

Министерство науки и высшего образования РФ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)»

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

Диссертация на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
В.В. Сиротюк

Омск – 2019

Содержание

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА, ОСОБЕННОСТИ ЗОЛОШЛАКОВ КАК ТЕХНОГЕННЫХ ГРУНТОВ	16
1.1 Вопросы образования, складирования и накопления золошлаковых смесей тепловых электростанций.....	16
1.2 Особенности химико-минералогического состава_золошлаковых смесей.....	19
1.3 Структурные особенности золошлаковых смесей.....	21
1.4 Расчётные параметры механических характеристик грунтов для проектирования насыпей земляного полотна и дорожных одежд.....	27
1.5 Состояние вопроса по исследованию золошлаковых смесей как техногенных грунтов для сооружения земляных сооружений	35
Выводы по первой главе.....	44
2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ МЕХАНИЗМА ФОРМИРОВАНИЯ НАПРЯЖЁННОГО СОСТОЯНИЯ В НАСЫПЯХ ИЗ ЗОЛОШЛАКОВЫХ СМЕСЕЙ.....	47
2.1 Представления о формировании напряжённого состояния_в грунтовых насыпях	47
2.2 Влияние структуры грунта на механизм формирования напряжений.....	56
2.3 Моделирование напряжённого состояния в грунтах и оценка возможности использования этих моделей для золошлаковых смесей.....	62
2.3.1 Измерение напряжений (давлений) по глубине массива из золошлаковой смеси.....	62
2.3.2 Оценка адекватности моделей напряжённого состояния в грунтовых массивах применительно к золошлаковой смеси	66
2.4 Особенности формирования напряжённого состояния в насыпи из золошлаковой смеси при воздействии динамической нагрузки	73
Выводы по второй главе.....	77

3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСЧЁТНЫХ ПАРАМЕТРОВ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗОЛОШЛАКОВЫХ СМЕСЕЙ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА	79
3.1 Методы определения расчётных параметров грунтов для проектирования земляного полотна автомобильных дорог	79
3.1.1 Прочностные характеристики.....	79
3.1.2 Деформационные характеристики	81
3.1.3 Методы испытаний для определения механических характеристик золошлаковых смесей	84
3.2 Исследование прочностных характеристик золошлаковых смесей в зависимости от плотности и влажности	85
3.3 Исследование деформационных характеристик золошлаковой смеси.....	89
3.4 Закономерности изменения механических характеристик золошлаковой смеси при изменении влажности и плотности.....	100
3.5 Оценка неоднородности золошлаковых смесей в отвалах и учёт этого при назначении расчётных значений механических параметров	103
3.5.1 Определение закономерностей изменения гранулометрического состава ЗШС по объёму золоотвала	104
3.5.2 Влияние гранулометрического состава золошлаковых смесей на механические параметры.....	106
3.6 Изменение прочностных параметров золошлаковых смесей при циклическом воздействии транспортных средств.....	112
Выводы по третьей главе	118
4 ОПЫТНО-ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ ПРОВЕРКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	121
4.1 Конструктивно-технологические решения для сооружения насыпей земляного полотна из золошлаковой смеси	121
4.2 Результаты строительства и обследования опытного участка насыпи.....	124
4.3 Результаты проектирования и строительства пилотных участков насыпей из золошлаковых смесей на транспортных развязках.....	136

Выводы по четвертой главе.....	145
5 ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ И ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПРЕДЛАГАЕМЫХ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ	146
5.1 Экологическая оценка применения золошлаковых смесей для строительства насыпей земляного полотна	146
5.1.1 Оценка традиционных и нормируемых показателей	147
5.1.2 Пригодность золошлаковой смеси для роста травы на откосных частях земляного полотна	151
5.1.3 Оценка пылеуноса золошлаковой смеси	157
5.2 Экономическая оценка применения золошлаковых смесей для строительства насыпей земляного полотна	160
Выводы по пятой главе.....	165
Заключение по диссертационной работе.....	167
Рекомендуемые направления дальнейших исследований.....	169
Список литературы	170
Приложение А – Коэффициенты для прогнозирования параметров механических характеристик золошлаковых смесей	180
Приложение Б – Конструкции поперечных профилей земляного полотна из ЗШС для дорог I-II технической категории.....	182
Приложение В – Конструкции поперечных профилей земляного полотна из ЗШС для дорог III-V технической категории.....	186
Приложение Г – Акт внедрения научно-исследовательских разработок.....	190
Приложение Д – Акт внедрения научно-исследовательских разработок	191
Приложение Е – Акт внедрения в учебный процесс результатов диссертационной работы	192

ВВЕДЕНИЕ

Основой для строительства автомобильных дорог с длительно сохраняющимися транспортно-эксплуатационными показателями в сложных природно-климатических и грунтово-геологических условиях России является высокое качество земляного полотна.

При этом всё чаще возникают проблемы, связанные с изысканием кондиционных природных грунтов для строительства насыпей земляного полотна. Особенно остро это ощущается при строительстве городских и пригородных дорог. Высокая стоимость земель и сложность отвода частных территорий под разработку карьеров приводит к необходимости использования под грунтовые карьеры неудобья и участки с переувлажненными некондиционными грунтами. При этом стоимость строительства увеличивается либо за счёт доставки грунтов из отдалённых резервов, либо из-за использования некондиционных грунтов.

В энергетической отрасли РФ давно зреет другая проблема. Не менее 65% тепловой и электрической энергии производится за счёт сжигания углей на тепловых электростанциях (ТЭС) [1]. Несмотря на попытки внедрения новых «зелёных» технологий количество сжигаемого твёрдого топлива на ТЭС стабильно увеличивается. Если в 2010 г. общая установленная мощность угольных ТЭС составляла 44,9 ГВт, то по прогнозу Интер РАО ЕЭС к 2030 г. она возрастет до 68,2 ГВт. При сжигании углей образуется от 10 до 50% золошлаковых отходов (ЗШО). Ежегодно ТЭС РФ отправляют в отвалы более 30 млн. т ЗШО. Таким образом, к 2030 г. в золоотвалах РФ будет складировано порядка 2 млрд т золошлаковых смесей (ЗШС). Только в трёх золоотвалах г. Омска складировано более 75 млн. т ЗШС [2].

Золоотвалы в мегаполисах занимают от 200 до 1000 га пригородных территорий (общая площадь золоотвалов в РФ превышает 30 тыс. га.), которые полностью извлекаются из хозяйственного оборота.

Каждый отвал является потенциальным источником опасности. Нередки аварии, происходящие на золоотвалах, в результате которых прорыв дамбы становится причиной гибели целой природной экосистемы и разрушения прилегающих зданий и сооружений как это было в декабре 2008 г. в Тенесси [3,4] и в Северной

Каролине в феврале 2014 г. [5]. Дамба высотой 20 м, ограждающая золоотвал ТЭЦ-4 в г. Омске, расположена в 50 м от р. Иртыш.

Сложившаяся ситуация требует принятия серьёзных мер по ликвидации скопления золошлаков, что, в конечном итоге, позволит освободить пригородные территории, снизить риск аварий на гидрозолоотвалах, улучшить экологическую обстановку в регионах.

Согласно многочисленным исследованиям, использование золошлаков возможно во многих отраслях промышленности. Это получение редкоземельных элементов [6], создание композитов с применением зол-уноса [7, 8], мелиорации почв, производство керамических изделий и кирпича, при катализе [9], получении драгоценных металлов и, конечно, в строительной индустрии [10-29].

Из перечисленных направлений применения ЗШС наиболее перспективным считается крупнотоннажная утилизация этого техногенного грунта при сооружении насыпей земляного полотна автомобильных дорог, планировочных насыпей, поскольку потребность в материале для таких объектов измеряется сотнями тысяч тонн.

В России (СССР) ЗШС из отвалов ТЭС применяли для возведения земляного полотна с 70-х годов прошлого века при строительстве подъездных дорог в районе городов Омск [12], Тверь, Воркута [30], при строительстве автомобильных дорог МКАД-Кашира [30], Москва-Серпухов, Алтай-Кузбасс и др. [31].

Подобная схема утилизации постепенно находит своё место и в практике дорожного строительства в РФ. В Подмосковье в январе 2016 г. была сдана в эксплуатацию транспортная развязка с насыпью земляного полотна высотой до 15 м, возведённой из ЗШС Каширской ГРЭС-4 (автор диссертации принимал участие в проектировании этого объекта) [32].

Еще один крупный объект дорожного строительства с насыпью из ЗШС, был построен (с нашим участием) в период с мая 2016 г. по январь 2018 г., в Люберецком районе Московской области. Строительство этой развязки велось в сложных грунтово-гидрологических условиях (один из съездов проходил по заболоченному участку, второй по свалке бытовых отходов), что делает его, по-своему, уникальным.

Иностраный опыт утилизации ЗШО в строительной области гораздо богаче российского. Объёмы использования ЗШО в развитых странах составляют от 50 до 100% их выхода и представлены детально в таблице ниже.

Таблица – **Объёмы производства и утилизации ЗШО в России и мире**

Страна или группа стран	Объём ЗШО в год, млн. т	Процент утилизации, %
Австралия	13,1	45,8
Канада	6,8	33,8
Китай	395,0	67,1
Европа (15 стран ЕС)	52,6	90,9
Индия	131,0	55,7
Япония	11,1	96,4
Ср. Восток и Африка	32,2	10,6
США	118,0	42,1
Другие страны Азии	16,7	66,5
Российская Федерация	26,6	8-10

Широко известен положительный опыт применения этих материалов в США, Франции, Германии, Японии, Польше, Индии [18-20,25,29,31].

Применение ЗШС в США началось в 70-х годах прошлого столетия. На сайте федеральной администрации дорог при департаменте транспорта США приведена информация, что в период с 1971 по 1993 гг. в 14 штатах был возведён, по меньшей мере, 21 объект с насыпями земляного полотна автомобильных или железных дорог из ЗШС, данные по которым приведены в таблице ниже [33].

Согласно отчётам Научно-исследовательского института электроэнергетики, на двух объектах (один в Делавэре и один в Пенсильвании) проводился авторский надзор в ходе строительства и последующий мониторинг в течение трёх лет. В ходе наблюдения отбирались образцы, и проводился анализ физических и механических свойств ЗШС. Были проведены исследования особенностей уплотнения и технологичности применения ЗШС, состава грунтовых вод и осадок в разных местах насыпей. За все три года наблюдений, не было отмечено чрезмерных осадок или загрязнения окружающей среды [34,35].

На сегодняшний день в США строится множество объектов из ЗШС. Так, к примеру, департамент транспорта штата Миссисипи рекомендует использовать для оснований автодорог ЗШС, производимую на ТЭЦ Ред Хилс, расположенную в городе Аккерман, Миссисипи. В Джорджии в пригороде городка Рим, был про-

строен ряд опытных участков для оценки инфильтрации тяжёлых металлов из ЗШС в подстилающую почву, результат этой оценки дал толчок к использованию этого материала в регионе.

Таблица – Сводная информация об объектах с насыпями из ЗШС

Штат	Годы строительства	Расположение объекта	Использованный объем, тыс. м ³
Аризона	1980	I-40, Джозеф Сити	47,60
Делавэр	1987	I-495, Уилмингтон	6,30
	1992	Трасса 1	237,00
Иллинойс	1972	Уокиган	190,00
Мэриленд	1993	Трасса 213, Истон	91,00
Массачусетс	1978	Нортон	3,80
Мичиган	1978	Железнодорожный мост, Монро	2,03
Миннесота	1971	Сент-Пол	38,00
	1978	Трасса 13, Иган	270,00
Миссури	1983	Северный Мост, Канзас-Сити	107,00
Огайо	1979	Трасса 7, Паутан Поинт	5,20
	1981	I-480, Айвон	27,00
	1983	Трасса. 35, Округ Галлия	24,00
Оклахома	1982	Трасса 62, Маскоги	450,00
Пенсильвания	1977	Калвер дорога, Питтсбург	57,00
	1988	I-279, Питтсбург	321,00
Виргиния	1978	Трасса 665, Carbo	270,00
Западная Виргиния	1971	Трасса 250, Фейрмонт	4,50
	1976	Трасса 60/12, Молден	15,30
Висконсин	1977	Аэропорт, Милуоки	109,00
	1978 – 90	Различные объекты	270,00

Во Франции в рамках проекта CAREX инициированного французским агентством по управлению энергетикой и окружающей средой были проанализированы свыше 17 автомобильных дорог разных классов, в которых золошлаки были применены в различных конструктивных слоях, и показали себя с положительной стороны [28].

Значительные объёмы ЗШС применяются в Индии. При строительстве второго моста имени *Nizamuddin* в Дели подходы были отсыпаны из ЗШС. Насыпи высотой от 6 до 9 м были полностью сформированы из этого техногенного грунта, что позволило утилизировать 150 тыс. м³ золошлаков [29]. При строительстве насыпи автомобильной дороги *Dankuni-Kalagat* было использовано 2,0 млн. м³ ЗШС, причём дальность возки оказалась свыше 100 км. Строи-

тельство дороги *Noida – Greater Noida Expressway* также потребовало около 2,1 млн. м³ ЗШС, а при строительстве объездной дороги города *Allahabad* использовалось около 6,7 млн. м³ [36,37].

В Индии часто используют этот материал при строительстве на подтопляемых участках. Низкий удельный вес, обеспечивает меньшее давление на слабое основание из переувлажнённых грунтов. Например, была проложена дорога по сезонно подтопляемой местности со слабыми основаниями между *Kalindi Colony* и *Kalindi Kunj* в Нью Дели [27]. Эту же особенность использовали при засыпке подпорных стенок на дороге *Okhla* и *Sarita Vihar* [38].

Столь интенсивное использование ЗШО за рубежом объясняется ещё и тем, что «экологические штрафы» за складирование ЗШО в отвалах значительно выше, чем в РФ: в Германии 120 евро/т, во Франции 60 евро/т, в Италии 90 евро/т (в России – примерно 0,3 евро/т).

Выше изложенное, а также многочисленные публикации [17-21, 31-37], подтверждают возможность строительства насыпей автомобильных дорог из ЗШС. Главным препятствием, сдерживающим полномасштабное применение ЗШС, является недостаточная изученность механических свойств этого техногенного грунта, знание которых необходимо 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» [39] и ряд региональных нормативов, как например СТО 82982783.001-2010 «Материалы золошлаковые омских ТЭЦ для дорожного строительства. Технические условия.» [40] требуют дополнений. Необходимо уточнить приведённые там значения прочностных и деформационных параметров. Коэффициент Пуассона ЗШС ранее не определялся. Мало данных о влиянии влажности, степени уплотнения и число циклов нагружения на механические свойства ЗШС. Не обобщены данные об изменении механических свойств ЗШС в течение срока службы грунтовых сооружений. Поэтому определение закономерностей изменения и достоверных значений расчётных параметров механических свойств является актуальной задачей изучения.

Диссертационная работа выполнена в соответствии с тематическим планом ФГБОУ ВО «СибАДИ». Исследования выполнялись по прямым договорам с производственными предприятиями (отчёт по НИР по договору 23-16 от 21.04.16, отчет по НИР по договору 37-16 от 12.12.2016). Исследования были поддержаны РФФИ на протяжении двух лет (грант № 16-48-550508 р_а).

Степень разработанности

Особенности применения ЗШС для сооружения земляного полотна автомобильных дорог исследовали в Союздорнии, Гипродорнии, СибАДИ, в научных центрах Белоруссии, Украины, Казахстана, Узбекистана.

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. Пантеев, 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 др.

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 г.), выполненную под руководством В.В. Сиротюка.

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 для прогнозирования напряжённого 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.

Исходя из цели, сформулированы **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.

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

Практическая значимость. 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.

Методология и методы исследования. Методологической основой для решения поставленных задач является системный подход при изучении физико-механических характеристик ЗШС. В процессе выполнения диссертационной работы использованы методы исследования, включающие: литературный и патентный поиск, анализ и обобщение, теоретические исследования и физические эксперименты, теорию планирования эксперимента, опытное строительство и обследование, технико-экономическую оценку результатов исследования; математическое моделирование и регрессионный анализ. Используются следующие программные комплексы: MATLAB (Curve Fitting), Geo5, Z-soil, Plaxis 2D, IndorCAD, Госстройсмета.

Достоверность 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.

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 прессы, 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.

Личный вклад 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 молодых» 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», 8-30 апреля 2016 г, Омск, ОмГУ;
- III Всероссийская студенческая научная конференция с международным участием «Студент: наука, профессия, жизнь», 25-29 апреля 2016 г, Омск, ОмГУПС;
- 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 специализированная выставка «Стройиндустрия Сибири», 18 апреля 2016 г., Омск, Экспоцентр;

– 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., Омск, СибАДИ;

– Работа презентована в финале федерального конкурса «Моя страна – моя Россия» 24-27 июня 2017 г., Москва;

– Международная научно-практическая конференция «Инновационные факторы развития транспорта. Теория и практика», 19-20 октября 2017 г., Новосибирск, СГУПС;

– Международная выставка «100 идей для СНГ», 11-13 апреля 2018 г., Минск, БГТУ;

– Результаты работы обсуждались на 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, индексированных 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, списка литературы и приложений. Результаты исследования изложены на 179 страницах основного текста, включающего 87 рисунков, 39 таблиц, список литературы включает 211 наименований.

1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА, ОСОБЕННОСТИ ЗОЛОШЛАКОВ КАК ТЕХНОГЕННЫХ ГРУНТОВ

1.1 Вопросы образования, складирования и накопления золошлаковых смесей тепловых электростанций

В процессе развития теплоэнергетики постоянно совершенствовались методы переработки твёрдого топлива. Для повышения КПД и снижения вредных выбросов схемы сжигания угля постоянно развивались, пройдя путь от простого кускового сжигания до современных топок с кольцевой схемой сгорания пылевидного топлива. Однако, несмотря на все применяемые меры по совершенствованию котлоагрегатов на ТЭС, они не позволяют избежать образования минеральных отходов сгорания углей, так называемых золошлаков.

Золошлаки – это продукты комплексного термического преобразования горных пород и сжигания твёрдого топлива. Свойства и состав золошлаков главным образом зависят от химического состава исходного угля, технологии сжигания и способа их удаления из камер сгорания [39,41].

На данный момент технологии выработки энергии на различных тепловых электростанциях России практически одинаковы и основаны на сжигании твёрдого топлива в пылевидном состоянии (так называемое факельное сжигание). Поступающий на станцию уголь разгружается и поступает на склад, откуда конвейером по мере необходимости подается в шаровую мельницу для измельчения (рисунок 1.1). В результате на выходе получается угольная пыль размером 0,07 – 0,05 мм, пригодная для дальнейшего сжигания.

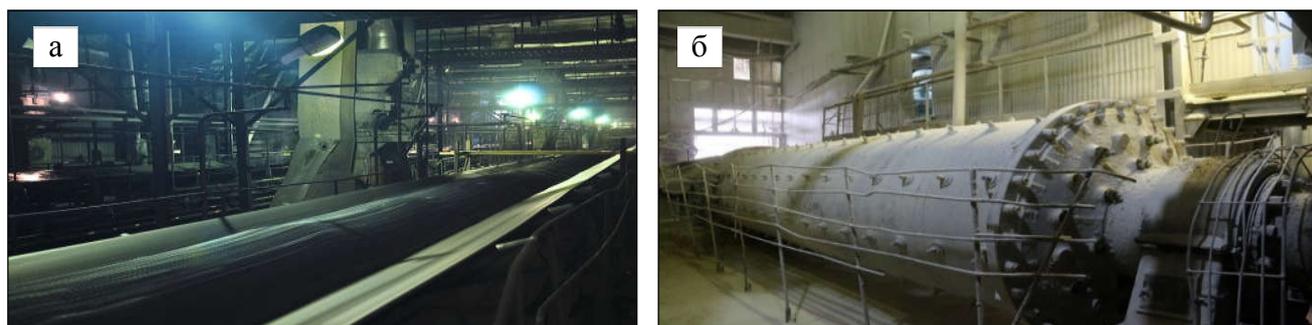


Рисунок 1.1 – Элементы системы измельчения: а – питающий конвейер, б – шаровая мельница

Размолотая пыль под действием горячего воздушного потока вдвигается в котлоагрегат, где сгорает с образованием золошлаковых отходов. За счёт высоких температур (1400 – 1600 °С) и постоянного движения воздушных потоков, поддерживающих горение, в котле происходит разделение продуктов сгорания (рисунок 1.2).

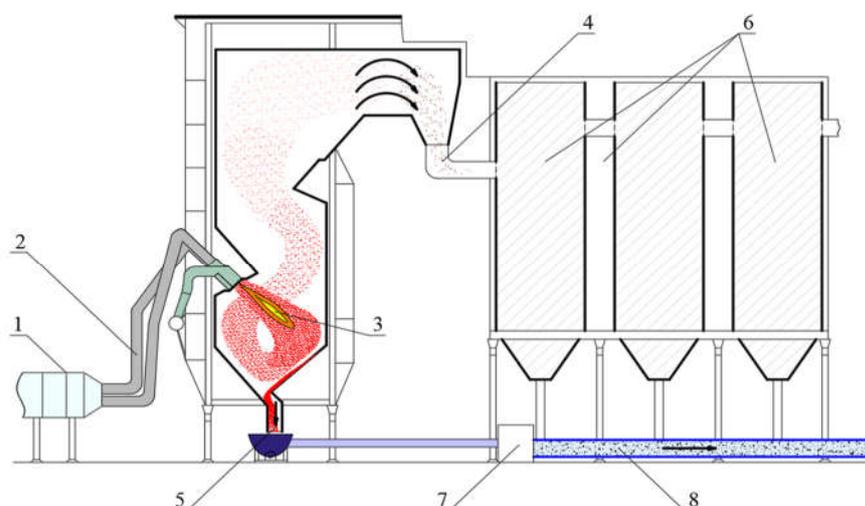


Рисунок 1.2 – схема котла с факельным сжиганием: 1 – шаровая мельница; 2 – система подачи топлива, 3 – факел сгорания, 4 – дымовые газы, насыщенные золой-уноса, 5 – топливный шлак, 6 – батарея циклонных фильтров, 7 – насосная станция, 8 – система гидрозолоудаления

Наиболее лёгкие и тонкодисперсные частицы, называемые зола-унос, поднимаются в верхнюю часть топки, откуда с дымовыми газами подаются в систему очистки воздуха. В ходе фильтрации, имеющей одну или более ступеней улавливания, зола-уноса осаждается в системе газоочистки. Далее она отправляется в багерную насосную станцию для дальнейшего гидрозолоудаления (мокрый отбор) или может быть отобрана в сухом виде и помещена в силос для дальнейшего сухого хранения (сухой отбор). Внешний вид золы уноса представлен на рисунке 1.3.

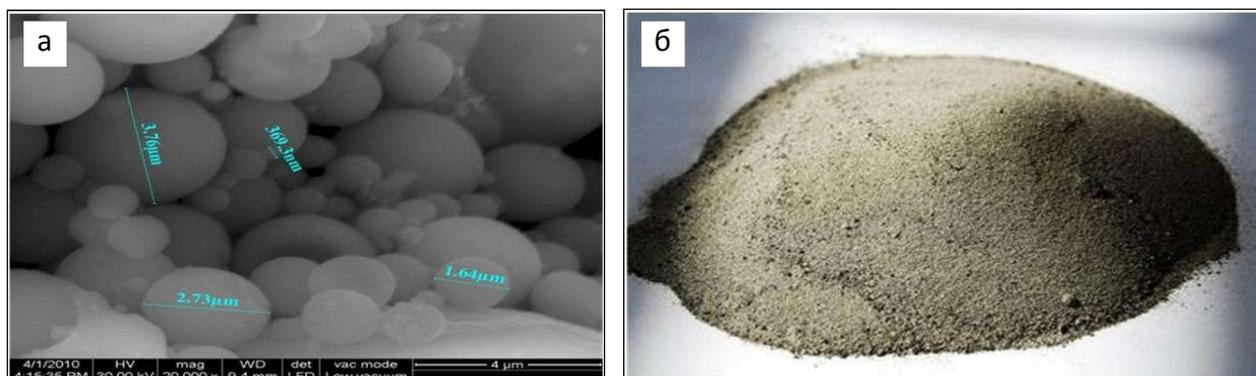


Рисунок 1.3 – Зола-уноса: а – частицы золы под микроскопом, б – образец золы с первой ступени фильтрации

В нижней части топки образуется более крупнодисперсный топливный шлак. Он агрегируется за счёт слипания перегретых частиц золы и образует гранулы пористой или плотной структуры. Удаление шлака происходит с нижней части котлоагрегата откуда он в перегретом состоянии стекает в ванну с холодной водой (жидкое шлакоудаление) или, остывая на охлаждаемых поверхностях донной части котла, подается в систему гидрозолоудаления (твёрдое шлакоудаление). Внешний вид топливного шлака представлен на рисунке 1.4.

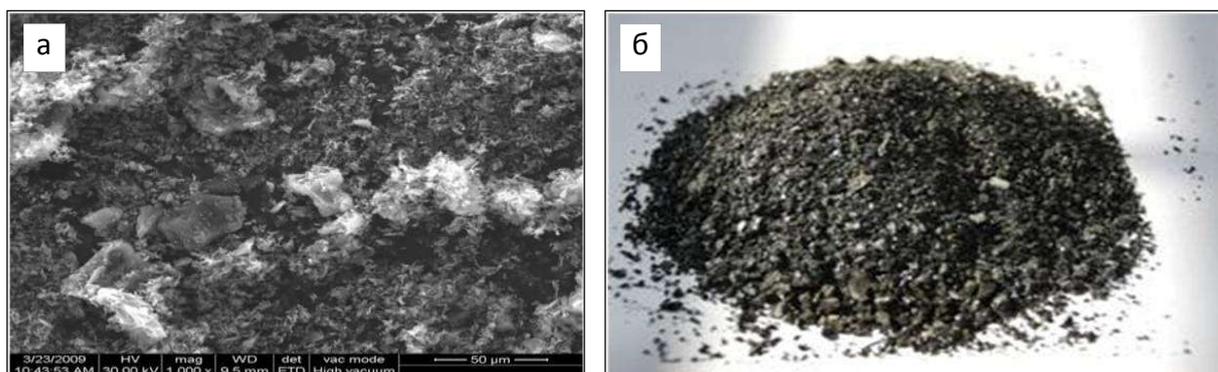


Рисунок 1.4 – Топливный шлак: а – частицы шлака под микроскопом, б – топливный шлак

Как правило, на российских ТЭС топливный шлак и зола-уноса удаляются со станции совместно по системе гидрозолоудаления. Смешиваясь в процессе движения по пульпопроводу, они образуют полидисперсную золошлаковую смесь (ЗШС). В составе смеси преобладают частицы золы-уноса и лишь в малых количествах топливный шлак, поэтому говоря о свойствах ЗШС можно с некоторыми допущениями говорить о параметрах золы. ЗШС осаждается на золоотвале, где впоследствии и хранится.

Место хранения золошлаковых отходов (ЗШО практически синоним ЗШС) – золоотвал – это ответственное гидротехническое сооружение, предназначенное для складирования золы и шлака, удалённых с тепловой электростанции. Как правило, он состоит из нескольких секций (ограниченных дамбами обвалования), пруда с осветлённой водой, системы дренажей для отвода лишней воды [41].

Отвалы служат для долговременного захоронения отходов, и, по мере поступления новых золошлаков, расширяются за счёт строительства новых секций или наращиваются за счёт увеличения высоты окружных дамб обвалования. На каждом золоотвале устраивают пруд, покрывающий поверхность массива и предотвращающий пыление на окружающие территории. Площади отвала исчисляются сотнями, а иногда и тысячами гектар, при высотах дамб до 15 – 20 метров.

1.2 Особенности химико-минералогического состава золошлаковых смесей

Свойства тех или иных ЗШС определяет их химический состав, который главным образом зависит от состава твёрдого топлива. Поскольку состав минеральной составляющей углей в месторождениях неоднороден, существуют некоторые колебания химического состава и свойств зол и шлаков ТЭС.

Химический состав большинства ЗШС ТЭС Российской Федерации соответствует кислым по классификации [39] (таблица 1.1), следовательно, не способным к самостоятельному твердению даже при тепловлажностной обработке.

Таблица 1.1 – Классификация золошлаков ТЭС

Вид	Разновидность	Содержание элементов, % по массе, в расчёте на оксиды			
		$CaO+MgO$	$SiO_2+Al_2O_3$	$F_2O_3+FeO+R_2O$	SO_3
I Высококальциевые	Высокосульфатные (I-A)	не менее 20	-	-	не менее 5
	Низкосульфатные (I-B)				менее 5
II Низкокальциевые	Кислые (II-A)	менее 20	не более 70	не менее 10	-
	Сверхкислые (II-B)		более 70	менее 10	

Из всех исследованных материалов, только золошлаки от сжигания бурого угля некоторых разрезов Канско-Ачинского месторождения содержит значительное количество оксида кальция, и могут проявлять вяжущие свойства.

В таблице 1.2 представлены данные химического анализа проб золошлаков ТЭС России и усреднённые данные по природным грунтам [42]. При оценке пригодности той или иной ЗШС, особое внимание необходимо уделять суммарному содержанию оксидов кальция и магния (CaO и MgO), а также количеству потерь при прокаливании (п.п.п).

В качестве грунта земляного полотна автомобильных дорог предпочтительно использовать ЗШС относящиеся к кислым или сверхкислым по классификации [39]. Величина п.п.п. должна соответствовать низкому или среднему содержанию горючих веществ (по классификации [39]), поскольку содержание органики может влиять на изменения свойств ЗШС во времени.

Таблица 1.2 – Химический состав золошлаков (данные РАО «ЕАС России») и грунтов

Вид материала/ сжигаемого угля	Химический состав, в % по массе								
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	п.п.п.
Экибастузский	57,0-65,0	22,0-30,0	2,0-13,0	0,3-2,0	0,1-1,2	0,3-1,4	0,1-0,6	0,1-2	0,3-5,0
Кузнецкий	50,0-64,0	18,0-30,0	4,0-15,0	2,0-10,0	0,5-2,5	1,3-2,4	0,5-1,3	0,3-2,2	3,0-22,0
Донецкий АШ	35,0-55,0	12,0-28,0	9,0-18,0	1,0-5,0	0,2-3,0	2,5-5,0	0,6-2,0	0,2-0,04	8,0-22,0
Бородинский	40,0-55,0	4,0-10,0	6,0-14,0	20,0-35,0	3,0-6,0	0,3-1,5	0,2-0,5	0,9-5,0	2,0
Березовский	13,0-45,0	6,0-15,0	5,0-12,0	34,0-60,0	5,0-10,0	0,2-1,0	0,1-1,1	1,0-18,0	1,0-12,0
Нерюнгринский	50,0-55,0	20,0-30,0	6,0-18,0	2,0-6,0	1,0-3,5	0,2-0,7	0,2-0,6	0,5-1,2	9,0-20,0
Подмосковный	46,0-55,0	22,0-39,0	5,0-17,0	2,0-5,0	0,2-2,4	0,2-1,0	0,1-0,7	0,2-1,6	0,2-1,3
Челябинский	49,0-60,0	21,0-27,0	6,0-20,0	2,0-4,0	1,5-3,5	0,7-2,5	0,7-1,1	0,3-1,2	3,5
Интинский	56,0-64,0	18,0-19,0	11,0-13,0	4,7-7,5	1,6-2,7	1,1-1,5	0,9-1,4	0,7-2,4	4,3-7,6
Кварцевые пески	89,0-98,0	0,7-5,1	0,4-1,2	0,3-1,5	0,0-1,5	-	-	0,0-0,3	0,4-1,4
Глины	46,0-70,0	15,0-39,0	0,1-6,3	0-5,4	0,0-3,1	0,1-3,0	0,0-3,0	0,0-0,4	7,9-13,8
Супеси	79,0-95,0	4,4-9,0	0,2-5,7	0,0-4,0	0,0-2,0	0,1-0,9	0,0-2,0	0,0-0,2	0,6-4,0
<u>Суглинки</u>	64,0-78,0	11,0-14,0	0,7-7,4	1,5-4,9	0,8-2,4	1,7-3,4	1,1-2,0	-	4,6-7,7
Примечание п.п.п. – потеря массы при прокаливании (содержание горючих веществ)									

Фазово-минералогический состав ЗШС включает неорганическую и органическую составляющие. Как следует из исследований *Иванова Е.В.* [41], неорганическая фаза ЗШС сложена кристаллической составляющей и аморфизированным веществом. Причем аморфная фаза включает аморфизированное глинистое вещество и зольное стекло с ферроалюмосиликатным составом.

Кристаллическую составляющую складывают первичные минералы в виде частично оплавленных зёрен кварца или полевого шпата, а также минералы новообразованные в процессе сжигания – муллит, гематит, магнетит, корунд и пр.

ЗШС имеют в составе и органическую часть, представленную углистыми остатками. Большинство минеральной составляющей («пустой породы») топливных углей представлены породообразующими компонентами, имеющими монтмориллонитовый, каолинитовый и гидрослюдистый характер. В глинистом веществе Экибастузского угля преобладает каолинитовый состав, а Кузнецкого – гидрослюдистый и монтмориллонитовый. Минеральная составляющая углей Канско-Ачинского бассейна содержит значительное количество известняка. Это различие обуславливает разницу в фазовом составе золошлаков (таблица 1.3).

В процессе сгорания топлива глинистое вещество подвергается кратковременному нагреву (температура в ядре факела достигает 1400 – 1600 °С), вследствие чего это вещество дегидратирует и остекловывается.

Таблица 1.3 – Фазовый состав зол-уноса

Угольные бассейны	Содержание веществ и минералов, % по массе			
	аморфизированное глинистое вещество	стекло различных оттенков	оплавленный кварц, муллит	углистое вещество
Экибастузский	40-60	15-35	5-10	2-10
Кузнецкий	10-30	50-75	5-15	4-12
Канско-Ачинский	1-10	70-85	4-12	1-12

Примечание. В таблице указаны диапазоны изменения содержания веществ и минералов

Стекло в золах может быть силикатного, алюмосиликатного и железисто-алюмосиликатного состава. Аморфизированные глинистые вещества - метакаолинит и слабоспекшееся аморфизированное глинистое вещество, а также спекшиеся и частично остеклованные частицы определяют химическую активность золы, форму и характер поверхности зольных частиц.

Шлаки по сравнению с золами содержат меньше органических остатков и аморфизированного глинистого вещества, но больше стеклофазы (до 95%). Обусловлено это тем, что шлаки большее время находятся в высокотемпературной зоне топки (особенно это относится к котлам с жидким шлакоудалением). Кристаллическая фаза в них представлена кварцем, муллитом, магнетитом и т.д.

Следует особо отметить, что в процессе хранения ЗШС в золоотвале растворимые вещества практически полностью вымываются из его состава. Результатом такого преобразования является не агрессивность к строительным конструкциям на основе цементов, битума и т.п. Однако, согласно СТО 82982783.002-2011 [43] по влиянию на металлоконструкции ЗШС среднеагрессивны.

Анализ фазово-минералогического и химического составов свидетельствует, что ЗШС представлены устойчивыми соединениями и минералами, не подверженными различным видам распада под воздействием погодно-климатических факторов и механических воздействий [43].

1.3 Структурные особенности золошлаковых смесей

ЗШС состоят из комбинации зол-уноса и топливного шлака, которые имеют принципиальные различия в своей структуре.

Частицы зол-уноса в основной массе имеют сферическую или близкую к ней форму в сочетании с гладкой остеклованной поверхностью. Однако золы не всегда сложены однородными частицами. Часть их состоит целиком из стекла, некоторые имеют в средней части включения минералов или коксовых зёрен. Встречаются и полые стеклянные шарики (так называемая микросфера), образованные в результате попадания пузырьков воздуха в расплав перед застыванием. Размер частиц варьируется в пределах от 3 до 150 мкм [41] (рисунок 1.5).

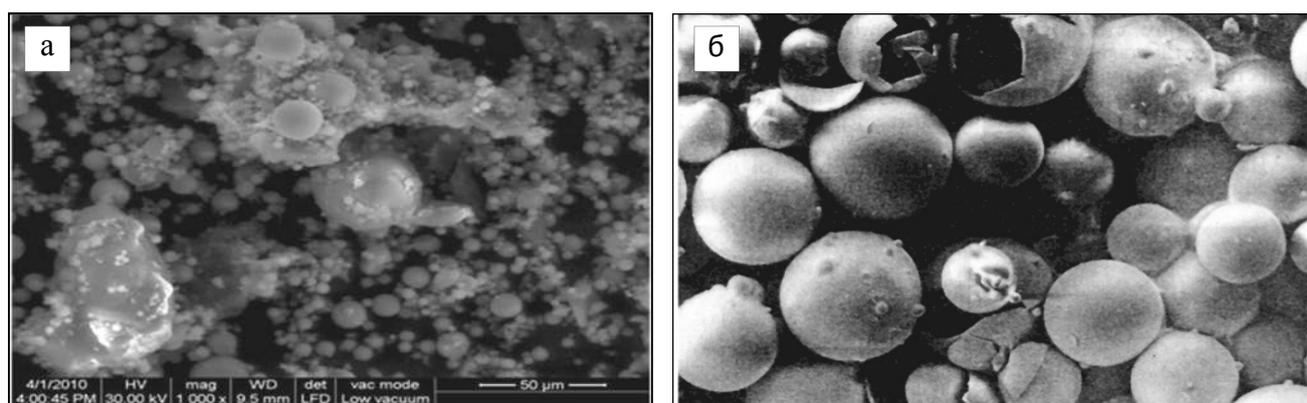


Рисунок 1.5 – Внешний вид золы-уноса под микроскопом: а – зала-уноса; б – зольные микросферы

В процессе сгорания могут образовываться стекловидные частицы шлака и зол неправильной или губчатой формы, а также с ядром из кристаллических веществ. Крупные фракции ЗШС содержат агрегаты, полученные путём слипания множества отдельных зёрен (как правило, такие структуры неоднородны и имеют невысокую прочность) или путём агрегации расплава в нижней части котлов. Шлаковые частицы могут быть двух разных видов: шлак, полученный в системе жидкого шлакоудаления; шлак, получаемый в системе с твёрдым шлакоудалением (рисунок 1.6).

Первая разновидность, как правило, имеет губчатую форму, образованную, во-первых, диффузией кислорода в процессе горения, как к поверхности частицы, так и внутри частицы после образования на её поверхности зольной оболочки. Во-вторых, из-за наличия в угольном топливе минеральных остатков и органических включений в процессе их дегидратации и диссоциации образуется газообразная фаза. За счёт её роста происходит вспучивание зольной частицы, находящейся в пиропластическом состоянии и образуются закрытые и открытые поры. Пористые частицы такого шлака характеризуются высоким водопоглощением.

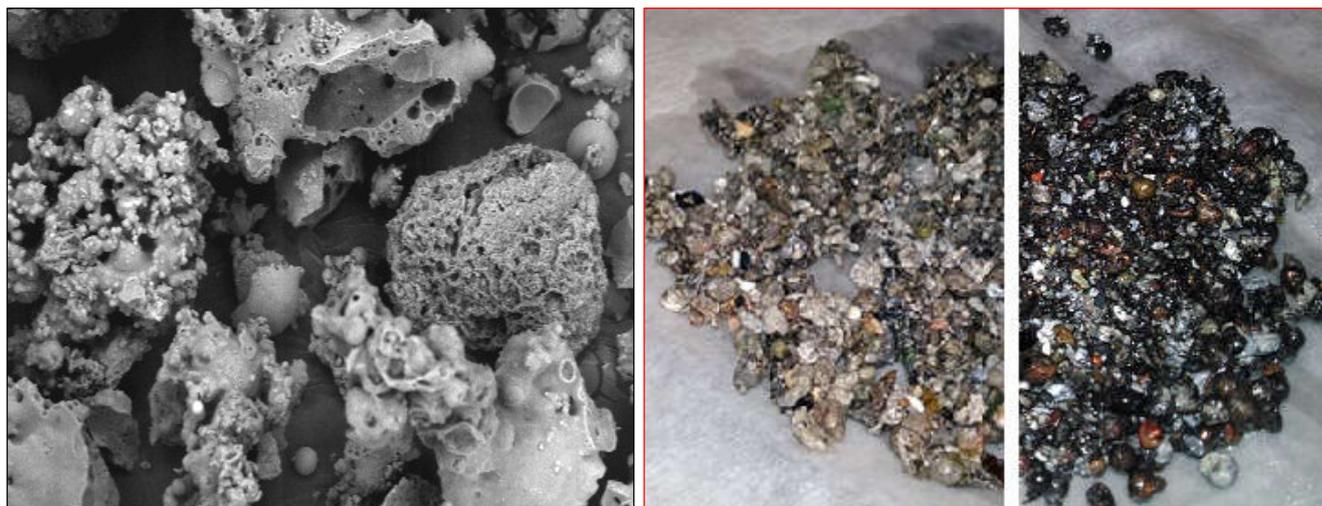


Рисунок 1.6 – Внешний вид топливного шлака: а – пористые частицы сплавленных агрегатов; б – пористый шлак; в – плотный шлак

Шлаковые частицы из системы жидкого шлакоудаления агрегируют в зерна более правильной формы без большого количества пор и имеют гладкую поверхность. За счёт этого материал менее подвержен водопоглощению, имеет более высокую прочность на сжатие и обычно образует более крупные частицы шлака.

Подобная форма частиц существенно влияет на физико-механические характеристик ЗШС. По сравнению с низкопрочными частицами пористого шлака, использование плотного шлака вызывает пониженные осадки в условиях первичного нагружения, хотя отсутствие большого числа открытых пор не обеспечивает структурное сцепления в материале.

В уплотненной ЗШС, содержащей пористый шлак и большое число сплавленных агрегатов, наблюдается наличие структурного сцепления между частицами и агрегатами. Это не отмечается в природных глинистых грунтах и ЗШС с плотным шлаком. Сцепления в образцах материала сохранение даже при полном водонасыщении.

За счёт большого количества структурных зацеплений и высокой связности в уплотненном состоянии такая ЗШС менее подвержена боковому расширению. Это приводит к концентрации вертикальных напряжений в таком массиве, что ранее не отмечалось в других исследованиях.

Такое поведение для ЗШС с плотным шлаком не характерно, поскольку его частицы имеют форму близкую к гравелистому песку, не обладающему связностью. Наличие большого числа крупных и гладких агрегатов должно создавать

структуру с пустотами между крупными частицами, в которых передача давления на мелкие частицы практически отсутствует. В таком случае механизм распределения напряжений будет схож с прочими зернистыми средами, хотя и будет иметь особенности, связанные с отличием техногенного грунта от природного.

Высокое число пор в шлаковых и зольных частицах обуславливает повышенную водоудерживающую способность, что позволяет ЗШС поглотить большее количество влаги, не теряя несущую способность. Эта причина предопределяет и повышенное значение оптимальной влажности в этом техногенном грунте.

Высокая микро- и макропористость влияет на особенности теплопереноса в ЗШС. За счёт мелких изолированных пор ЗШС смеси могут выступать как теплоизолятор, теплопроводность которого значительно ниже, чем у природного грунта. Эти особенности в существенной степени влияют на криогенные процессы в слое ЗШС, что должно обеспечивать с одной стороны меньшую глубину промерзания, а с другой, меньшую деформацию морозного пучения земляного полотна отсыпанного из этого техногенного грунта. Данные о теплопроводности ЗШС, полученные *Е.В. Ивановым*, приведены на рисунке 1.7 [41].

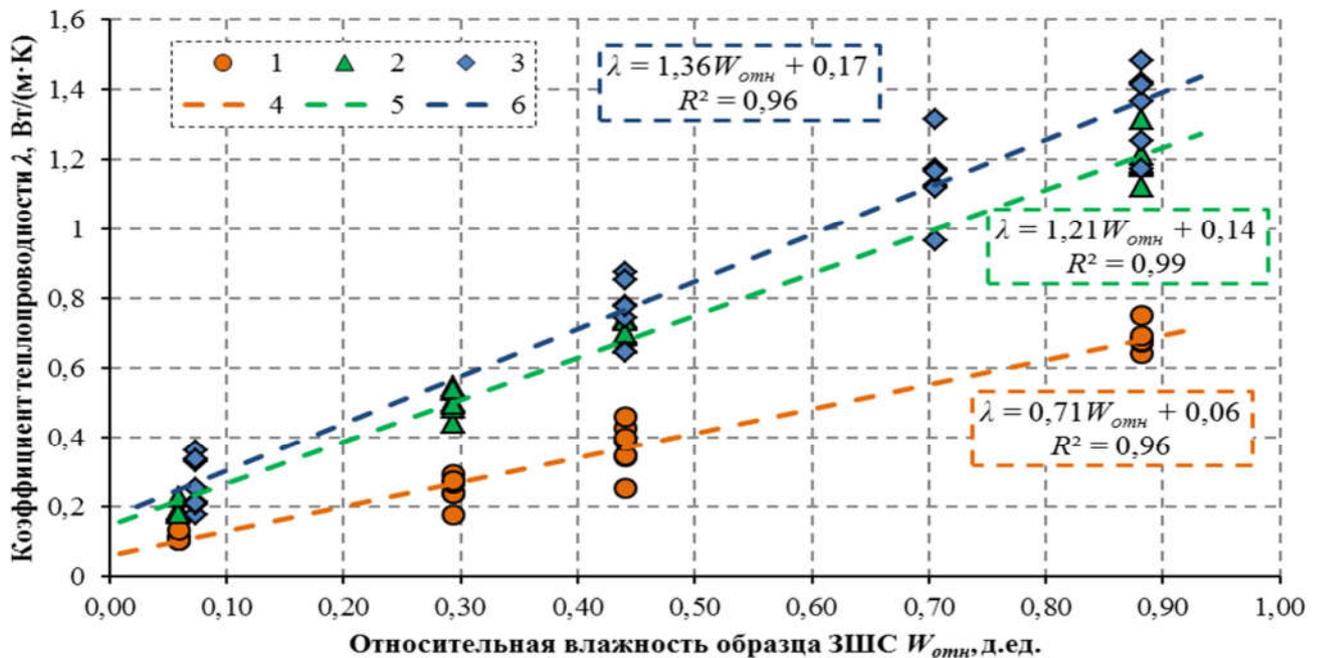


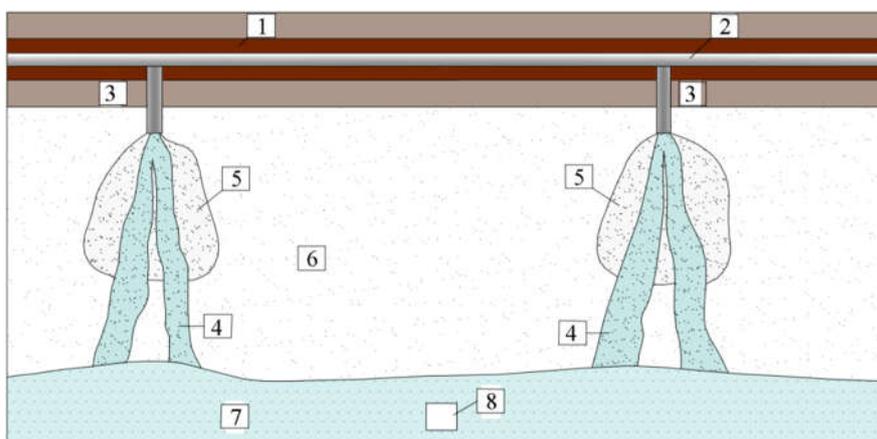
Рисунок 1.7 – Зависимость коэффициента теплопроводности от относительной влажности ЗШС из отвала ТЭЦ-5 г. Омска: 1 – при насыпной плотности ЗШС в талом состоянии; 2 – при $K_{пл}=1$ ЗШС в талом состоянии; 3 – при $K_{пл}=1$ ЗШС в мёрзлом состоянии; 4-6 – эмпирические зависимости при соответствующей плотности и состоянии ЗШС

Существенное влияние на механические характеристики ЗШС имеет зерновой или гранулометрический состав этого техногенного грунта. Зерновой состав ЗШС зависит от множества факторов: конструкции топок котлоагрегатов и режимов их эксплуатации, системы пылеприготовления и подачи топлива, конструкции и режима работы золоулавливающих систем, системы приготовления и дальности транспортировки пульпы, типа золоотвала и системы гидронамыва, от места отбора пробы (по площади и глубине) относительно выпуска пульпы, относительно руслового потока и отстойного пруда.

Принятая технология удаления способствует образованию в зоне растекания на надводном откосе отдельных русловых потоков, что приводит к неоднородности характеристик ЗШС по длине фронта намыва и по глубине массива (рисунок 1.8).

Твёрдая фаза золошлаковой пульпы осаждается на надводном откосе намыва и в отстойном пруду. Осветлённая вода из пруда попадает в водосборные колодцы и возвращается для повторного использования. Такая технология намыва приводит к образованию в зоне растекания на надводном откосе отдельных русловых потоков, что предопределяет неоднородность характеристик ЗШС по длине фронта намыва и по глубине массива.

Рисунок 1.8 – Схема золоотвала: 1 – дамба; 2 – пульпопровод; 3 – выпуски пульпы; 4 – русловые потоки; 5 – золошлаковая зона; 6 – зольная зона надводного намыва; 7 – осветительный пруд и зольная зона подводного намыва; 8 – водосборный колодец.



Это подтверждается исследованиями *Е.И. Иванова*, проведёнными на золоотвалах ТЭС городов Иркутска, Омска, Кемерово, Белово, Томска и автора данной работы (золоотвалы ТЭС Новосибирска, Москвы и Омска) [41].

Результаты исследований показали, что зерновой состав ЗШС, получаемыми в котлах с твёрдым шлакоудалением, схож с песками пылеватыми. ЗШС из котлоагре-

готов с жидким шлакоудалением больше изменяет зерновой состав по длине намыва. В золоотвалах с этими ЗШС встречаются зоны намыва с гранулометрией, схожей со щебнем, гравием, а также крупным, средним и мелким песком. По степени неоднородности гранулометрического состава ЗШС относятся к неоднородным дисперсным грунтам.

Нами установлено [44], что зерновой состав ЗШС, сформировавшийся в отвалах, существенно изменяется в ходе уплотнения слоя (как ручной трамбовкой, так и механическими средствами). Энергия уплотнения расходуется не только на перемещение частиц, но в местах контакта агрегатов происходит концентрация напряжений, вызывающая сминание и разрушение частиц.

Это явление характерно для уплотнения ЗШС с пористыми шлаковыми частицами [45]. При исследованиях ЗШС с плотным шлаком таких изменений не отмечалось, что говорит о низкой прочности пористых шлаковых частиц.

Известно, что глинистые грунты имеют большое капиллярное поднятие (до 6 м), что имеет существенное значение для назначения конструктивных решений при проектировании дорожных конструкций, толщины слоёв при вертикальной планировке территорий и т.п. Установлено [41], что с повышением дисперсности ЗШС высота капиллярного поднятия влаги в слое может достигать 1,2 м (рисунок 1.9).

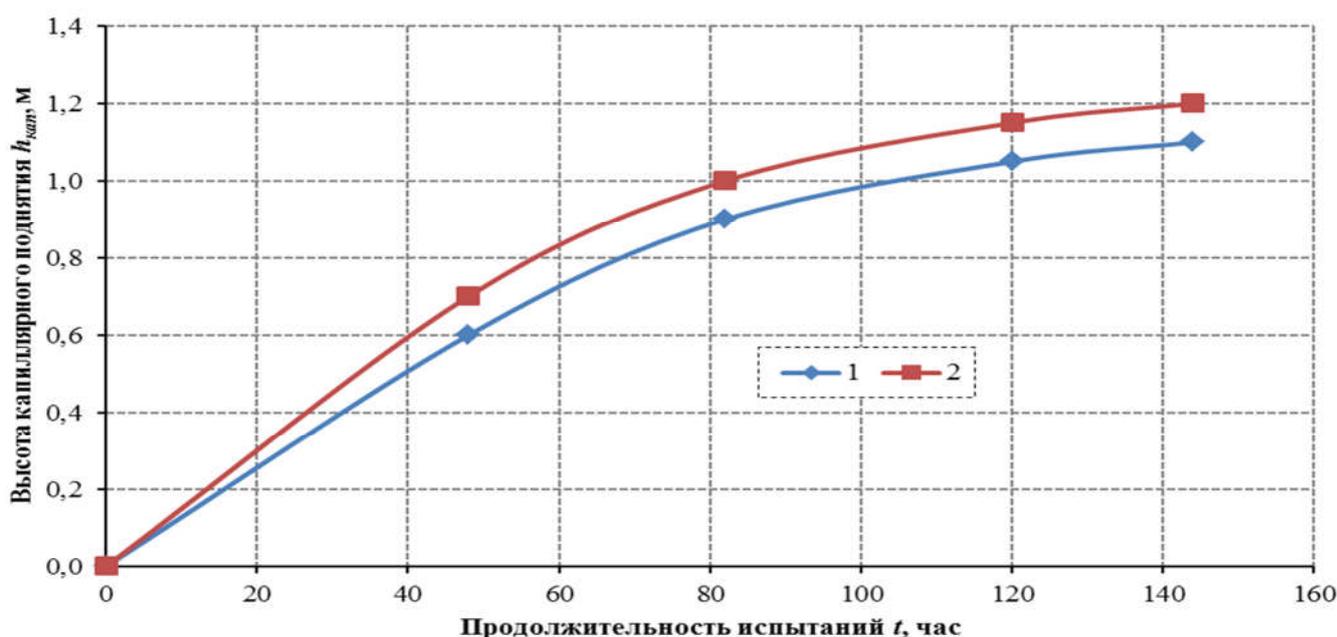


Рисунок 1.9 – Кинетика процесса капиллярного поднятия воды в ЗШС:
1 – ЗШС из отвала Барабинской ГРЭС; 2 – ЗШС из отвала ТЭЦ-5 г. Омска

При определении высоты капиллярного поднятия установлено, что на границе уреза воды влажность ЗШС практически достигает значений полной влагоёмкости. С увеличением расстояния от уреза воды влажность ЗШС уменьшается до значения максимальной молекулярной влагоёмкости в точке, где визуально заканчивается поднятие границы увлажнения.

Проведены дополнительные эксперименты по исследованию капиллярного поднятия воды на границе суглинистого грунта и ЗШС, что важно для прогнозирования процесса увлажнения насыпи из ЗШС, отсыпанной на грунтовое основание. Эксперимент показал, что, несмотря на длительное увлажнение, лишь малая часть влаги поднялась из слоя суглинка, находящегося на границе текучести, в слой ЗШС.

Определение пригодности грунтов для земляного полотна предполагает определение показателей набухаемости и усадочности ЗШС. Для проверки этих показателей были отобраны пробы ЗШС из золоотвалов городов Омска, Новосибирска и Москвы.

Величина относительного свободного набухания исследуемых проб составила в среднем 0,001 (максимум – 0,004). Следовательно, ЗШС относятся к ненабухающим грунтам по ГОСТ 25100-2011 [46]. Это объясняется тем, что в результате термообработки в ЗШС отсутствуют глинистые частицы, на поверхности которых происходит адсорбция воды, которая вызывает образование гидратных оболочек, раздвигающих предварительно уплотненные агрегаты (набухание).

Испытания по определению усадки также дали положительные результаты, что свидетельствует о наличии только контактного взаимодействия частиц и отсутствие или слабость водно-коллоидных связей.

1.4 Расчётные параметры механических характеристик грунтов для проектирования насыпей земляного полотна и дорожных одежд

Действующие нормативные документы по проектированию дорог относят ЗШС к особым разновидностям грунтов. Поэтому применение этих техногенных грунтов должно обосновываться в каждом конкретном случае. Следовательно,

при проектировании земляного полотна автомобильной дороги в каждом конкретном случае необходимо оценивать:

1. Устойчивость откосных частей насыпи к обрушению;
2. Возможность возведения жёстких и нежёстких дорожных одежд на основании из этого техногенного грунта;

Поэтому для решения этих задач, требуется определить значения расчетных параметров прочностных и деформационных характеристик для конкретных условий строительства.

В данной диссертационной работе в основном рассмотрены вопросы, касающиеся механического аспекта решения этих задач. Поскольку особенности водно-теплого режима этих грунтов были решены другим автором [41].

Оценка устойчивости земляного полотна. Потеря общей устойчивости откосов насыпей и выемок является одним из наиболее распространенных видов деформаций земляного полотна автомобильных дорог.

Оценка устойчивости склонов и откосов обычно решается в рамках условия прочности Кулона-Мора, рассматривающей условия равновесия массива грунта на участке сооружения длиной один метр, с вертикальными гранями, без учёта сил, действующих по боковым граням (плоская задача).

В области расчёта устойчивости откосов грунтовых сооружений существует множество методов, пригодных для оценки устойчивости откосов насыпей из ЗШС среди которых, согласно ОДМ 218.2.006-2010 [47]:

- а) метод предельного равновесия;
- б) метод конечных элементов;
- в) комбинированный метод;
- г) метод пространственных колонок.

Метод предельного равновесия: наиболее распространенная разновидность методов оценки устойчивости грунтовых склонов. В строительной практике имеется существенное количество вариаций, таких как метод: *Бишопа, Шахунянца, Маслова-Берера, Терцаги-Крея, Свена Гульдена, Сарма, Янбу, Спенсера, Morgenштерна-Прайса*, и т.д. [48-50].

В России чаще используют в расчётах так называемый метод моментов. Суть метода заключается в определении коэффициента устойчивости, равного отношению сдвигающих и удерживающих моментов относительно центра круглоцилиндрической поверхности скольжения. Хотя наряду с методом моментов используют и метод равновесия сил, который сводится к определению коэффициента устойчивости через баланс проекций сил, возникающих в отсеках насыпи. Формулы для определения коэффициентов устойчивости для обоих методов приведены в таблице 1.4.

Таблица 1.4 – Формулы для определения коэффициента устойчивости

Название метода оценки	Формула для расчёта коэффициента устойчивости
1	2
Метод предельного равновесия	
Коэффициент устойчивости из условия равновесия сил	$K_f = \frac{\sum_{i=1}^n [c_i l_i + (N_i - u_i l_i) \operatorname{tg} \varphi_i] \cos \alpha_i}{\sum_{i=1}^n N_i \sin \alpha_i + \mu_h \sum_{i=1}^n W_i + \sum_{i=1}^n D_i \sin \beta_i}$
	<p>где: i – номер рассматриваемого отсека; n – общее число отсеков; α – угол наклона основания к отсеку к горизонту, град; l – длина основания отсека; c – удельное сцепление в грунте основания отсека, кПа; φ – угол внутреннего трения в грунте основания отсека, град; W – вес грунта в отсеке, кН; N – нормальная реакция в основании отсека, кПа; D – результирующая сила внешней нагрузки, кН; u – величина порового давления, кПа; μ – коэффициент сейсмичности; β – угол наклона результирующей внешней нагрузки D, град.</p>
Коэффициент устойчивости из условия равновесия моментов сил	$K_f = \frac{\sum_{i=1}^n [c_i l_i + (N_i - u_i l_i) \operatorname{tg} \varphi_i] R_i}{\sum_{i=1}^n N_i f_i + \sum_{i=1}^n W_i x_i + \mu_v \sum_{i=1}^n W_i x_i + \mu_h \sum_{i=1}^n W_i e_i + \sum_{i=1}^n D_i d_i}$
	<p>где: f – плечо силы нормальной нагрузки N, м; R – плечо силы сопротивления грунта сдвигу, м; x – плечо силы тяжести отсека W, м; e – плечо горизонтальной составляющей сейсмической нагрузки, м; d – плечо результирующей внешней нагрузки D, м.</p>
Метод конечных элементов (МКЭ)	
Коэффициент устойчивости согласно теории Кулона-Мора	$K_f = \frac{\sigma_n \operatorname{tg} \varphi' + c'}{\sigma_n \operatorname{tg} \varphi_r + c_r}$
	<p>где: c' и φ' – исходные параметры; σ_n – фактическое нормальное напряжение; c_r, φ_r – параметры прочности, сниженные в ходе расчёта до минимальных значений, достаточных для поддержания равновесия.</p>

Комбинированный метод оценки устойчивости склонов	
1	2
Коэффициент устойчивости	$K_f = \frac{\sum_{i=1}^n [(\sigma_n - u) \operatorname{tg} \varphi + c] l_i}{\sum_{i=1}^n \left(\tau_{xy} \cos 2\Theta - \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \sin 2\Theta \right) l_i}$ <p>где σ_n – нормальное напряжение, возникающее в середине основания отсека и генерируемое с использованием метода конечных элементов; τ_{xy} – касательное напряжение в плоскости XOY в центре основания отсека, кПа; θ – угол между положительным направлением оси X и направлением приложения нормального напряжения; σ_x – полное напряжение в направлении оси X в середине основания отсека, кПа; σ_y – полное напряжение в направлении оси Y в середине основания отсека, кПа.</p>
Метод пространственных колонок	
Коэффициент устойчивости из условия равновесия моментов относительно оси вращения	$K_f = \frac{\sum_{i=1}^n [A_i c_i - (N_i - u) \operatorname{tg} \varphi_i] \cdot (\cos \alpha_x d_y + \sin \alpha_x d_x)}{\sum_{i=1}^n (N_i \cos \Theta_x d_y - N_i \cos \Theta_y d_x + W_i d_x + \mu W_i d_e)}$ $N = \frac{W_i - (X_L + X_R) - (V_L - V_R)}{\cos \Theta_y + \frac{\operatorname{tg} \varphi_i \sin \alpha_x}{K}} - \frac{\frac{A_i c_i \sin \alpha_x}{K} + \frac{u \operatorname{tg} \varphi_i \sin \alpha_x}{K}}{\cos \Theta_y + \frac{\operatorname{tg} \varphi_i \sin \alpha_x}{K}}$ <p>где: d_x – плечо проекций сил на ось x; d_y – плечо проекций сил на ось y; θ_x – угол между горизонталью в направлении перемещения и нормальной силой в основании колонки; θ_y – угол между горизонталью в направлении, перпендикулярном перемещению, и нормальной силой в основании колонки; A – площадь основания колонки; X_L – межколонковые касательные усилия на левой (со стороны низа откоса) грани колонки; X_R – межколонковые касательные усилия на правой (со стороны верха откоса) грани колонки; V_L – межколонковые касательные усилия на левой боковой грани; V_R – межколонковые касательные усилия на правой боковой грани; α_x – угол между горизонтом и касательной силой в основании отсека, в направлении перемещения.</p>

Метод конечных элементов (МКЭ). Помимо представленных методов предельного равновесия все больше набирают популярность методы численного моделирования (МКЭ), реализованные во многих программных комплексах (*Plaxis, GEO5, Phase2, FLAC, Z-Soil, Ansys, GGU Stability; GeoStab; GeoStudio; SlopeStability; Slide; DCGeotex; MRE; MacStars 2000, GenID32* и т.д.). МКЭ рассматривает напряжённо-деформированное состояние грунтового массива с учё-

том упругого и упругопластического поведения грунтов (описываемого в рамках моделей *Кулона-Мора*, *Друкера-Прагера*, *Hardening Soil*, *Cam-Clay*, *Soft-soil* и т.д.) и наличия сооружений и конструкций в массиве горных пород [51-53].

Использование метода конечных элементов связано с тем, что стандартные методики не учитывают напряжённо-деформированное состояние насыпи и её основания, а также неконсолидированное состояние основания, которое возникает в результате возведения насыпи и наличия прилегающих объектов и конструкций [54,55].

Оценка устойчивости ведётся на основе коэффициента устойчивости. Для данного метода он определяется с использованием метода снижения прочности (*SMR – shear reduction method*). Расчёт ведётся при помощи одновременного понижения обоих показателей сдвиговой прочности путём деления на теоретический коэффициент устойчивости [56]. За счёт применения итерационного подхода достигается высокая точность определения коэффициента устойчивости. Формула для определения коэффициента устойчивости приведена в таблице 1.4 [57, 58].

Существенным преимуществом метода снижения прочности по сравнению с методами предельного равновесия является то, что поверхность скольжения и коэффициент устойчивости определяются в процессе расчёта одновременно.

Комбинированный метод оценки устойчивости склонов основан на совместном использовании, как методов конечных элементов, так и теории предельного равновесия. Этот расчёт требует разбиения тела насыпи (склона) на отдельные отсеки и оценку напряжённо-деформированного состояния внутри каждого из них, с последующим определением отношения сдвиговой прочности к усилиям, возникающим в отсеке. Формула для определения коэффициента устойчивости приведена в таблице 1.4.

Метод пространственных колонок. Этот метод заключается в определении устойчивости склонов на основе методов предельного равновесия с определением объёмного коэффициента устойчивости. То есть главным различием служит то, что в этом методе идёт решение не плоской задачи, а объёмной. Это с одной стороны усложняет решение, а с другой повышает возможную сферу применения метода. Коэффициент устойчивости из условия равновесия моментов относительно оси вращения приведён в таблице 1.4.

Оценка устойчивости и прогноз осадки насыпи на слабом основании

В связи с пониженным удельным весом ЗШС, его целесообразно использовать при замене грунта насыпи на слабом основании [27, 38]. При проектировании насыпей земляного полотна автомобильной дороги на слабом основании выполняется прогноз устойчивости и осадки слабого грунта в основании насыпи.

Для выполнения этих расчетов, проводится оценка напряженно-деформированного состояния грунтов в основании насыпи. При этом учитываются напряжения в основании, возникающие за счет нагрузки от собственного веса насыпи (статические нагрузки) и от подвижного состава (динамические нагрузки).

Для определения напряженного состояния основания насыпи используются решения плоской задачи теории линейно-деформированного однородного полупространства, загруженного с поверхности нагрузкой, распределенной по тому или иному закону. В качестве базовой схемы нагрузки слабого основания используется трапециевидная нагрузка от собственного веса насыпи, дополнительное влияние на которую оказывает напряженно-деформированное состояние грунта, вызванное влиянием транспортной нагрузки по подошве насыпи. Причем влияние транспортной нагрузки, переданной на основание должно учитываться в виде:

- 1) дополнительной статической нагрузки;
- 2) в виде динамического воздействия.

Следует так же отметить, что при высоте насыпи свыше трех метров, влиянием подвижной нагрузки (в статическом смысле) в расчетах можно пренебречь в связи с их почти равномерным распределением по подошве земляного полотна [59].

Проектирование дорожных одежд. Расчёт дорожных одежд опирается на показатели механических характеристик грунтов насыпи при оценке по двум критериям прочности [60-62]: упругому прогибу; условию сдвигоустойчивости подстилающего грунта и малосвязных конструктивных слоёв.

Важнейшим элементом расчёта дорожной одежды по критерию упругого прогиба является определение общего расчётного модуля упругости конструкции. Общий модуль упругости многослойной конструкции нежёсткой дорожной одежды определяют по формуле, приведённой в таблице 1.5.

Как видно из формул, для расчёта необходимы толщины слоёв, назначаемые на этапе конструирования конструкции, модули упругости материалов дорожных одежд, имеющиеся в справочных данных, и модуль упругости подстилающего грунта насыпи.

Расчёт жёстких дорожных одежд согласно методическим рекомендациям по проектированию жёстких дорожных одежд [63] так же требует знания модуля упругости основания для приведения конструкции к эквивалентной. Для этого используют формулу, приведённую в таблице 1.5.

Расчет напряжений в грунтовом массиве земляного полотна автомобильной дороги является одной из ключевых задач расчета дорожной конструкции. Такой расчет необходим при проверке дорожной одежды по критерию сопротивления сдвигу в грунте. В основе расчета по сопротивлению сдвигу лежит условие пластичности Мора–Кулона, записанное в полных главных напряжениях. Следуя этому условию касательное напряжение определяют по формуле:

$$\tau_p = \frac{1}{\cos\varphi} \cdot \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} - \operatorname{tg}\varphi \cdot \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}, \quad (1.1)$$

где φ – угол внутреннего трения, °;

σ_1 и σ_3 – максимальное и минимальное главные напряжения, возникающие в сечении по оси симметрии нагрузки, распределенной по круглой площадке, МПа.

Из анализа формулы (1.1) ясно, что для вычисления касательного напряжения в массиве золошлаковой смеси необходимо определять главные напряжения, возникающие в нем. А, для этого требуется знать механизм распределения напряжений в ЗШС, который согласно рабочей гипотезе, отличается от распределения в природных грунтах и требует изучения.

Вычисленное касательное напряжение сравнивают с предельной величиной, которая зависит от сцепления грунта и напряжений от собственного веса слоев дорожной одежды, расположенных выше проверяемого на сопротивление сдвигу грунта земляного полотна. Предельная величина напряжений сдвига $T_{\text{пр}}$ в грунте рабочего слоя (или в песчаном материале промежуточного слоя) определяемое по формулам [60-62], приведённым в таблице 1.5.

Таблица 1.5 – Формулы для расчёта дорожных одежд учитывающие характеристики грунта

Методы оценки	Формула для расчёта дорожных одежд
Расчёт по упругому прогибу	
Определения общего модуля упругости конструкции нежесткой дорожной одежды	$E_{общ}^i = \frac{\left[1,05 - 0,1 \frac{h_i}{D} \left(1 - \sqrt[3]{\frac{E_{общ}^{i+1}}{E_i}} \right) \right] E_i}{0,71 \sqrt[3]{\frac{E_{общ}^{i+1}}{E_i} \arctg\left(\frac{1,35h_э}{D}\right) + \frac{E_i}{E_{общ}^{i+1}} \frac{2}{\pi} \arctg\left(\frac{D}{h_3}\right)}}$
Определения общего модуля упругости конструкции жесткой дорожной одежды	$E_{общ}^i = \frac{E_i}{0,71 \sqrt[3]{\frac{E_{общ}^{i+1}}{E_i} \arctg\left(\frac{1,35h_э}{D}\right) + \frac{E_i}{E_{общ}^{i+1}} \frac{2}{\pi} \arctg\left(\frac{D}{h_3}\right)}}; h_э = 2h_i \sqrt[3]{\frac{E_i}{6E_{общ}^{i+1}}}$
Для жесткой и нежесткой дорожной одежды	<p>где: $h_э$ – толщина эквивалентного слоя материала; i – номер рассматриваемого слоя дорожной одежды считая сверху; h_i – толщина i-го слоя, см; D – диаметр нагруженной площади, см; $E_{общ}^{(i+1)}$ – общий модуль упругости полупространства, подстилающего i-й слой, МПа; E_i – модуль упругости материала i-го слоя, МПа.</p>
Расчёт по несущей способности	
Определение общей толщины нежесткой дорожной одежды	$T = \frac{3,84N^{0,16}}{CBR^{0,3}}$ <p>где: N – количество расчётной нагрузки на срок эксплуатации, ед; CBR – калифорнийское число несущей способности, %.</p>
Расчёт по сдвигоустойчивости	
Удерживающее усилие по ОДН 218.046-01	$T_{np} = k_d c_N + 0,1 \gamma_{cp} z_{on} \operatorname{tg} \varphi_{CT}$
Удерживающее усилие по МОДН 2-2001 и ПНСТ 265-2018	$T_{np} = k_d (c_N + 0,1 \gamma_{cp} z_{on} \operatorname{tg} \varphi_{CT})$
Для расчёта по ОДН 218.046-01, МОДН 2-2001 и ПНСТ 265-2018	<p>где: c_N – сцепление в грунте земляного полотна (или в промежуточном песчаном слое), МПа, принимаемое с учётом воздействия многократной нагрузки; k_d – коэффициент, учитывающий особенности работы конструкции на границе песчаного слоя с нижним слоем несущего основания; z_{on} – глубина расположения поверхности слоя, проверяемого на сдвигоустойчивость, от верха конструкции, см; γ_{cp} – средневзвешенный удельный вес конструктивных слоёв, расположенных выше проверяемого слоя, кг/см³; φ_{CT} – расчётная величина угла внутреннего трения материала проверяемого слоя при статическом действии нагрузки.</p>

Таким образом, при оценке устойчивости откосов с использованием классических методов, требуется знать 3 основных расчётных параметра механических характеристик грунта: удельное сцепление (c), угол внутреннего трения (φ) и

удельный вес (γ). Для использования МКЭ с простейшей вязкопластической моделью Кулона-Мора требуется ещё трёх основных расчётных параметров грунта: модуля упругости (E), коэффициента Пуассона (ν) и угла дилатансии (ψ) [51-58].

В случае оценки устойчивости и прогнозов осадки слабого основания нужно иметь значения расчётных параметров ЗШС при различной влажности, степени уплотнения и содержании шлаковых частиц. Поскольку в зоне скольжения слишком мало влияние транспортных нагрузок на характеристики грунта для оценки устойчивости откосных частей не требуется прогноза напряженного состояния, а при проектировании земляного полотна на слабых основаниях он носит ключевой характер.

Для расчёта дорожных одежд на основании из ЗШС требуется знать два параметра прочности теории Кулона-Мора – удельное сцепление (c) и угол внутреннего трения (φ) (*с учетом влияния транспортных нагрузок*), а также модуль упругости (E) и удельный вес (γ). А также, знать особенности распределения в грунте земляного полотна напряжений, возникающих в ходе действия транспортных нагрузок.

При этом, во всех расчетах необходимо учесть влияние влажности и плотности изменяемых в ходе жизненного цикла автомоибельной дороги и

1.5 Состояние вопроса по исследованию золошлаковых смесей как техногенных грунтов для сооружения земляных сооружений

Одни из первых исследований механических свойств золы, как материала для строительства насыпей, были выполнены за рубежом в 1972 г. коллективом авторов *A.M. DiGioia* и *W.L. Nuzzo* [64]. В ходе опытов на приборах прямого среза и трёхосного сжатия был отмечен рост угла внутреннего трения с 30 до 40° при возрастании плотности сухого грунта от 60 до 80 фунтов на кубический фут. Проведённые в этой работе испытания на одноосное сжатие показали наличие сцепления в золах уноса при природной влажности и отсутствие сцепления при полном водонасыщении и в сухом состоянии. Также ими было исследовано влияние вибрационных нагрузок разной частоты на уплотняемость золы. Однако эти исследования были характерны для сухой золы-уноса, а не ЗШС из отвала.

Исследования *Gray u Lin* [65] были сосредоточены на изучении влияния формы частиц, гранулометрического и химического состава на изменение удельного веса угольной золы и его влиянии на прочностные характеристики материала. В их работе также рассматриваются пуццолановые свойства и свойства морозного пучения. Однако данное исследование выполнялось для зол из штата Мичиган, содержание свободной извести в которых выше, чем в инертных золах России.

В 1990 г. *J.P. Martin* и др. [66], опубликовали исследование зол-уноса класса F (не цементирующихся) из трёх разных источников в *Delaware Valley: Pensilvania, New Jersey, Delaware*, для оценки их применения в дорожных насыпях. В статье оценивается прочность на срез, сжимаемость, водопроницаемость и уплотняемость золы в сравнении с более ранними работами прочих авторов [64,65].

В работе *J.P. Martin* [66] отмечено повышенное водопоглощение ЗШС и низкий коэффициент фильтрации (подтверждается опытами *Marito A* [67]), что говорит об исследованиях мелкодисперсных пористых шлаков. В работе уделяется внимание и морозному пучению. При этом отмечается, что особенности структуры золы позволяют формировать кристаллы льда при замерзании без выпучивания грунта, если влажность не достигает полной влагоёмкости. Для ликвидации возможности пучения при существенном подтоке воды *J.P. Martin* рекомендует исключать ЗШС из рабочего слоя или устраивать капилляропрерывающие слои и использовать гидроизоляцию.

Значения *CBR* были описаны в работе [66] на основе анализа испытаний 51 образца ЗШС из разных отвалов, выполненных *McLaren u DiGioia*.

Несущая способность, определённая на опытной площадке с использованием *Standard Penetration Test* (SPT), показала высокую несущую способность ЗШС в массиве по сравнению с песком даже при высокой влажности материала. Результаты испытания приведены на рисунке 1.10.

Подобно исследованиям *Gray u Lin*, в статье [65] *B. Indraratna u др.* [68] представили: гранулометрический и минералогический составы, пуццолановые свойства, уплотняемость и прочностные характеристики зол класса C, отобранных с электростанции *Maе Moh* в северном Тайланде.

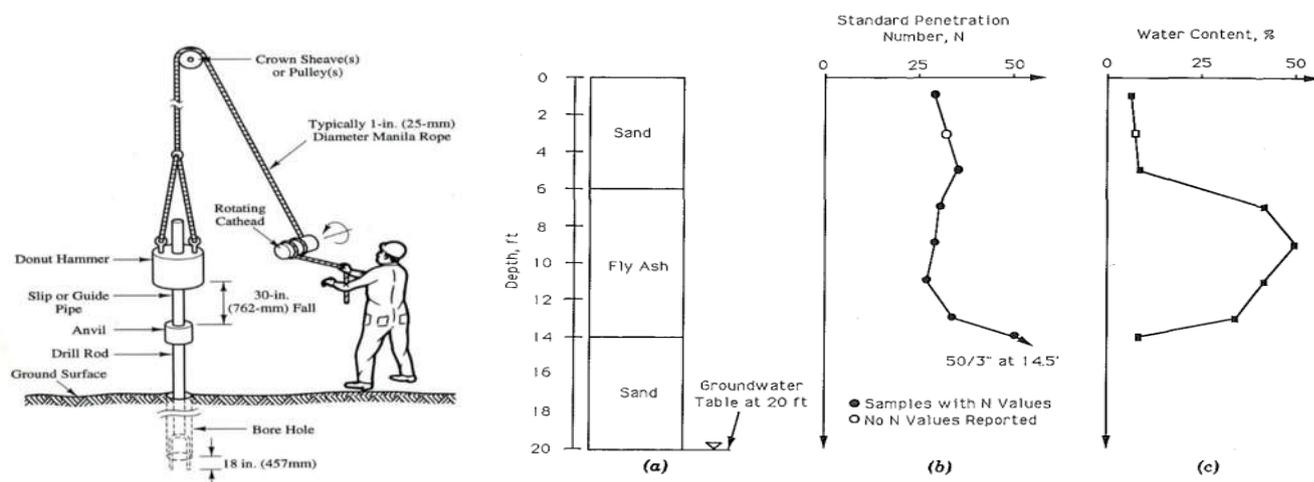


Рисунок 1.10 – Результаты Standard Penetration Test проведённые *J.P. Martin*
а – схема установки; б – результаты испытаний из работы *Martin* [66]

Помимо изучения особенностей твердения сухой золы, им были проведены трёхосные испытания ряда образцов отвалной ЗШС. В результате было установлено, что свежеприготовленные образцы имеют удельное сцепление близкое к прочим грунтам. Однако после полного водонасыщения образцы не обладают сцеплением и являются несвязным грунтом.

Это же было подтверждено опытами *Singh and Panda* [69] при проведении испытаний по определению прочностных характеристик на свежееуплотненных образцах ЗШС с разной влажностью и *Muhardi u др.* [70], в работе которого отмечена эта особенность характерная для шлаковых частиц.

A.K. Sinha, V.G. Havanagi, S. Mathur, U.K. Guruvittal в работе [27] рассмотрели особенности расчёта осадки насыпи из ЗШС на подтопляемом участке используя *Cone penetration test* (CPT) и *Standard Penetration Test* (SPT). Кроме того, ими были успешно применены методы предельного равновесия *Бишона* и *Петтерсона* при оценке устойчивости откосных частей, что позволило построить дорогу на болотистом участке между *Kalindi Colony* и *Kalindi Kunj* в Нью Дели, Индия.

Расчёты устойчивости подтопляемого участка дамбы из ЗШС с применением метода конечных элементов были проведены *R. Ossowski u K. Gwizdala* [71] в рамках проекта «DredgDikes», проводимого в Польше. Для расчётов использовался программный комплекс *Plaxis 2D* с моделью Кулона-Мора. Причем часть параметров материалов была взята из статьи их коллег по проекту *Dredg Dikes, L. Balochowski B Z. Sikora* [72], а часть – из статьи *Ossowski u Sikora* [73].

N.S. Pandian [74] провёл исследования ЗШС при разных условиях. Используя трёхосные испытания, им были проанализированы прочностные характеристики зол-уноса, отвальной ЗШС и топливного шлака в рыхлом и уплотнённом состоянии, а также в насыщенном и ненасыщенном состоянии. Согласно его данным сцепление в золе-уноса проявляется только в уплотнённой и влажной смеси и пропадает при водонасыщении или разрушении уплотнённой структуры. При этом сцепление сохраняется в некоторых ЗШС и образцах шлаковой фракции. В его работе отмечено снижение угла внутреннего трения в ЗШС с пористым шлаком при увлажнении. Причём ряд значений угла внутреннего трения при неконсолидированно-недренированных испытаниях был ниже, чем 29° .

В то же время во всех образцах ЗШС, уплотнённых по методике Проктора, после водонасыщения сохранялась высокая степень сцепления. Также в его работе показана динамика снижения прочностных и деформационных параметров золошлаков при увлажнении и уплотнении, хотя значений плотности сухого грунта и конкретной влажности не представлено.

Экспериментальные исследования грунтовых композитов в условиях трёхосного сжатия опубликовали *M.A. Khan, A. Usmani, S.S. Shahand, H. Abbas* из Алигархского мусульманского университета [75]. В их работе отражены испытания слоистых золо-глинистых образцов, которые за счёт наличия пластинчатой глины могут больше деформироваться без разрушения, но имеют немного меньшее сопротивление сжатию. Хотя в этой работе и рассматриваются свойства слоистых образцов из дисперсной ЗШС и глинистого грунта, но не приведены расчётные параметры этих композитов. Вычислить их из опубликованных данных также не представляется возможным.

Схожие исследования проведены *J. Prabakar* [76], с той разницей, что он производил смешивание разных типов грунта с ЗШС. В его работе отмечен рост прочностных параметров при добавлении определённого количества ЗШС в глинистый грунт. Причём параметры композиции на 10 – 40% превосходили параметры исходных грунтов. А при определённых концентрациях смеси прочностные параметры выше чем у исходного грунта и ЗШС.

S.K. Pal u A. Ghost [77] исследовали прочность на сдвиг образцов ЗШС, отобранных с девяти ТЭЦ. Испытания проводили в приборах трёхосного сжатия по схеме неконсолидированного-недренированного испытания. Хотя в работе представлено сравнение большого количества ЗШС, но все образцы были приготовлены при оптимальной влажности и с максимальной плотностью сухого грунта, что не даёт возможности прогнозировать их характеристики в разных условиях.

Прочностные характеристики ЗШС в приборах трёхосного сжатия также оценивал *Jakka u nr* [78]. В этих опытах испытывались ЗШС трёх разных источников в рыхлом и уплотненном состоянии без упоминания о влажности, что так же не позволяет прогнозировать устойчивость земляного полотна при реальных условиях его эксплуатации. Результаты частичных геотехнических испытаний представлены в работах *Kumar, Mohanty* [79, 80].

В работе *S.K. Tiwari* [81] отражено влияние водонасыщения образцов, сформированных в лаборатории, на их прочностные характеристики. Автор констатировал, что прочность ЗШС не уменьшалась до нуля, как в опытах *Pandian* [74]. Результаты испытания образцов с различной комбинацией золы и топливного шлака из разных источников представлены в статье *B. Kim u nr.* [82].

В работе *Muhunthan* [83] проводится анализ гранулометрического состава и структуры ЗШС от сжигания твёрдых отходов, которые отличались от угольной золы. В работе проведены комплексные исследования, включающие одновременную оценку механических характеристик золошлаков разного состава при различной влажности, чего у прочих авторов отмечено не было.

Работа *Gimhan* и пр. [84] посвящена оценке механических свойств различных комбинаций шлаковых и зольных частиц из отвала одной ТЭС. Им были выполнены исследования по оценке прочностных характеристик несущей способности зол и шлаков разного гранулометрического состава и их комбинаций. Автором выполнен обзор литературных источников по теме оценки механических характеристик ЗШС.

В статье *Gruchot* [85] даётся оценка пригодности лабораторных экспресс-методов оценки механических свойств ЗШС (крыльчатки образца армии США, конусного пенетрометра и портативного пенетрометра) для определения параметров прочности

недренированной золы ТЭС. На основе показаний экспресс контроля, проводилось сопоставление показаний с традиционными прочностными параметрами грунтов.

Исследования физико-механических характеристик ЗШО и направлений их эффективной утилизации получили интенсивное развитие в СССР после 3 марта 1971 г., когда Совет Министров СССР принял постановление №142: «Об использовании золы и шлака тепловых электростанций в народном хозяйстве».

Комплексные исследования золошлаков, проводимые в СоюзДорНИИ, СибАДИ, Гипродорнии, научных центрах Белоруссии, Украины, Казахстана, Узбекистана нашли отражение в ВСН 185-75 «Технические условия по использованию зол уноса и золошлаковых смесей от сжигания различных видов твёрдого топлива для сооружения земляного полотна и устройства дорожных оснований и покрытий автомобильных дорог» [86]. Требования к ЗШС для сооружения земляного полотна в этом документе ограничивались только величиной морозного пучения. Расчётные параметры прочности и деформативности ЗШС в нём отсутствуют.

Исследования золошлаков проводились в СибАДИ с разной интенсивностью с 1968 г. [10-12, 87]. В основном они были посвящены вопросам использования зол уноса в асфальто- и цементобетонах, при укреплении грунтов и производстве вяжущих и т.п. При этом мало внимания уделялось специальным вопросам использования ЗШС в качестве техногенного грунта для насыпей.

В 1974 г. *Н.И. Барац* [44] исследовала сложение намытой ЗШС на отвалах Омских ТЭЦ, работающих на Экибастузских углях, однако её исследования касались только намывных грунтов.

Чуть позже, в 1978 г., на пике интереса к утилизации золошлаков в СССР, вышла работа, обобщающая исследования физико-механических свойств ЗШС [88]. В этой работе *В.А. Мелентьев* и др. обобщили значительный объём информации о свойствах ЗШС различных ТЭЦ. Эта публикация имеет обзорный характер, в ней слабо учтена проблематика использования ЗШС в качестве техногенных грунтов. Кроме того, в этой работе почти не затронуты свойства ЗШС Экибастузских углей, являющихся и сегодня одним из основных и самых высокозольных топливных углей в Сибирской федеральном округе (СФО) (зольность достигает 50%).

Общие зависимости поведения насыпей из ЗШС представлены в работе *В.И. Крутова* [89], опубликованной в 1988 г. В этой работе рассмотрены вопросы самоуплотнения и формирования структуры насыпного грунта и, частично, изменения физико-механических характеристик ЗШС.

Более подробное обобщение результатов исследований свойств и опыта применения ЗШС в дорожном строительстве за период с 1980 по 2000 гг. опубликовали *Е.И. Путилин и В.С. Цветков* [31]. В этой публикации уделено внимание использованию золошлака как компонента асфальтобетона, цементобетона, слоёв оснований, укреплённых вяжущим, земляного полотна, но нет конкретных сведений о прочностных и деформационных характеристиках ЗШС.

Полезная информация о механических свойствах ЗШС в зависимости от влажности и пористости этого материала приведена в работе *П.Ю. Дьяконова* [90]. Однако он не смог связать полученные результаты со стандартными зависимостями, характерными для природных грунтов, и пришёл к выводу о необходимости продолжения исследований, схожих с представленными в этой статье.

Специалистами из ТГАСУ *М.В. Балюра и В.В. Фурсовым* проанализированы физико-механические характеристики ЗШС из отвалов Томской ГРЭС-2, Северской ТЭЦ, Кемеровской ТЭЦ, Новокемеровской ТЭЦ [22, 91,92]. Эти исследования носили точечный характер, без анализа причинно-следственных связей. Поэтому на их основе нельзя установить достоверные расчётные параметры для проектирования насыпей из ЗШС.

В лаборатории кафедры Геология МГУ были исследованы некоторые прочностные характеристики ЗШС из отвала Каширской ГРЭС-4, которые использованы при расчётах устойчивости высоких насыпей на транспортной развязке вблизи г. Кашира Московской области [32].

Одним из основных показателей, определяющих пригодность грунтов для сооружения земляного полотна автомобильных дорог, является степень морозного пучения. Значительные исследования ЗШС как техногенного грунта проведены в СибаДИ *Е.В. Ивановым* [41,93,94]. Экспериментальные исследования по оценке величины морозного пучения ЗШС проводили в специальной установке (рисунок 1.11), обеспечивающей промораживание образца в заданном температурном и влажностном режимах.

Рисунок 1.11 – Установка для определения морозного пучения ЗШС

Исследованы ЗШС от сжигания Экибастузских и Кузнецких углей из отвалов ТЭЦ-4 г. Омска, Беловской ГРЭС, Новокемеровской ТЭЦ, Барабинской ГРЭС.



Для сравнения испытанию на морозное пучение подвергали природные грунты нарушенной структуры: песок, супесь и суглинок.

Для получения данных о зависимости относительной деформации пучения ЗШС от влажности испытания проводили, моделируя закрытую (нет подтока влаги к нижней границе образца) и открытую (неограниченный подток влаги к нижней границе образца) системы. Результаты исследований ЗШС и некоторых разновидностей природных грунтов представлены на рисунке 1.12.

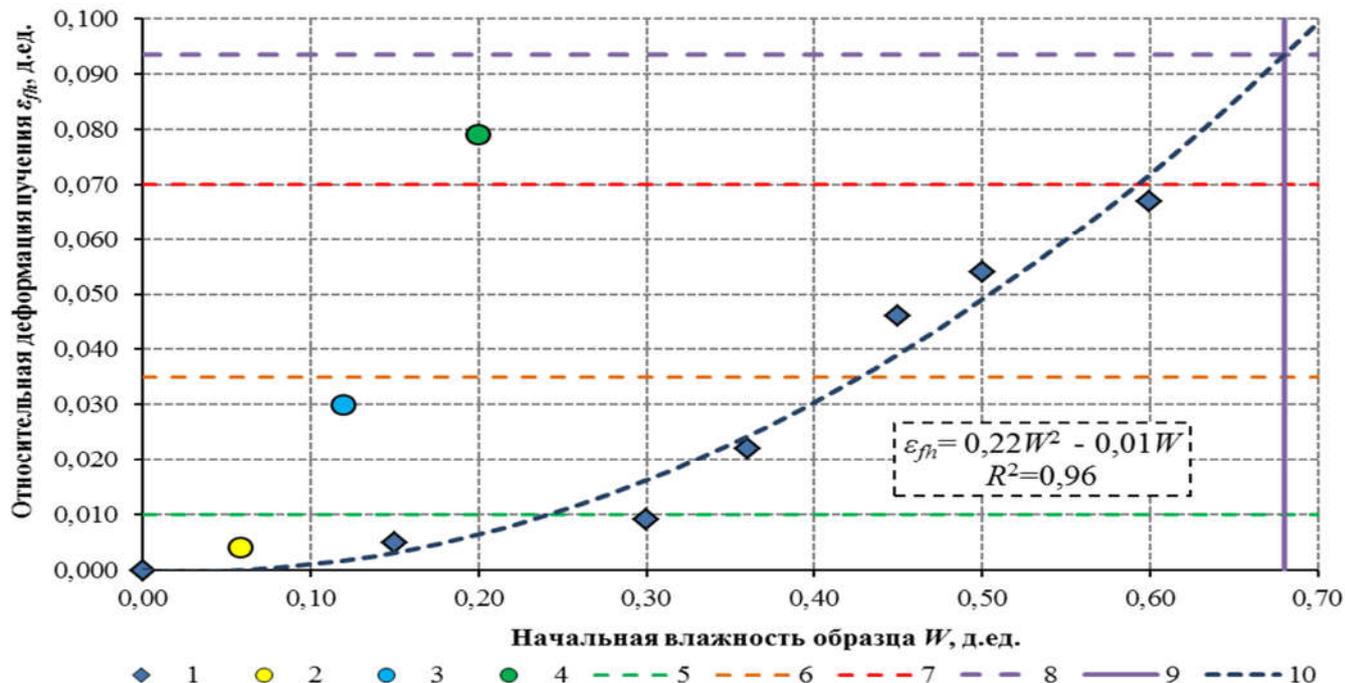


Рисунок 1.12 – Относительная деформация пучения: 1 – ЗШС; 2 – песок средний; 3 – супесь песчаная; 4 – суглинок легкий пылеватый; 5, 6, 7 – границы степеней пучинистости по ГОСТ 25100-2011 слабо-, средне- и сильнопучинистого грунта, соответственно; 8 – максимально возможная деформация пучения ЗШС; 9 – значение полной влагоемкости ЗШС ТЭЦ-4 г. Омска; 10 – эмпирическая зависимость относительной деформации пучения от влажности ЗШС

Установлено, что при увеличении влажности от гигроскопической до максимальной молекулярной влагоёмкости ЗШС является непучинистым материалом. Дальнейшее увеличение влажности приводит к увеличению морозного пучения ЗШС – вплоть до показателя «среднепучинистый» (по ГОСТ 25100). Только насыщение ЗШС до уровня полной влагоёмкости может перевести этот техногенный грунт в разряд сильнопучинистого.

Сравнивая результаты испытания техногенного грунта (ЗШС) с природными грунтами было установлено, что по относительной деформации морозного пучения в условиях закрытой системы ЗШС обладает лучшими показателями.

Испытания с неограниченным подтоком влаги к границе промерзания были выполнены с использованием математического планирования двухфакторного эксперимента. В качестве переменных факторов приняты коэффициент уплотнения ЗШС и относительная температура промораживания в климатической камере. Результаты исследования представлены на рисунке 1.13.

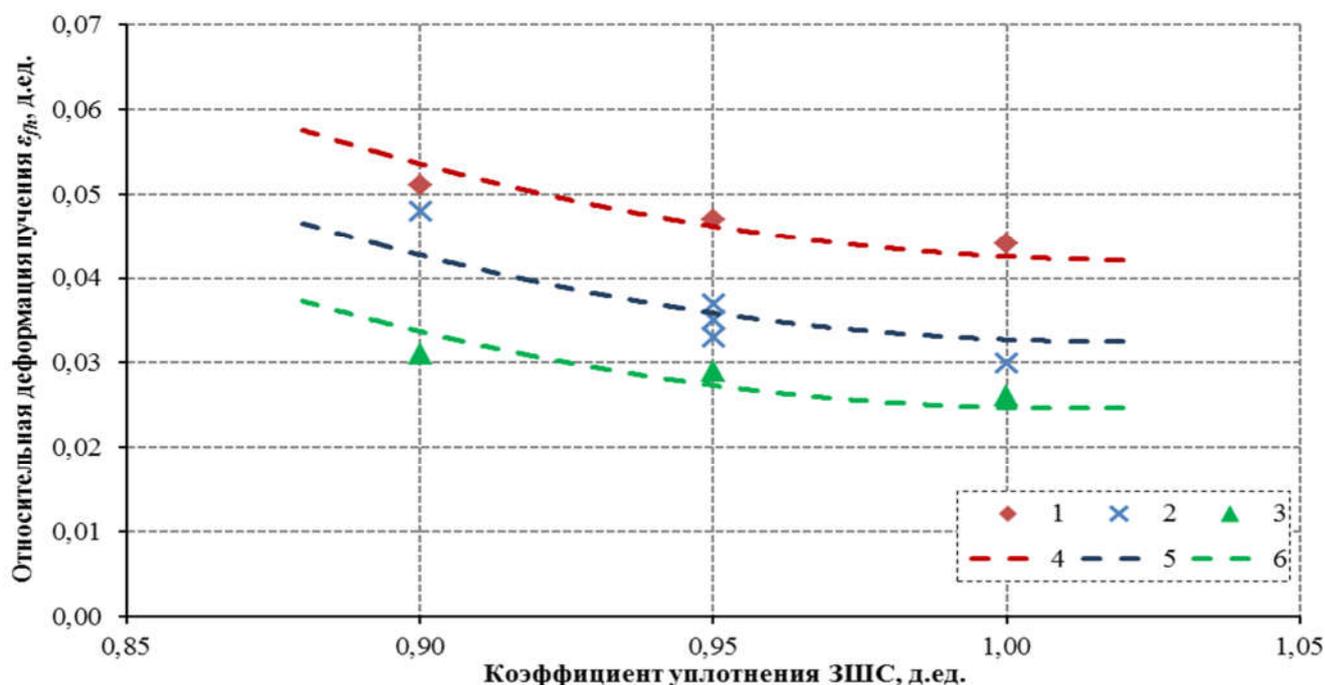


Рисунок 1.13 – Зависимость степени пучинистости ЗШС от коэффициента уплотнения и температуры промораживания: 1, 2, 3 – значения относительной деформации пучения; зависимости относительной величины пучения при температуре: 4 – минус 4°C ; 5 – при температуре минус 6°C ; 6 – температуре минус 8°C .

В результате обработки полученных данных установлена корреляционная зависимость $\varepsilon_{fh} = f(K_{упл}t)$ для ЗШС:

$$\varepsilon_{fn} = \frac{(0,1W_{отн}^2 - 0,008W_{отн})}{100 \varepsilon_{f0}} (87,3 - 1556K_{упл} - 7,3t_{отн} + 75K_{упл}^2 + 0,8t_{отн}^2 + 3K_{упл} \cdot t_{отн}); \quad (1.2)$$

где W_{opt} – относительная влажность ЗШС, д.ед.;

$K_{упл}$ – коэффициент уплотнения рабочего слоя земляного полотна из ЗШС, д.ед.;

$t_{отн}$ – относительная температура промерзания ЗШС, д.ед.;

ε_{f0} – относительная деформация пучения ЗШС, полученная в испытаниях в «открытой» системе при постоянном коэффициенте уплотнения и температуре промораживания (значение $\varepsilon_{f0}=0,043$ при $K_{упл}=1,0$ и $t_{отн}=0,67$), д.ед.;

100 – коэффициент перевода из % в д.ед.

Эти данные, а также результаты других исследований в РФ и за рубежом нашли отражение в ОДМ 218.2.031-2013 [39], разработанном в СибАДИ под руководством *В.В. Сиротюка*. Этот ОДМ является основным документом, регламентирующим применение ЗШС в дорожном строительстве РФ.

Расчётные значения прочностных и деформационных показателей ЗШС, приведённые в [39], осознанно занижены из-за ограниченности данных, имеющихся в период разработки этого документа. Поэтому при проектировании насыпей из ЗШС только на основе данных из [39] возможен существенный и порой необоснованно завышенный запас прочности.

Выводы по первой главе

По завершении первой главы можно сформулировать несколько основных выводов:

1. Многотоннажное применение ЗШС ТЭС для сооружения насыпей земляного полотна, планировочных насыпей является перспективным и актуальным направлением утилизации этого техногенного грунта как для дорожного строительства, испытывающего дефицит кондиционных грунтов, так и для теплоэнергетики, находящейся под постоянным давлением экологических служб.

2. Анализ химического и фазового составов ЗШС свидетельствует о схожести этих техногенных грунтов с природными песчаными и глинистыми грунтами.

Однако особенности структуры ЗШС определяют ряд существенных особенностей по сравнению с природными грунтами.

3. Особенности водно-теплового режима и морозного пучения этих техногенных грунтов сравнительно недавно изучены *Ивановым Е.В.* в СибАДИ.

При этом сравнительно слабо исследованы вопросы изменения прочностных и деформационных характеристик ЗШС.

4. Анализ методов проектирования насыпей земляного полотна позволил ограничить перечень параметров механических характеристик ЗШС, необходимых для проектирования. Однако необходимы масштабные исследования по определению значений параметров механических характеристик ЗШС различных угольных бассейнов с оценкой влияния различных факторов (плотности, влажности, содержания шлаковой фракции и числа приложений нагрузок от движения транспорта) на значения механических характеристик.

5. В мировой научной литературе мало достоверной информации о формировании напряжённого состояния, возникающего в насыпях из ЗШС под действием внешних нагрузок. Учитывая особенности структуры ЗШС, закономерности формирования напряжённого состояния должны иметь свои особенности, не присущие природным глинистым и песчаным грунтам. Эти особенности так же требуется установить для проведения геотехнических расчетов и моделирования дорожных конструкций в современных программных комплексах.

На основании изложенного **цель исследования** - 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.

Исходя из цели, сформулированы **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 напряжённого 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.

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 при воздействии внешних факторов.

2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ МЕХАНИЗМА ФОРМИРОВАНИЯ НАПРЯЖЁННОГО СОСТОЯНИЯ В НАСЫПЯХ ИЗ ЗОЛОШЛАКОВЫХ СМЕСЕЙ

2.1 Представления о формировании напряжённого состояния в грунтовых насыпях

В механике грунтов существует несколько основных подходов к прогнозированию напряжённо-деформированного состояния массива грунта. Это подходы, чаще основаны на базе механики сплошных сред, механики зернистых сред или инженерных методах, аппроксимирующих данные экспериментов [95].

Методы механики сплошной среды для расчёта и прогнозирования напряжённо-деформированного состояния грунтовых оснований начали развитие с попытки *Кулле* [96] создать теорию давления грунтового массива. Его работа, опубликованная в 1726 г., стала первой теоретической основой для определения давления на подпорную стенку.

В 1773 г. *Ш. Кулон* модернизировал решение *Кулле* и создал теорию давления грунтов на подпорные стенки. Основным новшеством стало применение закона *Амонтона* (упоминается в литературе как закон *Амонтона-Кулона* при применении его к грунтам). Амонтон связал зависимость между нормальными и касательными напряжениями посредством угла внутреннего трения [97]. А *Кулон* впервые внес в механику характеристику молекулярного сцепления частиц грунта, которое не зависит от нагрузки. Подобный подход в дальнейшем и обусловил представление о грунтах как о сплошных телах.

В дальнейшем *К.О. Мор* объединил идею *Кулона* с графическим представлением *К. Кульмана*, создав условие прочности *Кулона-Мора*, которое окончательно утвердило отношение к грунтам как к сплошной среде [96].

Основываясь на этих предпосылках механики сплошной среды, *Ж.Б. Буссинеск* в 1885 г. опубликовал решение задачи о распределении напряжений от действия вертикальной сосредоточенной силы в идеально упругом, изотропном полупространстве [98]. Решение *Буссинеска* показало, что распределение напря-

жений идет не под одним углом, а изменяется по некой кривой. В соответствии с его решением компоненты тензора напряжений определяются по формулам, приведённым в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Уравнения компонентов тензора напряжений по решению *Ж. Буссинеска*

Название компонента тензора	Формула для определения соответствующего компонента тензора
Главное нормальное напряжение на площадке перпендикулярной оси Z, кПа	$\sigma_z = \frac{3 \cdot P}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{z^3}{R^5}$
Главное нормальное напряжение на площадке перпендикулярной оси X, кПа	$\sigma_x = \frac{3 \cdot P}{2 \cdot \pi} \cdot \left[\frac{z \cdot x^2}{R^5} + \frac{1-2 \cdot \mu}{3} \cdot \left(\frac{R^2 - R \cdot z - z^2}{R^3 \cdot (R+z)} - \frac{x^2 \cdot (2 \cdot R+z)}{R^3 \cdot (R+z)^2} \right) \right]$
Главное нормальное напряжение на площадке перпендикулярной оси Y, кПа	$\sigma_y = \frac{3 \cdot P}{2 \cdot \pi} \cdot \left[\frac{z \cdot y^2}{R^5} + \frac{1-2 \cdot \mu}{3} \cdot \left(\frac{R^2 - R \cdot z - z^2}{R^3 \cdot (R+z)} - \frac{y^2 \cdot (2 \cdot R+z)}{R^3 \cdot (R+z)^2} \right) \right]$
Касательное напряжение по площадке zOy, кПа	$\tau_{zy} = \frac{3 \cdot P}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{y \cdot z^2}{R^5}$
Касательное напряжение по площадке zOx, кПа	$\tau_{zx} = \frac{3 \cdot P}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{x \cdot z^2}{R^5}$
Касательное напряжение по площадке xOy, кПа	$\tau_{xy} = \frac{3 \cdot P}{2 \cdot \pi} \cdot \left[\frac{x \cdot y \cdot z}{R^5} - \frac{1-2 \cdot \mu}{3} \cdot \frac{x \cdot y \cdot (2 \cdot R+z)}{R^3 \cdot (R+z)^2} \right]$
Примечание: <i>P</i> – нормальная сила, приложенная к поверхности полупространства, кН; <i>π</i> – математическая постоянная, равная отношению длины окружности к её диаметру; <i>z</i> – координата точки по оси <i>z</i> , м; <i>R</i> – расстояние от точки приложения силы до точки в которой определяется напряжение, м; <i>x</i> – координата точки по оси <i>x</i> , м; <i>y</i> – координата точки по оси <i>y</i> , м; <i>μ</i> – коэффициент бокового расширения.	

Механизм распределения напряжений, предложенный *Буссинеском*, в дальнейшем был подтверждён опытами, проведёнными на базе Пенсильванского колледжа в 1913-1914 гг. Аналогичные исследования проводил *П.А. Минаев* с 1912 по 1916 гг. В ходе этих экспериментов теория *Буссинеска* была подтверждена не только с качественной точки зрения, но и с количественной, что в дальнейшем обусловило её применение как основной модели для прогнозирования напряжений в грунтовых массивах [95].

Почти одновременно с решением задачи о напряжениях от сосредоточенной нагрузки появились формулы *М. Фламана* для определения напряжённого состоя-

ния под действием погонной нагрузки. Это решение развито в трудах *H. Gray, D.L. Holl, Newmark* при решении задачи о напряжениях от полосовой нагрузки [95].

Развитие теории сплошных сред отражено в работе *Лява* [99,100], где в уравнения перемещений и напряжений введён частный случай вектора *Галеркина*. Решение *Лява* в основном используется для расчёта напряжений сжатия в точках под центром круглого или прямоугольного штампа. *Ляв* отмечает, что для вычисления напряжений подходят и формулы *Митчелла*, которые основаны на более общем решении *Лява* [95]. Однако оба этих метода, как и решения, описанные в трудах *Д. Митчелла, Л. Прандля, Г.В. Колосова, Н.П. Пузыревского*, никак не учитывают различие в структуре изучаемых материалов.

Таким образом, эти и множество более поздних работ строились на базе решений, которые не учитывали различия материалов и их поведения под нагрузкой. Различие в распределении напряжений в разных материалах впервые обнаружил *Штрошнейдер* при изучении распространения давления в песках. Что позволило *Н.Н. Иванову* в 1929 г. поднять проблему о необходимости сближения опытных и теоретических данных для различных грунтов [95].

В последующем идею *Н.Н. Иванова* развивали *О.К. Фрелих* и *Griffith* [95]. В работе [101] *О.К. Фрелих* провёл анализ решения *Буссинеска* и модернизировал его путём введения параметра материала n , зависящего от вида грунта. В соответствии с решением *Фрелиха*, напряжения изменяются сходным с решением *Буссинеска* образом (рисунок 2.1).

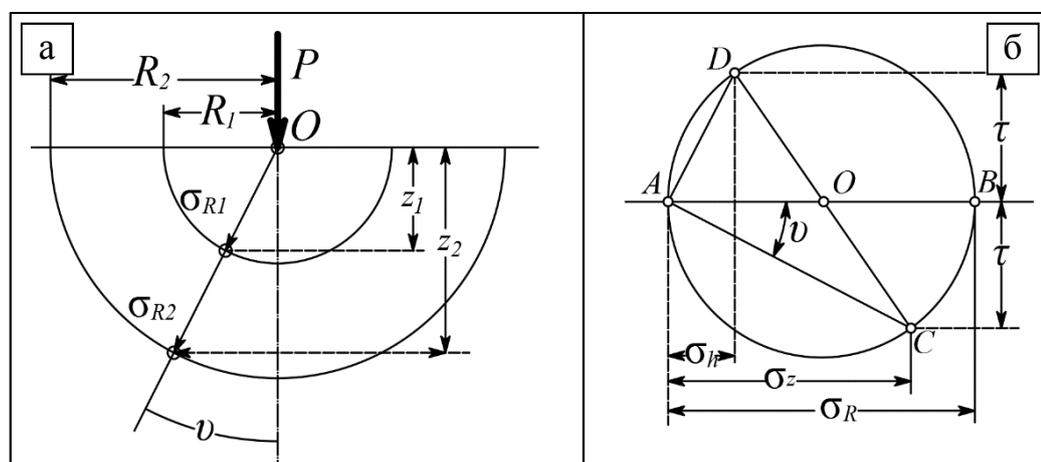


Рисунок 2.1 – Иллюстрации к решению *Фрелиха* [101]:
а – расположение сосредоточенной нагрузки на поверхности; б – круг Мора

Сами же напряжения определяются по формулам, сведённым в таблицу 2.2, и учитывают различие материалов путём внесения параметра *Фрелиха*.

Таблица 2.2 – Уравнения для определения напряжений по решению *Фрелиха*

Название компонента тензора	Формула для определения соответствующего компонента тензора
Радиальное напряжение, кПа	$\sigma_r = \frac{n \cdot P}{2 \cdot \pi \cdot R^2} \cdot \cos^{n-2} \nu$
Вертикальное нормальное напряжение, кПа	$\sigma_z = \frac{n \cdot P}{2 \cdot \pi \cdot R^2} \cdot \left(\frac{z}{R}\right)^n$
Горизонтальные нормальные напряжения, кПа	$\sigma_h = \frac{n \cdot P}{2 \cdot \pi \cdot R^2} \cdot \cos^{n-2} \nu \cdot \sin^2 \nu$
Касательное напряжение, кПа	$\tau = \frac{n \cdot P}{2 \cdot \pi \cdot R^2} \cdot \cos^{n-1} \nu \cdot \sin \nu$
Примечание: <i>n</i> – коэффициент распределения напряжений, введённый <i>Фрелихом</i> ; <i>ν</i> – угол между осью симметрии полупространства и нормалью площадки, град; <i>P</i> – нормальная сила, приложенная к поверхности полупространства, кН; <i>R</i> – расстояние от точки приложения силы до точки в которой определяется напряжение, м.	

Теория *Фрелиха* оказалась более универсальной, что позднее опытным путём подтвердил *А.А. Бирюков*. Предположение о связи структуры грунта и значении коэффициента распределяющей способности позволило качественно соотнести данные теоретического расчёта и экспериментального измерения. Кроме того, *А.А. Бирюковым* было установлено, что для грунтов в условиях естественного залегания значение коэффициента *n* может изменяться от трёх до шести, а для грунтов нарушенной структуры – примерно равно шести [95].

Методы механики зернистой среды для расчёта и прогнозирования напряжённо-деформированного состояния грунтовых оснований, начали разрабатываться несколько позже. Развитие этого направления в науке связано с интеграцией в механику грунтов вероятностного подхода. Пионерами в сопротивлении материалов выступал *Н.К. Снитко*, а в механике грунтов *Г.И. Покровский* [96].

Н.К. Снитко осуществил попытку объяснить прочность материалов на основе вероятностного поведения кристаллов. *Г.И. Покровский*, в свою очередь, использовал эти методы для изучения напряжённо-деформированного состояния грунтов. При построении теории *Г.И. Покровский* ориентировался на то, что давление в среде

передается посредством контактов частиц, число которых в единице объема определяет его деформируемость и способность к распределению напряжений.

На количество контактов частиц в грунтах оказывает влияние их форма, зерновой состав и структура грунта, распределение которых можно оценивать методами теории вероятности. *И.И. Кандауровым* было развито представление, в котором нагрузки передаются от частицы к частице грунта. Для решения задачи распределения напряжений *И.И. Кандауровым* был использован вероятностно-статистический подход, легший в основу механики зернистых сред.

Согласно данным *А.С. Александрова* [95], *И.И. Кандауров* приходит к выводу, что для плоской задачи решением является формула, полученная в 1910 г. специалистами из США. Эта формула представляет собой биномиальный закон распределения. Выполняя аппроксимацию кривой биномиального закона распределения, *И.И. Кандауров* приходит к формуле для определения напряжений в безраспорной среде. После введения соответствующего коэффициента передачи усилий формула преобразуется в вид:

$$\sigma_z = p \cdot k \cdot \sqrt{\frac{2}{\pi \cdot a_{мч} \cdot z}} \cdot \exp\left[-\frac{2 \cdot k \cdot x^2}{a_{мч} \cdot z}\right]; \quad (2.1)$$

где k – коэффициент учитывающий контактное взаимодействие частиц.

В работе [96] *И.И. Кандауров* предложил коэффициент k , связанный с коэффициентом распределительной способности среды и определяемый по формуле:

$$k = \nu_p \cdot \left(\frac{1}{n+1}\right)^\delta; \quad (2.2)$$

где ν_p – коэффициент распределительной способности среды *Кандаурова*;

δ – величина, характеризующая относительное число взаимосвязей частиц в горизонтальном ряду ($\delta = 0$ для безраспорной среды и $\delta = 1$ для распорной).

Вводя в своё решение коэффициент распределительной способности, *И.И. Кандауров* получил формулы для расчёта напряжений в безраспорной среде (таблица 2.3).

Таблица 2.3 – Формулы для расчёта напряжений в безраспорной среде для плоской задачи

Название компонента тензора	Формула для определения соответствующего компонента тензора
Вертикальное нормальное напряжение, кПа	$\sigma_z = \frac{2 \cdot p}{z} \cdot \sqrt{\frac{\nu_p}{\pi}} \cdot \exp\left[-\frac{4 \cdot \nu_p \cdot x^2}{z^2}\right]$
Горизонтальные нормальные напряжения, параллельное оси x, кПа	$\sigma_x = \frac{2 \cdot p \cdot x}{z^3} \cdot \sqrt{\frac{\nu_p}{\pi}} \cdot \exp\left[-\frac{4 \cdot \nu_p \cdot x^2}{z^2}\right]$
Горизонтальные нормальные напряжения, параллельное оси y, кПа	$\sigma_y = \frac{p}{4 \cdot \nu_p \cdot z} \cdot \sqrt{\frac{\nu_p}{\pi}} \cdot \exp\left[-\frac{4 \cdot \nu_p \cdot x^2}{z^2}\right]$
Касательное напряжение, кПа	$\tau_{xz} = \frac{2 \cdot p \cdot x}{z^2} \cdot \sqrt{\frac{\nu_p}{\pi}} \cdot \exp\left[-\frac{4 \cdot \nu_p \cdot x^2}{z^2}\right]$
Примечание: p – интенсивность нагрузки под штампом, кПа. x – координата точки по оси x , м; z – координата точки по оси z , м; ν_p – коэффициент распределительной среды <i>Кандаурова</i> .	

За пределами Советского Союза также проводилось развитие теории зернистых сред. В работах *М. Хара* [102] было выполнено сравнение формул механики сплошной среды с зависимостями, выведенными *И.И. Кандауровым*. *Хар* указывал на возможность определения нормального вертикального напряжения от действия вертикальной сосредоточенной силы по формуле:

$$\sigma_z = \frac{N}{2 \cdot \pi \cdot \nu_p \cdot z^2} \cdot \exp\left[-\frac{y^2 + x^2}{2 \cdot \nu_p \cdot z^2}\right]. \quad (2.3)$$

где σ_z – напряжение от нагрузки, действующее на площадке нормальной к оси z , кПа;

N – интенсивность вертикальной сосредоточенной силы на поверхности среды, кН;

ν_p – коэффициент распределительной способности среды *Хара*;

z – координата точки по оси z , м;

y – координата точки по оси y , м;

x – координата точки по оси x , м.

Он считал, что при определении напряжений по оси нагрузки (в случае ν_p равного 1/3) формула *И.И. Кандаурова* даёт результаты, тождественные формуле *Буссинеска*. Поэтому *Хар* предложил альтернативную формулу:

$$\sigma_z = p \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{R^2}{2 \cdot \nu_p \cdot z^2}\right) \right]. \quad (2.4)$$

где σ_z – напряжение от нагрузки, действующее на площадке нормальной к оси z , кПа;

p – интенсивность нагрузки на поверхности среды, кПа;

R – расстояние до точки приложения центра нагрузки, м;

ν_p – коэффициент распределительной способности среды *Хара*;

z – координата точки по оси z , м.

А.С. Александров отмечает [95] близкие результаты, полученные по формулам механики зернистой среды (*Кандауров, Хар*) и формуле *Лява* при значениях ν_p от 0,3 до 0,4. Но это справедливо только при отношении $z/R \geq 1$. При $z/R < 1$ затухание напряжений в формуле *Лява* происходит более интенсивно и говорит о разном подходе к описанию переуплотненного ядра под круглым штампом, которое формулой *Лява* не учитывается [95]. Кроме того, *А.С. Александров* отмечает различный подход к определению влияния параметра ν_p в формулах *Хара* и *Кандаурова*.

В инженерных методах прогнозирования напряжённо-деформированного состояния грунтовых оснований подход к рассеиванию напряжений по глубине грунтового массива несколько упрощается. Согласно расчётной схеме *Е. Головачева* [95, 103], рассеивание напряжений происходит через угол, названный им угол рассеивания напряжений. Эта схема, описанная в 1870 году, предназначена для определения диаметра площадки, по которой создается давление от нагрузки, стоящей в верхней части полупространства на определенной глубине. Используя эту схему можно вывести формулу для определения диаметра этой площадки:

$$D_z = D_o + 2 \cdot z \cdot \operatorname{tg} \alpha_\sigma, \quad (2.5)$$

где D_z – диаметр круга, по которому нагрузка действует на глубине z , м;

D_o – диаметр круга, по которому нагрузка действует по поверхности, м;

z – глубина, на которой определяется диаметр действия нагрузки, м.

α_σ – угол рассеивания напряжений.

При определении вертикальных напряжений по этой схеме основываются на допущении об их равенстве по глубине в пределах площадки тогда, нормальные напряжения для круглой площадки на глубине z (σ_z) можно определить по формуле:

$$\sigma_z = p \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot z}{D_o} \cdot \operatorname{tg} \alpha_\sigma \right)^{-2}. \quad (2.6)$$

Логично предположить, что угол рассеивания напряжений, как и параметр *Фрелиха*, зависит от свойств и структуры материала. Однако определение этого параметра с помощью экспериментальных средств затруднительно. Поэтому его обычно стараются связать с другими параметрами.

Согласно *Е. Головачеву* [103], угол распределения напряжений приравнивался к углу естественного откоса. По данным *П.А. Минаева* углы внутреннего трения и естественного откоса среднего песка равны у свободной поверхности, в то время как в массиве угол трения на 23% больше угла естественного откоса. У *Н.В. Немилова* для песчаных и гравелистых грунтов проявляется та же тенденция, но угол внутреннего трения больше угла естественного откоса на 39% [104].

Клейн [104], обобщая работы о взаимосвязи этих параметров, приводит выражение:

$$\sigma_z = p \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot z}{D_o} \cdot \operatorname{tg} f(\varphi) \right)^{-2}; \quad (2.7)$$

где $f(\varphi)$ – некая функция угла внутреннего трения, численно равная углу естественного откоса, град.

В работе [95] *К.С. Теренецкий* приводит формулу, в которой угол рассеивания напряжений связан с модулями деформации слоёв дорожной конструкции, которая, однако, для любой однородной среды выдает один угол распределения:

$$\alpha_\sigma = 30 + 25 \cdot \lg \frac{E_{D(cл)}}{E_{D(o)}}; \quad (2.8)$$

где α_σ – угол рассеивания напряжений;

$E_{D(cл)}$ – модуль деформации дискретного слоя, МПа;

$E_{D(o)}$ – модуль подстилающего слоя, МПа.

Помимо связи угла рассеивания напряжений с модулем деформации есть зависимость, предложенная Дж. Ленгом [105], которая связывает его с сопротивлением недреннированному сдвигу:

$$\tan \alpha_{\sigma} = \frac{\sqrt{(\sqrt{2}-1)^2 \cdot P_s / (2 \cdot p_{uu}) + P_s / (\lambda \cdot \pi \cdot c_u)}}{6.5 \cdot \log N / c_u^{0.63}} - \frac{(\sqrt{2}-1)^2 \cdot P_s / (2 \cdot p_{uu})}{6.5 \cdot \log N / c_u^{0.63}}; \quad (2.9)$$

где α_{σ} – угол рассеивания напряжений;

P_s – расчётная осевая нагрузка, кН;

p_{uu} – давление в шинах, МПа;

C_u – сопротивление недреннированному сдвигу, МПа;

N – число приложения расчётной нагрузки, шт.

Помимо напряжения от внешней нагрузки в полупространстве будет возникать и напряжение от веса вышележащих слоёв. Поэтому итоговая зависимость для прогнозирования напряжений должна иметь в своём составе компонент, зависящий от плотности грунта и глубины площадки, на которой определяются напряжения.

Подобные решения предлагал в своей работе по расчёту промышленных дорог В.Д. Казарновский [106]. Учёт давления грунта в его методе сводится к введению в формулу для определения максимального и минимального главных напряжений слагаемого, отвечающего за напряжения, создаваемые вышележащим слоем грунта (таблица 2.4).

Таблица 2.4 – Формулы для расчёта напряжений в безраспорной среде для плоской задачи с учётом веса грунта

Название компонента тензора	Формула для определения соответствующего компонента тензора
Вертикальное нормальное напряжение, кПа	$\sigma_1 = p \cdot \left[1 - \left(\frac{z}{\sqrt{R^2 + z^2}} \right)^3 \right] + \gamma_{cp} \cdot z$
Горизонтальное нормальное напряжение, параллельное оси x, кПа	$\sigma_3 = \frac{p}{2} \cdot \left[(1 + 2 \cdot \mu) - \frac{2 \cdot (1 + \mu) \cdot z}{\sqrt{R^2 + z^2}} + \left(\frac{z}{\sqrt{R^2 + z^2}} \right)^3 \right] + \frac{z \cdot \gamma_{cp} \cdot \mu}{1 - \mu}$
Примечание: σ_1 – максимальное главное напряжение, кПа; σ_3 – минимальное главное напряжение, кПа; p – интенсивность нагрузки, кН/м ² ; γ_{cp} – усредненный удельный вес вышележащих слоёв грунта, кН/м ³ ; z – координата точки по оси z, м; R – расстояние от точки приложения силы до точки, в которой определяется напряжение, м; μ – коэффициент бокового расширения.	

А.Е. Мерзликиным было предложено при анализе траекторий нагружения слоёв дорожной одежды от движущейся нагрузки использовать для прогнозирования главных напряжений известные формулы с учётом веса грунта [95]. Согласно его данным, напряжения от собственного веса грунтов можно определять по формулам:

$$\sigma_{zy} = \gamma_{cp} \cdot z, \quad (2.10)$$

$$\sigma_{xy} = \gamma_{cp} \cdot z \cdot \frac{1 + 2 \cdot \mu}{2}, \quad (2.11)$$

где σ_{zy} – напряжение от собственного веса грунта, действующее на площадке нормальной к оси z , кПа;

σ_{xy} – напряжение от собственного веса грунта, действующее на площадке нормальной к оси x , кПа;

γ_{cp} – усредненный удельный вес вышележащих слоёв грунта, кН/м³;

z – координата точки по оси z , м;

μ – коэффициент бокового расширения.

2.2 Влияние структуры грунта на механизм формирования напряжений

В отличие от первых классических решений по прогнозированию напряжённого состояния грунтов под действием внешней нагрузки (*Буссинеск, Фламан, Митчелл, Das и др.*) [95, 98, 107, 108], современные представления о формировании напряжённого состояния учитывают различие в структуре разных видов грунтов и влияние состояния массива на распределение напряжений (которое подтверждается опытами *Берингера, Сантамарина, Кларка, Таданага* [109-112]).

Опыты показывают, что различие в структуре не только влияет на равномерность распределения давлений, но и сказывается на характере распределения напряжений внутри массива. Значит и уплотнение грунтовых материалов должно вызывать схожие изменения в формировании НДС.

Проведенные *Сантамарина* [109] и *Берингером* [110] исследования по загрузке плоских массивов из фотоупругих элементов показывают, что распределение напряжений кардинальным образом зависит от крупности частиц и степени упорядоченности элементов (аналог плотности). Следовательно, решение задач о прогнозировании напряжений в грунтовых средах кардинально зависят от структурных особенностей анализируемых материалов. На рисунке 2.2 показаны цепочки напряжений в структурах с разными размерами элементов.

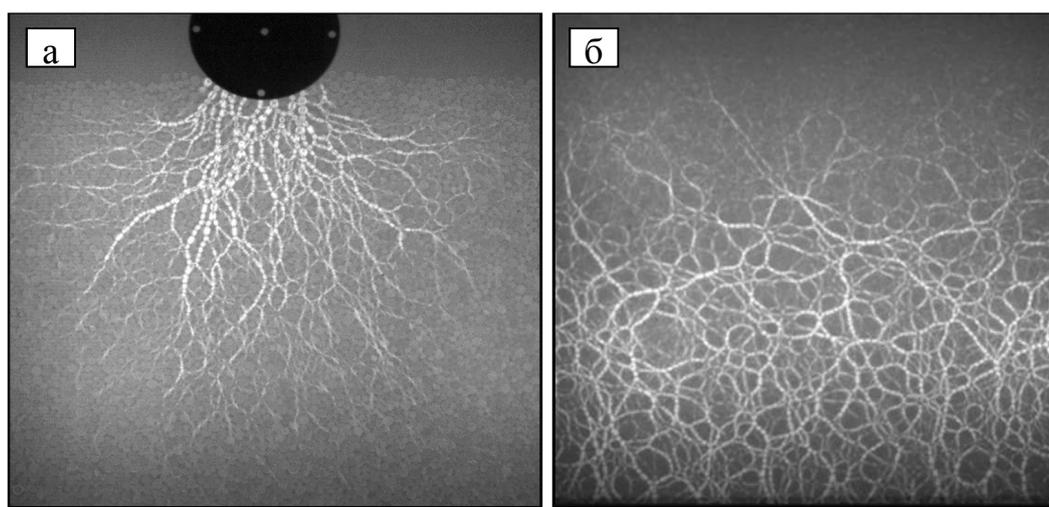


Рисунок 2.2 – Цепочки напряжений в нагруженных фотоупругих дисках, проявленные при просвечивании в поляризованном свете: а – в массиве из мелких частиц; б – в массиве из более крупных, разноразмерных частиц

На этом рисунке видна картина распределения напряжений в двух различных структурах. При этом видно, что часть элементов воспринимает наибольшую нагрузку, а некоторые вообще не испытывают давления. Аналогичная картина получена в ходе опытов *Кларка* [111]. Фото цепочек напряжений, полученных им, приведены на рисунке 2.3.

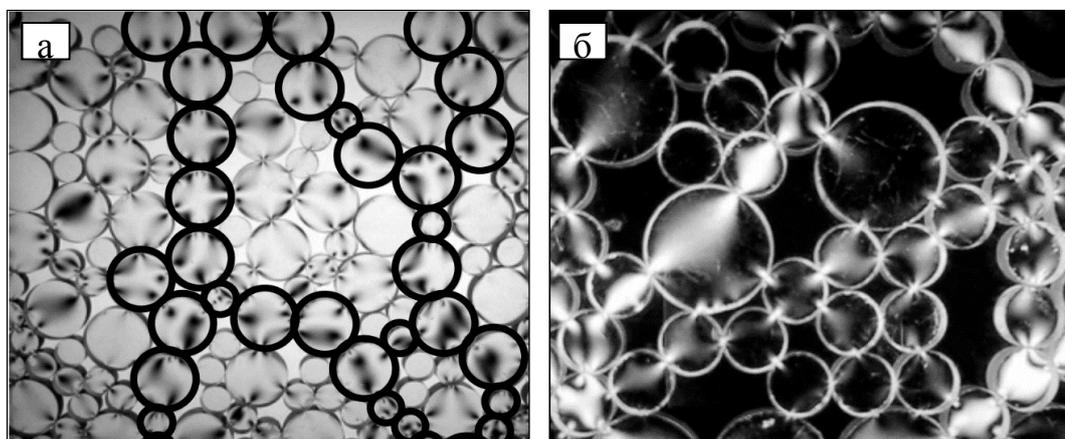


Рисунок 2.3 – Цепочки напряжений в массиве фотоупругих дисков (опыты Кларка): а – под действием внешней нагрузки; б – от собственного веса

Помимо крупности частиц, степень упорядоченности частиц тоже в немалой степени влияет на механизм формирования напряжённого состояния. Это иллюстрируют опыты *Берингера* [110] на образцах с разной плотностью укладки элементов (рисунок 2.4).

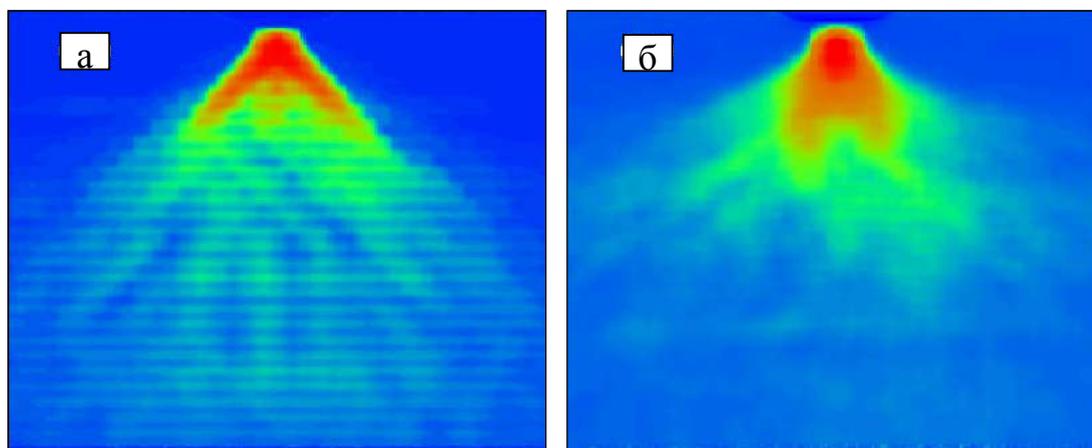


Рисунок 2.4 – Распределение напряжений в двумерном массиве из по-разному упорядоченных круглых элементов: а – массив из упорядоченных частиц; б – из случайно расположенных частиц

При прогнозировании напряжённого состояния в массиве грунта, обычно применяются решения механики сплошной среды или механики зернистых сред. В обоих случаях при учёте различного поведения грунтов в решение вводят либо коэффициенты распределительной способности среды, которые являются числовой характеристикой распределения напряжений, либо учитывается различие параметров этой среды.

В механике сплошных сред для прогнозирования напряжений в основном используют решения, включающие коэффициенты распределительной способности среды *Фрелиха* [113]. Так же в рамках строительной механики иногда используют инженерные аппроксимации и теории, базирующиеся на наличии некоего угла распределительной способности среды (*Пискунов* [114], *Тимошенко* [115], *Матвеев* [116], *Клейн*). Эти теории по большей части разработаны для описания поведения квазисплошных сред, к которым (согласно анализам гранулометрического состава) можно отнести и исследуемые нами мелкозернистые ЗШС [95].

Использование коэффициентов распределительной среды позволяет применять одни и те же решения для разных грунтов путём изменения величины этого коэффициента. Коэффициенты распределительной среды, как правило, должны определяться из опытов с определением напряжений, однако такие исследования

сложны и дороги. Поэтому ряд исследователей (*Александров, Гонсалес, Муллер, Матвееви др.*) осуществляли попытки связать механизм распределения напряжений с параметрами грунта, определяемыми в лаборатории [117-120].

Так, в своих работах *Гонсалес* [118, 119] связывал параметр *Фрелиха* и основной параметр, применяемый для проектирования дорожных конструкций в западных странах – калифорнийское число несущей способности (CBR). Эмпирические зависимости, связывающие эти величины, представлены в виде формул

$$n = 2 \cdot \left(\frac{CBR}{6} \right)^{0.337}, \quad (2.12)$$

$$n = 2 \cdot \left(\frac{CBR}{6} \right)^{0.1912}, \quad (2.13)$$

где n – коэффициент распределения напряжений, (параметр *Фрелиха*);

CBR – калифорнийское число несущей способности, %.

До настоящего времени параметр CBR в России практически не используется в инженерных расчётах, в том числе и во вновь принятом документе по расчёту дорожных одежд (ПНСТ 1.2.418-1.018.18 [121]). В исследованиях, этот параметр обычно связывают с деформационным параметром материала (модулем упругости). Для определения параметра *Фрелиха* по зависимостям *Гонсалеза* было решено внести в них выражения для определения CBR через модуль упругости.

Сопоставление формул для связи между параметром CBR и модулем упругости широко представлено в работе *Долгих и Семеновой* [122]. Эти формулы выведены *W. Heukelom* и *C.R. Foster* [123], *W. Heukelom* и *A.J.G. Klomp* [124], *Green* и *Hall* [125], *Witczak* [126] и *Powell* и др. [127]. В работе *Putri* и др. [128] представлена аналогичная зависимость *NAASRA* и Национально-исследовательской программе по исследованиям в области транспортных перевозок для значений CBR более 5 [129].

Все вышеуказанные зависимости были проанализированы и сравнены с реальными экспериментальными данными, что показало их несостоятельность для прогнозирования параметра CBR ЗШС.

По этой причине нами проведены дополнительные исследования (см. главу 3), по определению CBR ЗШС при разной степени уплотнения материала. Что позволило установить зависимость между калифорнийским числом несущей способности (CBR) и модулем упругости и компрессионным модулем деформации ЗШС:

$$CBR = 0,67 \cdot E_{\text{Лаб}}^{0,73}, \quad (2.14)$$

$$CBR = 0,52 \cdot E_{\text{Нат}}^{0,891}, \quad (2.15)$$

$$CBR = 0,117 \cdot E_{\text{Комп}}^{1,45}, \quad (2.16)$$

где CBR – калифорнийское число несущей способности, %;

$E_{\text{Лаб}}$ – модуль упругости полученный в ходе лабораторных испытаний, МПа;

$E_{\text{Нат}}$ – модуль упругости, полученный в ходе натуральных испытаний, МПа;

$E_{\text{Комп}}$ – модуль деформации по методу компрессионного сжатия, МПа.

Отличие в результатах определения модуля упругости связано с масштабным фактором при испытаниях в лаборатории и влиянием жёсткой формы, в которой находится лабораторный образец при нагружении штампом. Кроме того, структура (а значит и свойства) образцов, уплотнённых прессованием или ударной нагрузкой, отличается от аналогичных образцов, полученных методами уплотнения, применяемыми на дороге (укатка, вибрация).

Таким образом, при подстановке в формулу Гонсалеза формул (2.14-2.16) получаются зависимости, которые связывают параметр Фрелиха с модулем упругости насыпи земляного полотна из ЗШС (таблица 2.5).

Таблица 2.5 – Формулы связи параметра Фрелиха и деформационных параметров ЗШС

Связываемый параметр	Первая формула Гонсалеза	Вторая формула Гонсалеза
Лабораторный модуль упругости	$n = 2 \cdot \left(\frac{0,67 \cdot E_{\text{Лаб}}^{0,73}}{6} \right)^{0,337}$	$n = 2 \cdot \left(\frac{0,67 \cdot E_{\text{Лаб}}^{0,73}}{6} \right)^{0,1912}$
Натурный модуль упругости	$n = 2 \cdot \left(\frac{0,57 \cdot E_{\text{Нат}}^{0,922}}{6} \right)^{0,337}$	$n = 2 \cdot \left(\frac{0,57 \cdot E_{\text{Нат}}^{0,922}}{6} \right)^{0,1912}$
Компрессионный модуль деформации	$n = 2 \cdot \left(\frac{0,117 \cdot E_{\text{Комп}}^{1,45}}{6} \right)^{0,337}$	$n = 2 \cdot \left(\frac{0,117 \cdot E_{\text{Комп}}^{1,45}}{6} \right)^{0,1912}$

В противовес механики сплошных сред, в механике зернистой среды изначально учитывалась разница во взаимодействии частиц посредством коэффициента распределительной среды (*Кандауров*). Априори мы считаем, что закономерности механики зернистых сред также могут быть применимы к ЗШС, поскольку форма и особенности контактной передачи давлений между частицами в ЗШС и в мелких песках сходны. Однако, как и в случае с теорией сплошных сред, нет чёткого представления о значениях коэффициента распределительной среды различных грунтов. Анализируя работы *Кандаурова* и развивая их, *Муллер* [120] нашел связь между коэффициентом бокового давления ζ и коэффициентом распределительной способности среды ν_p :

$$\xi = \frac{1}{8 \cdot \nu_p}. \quad (2.17)$$

В механике грунтов определение коэффициента бокового давления, как правило, требует проведения сложных испытаний. В то же время имеются зависимости, выведенные для вычисления коэффициента бокового давления через угол внутреннего трения φ и коэффициент *Пуассона*.

Зависимости для определения коэффициента бокового давления через угол внутреннего трения представлены в таблице 2.6.

А при известном коэффициенте Пуассона, можно получить коэффициент бокового давления через зависимость [130]:

$$\xi = \frac{\mu}{1 - \mu}. \quad (2.18)$$

Кроме того, известны и собственные решения по определению коэффициента распределительной среды, одно из которых (решение *Баданина* и соавторов) также приведено в таблице 2.6 [131-136].

Представленные формулы позволяют определить коэффициент распределительной способности среды исходя из параметров материала, но в источниках нет данных о применимости того или иного решения для всего разнообразия техногенных грунтов (например – для ЗШС).

Таблица 2.6 – Формулы, связанные с углом внутреннего трения

Авторы	Формула для определения коэффициента	
	бокового давления (распределительной способности среды <i>Кандаурова</i>)	распределительной способности среды <i>Хара</i>
<i>Ж. Биарез и соавт.</i>	$\xi = \frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi}$	$v_p = \frac{1 + \sin \varphi}{8(1 - \sin \varphi)}$
<i>M.D. Bolton</i>	$\xi = \frac{1 - \sin(\varphi - 11,5)}{1 + \sin(\varphi - 11,5)}$	$v_p = \frac{1 + \sin(\varphi - 11,5)}{8 - 8\sin(\varphi - 11,5)}$
<i>Brooker-Ireland</i>	$\xi = 0,95 - \sin \varphi$	$v_p = \frac{1}{7,6 - 8\sin \varphi}$
<i>Р.Я. Попильский и соавт.</i>	$\xi = \operatorname{tg}^2 \left[\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right]$	$v_p = \frac{1}{8 \operatorname{tg}^2 \left[\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right]}$
<i>Мауне-Kulhawy</i>	$\xi = 1 - 0,998 \sin \varphi$	$v_p = \frac{1}{8(1 - 0,998 \sin \varphi)}$
<i>Г.И. Покровский</i>	$\xi = 1 - 0,74 \operatorname{tg} \varphi$	$v_p = \frac{1}{8(1 - 0,74 \sin \varphi)}$
<i>Баданин и соавт.</i>	-	$v_p = \operatorname{ctg}(\varphi + 45^\circ)$

Также неизвестно, какие из формул для сплошной или зернистой среды (*Клейн, Кандауров, Матвеев, Олсон* и другие) дают большую точность при оценке напряжённого состояния в массиве из ЗШС.

2.3 Моделирование напряжённого состояния в грунтах и оценка возможности использования этих моделей для золошлаковых смесей

2.3.1 Измерение напряжений (давлений) по глубине массива из золошлаковой смеси

Для оценки математических моделей, наиболее адекватно описывающих напряжённое состояние в массиве ЗШС, выполнены экспериментальные исследования с использованием оригинальных тензодатчиков, расположенных на разной глубине массива. Измерены давления, возникающие в массиве по оси плоского штампа, при его нагружении вертикальной нагрузкой.

В рамках эксперимента оценивалось схождение опытных данных прямых измерений и прогнозных значений главных нормальных напряжений по оси круглого жестко-

го штампа, полученных по формулам *И.И. Кандаурова, М. Хара, Р.Олсона, В.Г. Пискунова, Г.К. Клейна, С.А. Матвеева* (модифицированное) (таблице 2.7).

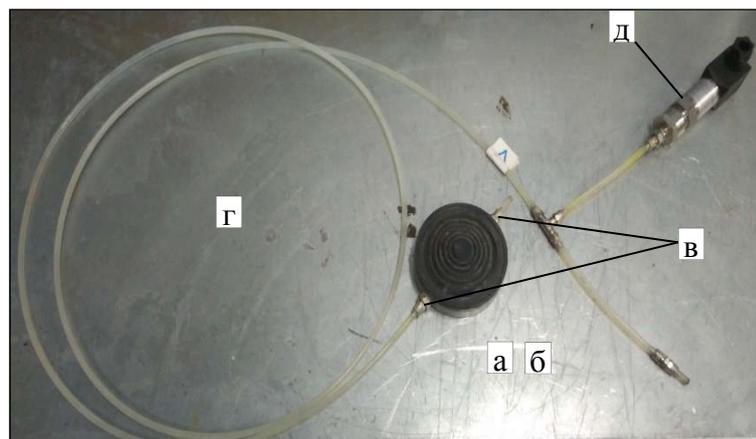
Таблица 2.7 – Теоретические решения для определения главных максимальных напряжений по оси круглого штампа

Авторы	Формула для определения
<i>И.И. Кандауров</i>	$\sigma_z = p \left[1 - \exp\left(\frac{-R^2}{2z^2\nu}\right) \right]$
<i>М. Харр</i>	$\sigma_z = p \left[1 - \exp\left(\frac{-4R^2\nu_p}{z^2}\right) \right]$
<i>Р.Е. Олсон</i>	$\sigma_z = p \left[1 - \frac{\left(\frac{z}{R}\right)^n}{\left(1 + \left(\frac{z}{R}\right)^2\right)^{n/2}} \right]$
<i>В.Г. Пискунов, Н.Н. Иванов</i>	$\sigma_z = B \cdot \exp(-\gamma z)$
<i>Г.К. Клейн</i>	$\sigma_z = p \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot z}{D_o} \cdot \text{tgf}(\varphi) \right)^{-2}$
<i>С.А. Матвеев (модиф.)</i>	$\sigma_z = p \cdot \left[\exp(\nu\{1 - \gamma z\}) \right]^{(1-\nu)}$

Где: p – величина давления по подошве круглого штампа, МПа;
 z – глубина точки по оси штампа в которой определяется напряжение, м;
 R – радиус штампа, м;
 λ – коэффициент распределительной способности среды Кандаурова;
 λ – коэффициент распределительной способности среды Хара;
 γ – коэффициент затухания;
 n – коэффициент распределительной способности среды Фрелиха;
 D_o – диаметр штампа, м;
 $f(\varphi)$ – некая функция угла внутреннего трения, численно равная углу естественного откоса, град.

Для определения напряжений (измерения давлений) использовали аналог датчиков давления (месдоз), сконструированных на базе датчиков уровня жидкости Piezus APZ 2422 (рисунок 2.5).

Рисунок 2.5 – Датчик давления грунта (месдоза) на основе датчика уровня Piezus APZ 2422: а – металлическая камера; б – резиновая мембрана; в – фитинги из никелированной латуни; г – полиамидные трубки; д – датчик уровня жидкости Piezus APZ 2422



Каждый датчик давления представлял собой замкнутую систему, заполненную маслом ВМГЗ, состоящую из следующих элементов: цельнометаллическая камера; мембрана Rm-L-Nd82 мм из маслостойкой резины (используется в сверхчувствительных разделителях сред); фитинги с накидной гайкой для гидравлических систем; трубки из полиамида PA 12 Rilsan для передачи давлений до 40 Бар; датчик уровня PiezusAPZ 2422 с пределом измерения 6 Бар.

Для получения показаний с датчиков (выходной сигнал 4-20 мА) использовался измеритель-регулятор ТРМ-1-Щ11.У.И. Перед установкой в массив датчики тарировались в универсальной испытательной машине ИР 5081-5. Для чего датчик помещался в импровизированный аналог компрессионного прибора диаметром 150 мм (рисунок 2.6).

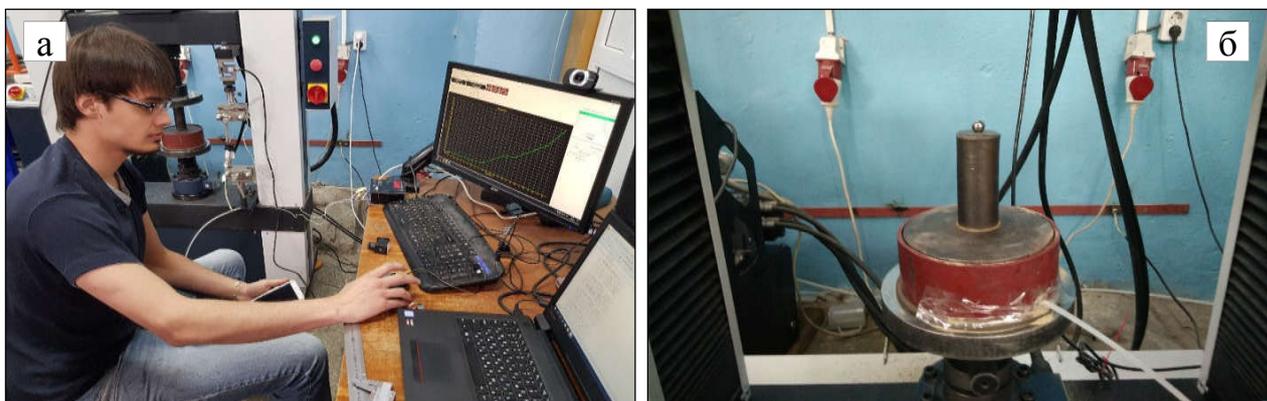


Рисунок 2.6 – Тарировка датчиков:
а – тарировка в машине ИР-5081-5; б – камера для тарировки

Выполняли 2 цикла испытаний: с постоянной плотностью и изменяющейся влажностью; с изменяемой плотностью при постоянной влажности.

Для проведения первого цикла эксперимента лабораторный лоток заполняли золошлаковой смесью слоями, увлажняли до оптимальной влажности и уплотняли до коэффициента уплотнения 0,95. Нижний слой имел толщину 15 см. Последующие слои укладывались по тому же алгоритму, но толщиной 7 – 8 см. После подготовки каждого слоя, на него устанавливали лазерный уровень, который наводился по меткам на проектное положение датчика (рисунки 2.7). Высотное положение датчика контролировалось с помощью нивелира. По центру датчика устанавливалась рейка и снималась высотная отметка относительно реперной точки. После чего производилась ручная засыпка с трамбованием ЗШС вокруг датчика.



Рисунок 2.7 – Позиционирование датчика в массиве ЗШС

По глубине было уложено три датчика давления. Давление создавали с помощью гидравлического пресс-штампа ПШ-050С диаметром 33 см. Измерение усилий, создаваемых пресс-штампом, осуществляли электронным динамометром ДЭП/З-1Д-50С-2. Схема размещения оборудования представлена на рисунке 2.8.

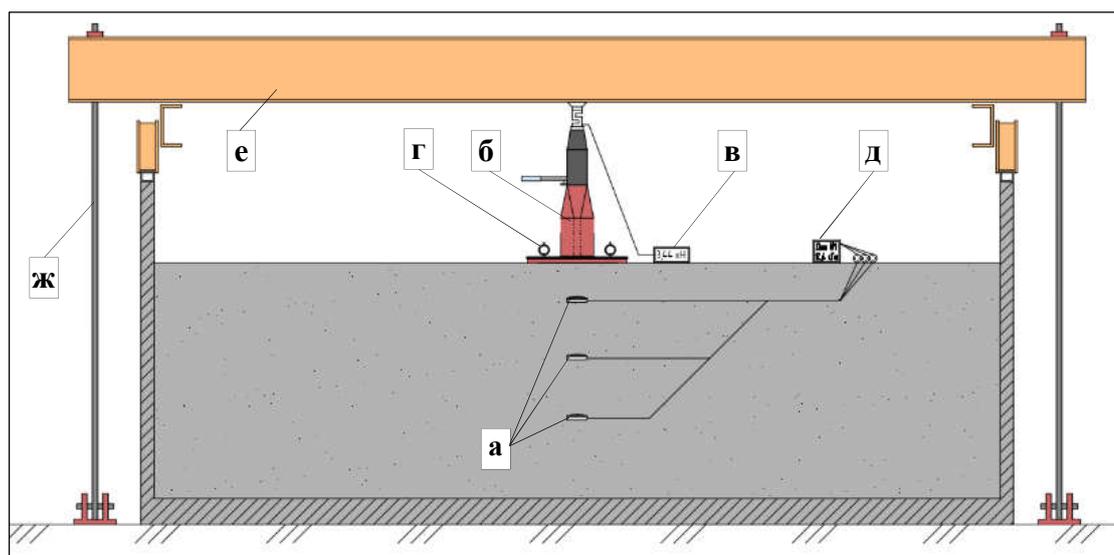


Рисунок 2.8 – Размещение измерительного оборудования и штампа для испытаний:
 а – датчики давления; б – пресс-штамп; в – датчик силы; г – измеритель-регулятор ТРМ;
 д – индикаторы перемещений; е – упорная система; ж – анкерные тяги

В ходе эксперимента, проводили штамповые испытания по оригинальной методике, основанной на ОДМ 218.5.007-2016 [137]. Жёсткий штамп последовательно нагружали до создания давления в 50, 100, 150 и 200 кПа. Выбор максимального давления 200 кПа назначен по известному максимальному напряжению, передаваемому на поверхность земляного полотна. После достижения требуемого давления проводили каскадную разгрузку штампа до 100, 50 и 1 кПа. Далее загружали и раз-

грузжали штамп повторно, аналогично первому циклу. На каждой ступени измеряли перемещения индикаторами ИЧ-10, установленным на противоположных краях штампа, и усилия, создаваемые при нагружении штампа.

После выполнения первого испытания проводили увлажнение массива через поливочный пистолет с функцией лейки. Количество воды, подаваемой на массив ЗШС, контролировали электронно-цифровым счётчиком воды "Gardena" 08188-24.000.00. Дополнительный контроль влажности осуществлялся путём отбора проб в слоях по глубине массива. Выполнено несколько циклов испытаний при влажностях ЗШС 22%, 25%, 28%, 33% и 38% по массе (что соответствует значениям относительной влажности 0.58, 0.68, 0.74, 0.87, 1.00).

2.3.2 Оценка адекватности моделей напряжённого состояния в грунтовых массивах применительно к золошлаковой смеси

Результаты исследований первого цикла испытаний были проанализированы в первую очередь на предмет соответствия теории *Фрелиха* при использовании коэффициента распределительной способности среды, найденного на основе формул *Гонсалеза*. График приведён на рисунке 2.9.

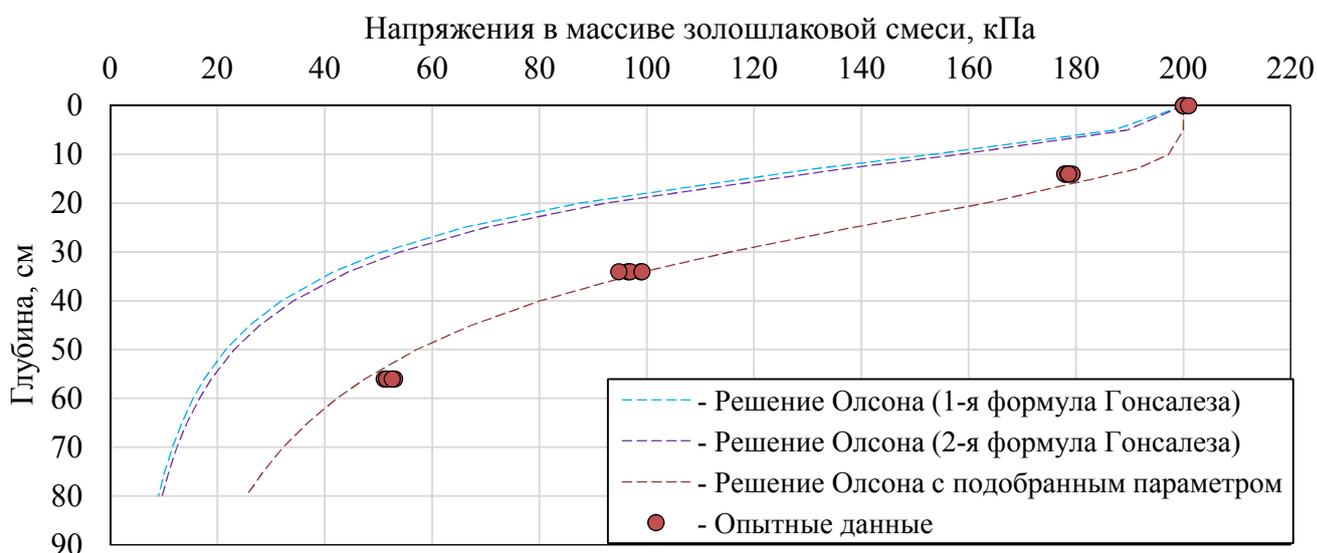


Рисунок 2.9 – График распределения напряжений прогнозом по формуле *Олсона* (с использованием формул *Гонсалеза*) и по опытными данным

Попытка описать распределение напряжений, используя решение *Олсона*, и первую, и вторую формулы *Гонсалеза*, показала непригодность такого решения

(ошибка аппроксимации составили 26,2 и 27,8% соответственно). В остальном же, формула *Олсона*, при подборе параметра ($n = 6,5$) описывает опытные данные со средней ошибкой аппроксимации (4,6%).

Помимо прочего, закономерности изменения CBR и модуля упругости от влажности имеют близкие значения. Следовательно, при определении распределительной способности среды *Фрелиха* на основе формул *Гонсалеза*, существенное влияние имеет влажность материала. В опытах же влияние влажности на распределение напряжений не отмечено, что указывает на непригодность формул *Гонсалеза* для определения параметра *Фрелиха* для ЗШС.

Сопоставление опытных данных с результатами расчёта по формулам механики зернистой среды проводилось с использованием формулы *Муллера* для определения коэффициента распределительной среды *Хара* через коэффициент бокового давления. Коэффициент бокового давления определялся через угол внутреннего трения по зависимостям, разработанным *Biares*, *Bolton*, *Jaky* и др. (см. таблице 2.6). Поскольку существует прямая связь между решением *Хара* и *Кандаурова*, на рисунке 2.10 представлен только анализ решения *Кандаурова*.

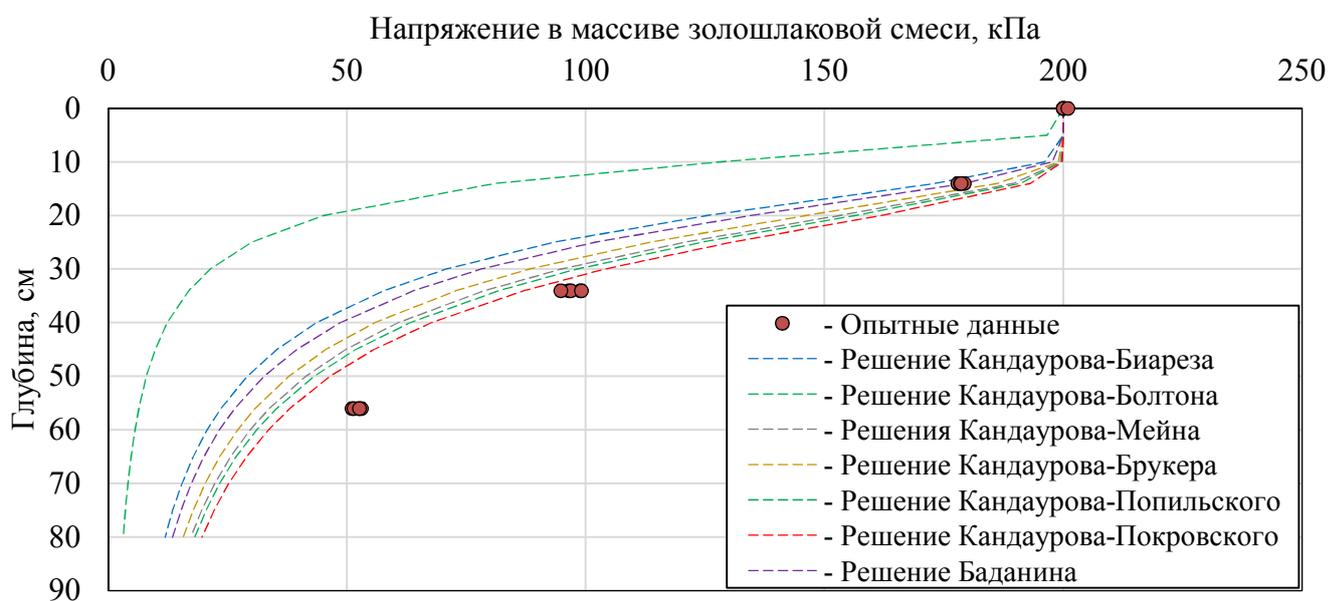


Рисунок 2.10 – Графики распределения напряжений по формуле Кандаурова и опытными данными

Наибольшее приближение при сравнении с опытными данными дала формула для определения коэффициента распределительной способности *Покровского*, ошибка аппроксимации для неё составила 11,1%. Наименьшей точностью облада-

ет зависимость *Попильского* (ошибка аппроксимации 56,1%). Все прочие зависимости, находятся между значениями ошибки от 11 до 25%.

Сравнение опытных данных и значений, прогнозируемых на основе аппроксимации *Пискунова*, осуществлялось путём использования зависимостей для определения коэффициента бокового давления (коэффициент затухания связан с коэффициентом бокового давления), что и для решений механики зернистой среды (см. таблице 2.6).

Среди представленных зависимостей (см. таблице 2.7), есть те, в которых формы связи между параметрами уже предложены (*Матвеев*), или неясны (*Пискунов*), либо полностью не определены (*Клейн*). Однако оценить форму распределения напряжений в них и сопоставить с опытными данными так же актуально. Сопоставление инженерных методов с опытными данными представлено на рисунке 2.11.

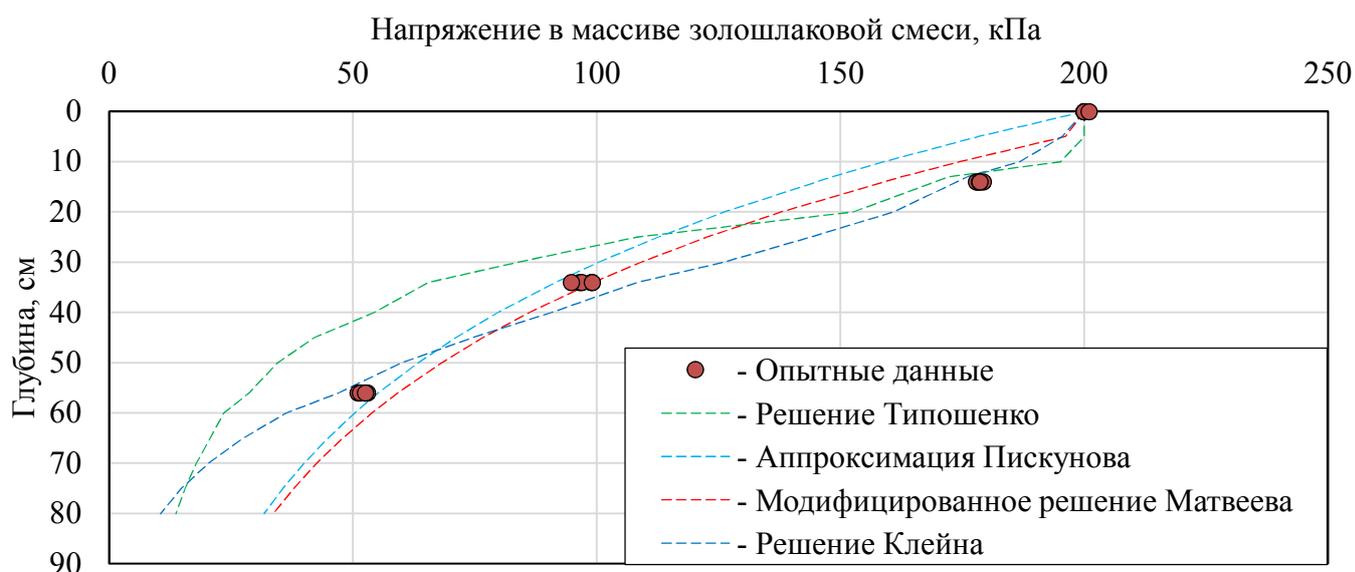


Рисунок 2.11 – Графики распределения напряжений, полученные по инженерным методам расчёта и опытными данным

Анализ показал, что при наибольшем приближении путём подбора параметра затухания решение *Пискунова* дало ошибку аппроксимации 7,2%. Подбор значения функции для зависимости предложенной *Клейном*, а именно $f(x)$, при наилучшем приближении дало ошибку аппроксимации 5,6%. Решение *Матвеева* (модифицированное), при расчёте с подстановкой коэффициента бокового давления из опытных данных [138] даёт ошибку аппроксимации 6,2%.

Сравнение с формулой *Клейна* проводилось условно, поскольку нет данных о виде функции угла трения в его формуле. По этой причине сравнение проводи-

лось только для оценки возможности описания формы и значений напряжений при подборе значения этой функции.

Формулы, предложенные *Гонсалесом* для определения коэффициента распределительной среды *Фрелиха*, оказались непригодны для прогнозирования распределения напряжений в массиве ЗШС. Установлено, что решение, выраженное для сплошной среды (*Олсона*) путём подбора параметра *Фрелиха*, даёт наиболее точные результаты для прогнозирования напряжённого состояния в массиве ЗШС среди всех исследованных зависимостей (ошибка аппроксимации 4,6%). Однако из-за ограниченности данных выявить связь между параметрами ЗШС и значением параметра *Фрелиха* пока не представляется возможным.

Решения механики зернистой среды (зависимости *Jaку*, *Bolton*, *Brucker-Ireland*, *Maуne-Kulhawу*, *Потильского* и *Покровского*) показали более низкую точность прогнозов, чем решение механики сплошной среды с подбором параметра. Однако при подборе параметра аппроксимация опытных значений решение *Кандаурова* даёт вполне приемлемые результаты со средней ошибкой 11,1%.

Наибольшая точность решения *Кандаурова*, достигаемая при подборе параметра распределяющей способности среды, составляет 6,5%. Хотя решение *Кандаурова* может описывать распределение напряжений в ЗШС, оно обладает меньшей точностью, чем решение *Олсона*. Причём, при использовании формулы *Муллера* для перехода к коэффициенту распределяющей среды *Хара*, значения распределений получаются идентичными решению *Кандаурова*.

Инженерные аппроксимации опытных данных (*Пискунов*, *Матвеев*) дали удовлетворительные результаты, но даже при подстановке коэффициента бокового давления, полученного из лабораторных испытаний, их точность оказалась меньше чем решение *Олсона*.

Формула, предложенная *Клейном* (так же, как и решение *Олсона*), даёт высокую аппроксимацию, но, в отличие от решения механики сплошной среды, позволяет прогнозировать только значения максимальных главных напряжений под осью круглого штампа. Кроме того, она не отражает особенностей формирования напряжённого состояния в массиве ЗШС разной плотности.

Поскольку распределение напряжений в массиве из ЗШС (в граничных значениях эксперимента) почти не зависит от влажности этого техногенного грунта, первый цикл испытаний не дал возможности определить связь параметров материала и распределения напряжений.

Установка датчиков велась по той же схеме (см. рисунке 2.8), что и в первом цикле испытаний. Испытания проводили при оптимальной влажности, степень уплотнения менялась от коэффициента уплотнения 0,85 до 1,00.

Результаты испытаний анализировали, ориентируясь на возможность описания новых опытных данных решением *Олсона* (через параметр *Фрелиха*). Поскольку в литературе не нашлось данных об определении параметра *Фрелиха* через параметры грунта, подбор параметра осуществлялся путём подбора, по критерию наименьшей ошибки аппроксимации. Графические результаты подбора и результаты экспериментов представлены на рисунке 2.12.

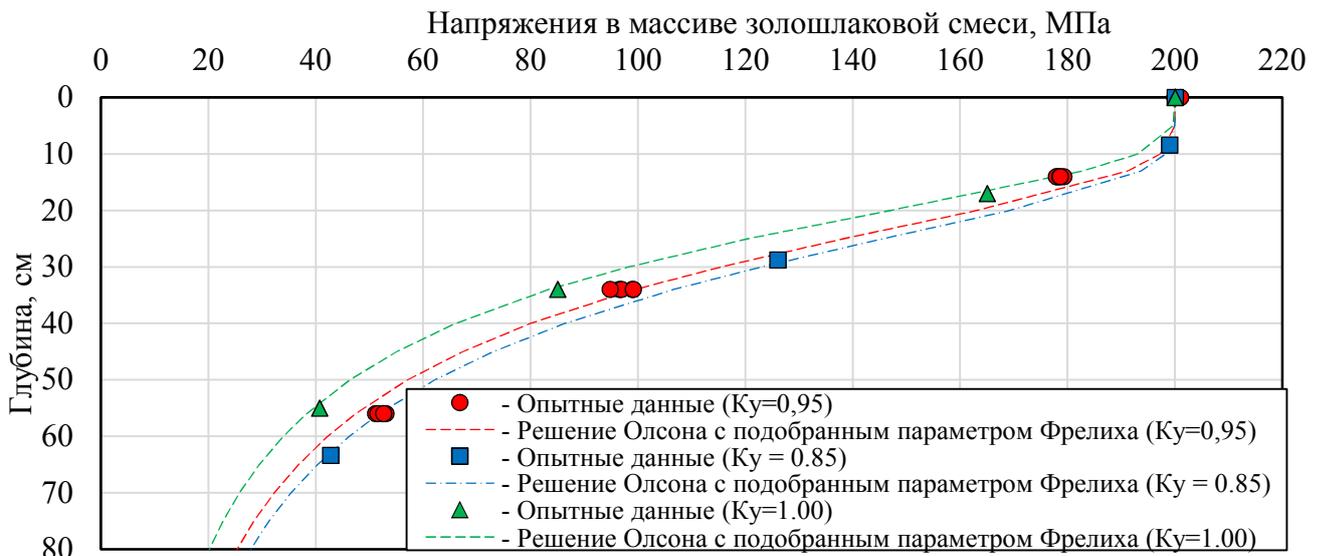


Рисунок 2.12 – Графики результатов второго цикла экспериментов и решения Олсона

Ошибка аппроксимации при описании полного комплекса опытных данных составила для этого решения 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 *Покровского* (ошибка аппроксимации 7,5%). Результаты сопоставления представлены на рисунке 2.13.

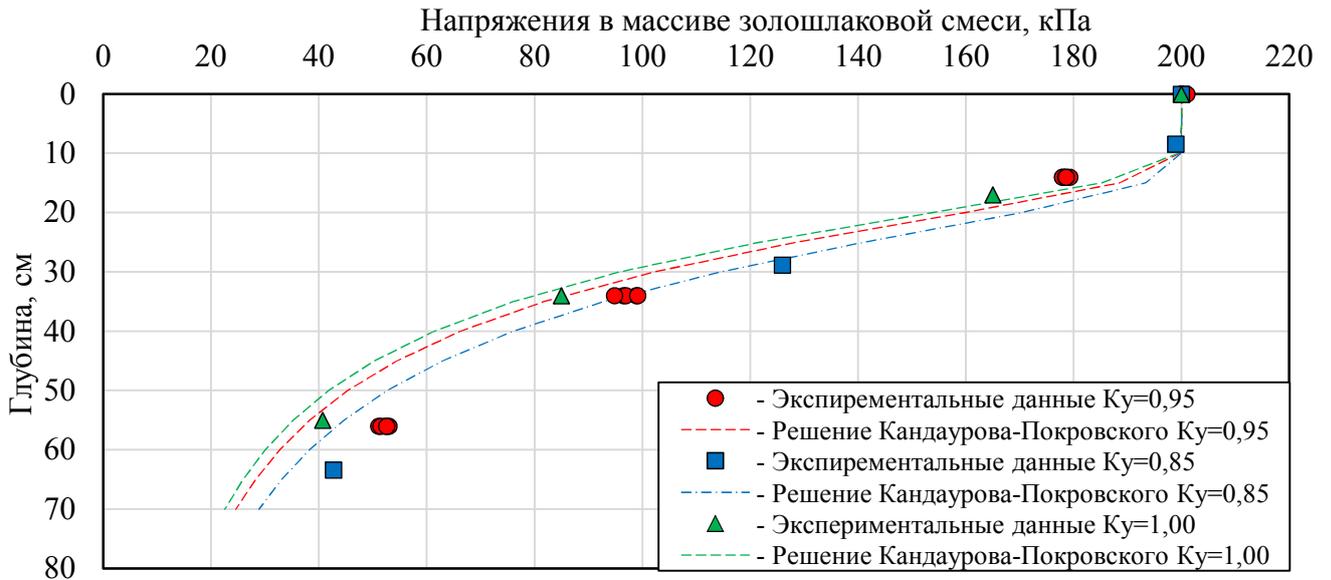


Рисунок 2.13 – Графики результатов второго цикла экспериментов и решения Кандаурова

Результаты исследований показали, что наибольшую точность прогнозирования напряжений в массиве из ЗШС даёт подход, разработанный *Фрелихом*, параметр материала в котором определен путём подбора. В тоже время, была обнаружена ярко выраженная корреляция между степенью уплотнения и подобранными параметрами *Фрелиха*, уравнение которой для ЗШС имеет вид:

$$n = 14 \cdot K_y - 6,8; \quad (2.19)$$

где: n – параметр *Фрелиха*;

K_y – коэффициент уплотнения.

Таким образом, параметр *Фрелиха* был впервые связан с параметрами структуры ЗШС (плотности и влажности). Для прогнозирования главных вертикальных напряжений от внешней нагрузки с учётом состояния массива ЗШС требуется внести зависимость, для определения параметра *Фрелиха* в формулу *Олсона*. Аналогично для определения главных горизонтальных напряжений требуется внесение зависимости в предлагаемое *Александровым* решение [117].

Полученные таким образом модели не учитывают собственный вес грунта, поэтому в них необходимо внести рекомендованный *Мерзликиным* компонент собственного веса. Математические модели для прогнозирования напряжений преобразуются в вид, представленный в таблице 2.8.

Таблица 2.8 – Уравнения для определения главных напряжений в массиве из ЗШС при действии нагрузки от штампа и веса вышележащих слоев

Название компонента	Формула для определения соответствующего компонента
Вертикальное нормальное напряжение, кПа	$\sigma_1 = \gamma_{cp} \cdot z + p \left[1 - \frac{\left(\frac{z}{R}\right)^{(14K_y - 6,8)}}{\left(1 + \left(\frac{z}{R}\right)^2\right)^{(14K_y - 6,8)/2}} \right]$
Горизонтальные нормальные напряжения, кПа	$\sigma_3 = \gamma_{cp} \cdot z \cdot \frac{1 + 2 \cdot \mu}{2} + p \left(\left(\frac{1 + 2 \cdot \mu}{2}\right) - (1 + \mu) \cdot \left[1 + \left(\frac{R}{z}\right)^2 \right]^{\left(\frac{14K_y - 6,8}{3}\right)} + \frac{1}{2} \cdot \left[1 + \left(\frac{R}{z}\right)^2 \right]^{(14K_y - 6,8)} \right)$
Примечание: K_y – коэффициент уплотнения ЗШС.	

Так как формула *Олсона* является другой записью решения *Фрелиха*, можно модифицировать более общее решение *Фрелиха* для прогнозирования напряжённого состояния в массиве грунтов. Тогда в общем случае, для прогнозирования напряжённого состояния в насыпи из ЗШС будут справедливы формулы, приведённые в таблице 2.9.

Таблица 2.9 – Общие уравнения для определения напряжений в массиве ЗШС при действии сосредоточенной силы

Название компонента тензора	Формула для определения соответствующего компонента тензора
Радиальное напряжение, кПа	$\sigma_r = \frac{(14K_y - 6,8) \cdot P}{2 \cdot \pi \cdot R^2} \cdot \cos^{14K_y - 8,8} \nu$
Вертикальное нормальное напряжение, кПа	$\sigma_z = \frac{(14K_y - 6,8) \cdot P}{2 \cdot \pi \cdot R^2} \cdot \left(\frac{z}{R}\right)^{14K_y - 6,8}$
Горизонтальные нормальные напряжения, кПа	$\sigma_h = \frac{(14K_y - 6,8) \cdot P}{2 \cdot \pi \cdot R^2} \cdot \cos^{14K_y - 8,8} \nu \cdot \sin^2 \nu$
Касательное напряжение, кПа	$\tau = \frac{(14K_y - 6,8) \cdot P}{2 \cdot \pi \cdot R^2} \cdot \cos^{14K_y - 7,8} \nu \cdot \sin \nu$
Примечание: n – коэффициент распределения напряжений, введенный <i>Фрелихом</i> ; ν – угол между осью симметрии полупространства и нормалью площадки, град; P – нормальная сила, приложенная к поверхности полупространства, кН; R – расстояние от точки приложения силы до точки в которой определяется напряжение, м; K_y – коэффициент уплотнения.	

2.4 Особенности формирования напряжённого состояния в насыпи из золошлаковой смеси при воздействии динамической нагрузки

Анализируя результаты исследований по воздействию кратковременных динамических нагрузок на грунт земляного полотна (например, резких колебаний автомобилей при движении по неровной дороге) [139], мы пришли к выводу о необходимости расширения этих исследований применительно к особенностям формирования напряжённого состояния в насыпи из ЗШС.

Особенность воздействия кратковременной динамической нагрузки связана с высокой скоростью её приложения (фактически это удар), в ходе чего возникает резкая концентрация напряжений в точке приложения с малым сроком действия нагрузки, что в совокупности вызывает волновой характер формирования напряжённого состояния. Отличие между формированием напряжённого состояния в условиях статики и динамики вызвало необходимость изучения особенностей динамических свойств среды (ЗШС). Для анализа динамических свойств среды использовался анализатор спектра модели ZET 017-U8 и пьезоэлектрические акселерометры BC 111 производства фирмы ZETLAB (рисунок 2.14).

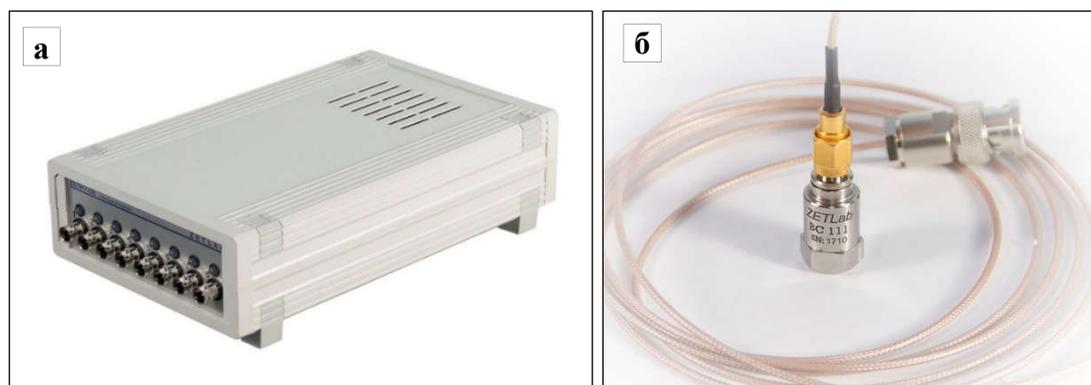


Рисунок 2.14 – Оборудование, использованное для экспериментов:
а – анализатор спектра модели ZET 017-U8; б – пьезоэлектрический акселерометр BC 111

Использование акселерометров, давало возможность получать значения ускорений по глубине массива ЗШС от действия кратковременной нагрузки.

Укладка акселерометров выполнялась в уже сформированный массив ЗШС. На первом этапе в центре испытательного лотка устраивалось отверстие диаметром 10см глубиной 60 см.

Для укладки первого датчика дно отверстия профилировали и доуплотняли штангой от прибора стандартного уплотнения. После чего датчик устанавливался в проектное положение и засыпался пятью сантиметрами ЗШС с уплотнением. После укладки первого слоя засыпки, осуществлялось уплотнение ЗШС штангой от прибора стандартного уплотнения, путём нанесения 20 ударов по одному следу. Процедура повторялась через 5 см засыпки, вплоть до укладки датчика № 2.

Укладка второго и последующих датчиков осуществлялась аналогичным образом. Горизонтальность площадки контролировалась цилиндрическим уровнем. Проектное положение контролировалось отвесом, который прикладывался на пересечении направляющих нитей. Для прокладки кабелей прокладывался канал. Процесс укладки приведён на рисунке 2.15.

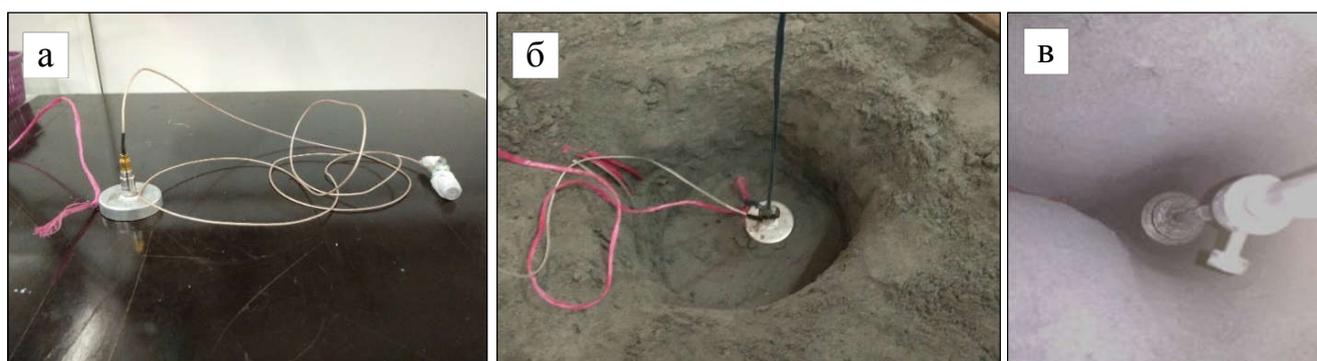


Рисунок 2.15 – Установка датчиков в лоток, заполненном ЗШС: а – пьезоэлектрический акселерометр с дополнительной «юбкой-уширителем»; б – установка датчика в проектное положение с помощью отвеса; в – трамбование ЗШС в процессе засыпки датчиков

На подготовленном массиве ЗШС с уложенными датчиками проводилась серия экспериментов для оценки напряжённого состояния, возникающего от действия однократной ударной нагрузки. Для приложения нагрузки использовался прибор динамического нагружения с диаметром штампа 30 см (рисунок 2.16) к поверхности которого жёстко закрепляли два акселерометра. Нагрузка прилагалась за счёт энергии падающего груза массой 5,0 кг с высоты 100 см.

Результаты динамических испытаний сопоставлены с результатами статических испытаний. При этом установлено, что результаты динамического воздействия могут быть описаны решениями, основанными на теории *Фрелиха* с ошибкой аппроксимации 2,7%.

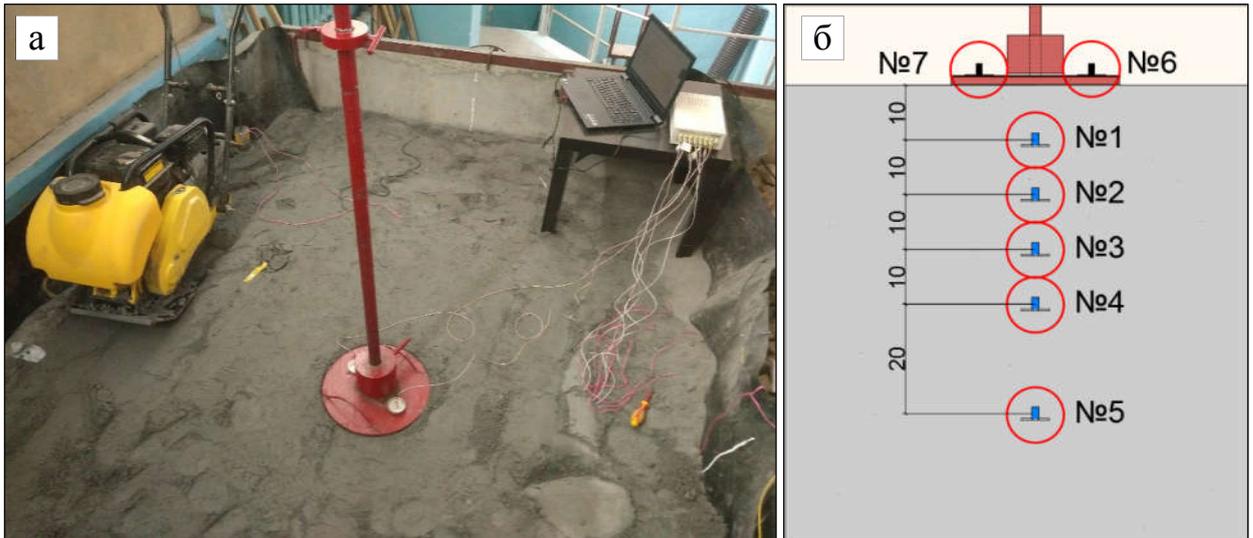


Рисунок 2.16 – Динамические испытания по оценки напряжённого состояния от действия однократной ударной нагрузки: а – оборудование для испытаний; б – схема расположения датчиков

Следовательно, для их описания можно применять ранее рекомендованные нами уравнения (таблице 2.9) с учётом динамичности нагрузки. Результаты сопоставления отражены на рисунке 2.17.

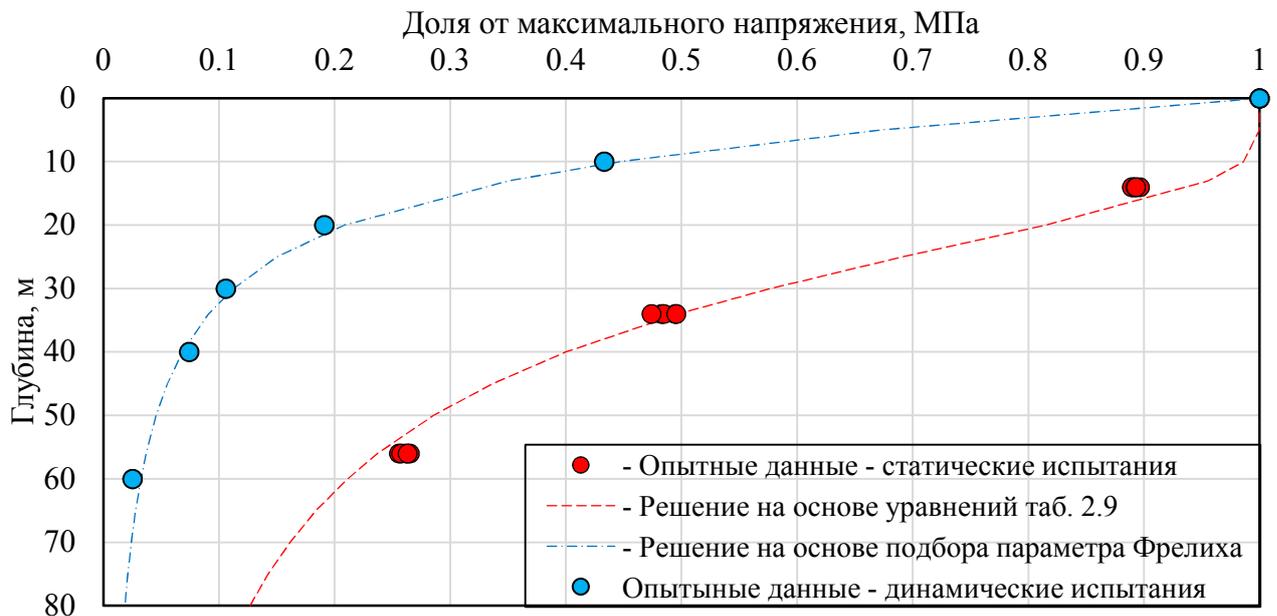


Рисунок 2.17 – Сопоставления затухания напряжений от динамической и статической нагрузок, приложенных по поверхности штампа по глубине массива из ЗШС

Различия в характере затухания напряжений по глубине (по оси штампа) могут быть учтены путём изменения компонент уравнений (таблица 2.9), ответственных за описание параметра *Фрелиха*. Введя в формулы для прогнозирования напряжённого состояния поправку, учитывающую характер приложения нагрузки (коэффициент динамичности), мы получили уравнения (таблица 2.10).

Таблица 2.10 – Общие уравнения для определения напряжений в массиве из ЗШС при действии сосредоточенной силы (с учётом характера приложения нагрузки)

Название компонента тензора	Формула для определения соответствующего компонента тензора
Радиальное напряжение, кПа	$\sigma_r = \frac{(14K_y - 6,8) \cdot P}{2 \cdot d \cdot \pi \cdot R^2} \cdot \cos \frac{14K_y - 6,8}{d} \cdot \nu$
Вертикальное нормальное напряжение, кПа	$\sigma_z = \frac{(14K_y - 6,8) \cdot P}{2 \cdot d \cdot \pi \cdot R^2} \cdot \left(\frac{z}{R} \right)^{\frac{14K_y - 6,8}{d}}$
Горизонтальные нормальные напряжения, кПа	$\sigma_h = \frac{(14K_y - 6,8) \cdot P}{2 \cdot d \cdot \pi \cdot R^2} \cdot \cos \frac{14K_y - 6,8}{d} \cdot \nu \cdot \sin^2 \nu$
Касательное напряжение, кПа	$\tau = \frac{(14K_y - 6,8) \cdot P}{2 \cdot d \cdot \pi \cdot R^2} \cdot \cos \frac{14K_y - 6,8}{d} \cdot \nu \cdot \sin \nu$

Введя в формулы для определения главных напряжений в массиве из ЗШС при действии нагрузки от штампа и веса вышележащих слоев (таблица 2.8) поправку, учитывающую характер приложения нагрузки (коэффициент динамичности), мы получили уравнения (таблица 2.11), которые служат для прогнозирования напряжений от транспортной нагрузки в слоях под дорожной одеждой.

Таблица 2.11 – 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	Формула для определения соответствующего компонента
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	$\sigma_3 = \gamma_{cp} \cdot z \cdot \frac{1+2 \cdot \mu}{2} + p \left(\left(\frac{1+2 \cdot \mu}{2} \right) - (1+\mu) \cdot \left[1 + \left(\frac{R}{z} \right)^2 \right]^{\left(\frac{14K_y - 6,8}{3d} \right)} + \frac{1}{2} \cdot \left[1 + \left(\frac{R}{z} \right)^2 \right]^{- (14K_y - 6,8)/d} \right)$

Таким образом, общие уравнения (таблица 2.10) позволяют прогнозировать напряжённое состояние в земляном полотне из ЗШС, возникающие под действием

сосредоточенной нагрузки (статической или динамической), что требуется для расчета насыпей на слабом основании. А уравнения для определения главных напряжений (таблица 2.11.) нужны для оценки напряженного состояния при проектировании дорожных одежд по условию сдвигоустойчивости.

Причём, варьируя параметр динамичности, можно описывать различные виды динамических нагружений, а используя известные из механики грунтов решения, можно вывести на основе этих уравнений решения для разных форм площадки приложения нагрузки и эпюр приложения нагрузки.

Выводы по второй главе

1 В настоящее время преимущественно используют три основных подхода к прогнозированию напряжённого состояния массива грунта: на базе механики сплошных сред, механики зернистых сред или инженерных методах, аппроксимирующих данные экспериментов.

2 Исследование теоретических предпосылок и решение задач по прогнозированию НДС в массиве из ЗШС позволило оценить результаты расчётов по каждому из трёх вышеуказанных подходов.

2.1 Инженерные аппроксимации опытных данных (*Пискунов, Матвеев*) дали удовлетворительные результаты, но даже при подстановке коэффициента бокового давления, полученного из лабораторных испытаний, их точность оказалась меньше чем решение *Олсона*.

2.2 При рассмотрении массива ЗШС с позиции механики зернистых сред наибольшая точность решения *Кандаурова*, достигаемая при подборе параметра распределяющей способности среды, составляет 6,5 %. Хотя решение *Кандаурова* может описывать распределение напряжений в ЗШС, оно обладает меньшей точностью, чем решение *Олсона*.

2.3 Решение, выраженное для сплошной среды (*Олсона*) путём подбора параметра *Фрелиха*, может дать наиболее точные результаты для описания напряженного состояния в массиве ЗШС среди всех исследованных зависимостей. Однако из-за

ограниченности данных выявить связь между параметрами ЗШС и значением параметра *Фрелиха* до наших исследований не представлялось возможным.

Нами осуществлён подбор параметра *Фрелиха* для описания распределения напряжений в массиве ЗШС по критерию наименьшей ошибки аппроксимации. Эта ошибка при описании опытных данных составила всего 3,2 %. Также нами, параметр *Фрелиха* был связан с коэффициентом уплотнения ЗШС.

Это позволило получить достоверное математическое описание напряженного состояния, возникающего в насыпи из ЗШС под действием транспортной нагрузки.

3 Исследований формирования напряженного состояния в насыпях из ЗШС при воздействии кратковременной динамической нагрузки ранее не проводилось.

3.1 Экспериментальные исследования позволили установить, что результаты динамического воздействия на массив ЗШС могут быть описаны решениями, основанными на теории *Фрелиха* с ошибкой аппроксимации 2,7 %.

3.2 Вводя в формулы для прогнозирования напряжённого состояния поправку, учитывающую характер приложения нагрузки (коэффициент динамичности), мы получили уравнения, позволяющие прогнозировать напряжённое состояние в земляном полотне из ЗШС, возникающие при действии кратковременной динамической нагрузки. Варьируя параметр динамичности, можно описывать различные виды динамических нагружений, а используя известные из механики грунтов решения, можно вывести на основе этих уравнений решения для разных форм площадки приложения нагрузки и эпюр приложения нагрузки.

3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСЧЁТНЫХ ПАРАМЕТРОВ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗОЛОШЛАКОВЫХ СМЕСЕЙ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА

3.1 Методы определение расчётных параметров грунтов для проектирования земляного полотна автомобильных дорог

3.1.1 Прочностные характеристики

Опытное определение сопротивления грунтов сдвигу может производиться различными методами: по результатам прямого среза, плоского среза, простого сдвига, кольцевого среза, трёхосного сжатия, вдавливания, среза целика грунта, вращательного среза и т.д.

В России, в соответствии с ГОСТ 12248-2010 [140], определение прочностных характеристик грунтов (угла внутреннего трения и удельного сцепления) традиционно производят на приборах прямого среза. Сущность данного метода заключается в измерении сдвигающего усилия необходимого для разрушения образца по фиксированной поверхности при предварительном нагружении образца нагрузкой, нормальной к плоскости среза.

С внедрением компьютерных технологий, приборы среза стали оснащать автоматизированным управлением. Это позволяет исключить влияние человека, повысить точность и удобство испытаний. Приборы, использованные нами для исследований, представлены на рисунке 3.1.

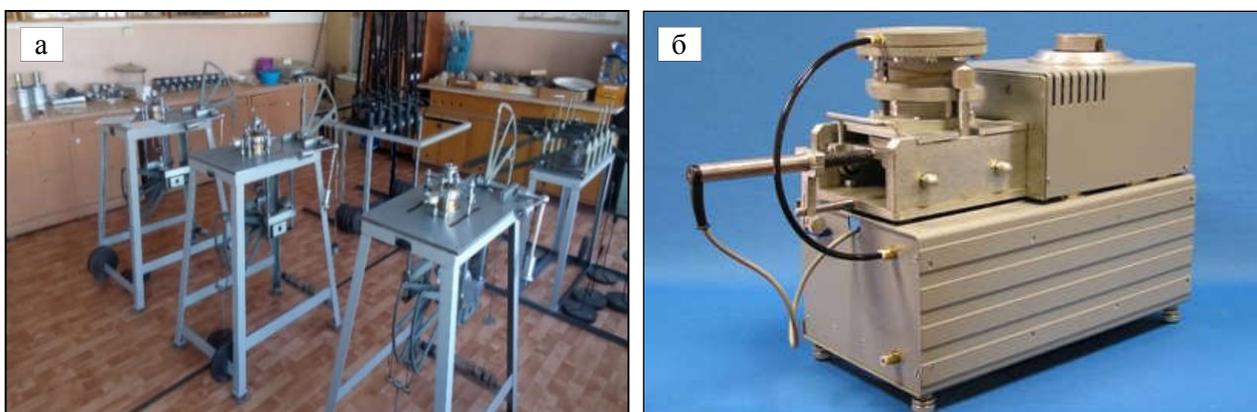


Рисунок 3.1 – Оборудование для исследований: а – приборы прямого сдвига ПСГ-3М конструкции «ГипродорНИИ»; б – приборы прямого сдвига СПКА 40/35-25 конструкции «ГЕОТЕК»

В Норвегии и Англии предпочтение отдается другому типу приборов – приборам простого сдвига, поскольку считается, что их использование обусловлено близостью вида разрушения грунта в приборе простого сдвига и основании гравитационных платформ или в массиве грунта при потере устойчивости склона. Причем сравнение результатов испытаний, выполненных с использованием приборов прямого среза и приборов простого сдвига, показывает большие значения прочности ϕ , c и жёсткости (модуль сдвига G) в приборе прямого среза (*Hanzawa и пр., 2007*) [141]. Это требуется учитывать при расчётах склонов.

Помимо приборов прямого среза и простого сдвига есть приборы, в которых определяют параметры остаточной прочности: угла внутреннего трения ϕ_r и сил сцепления c_r после прохождения первичного среза. Определение остаточной прочности с использованием приборов кольцевого среза включено в стандарты BS 1377-7 [142] и ASTM D 6467-99 [143]. В то время как стандартами РФ рекомендуется выполнять повторные испытания по уже сформированной поверхности сдвига.

Метод определения значений параметров прочности ϕ и c в условиях трёхосного сжатия в большей степени соответствует напряжённому состоянию грунта в основании сооружения. Испытание проводится на приборе, в котором образец грунта подвергается всестороннему гидростатическому и добавочному вертикальному давлению (рисунок 3.2).

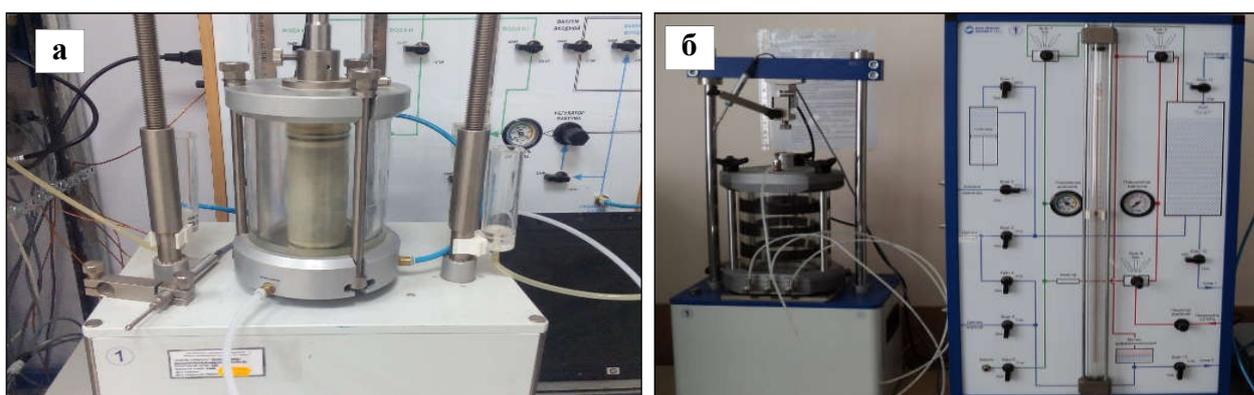


Рисунок 3.2 – Приборы трёхосного сжатия конструкции «ГЕОТЕК»: а – стабилометр типа «А» первого поколения; б – стабилометр типа «А» второго поколения

Для определения прочностных характеристик грунтов проводят серию испытаний при различных соотношениях давлений, доводя образец до разрушения, в результате каждого опыта получают значения наибольшего σ_1 и наименьшего σ_3

главных нормальных напряжений в момент разрушения. Графически зависимость между главными касательными и нормальными напряжениями представляют с помощью кругов Мора.

Сравнение результатов испытаний в условиях простого сдвига с результатами испытаний в условиях трёхосного сжатия или прямого среза, свидетельствуют о том, что в условиях простого сдвига прочность и жёсткость получаются ниже [141]. Несмотря на совершенство стабилометров (по сравнению с прочими приборами), необходимо учитывать, что их применение оправдано при изучении грунтов в основаниях сооружений и высоких насыпей в большей мере для изучения деформируемости материала.

Помимо двух параметров прочности, в расчётах с применением программных комплексов, реализующих моделирование на основе метода конечных элементов (*Mohr-Coulomb*, *Drucker-Prager*, *Hardening soil*), вводят дополнительный параметр – угол дилатансии ψ [54, 57]. Поскольку он определяется из сложных и трудоёмких экспериментов, для приближённого определения угла дилатансии используют эмпирическую зависимость, связывающую этот параметр с углом внутреннего трения: $\psi \approx \varphi - 30^\circ$. При величине φ меньше 30° угол дилатансии приравнивают нулю [58].

3.1.2 Деформационные характеристики

Деформациями грунтов называют их способность изменять форму и объём под действием внешних усилий, не приводящих к критическим разрушениям структуры грунта. При этом деформационные характеристики грунтов описывают зависимость изменения деформации от изменения нагрузки.

Величины деформационных характеристик для одного и того же грунта с одинаковыми значениями плотности-влажности зависят от напряжений, скорости их приложения и длительности действия. Деформации могут меняться, по абсолютной и относительной величине, развиваться быстро или медленно во времени, быть обратимыми и необратимыми. Именно с последним различием связана основная дифференциация параметров деформационных характеристик.

Классическим параметром деформации тела является модуль упругости грунта E (модуль Юнга), который является коэффициентом пропорциональности между вертикальным давлением на грунт и относительной вертикальной деформацией грунта и коэффициент Пуассона, который характеризует способность грунта расширяться в боковом направлении при действии на него вертикальной нагрузки.

Модули упругости, применительно к грунтам земляного полотна, традиционно определяют с использованием лабораторных и полевых методов испытаний штампами [144, 145]. Фрагменты наших испытаний представлены на рисунке 3.3.



Рисунок 3.3 – Лабораторный и полевой метод определения модуля упругости: а – испытания по методике рычажного пресса; б – штамповые испытания

Упругий модуль можно измерить в лаборатории, используя динамические трёхосные испытания или резонансные испытания образцов в условиях одноосного или трёхосного сжатия. Однако это связано с необходимостью отбора образцов и не всегда возможно или удобно.

Коэффициент Пуассона – абсолютная величина отношения поперечной к продольной относительной деформации образца материала. Этот коэффициент зависит не от размеров тела, а от природы материала, из которого изготовлен образец. Определение коэффициента может производиться по результатам стабилметрических испытаний, в компрессионных приборах, оборудованных устройством измерения бокового давления, или по способу одноосного сжатия образца грунта, заключённого в эластичную форму с малым сопротивлением растяжению.

Коэффициент Пуассона и модуль Юнга полностью характеризуют упругие свойства изотропного материала. Хотя грунт и не является полностью упругим и изотропным, для моделирования деформаций до допредельной стадии эти параметры являются основными для выполнения геотехнических расчётов.

Так же следует отметить, что грунты показывают линейно упругое поведение при относительно небольших нагрузках, не превосходящих предела пропорциональности, а также после определённого количества циклов «нагрузка – разгрузка». В связи с этим в механике грунтов принято отличать модуль упругости от модуля общей деформации $E_{общ}$, учитывающего как упругие, так и пластические деформации.

Методики полевого определения модулей деформации изложены в ГОСТ 20276-2012 [144]. Подобные методы лабораторных испытаний рассмотрены также в AASHTO T 307 [146], ASTM D1195 [147] и ASTM D1196 [148].

В отличие от РФ и стран СНГ, за рубежом, в основном проводились испытания по определению прочности грунтов, меньшее внимание уделялось деформационному поведению грунтов. Это можно обнаружить, рассматривая стандарты BS 1975 и BS 1990-х годов издания, в которых не регламентированы условия определения параметров деформируемости. В стандартах США ASTM D2850 [149] и ASTM D4767 [150] также нет подобных указаний. В основном это связано с переходом в проектировании сооружений от методов теории упругости к полуэмпирическим методикам расчёта допустимой несущей способности земляного полотна – определению калифорнийского числа несущей способности.

калифорнийское число несущей способности (CBR) – это метод определения механической прочности грунтов, несущих слоёв оснований и подстилающих грунтов перед строительством дорог. Сущность испытания сводится к измерению давления, необходимого для вдавливания плунжера стандартного размера в массив грунта или материала основания и сравнения его с усилием, требующимся для вдавливания плунжера в образец стандартизированного материала.

С недавнего времени метод определения CBR отражён в предварительном национальном стандарте РФ – ПНСТ 1.2.418-1.018.18 [121], который является адаптацией ряда иностранных документов.

Порядок проведения CBR теста описан в ASTM Standards D1883-16 (для приготовленных в лаборатории образцов) [151], в D4429 [152] (для образцов ненарушенного строения) и AASHTO T193 [153]. Также порядок полностью описан в BS

1377: Soils for civil engineering purposes: Part 4, Compaction related tests, ив Part 9: Insitu tests. В отличие от ПНСТ эти документы при обработке требуют вычисления давлений, действующих на материал от штампа, а в ПНСТ вычисление CBR ведётся путём сравнения усилия, приложенного к штампу, а не давления под его подошвой.

3.1.3 Методы испытаний для определения механических характеристик золошлаковых смесей

Для использования современных упругопластических моделей, например, упрочняющегося грунта, требуется определить значения ряда специфических показателей, которые можно получить только путём испытаний на трёхосное сжатие. Например, в стабилометре можно определить деформационные параметры в условиях разного бокового давления, такие как: секущего модуля упругости E_{50} , модуля разгрузки E_{ur} , одометрического модуля упругости E_{oed} , коэффициента Пуассона ν , показателя m , характеризующего упрочнение грунта и базового уровня напряжений p_{ref} .

В случае трёхосных испытаний хотя бы при трёх уровнях бокового давления можно определить не только весь перечень значений деформационных параметров модели *Hardening soil*, но и угол внутреннего трения, и удельное сцепление. Однако трудоёмкость и стоимость этих исследований существенно выше, чем отдельные исследования в приборах прямого среза и одноосного сжатия.

Как отмечалось ранее (см. п.1), ЗШС может быть высококальциевой (*Class C*) или низкокальциевой (*Class F*).

Высококальциевые золы-уноса сухого улавливания могут представлять собой самостоятельное вяжущее, они в данной работе не рассматривались.

Большая часть ЗШС РФ относится к низкокальциевым (инертным) ЗШС. Низкокальциевые и гидратированные в золоотвалах высококальциевые ЗШС по своим свойствам и поведению представляют техногенные антропогеннообразованные грунты, не проявляющие вяжущих свойств. К ним можно применять те же методики испытаний и нормативные документы, что и для природных грунтов. Поэтому в работе были выбраны следующие виды и методы исследований:

- метод прямого одноплоскостного среза грунтов в консолидировано-дренированных условиях;
- компрессионного сжатия грунта;
- определения модуля упругости материала на рычажном прессе;
- определения модуля деформации в приборе трёхосного сжатия;
- определения модулей штамповыми испытаниями;
- определения CBR.

Выбор этих видов и методов экспериментальных исследований связан с тем, что в литературе имеются зависимости для пересчёта параметров прочности теории Кулона-Мора (*Амонтона-Кулона*), полученных при различных методах исследований. Кроме того, метод одноплоскостного среза наиболее удобен и распространён в мировой практике. Аналогичные зависимости имеются в публикациях, посвящённых деформационным параметрам грунтов. Поэтому для сопоставления результатов наших исследований с данными разных авторов были выбраны те методы, которыми они пользовались в своих исследованиях.

Кроме того, в перечень наших испытаний добавлен основной метод, позволяющий получать значение модуля упругости земляного полотна автомобильных дорог согласно нормативам РФ. Нами использован метод трёхосного сжатия, из результатов испытаний которого можно получить значение коэффициента Пуассона ЗШС, который раньше не определялся.

3.2 Исследование прочностных характеристик золошлаковых смесей в зависимости от плотности и влажности

Наибольшее влияние на механические характеристики грунтовых материалов оказывает изменение таких параметров как: влажность и степень уплотнения. На них влияют факторы среды, которые на протяжении эксплуатации сооружения вызывают изменения в самой структуре грунтового материала. Следовательно, в ходе жизненного цикла автомобильных дорог изменяются прочностные и деформационные параметры любого грунта. Опубликованных результатов исследований по этому направлению для ЗШС очень мало [74, 77, 78]. Поэтому в рамках исследования была определена за-

висимость прочностных параметров ЗШС от степени уплотнения, критерием которого принят коэффициент уплотнения, и влажности материала. Величина максимальной плотности сухого грунта и оптимальной влажности ЗШС определялась в соответствии с требованиями ГОСТ 22733-2016 [154].

Для земляного полотна автомобильных дорог целесообразны исследования ЗШС со степенью уплотнения, соответствующей коэффициенту уплотнения от 0,90 до 1,05 и влажностью от 0,3 относительной влажности (около 10%) до влажности, соответствующей полному водонасыщению. Формование образцов выполнялось в форме большого прибора стандартного уплотнения, варьируя степень уплотнения числом ударов груза прибора. Далее в уплотнённую ЗШС врезалось кольцо для формирования образца с требуемыми размерами (рисунок 3.4).



Рисунок 3.4 – Подготовка образца: а – кольцо врезано в образец в большом приборе стандартного уплотнения; б – формирование образца с требуемыми размерами

Каждый из образцов повторно взвешивался для определения плотности, а из остатков грунта отбирались пробы на влажность, что позволяло контролировать параметры образца. Образцы ЗШС при полном водонасыщении изготавливали при оптимальной влажности и капиллярно насыщали водой в камере прибора.

Определение угла внутреннего трения и удельного сцепления осуществляли по ГОСТ 12248-2010. Исследования проводили на приборе прямого среза ПСГ-3М и на срезном приборе комплекса АСИС (рисунок 3.5). По гранулометрическому составу ЗШС близки к мелким пескам. Поэтому величину зазора принимали 1 мм.

Испытания ЗШС с разной влажностью проводили в пределах возможных значений влажности земляного полотна, которая изменяется в течение жизненного цикла дороги. После завершения испытаний проводили статистическую обра-

ботку результатов измерений и выполняли вычисления прочностных параметров материала по методике ГОСТ 20522-2012 [155]. Для каждого значения фактора определяли не менее девяти пар параметров (сопротивление срезу и соответствующий им уровень нормальных напряжений).



Рисунок 3.5 – Оборудование для исследований: а – приборы ПСГ-3М; б – приборы комплекса АСИС

После определения нормативных значений оценивали степень соответствия значений выборки нормальному закону, оценивали среднеквадратичное отклонение выборки, которое является основой для нахождения грубых ошибок. Далее определяли коэффициент надёжности и от него переходили к расчётным параметрам. Результаты вычислений сведены в таблице 3.1 [156].

Таблица 3.1 – Прочностные параметров ЗШС

Влияющий фактор		Угол внутреннего трения, град.							
		нормативные значения				расчётные параметры			
Коэффициент уплотнения		0,90	0,95	1,00	1,05	0,90	0,95	1,00	1,05
Влажность, %	12,0	26,7	29,6	31,6	35,2	25,4	28,2	30,1	33,5
	16,0	26,5	28,2	31,8	35,8	25,2	26,9	30,3	34,1
	20,5	26,3	28,3	31,9	36,2	25,0	27,0	30,4	34,5
	25,7	29,1	34	38,2	41,6	26,7	30,4	34,1	37,1
	33,0	27,4	28,4	32,2	36,5	26,1	27,0	30,7	34,8
		Удельное сцепление, кПа							
		нормативные значения				расчётные параметры			
Коэффициент уплотнения		0,90	0,95	1,00	1,05	0,90	0,95	1,00	1,05
Влажность, %	12,0	15	37	39	44	14	35	39	42
	16,0	22	48	51	55	21	46	49	52
	20,5	31	58	67	64	27	51	59	56
	25,7	26	38	40	33	24	35	40	33
	33,0	7	29	31	22	7	28	30	21

Результаты экспериментальных исследований сопоставляли с данными *Grunchot, Pal, Prabakar, Mohanty* [76,77,80,85]. На рисунке 3.6 представлены результаты сопоставления прочностных параметров образцов ЗШС в зависимости от коэффициента уплотнения при оптимальной влажности смеси.

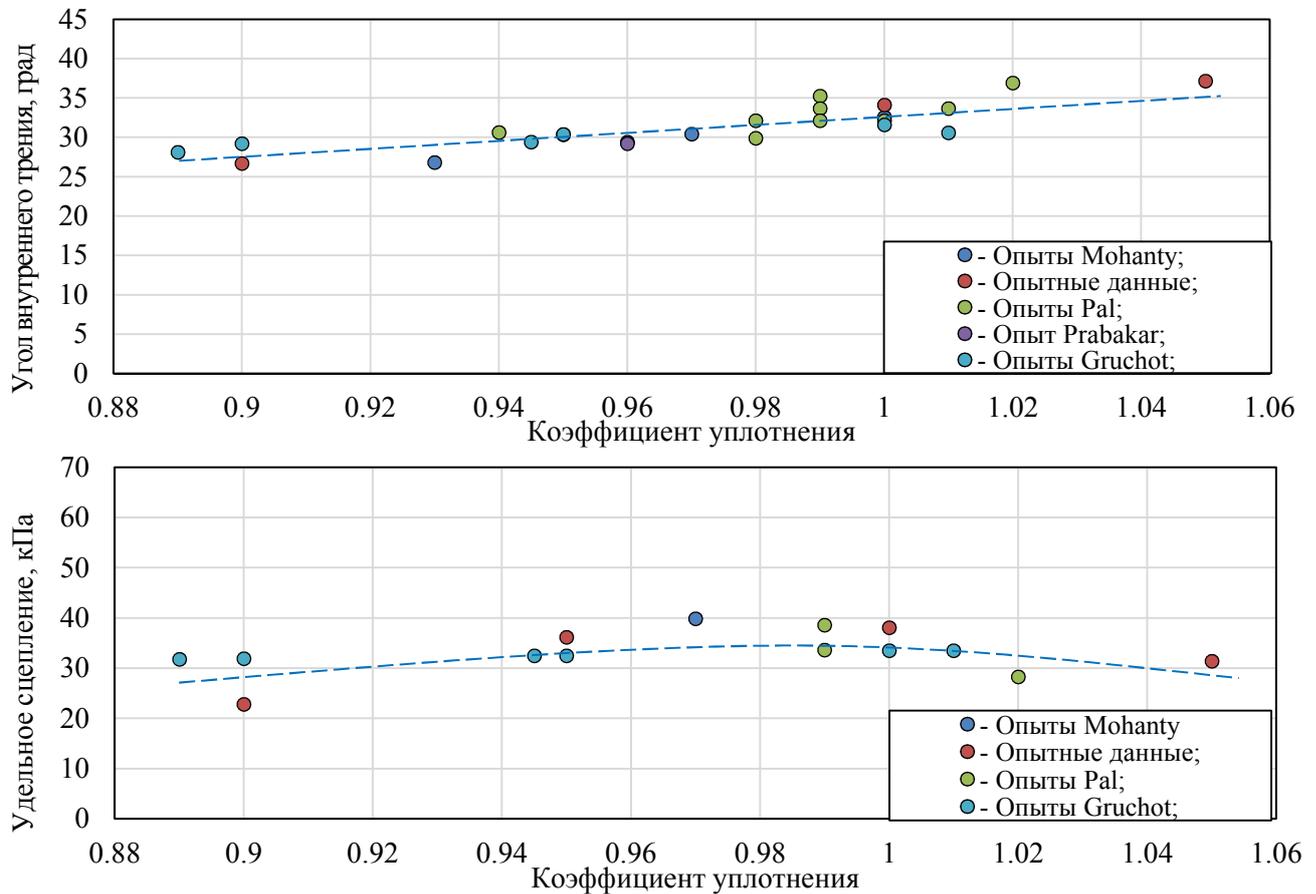


Рисунок 3.6 – Сопоставление прочностных параметров различных ЗШС

Из графиков следует, что плотность ЗШС оказывает существенное влияние на прочностные параметры этого техногенного грунта. Схожая картина отмечается у ряда исследователей, работавших с инертными ЗШС разного генезиса: с ростом плотности, частицы всё более сближаются, растёт число контактов, защемлений и глубина заклинивания отдельных частиц, что ранее описывал *Huang* [157].

Величина сцепления уменьшается при увеличении коэффициента уплотнения ЗШС от 1,0 до 1,05. Похожий эффект отмечал *Padam* [158]. Предположительно это объясняется разрушением крупных пористых агрегатов ЗШС, происходящим в процессе уплотнения, что описал ранее *Kim и др.* [82], а применительно к пескам и *Roberts* и *DeSouza* [28]. Однако, как и в опытах *Martin и др.* [66] сохраняется сцепление, вызванное взаимодействием водных плёнок вокруг мелких частиц золошлака.

При многократном испытании образцов с разной влажностью были получены нестандартные зависимости изменения угла внутреннего трения от влажности. Как и в опытах *Lamb и др* [160], максимальное сопротивление сдвигу было получено при оптимальной влажности ЗШС. В целом же, установлено, что срезающие напряжения, необходимые для разрушения образца, возрастают с ростом влажности вплоть до оптимального значения (рисунок 3.7).

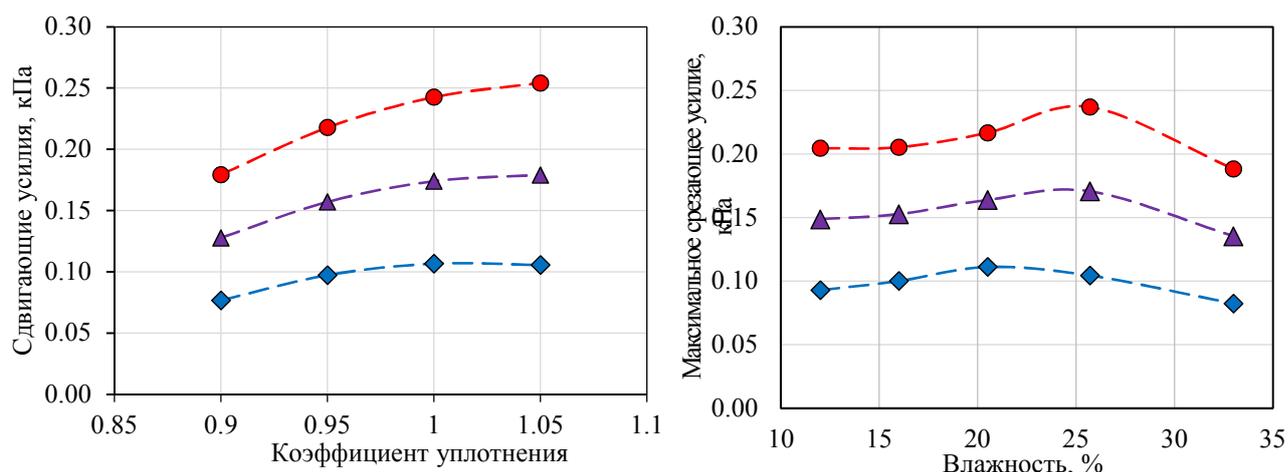


Рисунок 3.7 – Зависимости максимального срезающего усилия от коэффициента уплотнения и влажности ЗШС: сопротивление сдвигу при вертикальном напряжении:

◆ – 100 кПа; ▲ – 200 кПа; ● – 300 кПа.

Аналогично повышается сопротивление срезу при уплотнении ЗШС. Однако при увеличении коэффициента уплотнения от 1,0 до 1,05 прироста практически не отмечается, следовательно, можно сделать вывод о нецелесообразности переуплотнения этого материала (см. рисунок 3.7).

3.3 Исследование деформационных характеристик золошлаковой смеси

Существует множество методов для определения деформационных параметров грунтов. Имеющиеся формы перехода между механическими параметрами, полученными при разных видах испытаний природных грунтов, показали свою несостоятельность применительно к ЗШС. Поэтому, применительно к деформационным параметрам были выполнены комплексные исследования, включающие определение:

– модуля деформации по методу компрессионного сжатия;

- модуля упругости по методу рычажного прессы;
- секущего модуля деформации и коэффициента Пуассона по методу трёхосного сжатия;
- модуля упругости по методу статического испытания штампом;
- CBR по статической схеме.

Определение модуля деформации по методу компрессионного сжатия осуществлялось в соответствии с ГОСТ 12248-2010. Образцы ЗШС формировали сначала в большом приборе стандартного уплотнения (см. п. 3.1), а затем – непосредственно в кольцах компрессионного прибора.

В рамках компрессионных испытаний выполняли испытание образцов с разной плотностью и влажностью. Интервалы значений плотности-влажности принимали аналогично испытаниям по определению прочностных параметров. Для каждой точки эксперимента испытывали по четыре образца с одинаковой плотностью и влажностью. По результатам опытов в одомере строилась компрессионная кривая, по которой производилось определение модуля деформации на каждой ступени загрузки.

На основе анализа графика определялись значения модулей деформации в условиях компрессионного сжатия. После чего проводилась статистическая обработка результатов испытаний по [155]. Данные были скорректированы, с учётом более поздних испытаний по определению коэффициента Пуассона. Результаты испытаний с учётом статистической обработки сведены в таблицу 3.2.

Таблица 3.2 – Модули деформации ЗШС

Влияющий фактор	Коэффициент уплотнения				Влажность, %				
	0,90	0,95	1,00	1,05	12,0	16,0	20,5	25,7	33,0
Точки варьирования									
Модуль деформации при напряжении 100 кПа	<u>6,79</u> 5,93	<u>8,46</u> 7,16	<u>11,86</u> 8,30	<u>14,25</u> 13,74	<u>11,35</u> 10,95	<u>12,52</u> 11,99	<u>13,28</u> 12,33	<u>8,46</u> 7,16	<u>7,81</u> 6,22
Модуль деформации при напряжении 200 кПа	<u>18,30</u> 17,50	<u>20,92</u> 17,89	<u>23,75</u> 18,93	<u>29,22</u> 27,64	<u>26,86</u> 25,14	<u>26,10</u> 25,13	<u>25,91</u> 24,94	<u>20,92</u> 17,89	<u>16,44</u> 15,88
Модуль деформации при напряжении 300 кПа	<u>21,53</u> 19,76	<u>31,66</u> 27,14	<u>41,81</u> 38,24	<u>64,11</u> 63,84	<u>34,92</u> 32,85	<u>34,55</u> 32,53	<u>35,04</u> 33,30	<u>31,66</u> 26,15	<u>22,73</u> 22,05
Примечание: над чертой – нормативное значение; под чертой – расчётное значение.									

На рисунке 3.8 представлены результаты определения модуля деформации образцов ЗШС в компрессионном приборе, в зависимости от коэффициента уплотнения. Рост модуля деформации при увеличении плотности объясняется увеличением количества контактов частиц в структуре грунта, что ведёт к снижению контактных напряжений и уменьшению сминания малопрочных агрегатов.

Резкий прирост модуля в условиях компрессионного прибора при давлении 300 кПа связан с таким состоянием грунта, при котором не происходит переупаковка частиц за счёт скольжения агрегатов, а осадка может объясняться разрушением частиц, плотно заземлённых в своих положениях. Такие изменения структуры ЗШС ранее были описаны *Kim и пр.* [66].

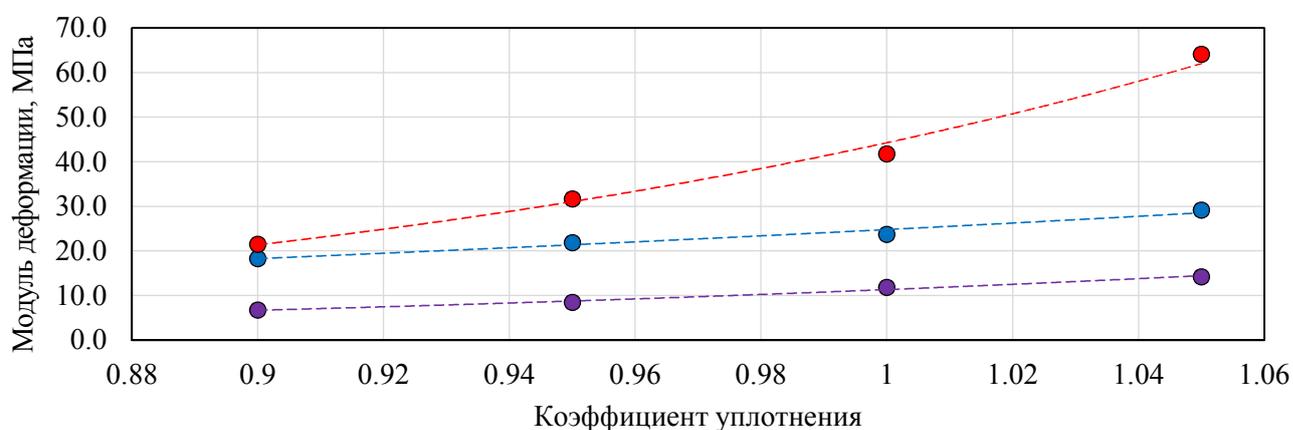


Рисунок 3.8 – Зависимость модуля деформации от коэффициента уплотнения: нормативные значения при давлении ● –100 кПа; ● – 200 кПа; ● –300 кПа

На рисунке 3.9 представлены результаты определения модуля деформации образцов ЗШС в компрессионном приборе, при различной влажности ЗШС и постоянном коэффициенте уплотнения 0,95.

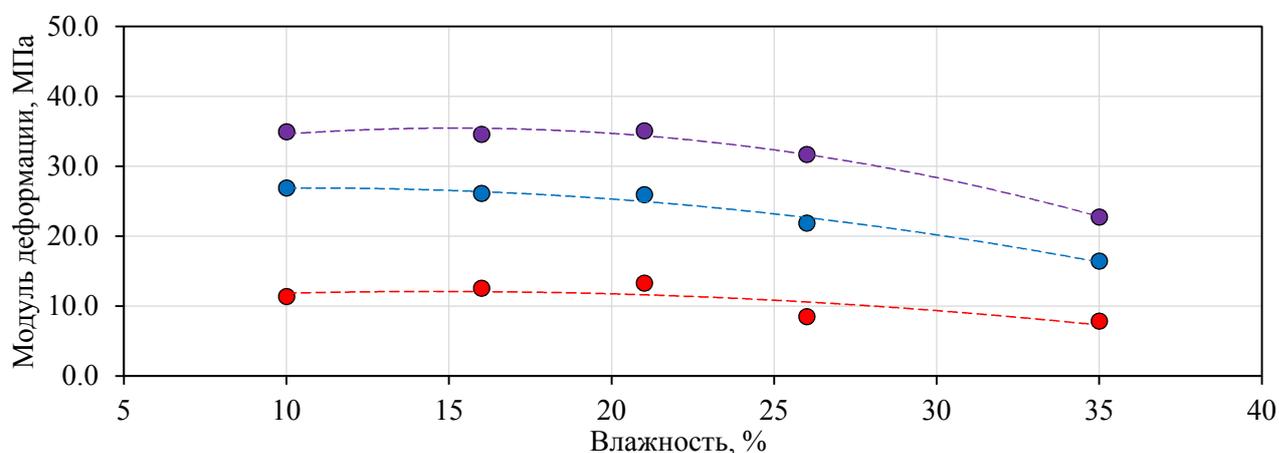


Рисунок 3.9 – Зависимости модуля деформации от влажности: нормативные значения при давлении ● –100 кПа; ● – 200 кПа; ● –300 кПа

Испытания ЗШС с разной влажностью указывают на снижение компрессионного модуля деформации с ростом влажности. При увеличении влажности вода способствует раздвижению частиц ЗШС, что ослабляет структуру. Кроме того, увеличение толщины водных пленок способствует увеличению осадок, т.к. их способность деформироваться выше, чем у частиц.

Схожие зависимости изменениям модулей упругости были получены *Kim и др*, что указывает на схожесть поведения ЗШС различного происхождения.

Определение секущего модуля упругости и коэффициента Пуассона по методу трёхосного сжатия осуществляли в соответствии с ГОСТ 12248-2010. Подготовка образцов для испытаний в приборе трёхосного сжатия, также велась с помощью ПСУ, который в три слоя заполняли ЗШС с оптимальной влажностью. Степень уплотнения ЗШС достигали, прикладывая число ударов, соответствующее требуемой плотности в рамках цикла испытаний. После уплотнения прибор стандартного уплотнения помещали в устройство производства НПП ГЕОТЕК для гидравлического вдавливания образца.

Готовые образцы взвешивали для контроля степени уплотнения и контролировали кромки. После чего образцы хранили до испытания заворачивая их в гильзы из полиэтилена. Испытания проводили в стабилometре типа «А», создающем осесимметричное статическое нагружение, по схеме консолидировано-дренированного испытания грунта. Исследование проводилось при боковом давлении 100 кПа для всех образцов.

Разрушение образца фиксировали в рамках заданной программы испытаний. Затем вертикальное нагружение снимали, и нагнетатель выпускал избыток давления в камере (рисунок 3.10).

В рамках стабилOMETрических испытаний, для каждого значения плотности-влажности, обусловленных программой испытаний, изготавливали и испытывали по три образца, диаметром 50 мм, высотой 100 мм. Ступени вертикального нагружения и время стабилизации деформаций выбирали как для пылеватых песков в соответствии с [140].

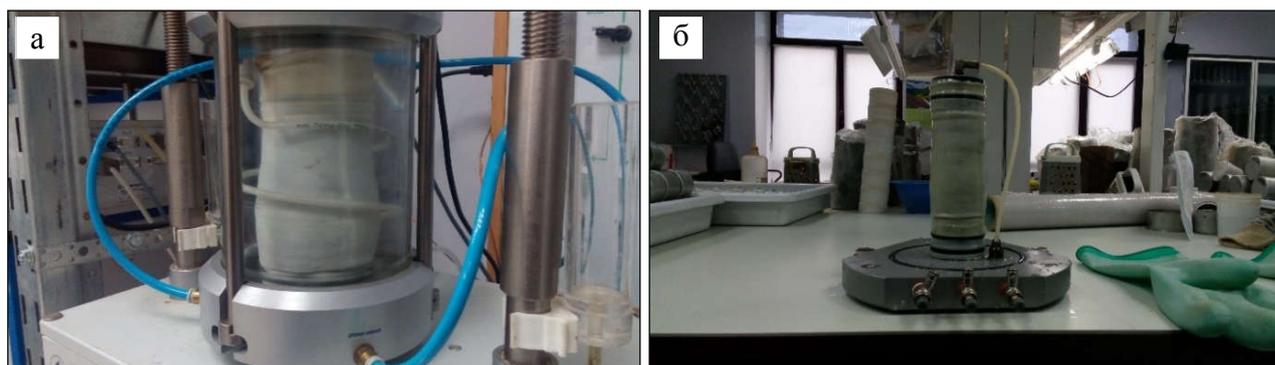


Рисунок 3.10 – Образец из ЗШС после окончания испытания:

а – образец, имеющий форму разрушения «бочка»; б – вынутый из камеры образец

По результатам испытания образцов ЗШС в условиях трёхосного сжатия вычисляли секущий модуль упругости, модуль деформации при разных значениях девиатора напряжений (ограниченно), а также коэффициент Пуассона. Статистическую обработку проводили по [155].

Секущий модуль упругости является необходимым параметром для моделирования НДС грунтов с использованием одной из популярнейших упругопластических моделей *Hardening Soil*. Этот показатель представляет собой модуль деформации грунта при половине значения девиатора напряжений в момент разрушения. Результаты испытаний (с учётом статистической обработки) представлены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Секущие модули упругости ЗШС

Влияющий фактор	Коэффициент уплотнения				Влажность, %			
	0,9	0,95	1,00	1,05	12	16	20,5	25,7
Точки варьирования								
Секущий модуль деформации, МПа	<u>11,26</u> 10,52	<u>13,23</u> 12,36	<u>13,89</u> 12,98	<u>15,97</u> 14,63	<u>16,17</u> 15,25	<u>17,35</u> 16,32	<u>17,51</u> 16,43	<u>13,23</u> 12,36
Примечание: над чертой – нормативное значение; под чертой – расчётное значение.								

В отличие от компрессионных модулей деформации, в приборе трёхосного сжатия с ростом нормальных напряжений не происходит возрастания реактивного давления от боковых поверхностей, поэтому образец ЗШС активно расширяется. За счёт этого массиву проще деформироваться под нагрузкой.

При увеличении плотности образцов характер их разрушения изменяется. При коэффициентах уплотнения 0,9 и 0,95 деформация идёт с разрушением по виду «бочки», а более плотный образец, с коэффициентом 1,0, разрушается в виде

плоскости сдвига. Это свидетельствует о более прочной, но хрупкой его структуре, свойства которой определяются, по-видимому, механическими контактами частиц [141]. Однако, несмотря на это, при росте коэффициента уплотнения от 0,95 до 1,00, рост модуля деформации происходит почти линейно (рисунок 3.11).

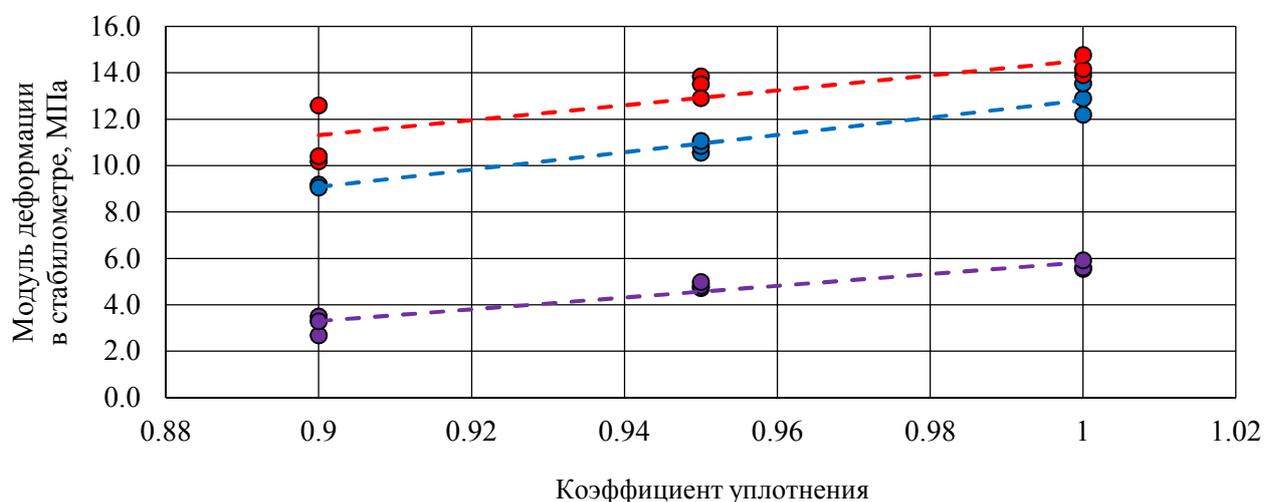


Рисунок 3.11 – Зависимости модуля деформации от коэффициента уплотнения ЗШС: нормативные значения при вертикальном давлении: ● – 100 кПа; ● – 200 кПа; ● – 250 кПа.

В процессе испытания, с ростом нормальных напряжений при боковом расширении скелет грунта деформируется, пока не достигается предела текучести грунта и следующее за ним разрушение структуры. Величину этого расширения описывает коэффициент Пуассона.

В рамках исследования коэффициент Пуассона определялся путём анализа объёмных и вертикальных деформаций в условиях трёхосного сжатия. Результаты определения коэффициентов Пуассона сведены в таблицу 3.4.

Таблица 3.4 – Коэффициенты Пуассона ЗШС

Влияющий фактор	Коэффициент уплотнения				Влажность, %			
	0,9	0,95	1,00	1,05	12	16	20,5	25,7
Точки варьирования	0,9	0,95	1,00	1,05	12	16	20,5	25,7
Коэффициент Пуассона	<u>0,094</u>	<u>0,133</u>	<u>0,167</u>	<u>0,200</u>	<u>0,127</u>	<u>0,123</u>	<u>0,121</u>	<u>0,133</u>
	0,101	0,142	0,176	0,210	0,113	0,112	0,111	0,142

Примечание: над чертой – нормативное значение; под чертой – расчётное значение.

На основе экспериментальных данных установлена связь между углом внутреннего трения и коэффициентом Пуассона.

Вначале мы использовали формулы для определения бокового давления, полученные Ж. Биареза, Ж. Жаку, Ж. Жаки, Жаку-Michalowski, Brooker-Ireland, M.D. Bolton, Р.Я. Попильским и М.Б. Штерном, О.Л. Хасановым [131-135]. В результа-

те было установлено, что зависимость между углом внутреннего трения и коэффициентом Пуассона для ЗШС не описывается не одной из ранее выведенных зависимостей для природных грунтов. Более того, с ростом угла трения при уплотнении отмечался рост бокового расширения, что также противоречит представленным зависимостям.

Тесная корреляция отмечается между степенью уплотнения ЗШС (K_y) и коэффициентом Пуассона, что косвенно подтверждается опытами п 2.3. В целом же, значения коэффициента Пуассона ЗШС несколько ниже, чем у природных грунтов, что, по-видимому, вызвано пористой структурой этого материала, допускающей большие деформации сжатия внутри образца. Сопоставление результатов этих исследований с результатами других авторов не проводилось, в связи с отсутствием в публикациях данных об исследованиях модулей деформации в условиях трёхосного сжатия при разных значениях плотности и влажности. Величина коэффициента Пуассона для ЗШС при разных значениях плотности и влажности определена впервые.

Определение модуля упругости по методу рычажного пресса осуществляли по методике, описанной в ВСН 29-76 [161]. Для испытаний образцов ЗШС использовали форму диаметром и высотой 15,0 см. В связи с отличием схемы уплотнения по сравнению с методом ПСУ, было проведено исследование зависимости степени уплотнения от числа ударов груза ПСУ. Поскольку диаметр формы для испытаний был больше, чем размер штампа ПСУ, ЗШС уплотняли послойно, по схеме, применяемой в тесте «А» метода Проктора [162,163].

Определение модуля упругости ЗШС по методике рычажного пресса производили на машине AL-7000 LA 10 со штампом диаметром 3,56 см (рисунок 3.12).

Форму, заполненную ЗШС, с установленным по центру штампом и закреплёнными индикаторами ИЧ-10, помещали в рычажно-силовое устройство, в котором передача нагрузки от штока осуществляли через подшипник, установленный в углубление штампа. Испытания проводили не менее, чем для трёх образцов одинаковой плотности и влажности.



Рисунок 3.12 – Внешний вид испытательной формы, заполненной ЗПС
а – форма в системе нагружения; б – отпечаток штампа на образце после испытаний

Нормативные значения и границы доверительного интервала значений модуля упругости в зависимости от плотности и влажности ЗПС представлены в таблице 3.5 и на рисунке 3.13 [164].

Таблица 3.5 – Модуль упругости ЗПС

Влияющий фактор		Модуль упругости							
		нормативные значения				расчётные параметры			
Коэффициент уплотнения		0,90	0,95	1,00	1,05	0,90	0,95	1,00	1,05
Влажность, %	7,6	56,56	73,07	85,85	97,97	56,00	72,34	85,00	97,00
	12,0	51,51	66,11	76,76	92,92	51,00	65,46	76,00	92,00
	16,0	45,45	58,28	68,34	85,85	45,00	57,14	67,00	85,00
	20,5	40,4	50,36	61,8	81,6	40,00	49,37	60,00	80,00
	25,7	29,78	39,07	55,06	71,87	29,48	38,68	53,98	71,16
	33,0	16,16	27,96	38,38	48,48	16,00	27,68	38,00	48,00

Методика испытаний предусматривает работу грунта в фазе нормального уплотнения. Как известно в процессе уплотнения происходит более компактная упаковка частиц за счёт местных сдвигов и соскальзывания более мелких частиц в поры агрегатов, что еще больше укрепляет скелет грунта. После окончания процесса уплотнения эти сдвиги практически затухают и грунт начинает работать в стадии обратимых деформаций. Чем выше исходный коэффициент уплотнения, тем более плотная структура скелета грунта образуется в образце, а значит, распределение нагрузки произойдет на большее число точек контакта. Помимо увеличения структурной прочности это снижает общую деформативность материала, чем и обусловлен рост модуля упругости [130].

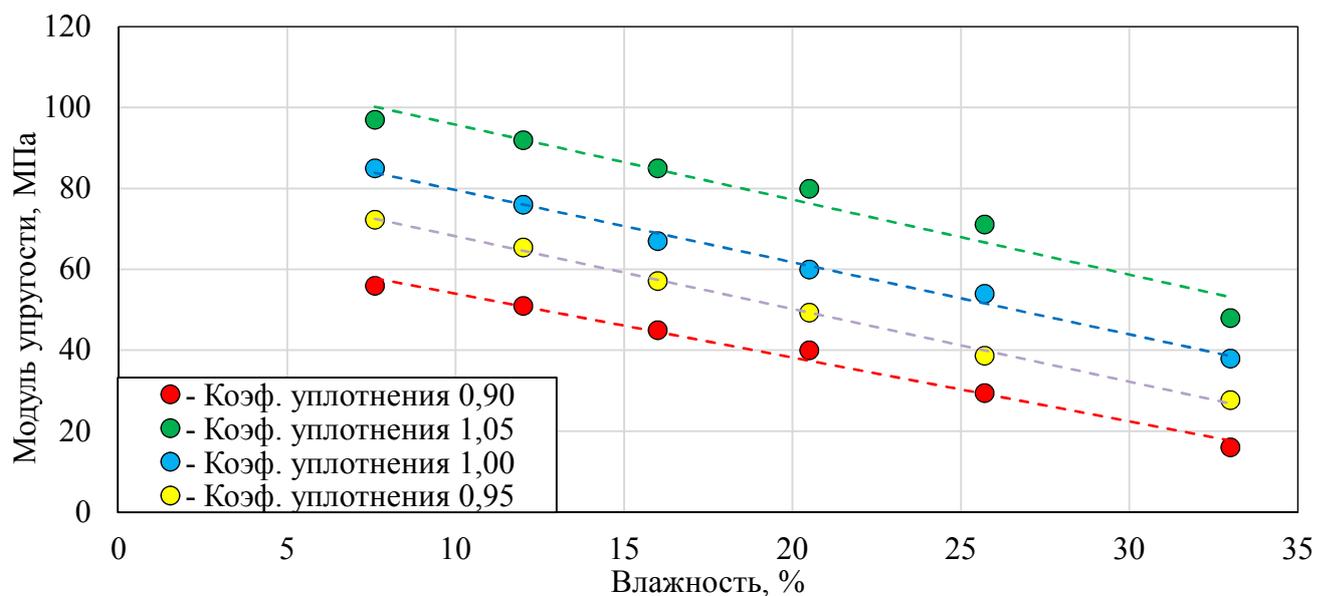


Рисунок 3.13 – Результаты определения модуля упругости ЗШС

В противоположность уплотнению, повышение влажности ЗШС вызывает разуплотнение скелета, которое существенно снижает способность грунта сопротивляться нагрузкам. Причём, чем выше влажность, тем больше негативный эффект, вплоть до достижения полной влагоёмкости, создающей эффект взвешивания частиц. В таком состоянии число контактов частиц уменьшается, а действующее поровое давление воды разуплотняет грунт.

Сопоставить результаты наших исследований по определению компрессионных и упругих модулей затруднительно в связи с отсутствием этого метода в иностранных нормативных документах. Однако существуют исследования, в которых связывают модуль упругости с Калифорнийским числом несущей способности (CBR) [122]. При этом известно, что модуль упругости и модуль деформации могут быть связаны с помощью простых зависимостей. Поэтому были проведены исследования по определению Калифорнийского числа несущей способности (CBR).

Определение CBR осуществляли по методике, описанной в [121]. Для теста использовали специально сконструированную стальную форму диаметром 152,4 мм и высотой 150 мм, цилиндрический плунжер диаметром 50 мм. Для нагружения образцов использовали универсальную машину AL-7000 LA 10, позволяющую задавать требуемую скорость нагружения (1,27 мм/мин) и прилагать нагрузки ступенями не более 44 Н.

Заполнение формы вели в три слоя, с послойным уплотнением каждого по схеме, аналогичной методу Проктора, но применительно к уплотняющему устройству от ПСУ (рисунок 3.14а). Число ударов на уплотнение каждого слоя приводили к работе, затрачиваемой на уплотнение при подготовке образцов в методе CBR.



Рисунок 3.14 – Процесс испытания: а – процесс уплотнения ЗШС в форме; б – форма, установленная в машину для испытаний

Форму, заполненную ЗШС, устанавливали в универсальную машину (рисунок 3.14б). Нагрузку прикладывали по кинематической схеме со скоростью 1,27 мм/мин (0,5 дюйм/мин). Полученные в ходе испытания зависимость глубины проникновения плунжера от давления использовали для определения величины CBR. Определение CBR проводили при трёх значениях коэффициента уплотнения: 0,9, 0,95 и 1,0. Результаты испытаний приведены на рисунке 3.15.

Toth u np. [165] отмечали, что величина CBR водонасыщенных образцов варьируется от 6,8 до 13,5%, а ненасыщенных – от 10,8 до 15,4%. Это свидетельствует о существенном снижении несущей способности при водонасыщении золошлака, которое мы видим и в наших опытах по определению модуля упругости и модуля деформации при различной влажности. Это подтверждает *Pandian* [74], который исследовал CBR отвальных шлаков, золы-уноса и топливного шлака при насыщении их водой и без насыщения. В его опытах также отмечено падение несущей способности при водонасыщении до двух раз.

Полученные нами значения CBR сопоставимы с данными *Toth u np.* для ЗШС другого генезиса, что может говорить о схожем поведении всех мелкозернистых инертных ЗШС под нагрузкой.

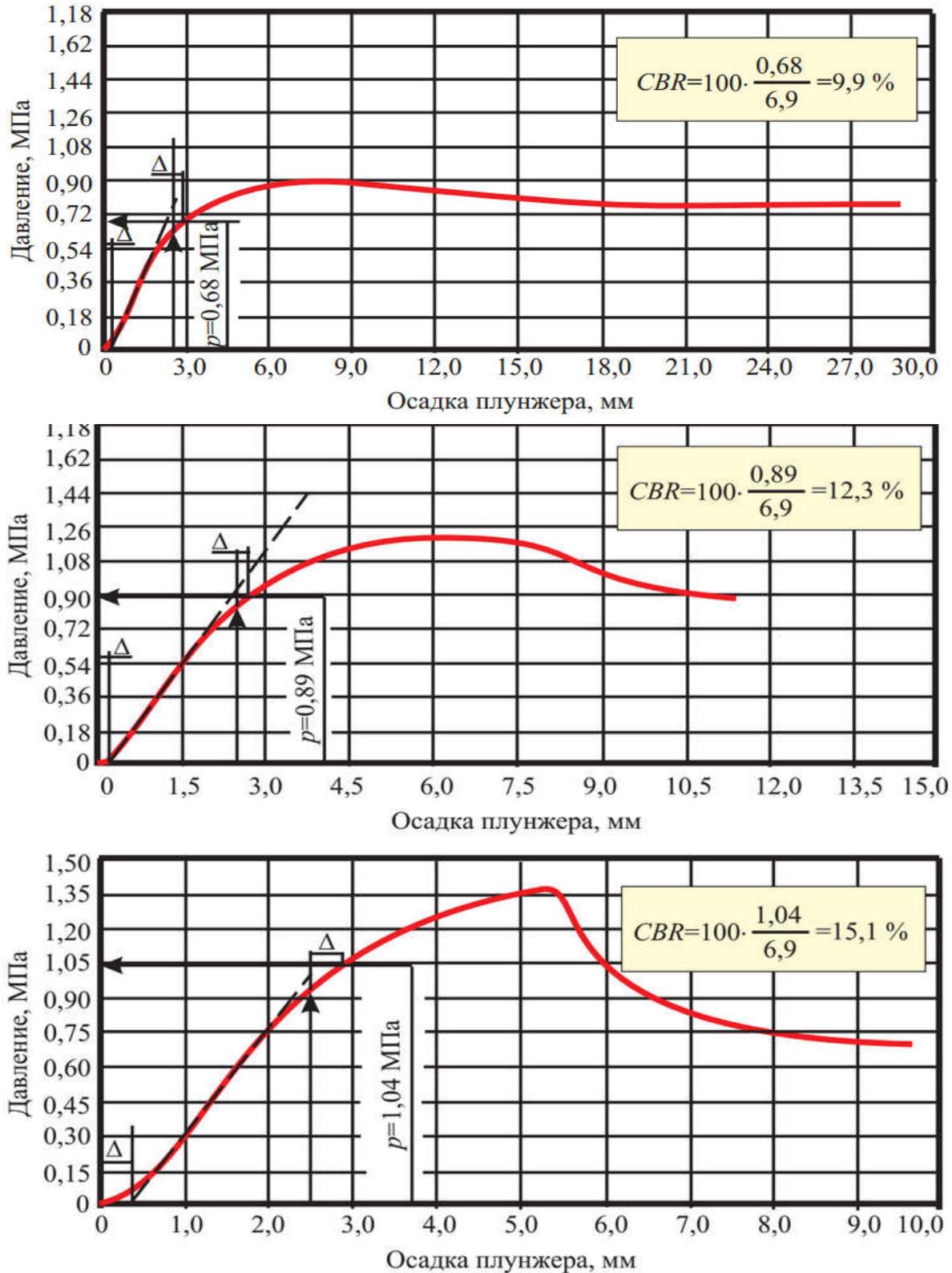


Рисунок 3.15 – Результаты определения CBR ЗШС: а – при коэффициенте уплотнения 0,90; б – при коэффициенте уплотнения 0,95; в – при коэффициенте уплотнения 1,00.

Кроме общих выводов, проведение исследований позволило вывести зависимости между деформационными параметрами ЗШС (таблица 3.6).

Таблица 3.6 – Формулы связи между деформационными параметрами ЗШС

Название параметра	Модуль упругости лабораторный	Модуль упругости натуральный	Компрессионный модуль деформации
Модуль упругости лабораторный	-	$E_{\text{Лаб}} = 0,72 \cdot E_{\text{Нат}}^{1,22}$	$E_{\text{Лаб}} = 0,093 E_{\text{Комп}}^{1,99}$
Модуль упругости натуральный	$E_{\text{Нат}} = 1,31 \cdot E_{\text{Лаб}}^{0,82}$	-	$E_{\text{Нат}} = 0,182 E_{\text{Комп}}^{1,57}$
Компрессионный модуль деформации	$E_{\text{Комп}} = 3,29 \cdot E_{\text{Лаб}}^{0,503}$	$E_{\text{Комп}} = 2,95 \cdot E_{\text{Нат}}^{0,636}$	-
CBR	$\text{CBR} = 0,67 \cdot E_{\text{Лаб}}^{0,73}$	$\text{CBR} = 0,52 \cdot E_{\text{Нат}}^{0,891}$	$\text{CBR} = 0,117 \cdot E_{\text{Комп}}^{1,45}$
Модуль упругости секущий	$E_{\text{Сек}} = 3,24 \cdot E_{\text{Лаб}}^{0,353}$	$E_{\text{Сек}} = 2,89 \cdot E_{\text{Нат}}^{0,431}$	$E_{\text{Сек}} = 1,4 \cdot E_{\text{Комп}}^{0,7}$

Аналогичные зависимости для природных грунтов получены многими учёными: *W. Heukelom* и *C.R. Foster* [123], *W. Heukelomu A.J.G. Klomp* [124], *Green and Hall* [125], *Witczak* [126] и *Powell* [127] и др. но они не пригодны для ЗШС.

3.4 Закономерности изменения механических характеристик золошлаковой смеси при изменении влажности и плотности

Значения бытовой плотности и влажности в ходе жизненного цикла земляного полотна существенно меняются в зависимости от выбранной конструкции дорожных одежд, высоты и типа поперечного профиля насыпи, климатических характеристик района строительства.

Испытания ЗШС, проведенные в лаборатории и на экспериментальном участке позволили нам установить аналогию между изменением плотности и влажности ЗШС и природного грунта – легкого суглинка, относительно изменений, вызванных сезонными циклами промерзания-оттаивания.

Поэтому для прогнозирования изменения значений параметров механических свойств ЗШС при изменении влажности и плотности земляного полотна были получены математические модели, основанные на лабораторных и натуральных испытаниях, выполненных в рамках этой работы и обобщении имеющихся исследований, опубликованных в работах [64-85].

По результатам исследований, выполненных с использованием математического планирования экспериментов, и корреляционно-регрессионного анализа в среде MathLab получены уравнения регрессии для прогнозирования значений прочностных и деформационных параметров ЗШС при различных значениях плотности и влажности (таблица 3.7).

Таблица 3.7 – Уравнения регрессии для прогнозирования прочностных параметров ЗШС

Тип уравнения	Уравнения регрессии	R ²
Удельное сцепление		
Линейное	$c = (P_{10} \cdot K_y + P_{01} \cdot W + P_{00}) \cdot C_n$ $P_{00} = -2,188; P_{10} = 3,56; P_{01} = -0,5938.$	0,45
Квадратное	$c = (P_{10} \cdot K_y + P_{20} \cdot K_y^2 + P_{01} \cdot W + P_{02} \cdot W^2 + P_{11} \cdot W \cdot K_y + P_{00}) \cdot C_n$ $P_{00} = -62,11; P_{10} = 120,3; P_{01} = 9,593; P_{11} = -4,87; P_{20} = -58,24; P_{02} = -3,974.$	0,89
Кубическое	$c = (P_{10} \cdot K_y + P_{20} \cdot K_y^2 + P_{30} \cdot K_y^3 + P_{01} \cdot W + P_{02} \cdot W^2 + P_{03} \cdot W^3 + P_{11} \cdot W \cdot K_y + P_{21} \cdot K_y^2 \cdot W + P_{12} \cdot K_y \cdot W^2 + P_{00}) \cdot C_n$ $P_{00} = -397,5; P_{10} = 1171,9; P_{01} = -13,35; P_{11} = 71,07; P_{20} = -1164; P_{02} = -25,93;$ $P_{30} = 386,7; P_{03} = 11,11; P_{21} = -38,43; P_{12} = -0,7386.$	0,95
<p>где: c – удельное сцепление, кПа; C_n – удельное сцепление при оптимальной влажности и коэффициенте уплотнения 0,98, кПа; P_{ij} – коэффициенты уравнения регрессии; K_y – Коэффициент уплотнения; W – отношение влажности к полной влагоемкости (относительная влажность).</p>		
Угол внутреннего трения		
Линейное	$\varphi = P_{10} \cdot K_y + P_{01} \cdot W + P_{00} + \varphi_n$ <p>где $P_{00} = -66,32; P_{10} = 1,71; P_{01} = 62,48.$</p>	0,89
Квадратное	$\varphi = P_{10} \cdot K_y + P_{20} \cdot K_y^2 + P_{01} \cdot W + P_{02} \cdot W^2 + P_{11} \cdot W \cdot K_y + P_{00} + \varphi_n$ $P_{00} = 67,36; P_{10} = -3,29; P_{01} = 208,6; P_{11} = 21,06; P_{20} = -11,35; P_{02} = 132.$	0,92
Кубическое	$\varphi = P_{10} \cdot K_y + P_{20} \cdot K_y^2 + P_{30} \cdot K_y^3 + P_{01} \cdot W + P_{02} \cdot W^2 + P_{03} \cdot W^3 + P_{11} \cdot W \cdot K_y + P_{21} \cdot K_y^2 \cdot W + P_{12} \cdot K_y \cdot W^2 + P_{00} + \varphi_n$ $P_{00} = 749,5; P_{10} = -246,9; P_{01} = -2167; P_{11} = 55,49; P_{20} = 338,6; P_{02} = 2135;$ $P_{30} = -133,2; P_{03} = -693,3; P_{21} = -80,19; P_{12} = 38,62.$	0,98
<p>Где: φ – угол внутреннего трения, град; φ_n – угол внутреннего трения при оптимальной влажности и коэффициенте уплотнения 0,98, град; P_{ij} – коэффициенты уравнения регрессии; K_y – коэффициент уплотнения; W – отношение влажности к полной влагоёмкости (относительная влажность).</p>		

Аналогично были построены уравнения регрессии для прогнозирования модулей упругости ЗШС при различных значениях плотности и влажности. Зависимости изменения параметров были выведены на основе результатов исследований в лаборатории и пересчитаны на основе выведенных зависимостей к штамповому модулю упругости по [137]. Полученные уравнения регрессии приведены в таблице 3.8.

Таблица 3.8 – Уравнения регрессии для прогнозирования деформационных параметров ЗШС

Тип уравнения	Уравнение регрессии	R ²
Натурный модуль упругости		
Линейное	$E = (P_{10} \cdot K_y + P_{01} \cdot W + P_{00}) \cdot E_{cm}$ $P_{00} = -2,241; P_{10} = 3,903; P_{01} = -0,8811.$	0,98
Квадратное	$E = (P_{10} \cdot K_y + P_{20} \cdot K_y^2 + P_{01} \cdot W + P_{02} \cdot W^2 + P_{11} \cdot W \cdot K_y + P_{00}) \cdot E_{cm}$ $P_{00} = 0,7532; P_{10} = -2,499; P_{01} = -0,4265; P_{11} = -0,05681; P_{20} = 3,3; P_{02} = -0,03244.$	0,99
Где: E – модуль упругости, МПа; E_{cm} – модуль упругости при оптимальной влажности и коэффициенте уплотнения 1,0, МПа; P_{ij} – коэффициенты уравнения регрессии; K_y – коэффициент уплотнения; W – отношение влажности к полной влагоемкости (относительная влажность).		
Коэффициент Пуассона		
Линейное	$\mu = 0,704 \cdot K_y - 0,538$	0,99
Квадратное	$\mu = -0,6 \cdot K_y^2 - 1,874 \cdot K_y - 1,1064$	0,99
Где: μ – коэффициент Пуассона; K_y – коэффициент уплотнения.		

Область применения этих моделей (граничные условия) ограничивается исходя из условий эксплуатации земляного полотна в ходе жизненного цикла автомобильных дорог. Полученные модели адекватны для земляного полотна из ЗШС, уплотнённой механическим способом до коэффициента уплотнения от 0,85 до 1,05, при относительной влажности от 0,3 до 1,0.

Используя полученные уравнения можно прогнозировать изменения прочностных и деформационных параметров ЗШС сходного гранулометрического состава при изменении влажности и степени уплотнения. Таким образом, определив значение параметра для ЗШС с оптимальной влажностью, при коэффициенте уплотнения 1,0, можно прогнозировать её свойства при любой влажности и степени уплотнения, имеющих место в ходе жизненного цикла автомобильной дороги.

Для упрощения инженерных расчетов, были вычислены значения коэффициентов для перехода от параметров, определяемых в ходе инженерно-геологических изысканий по ГОСТ 12248-2010 (угол внутреннего трения, удельное сцепление и модуль деформации), при оптимальной влажности и плотности близкой к максимальной плотностью скелету грунта, к расчетным прочностным и деформационным параметрам (модуль упругости, коэффициент Пуассона, CBR). Коэффициенты приведены в Приложении А.

3.5 Оценка неоднородности золошлаковых смесей в отвалах и учёт этого при назначении расчётных значений механических параметров

Необходимость оценки степени неоднородности ЗШС в золоотвалах связана с существенным разбросом гранулометрического состава смеси по площади намыва (см. п. 1.3). Эта неоднородность может оказать влияние на расчётную величину механических показателей этого техногенного грунта при проектировании земляного полотна из ЗШС.

Учёт неоднородности можно выполнять несколькими путями:

- 1) Определением значительного количества исследований механических параметров ЗШС конкретного золоотвала для статистической обработки и определения коэффициента запаса прочности по материалу для конкретного отвала;
- 2) Оценкой всех возможных значений механических параметров ЗШС конкретного класса и применение к ним единого коэффициента запаса прочности, учитывающего весь спектр неоднородности гранулометрического состава;
- 3) Выражением механических параметров ЗШС как функции гранулометрического состава и путём его прогнозирования определять закономерности изменения механических параметров ЗШС;
- 4) Снижением неоднородности техническими средствами при разработке отвала или подготовке материала на участке строительства.

Первый подход требует проведения очень трудоёмких и дорогостоящих инженерных изысканий на каждом золоотвале, но позволит проектировать сооруже-

ния из ЗШС с высоким запасом прочности, что будет сопряжено с занижением реальных механических характеристик в результате статистической обработки.

Второй подход схож с первым, только обобщение полученных результатов исследований будет вестись не для конкретного сооружения, а для их совокупности, включающей группу сходных сооружений. Подобный подход использовался при разработке ОДМ 218.2.031-2013, что вызвало еще большее занижение значений механических параметров ЗШС.

Четвёртый подход ранее так же учитывался [39] в качестве рекомендуемой технологической последовательности для разработки золоотвала. Однако, согласно этого же документа, ЗШС, как разработанная без усреднения грансостава, так и с его усреднением будет иметь одни и те же значения параметров механических характеристик. Так же нет опытных данных о влиянии такого усреднения, поскольку ранее не было выработано зависимостей, связывающих гранулометрический состав конкретного вида ЗШС со свойствами этого техногенного грунта.

Поэтому мы выбрали, как более рациональный, третий подход. Только этот подход даёт как фундаментальное знание, позволяющее прогнозировать механические параметры ЗШС посредством учёта изменения зернового состава в отвале, так и позволяет выявлять эффект усреднения состава ЗШС техническими средствами при разработке отвала.

Реализация выбранного подхода потребовала решения двух задач:

- определить закономерности изменения гранулометрического состава ЗШС по объёму золоотвала.
- установить влияние гранулометрического состава ЗШС на механические параметры этого техногенного грунта;

3.5.1 Определение закономерностей изменения гранулометрического состава ЗШС по объёму золоотвала

Эта задача решалась путём изучения опытных данных, поскольку в источниках отсутствовала требуемая теоретическая информация.

Как известно (см. п.1.2.) ЗШС перемещаются в отвал средствами гидрозолошлакоудаления, поэтому более крупные и тяжёлые частицы оседают ближе к выпускам пульпы, а мелкие и легкие дальше от выпусков. При изучении зернового состава по длине намыва были рассмотрены результаты наших экспериментальных исследований зернового состава и изысканий *Е.В. Иванова* [41]. Используя принцип аналогии с решением задачи о расчёте размера шлаковой зоны в золоотвале все материалы были приведены к виду, изображенному на рисунке 3.16.

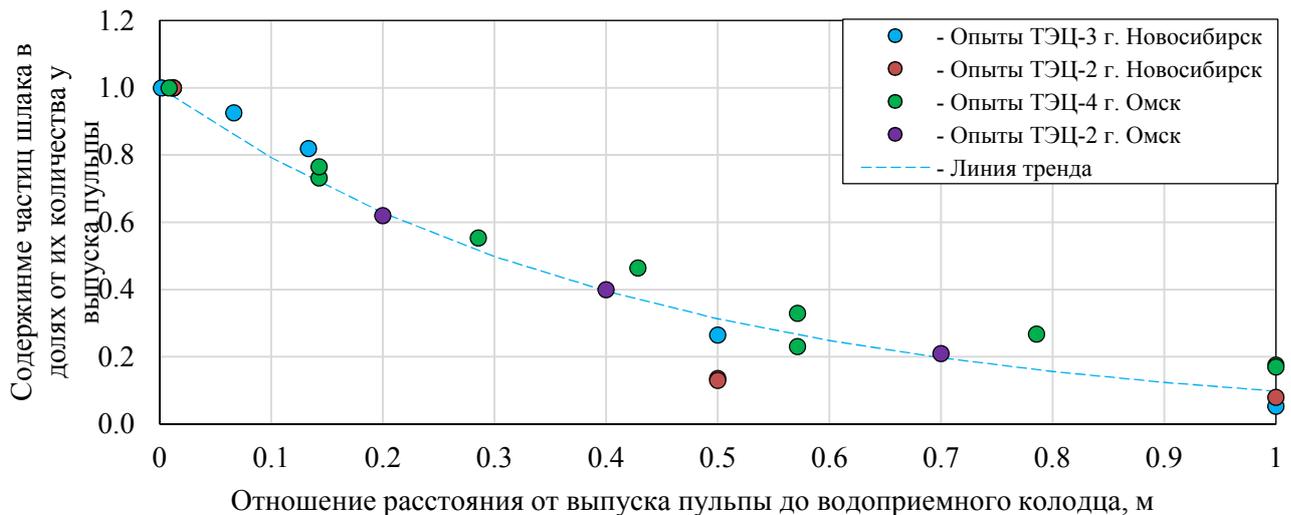


Рисунок 3.16 – Распределение частиц ЗШС крупностью более 0,1 мм при увеличении расстояния от выпуска пульпы

Проанализировав таким образом переработанные данные, можно заметить, что независимо от типа шлаковых частиц и гранулометрического состава исходной ЗШС, общая пропорция шлака и золы-уноса подчиняется одному тренду. Лучшие результаты (по методу наименьших квадратов) показала аппроксимация с использованием экспоненциальной зависимости. В результате выведена формула распределения шлаковых частиц по длине намыва в виде:

$$Ш = П_{ш} \cdot e^{-2,32 \frac{l}{L}} \quad (3.1)$$

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

$П_{ш}$ – 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 в отвале, м.

Как можно заметить, неоднородность по длине намыва имеет существенное влияние на гранулометрический состав. Существует некоторая неоднородность и по глубине массива в золоотвале. В первую очередь она связана с наличием русловых потоков пульпы, в которых скорость течения выше, чем в окружающем массиве, что обуславливает там отложение более крупных частиц.

Однако русловые потоки со временем меняют направление, пересекаются или их русло заполняется, что ведёт к образованию новых. Довольно часто меняют выпуски пульпы из трубопровода. Поэтому большая часть неоднородностей по глубине отвала не велика по объёму. На данном этапе исследований можно условно считать гранулометрический состав ЗШС по глубине массива в золоотвалах однородным.

Таким образом, выражение (3.1) в общем случае пригодно для характеристики неоднородности гранулометрического состава ЗШС в отвале (для решения задачи прогнозирования значений механических характеристик $K_{нмх}$ ЗШС). Это выражение можно внести в зависимости таблицы 3.9 и с их помощью перейти к получению коэффициентов неоднородности механических характеристик ЗШС на картах намыва:

$$K_{нмх} = \left(1 - \left| \frac{f(Ш_1) - f(Ш_2)}{f(0,5 \cdot Ш_1 + 0,5 \cdot Ш_2)} \right| \right)^{-1} \quad (3.2)$$

где: $f(Ш_1)$ – значения параметра механических характеристик, в начале карты;

$f(Ш_2)$ – значения параметра механических характеристик, в конце карты;

$f(Ш_1 - Ш_2)$ – значения параметра механических характеристик, в центре карты.

3.5.2 Влияние гранулометрического состава золошлаковых смесей на механические параметры

Механизм образования ЗШС, как полидисперсной смеси топливного шлака и золы-уноса, обуславливает её недостаток как материала для земляного полотна – неоднородность по площади и глубине золоотвала. Подобная неоднородность может вызывать изменения механических характеристик ЗШС. Эту неоднородность можно уменьшать техническими средствами (см. п.4.4) или учитывать при проектировании сооружений из ЗШС.

Влияние неоднородности зернового состава на свойства ЗШС подтверждаются исследованиями, выполненными *Tiwary, Kumar, Prezzi(Kim), Muhunthan, Gimhan* [79,81,82,83] для инертных ЗШС в США (4 электростанции штатов Вашингтон и Индиана) и Индии (3 электростанции штатов Уттар-Прадеш и Раджастан), Шри-Ланки (одна электростанция). В качестве критерия неоднородности в этих исследованиях выбрано содержание топливного шлака в составе смеси, которое меняется по длине намыва в отвале.

Схожий подход использован в работе *Е.В. Иванова* [39], в которой изучалось изменение модуля деформации и угла внутреннего трения мелкозернистой ЗШС из отвалов ТЭЦ-5 г. Омска и ГРЭС-2 г. Томск, а также среднезернистой ЗШС из отвала Беловской ГРЭС. Результаты этих исследований были сопоставлены с экспериментальными данными *Tiwary, Kumar, Prezzi (Kim), Muhunthan, Gimhan*, что отражено на рисунках 3.17-3.23.

На рисунке 3.17 представлена линия тренда, характерная для мелкозернистых ЗШС с добавлением как плотного, так и пористого шлака. Результаты исследований показали, что число шлаковых частиц, входящих в состав ЗШС, явно коррелирует с углом внутреннего трения. При сопоставлении данных установлено, что генезис материала, химический состав ЗШС, тип котлоагрегата практически не влияют на изменение угла внутреннего трения при изменении содержания шлака в смеси.

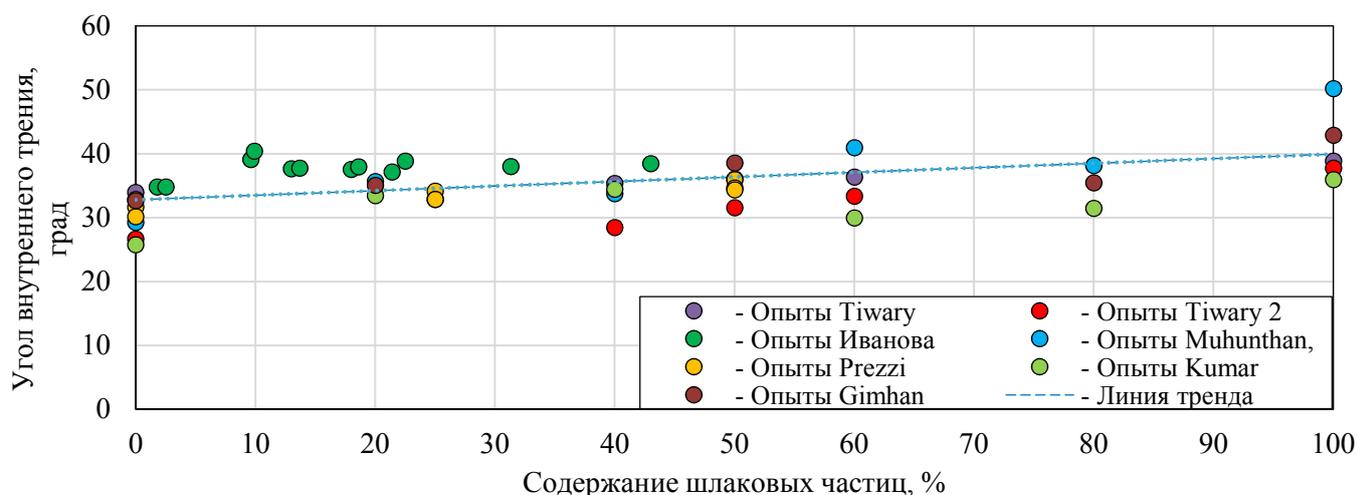


Рисунок 3.17 – Зависимость угла внутреннего трения ЗШС от содержания шлаковых частиц

На рисунке 3.18 представлены результаты опытных данных по исследованию удельного сцепления мелкозернистых ЗШС с добавками шлака.

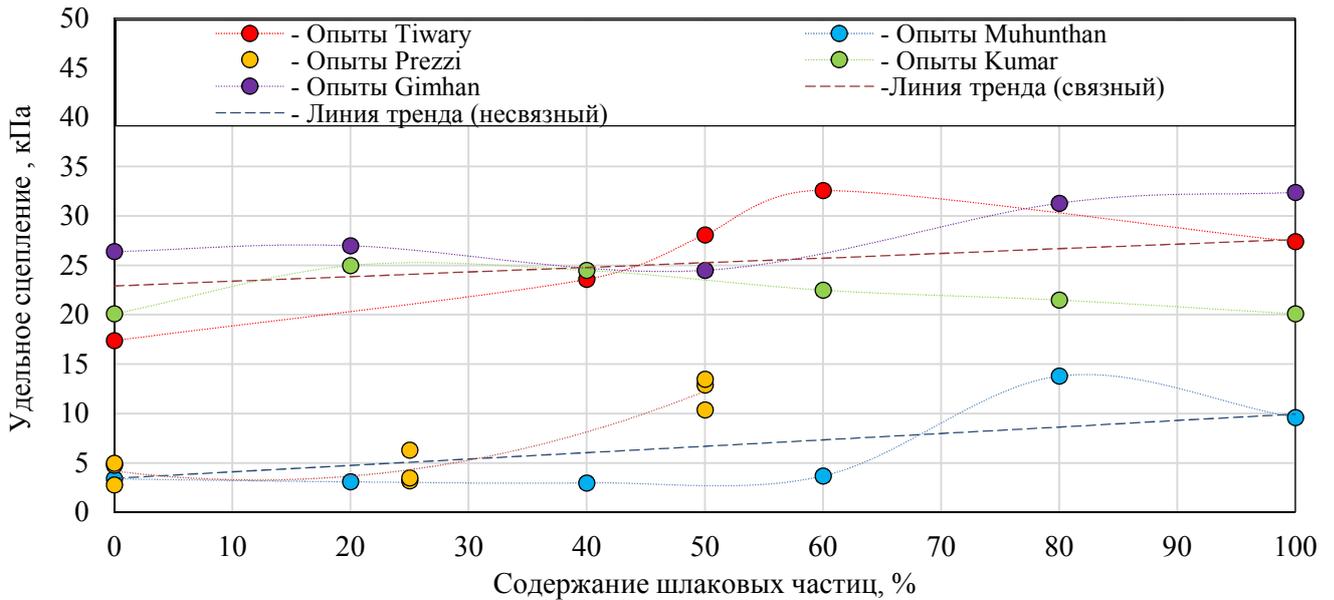


Рисунок 3.18 – Зависимость удельного сцепления в мелкозернистой ЗШС от содержания шлаковых частиц

Изменение удельного сцепления в образцах не имеет единообразной зависимости для различных ЗШС. Такой характер линий тренда связывается нами с оптимизацией гранулометрического состава ЗШС при определенном добавлении шлаковой фракции в мелкозернистую ЗШС, что вызывает образование большее число контактов и механических зацеплений между частицами.

При увеличении влажности ЗШС на величину более чем оптимальная влажность, капиллярная и гравитационная влага раздвигает твердые частицы. При этом коагуляционное и механическое сцепление уменьшается с соответствующим снижением величины удельного сцепления в ЗШС (рисунок 3.19).

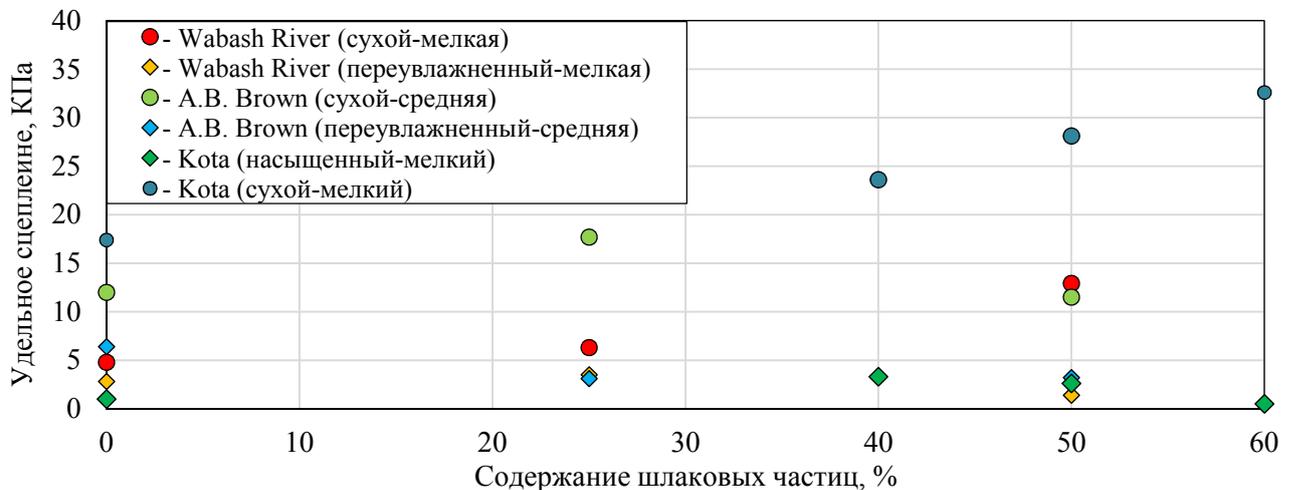


Рисунок 3.19 – Зависимость удельного сцепления мелкозернистой ЗШС от содержания шлаковых частиц при различной степени увлажнения

Как и в случае с мелкозернистой ЗШС при увеличении содержания шлаковых частиц в среднезернистой ЗШС отмечена общая тенденция к увеличению угла внутреннего трения (рисунок 3.20).

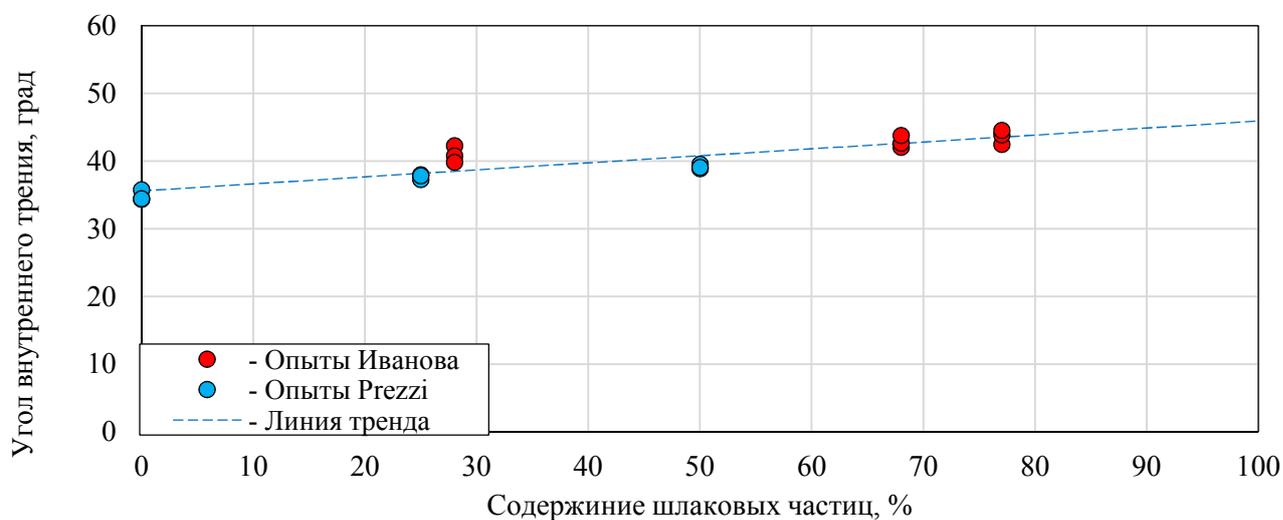


Рисунок 3.20 – Зависимость угла внутреннего трения среднезернистой ЗШС от содержания шлаковых частиц

В отличие от мелкозернистых ЗШС, в среднезернистых смесях увеличение содержания шлаковых частиц не даёт ощутимых позитивных результатов по величине удельного сцепления (рисунок 3.21).

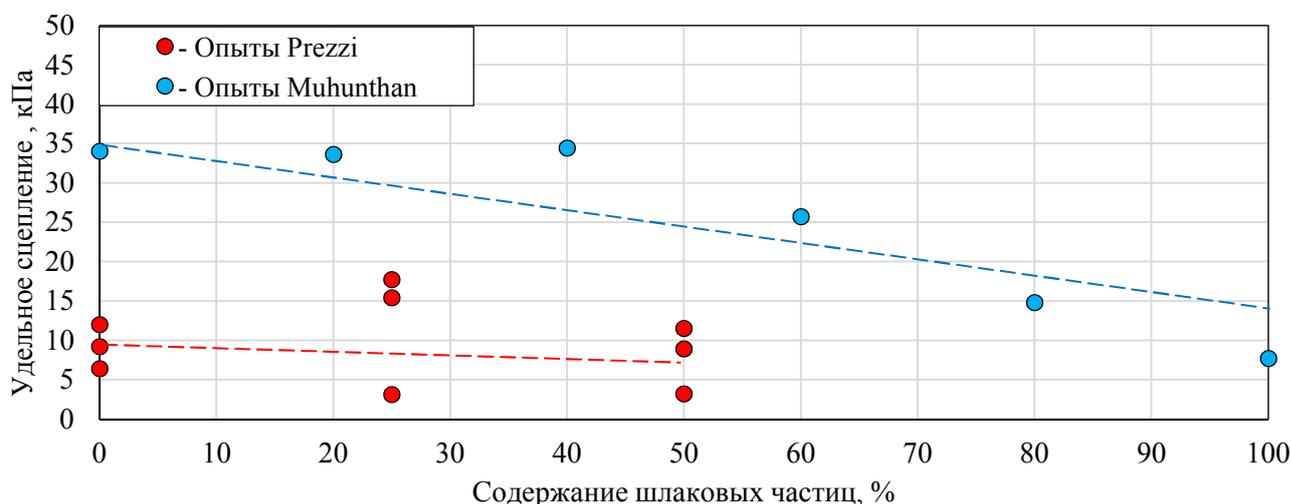


Рисунок 3.21 – Зависимость удельного сцепления в среднезернистой ЗШС от содержания шлаковых частиц

Влияние содержания шлаковой фракции в ЗШС на деформационные характеристики изучали *Иванов, Prezzi, Kumar, Gimhan* [41,79,82,84]. На рисунке 3.22 приведено сопоставление исследований модулей деформации ЗШС при изменении содержания пористого шлака.

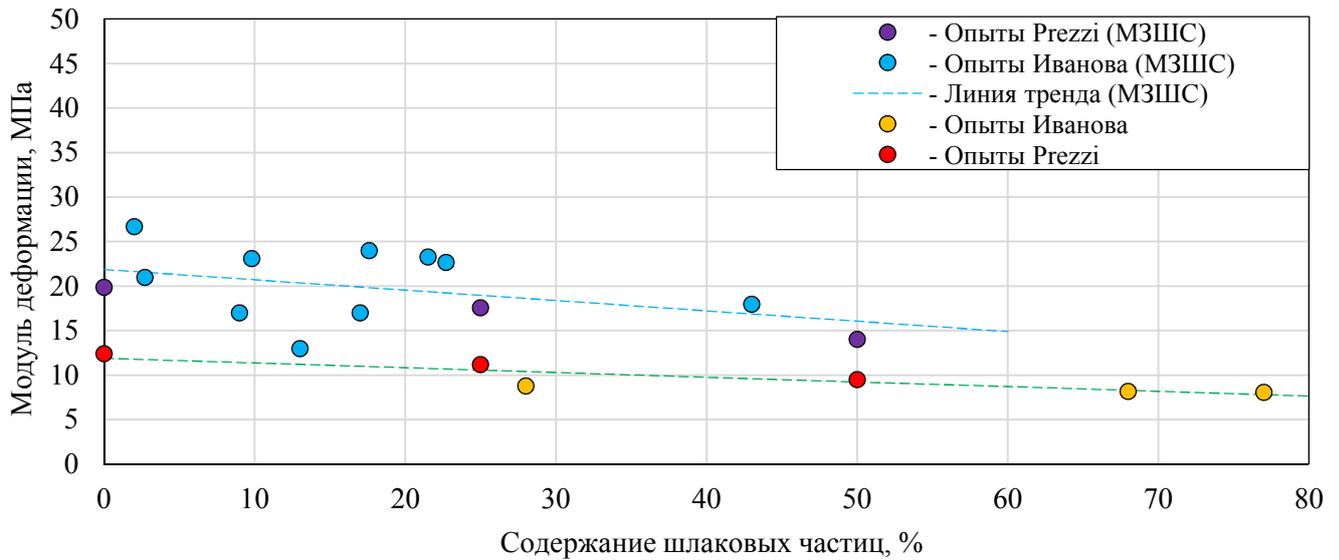


Рисунок 3.22 – Зависимость модуля деформации ЗШС от содержания пористых шлаковых частиц

Увеличение содержания пористого шлака оказывало отрицательный эффект на модуль деформации как мелко-, так и в среднезернистых ЗШС. При этом среднезернистые ЗШС, обычно имеющие большую величину модуля деформации, с добавлением пористого шлака обладают худшими деформационными параметрами по сравнению с мелкозернистыми. В первую очередь это связано с высокой дробимостью пористого шлака, описанной в [44, 45].

Повышенное содержание плотного шлака в ЗШС иначе влияет на деформационные показатели. Имея большую прочность, этот шлак повышает несущую способность ЗШС, что можно констатировать из опытов *Kumar* и *Gimhan* по определению CBR (рисунок 3.23).

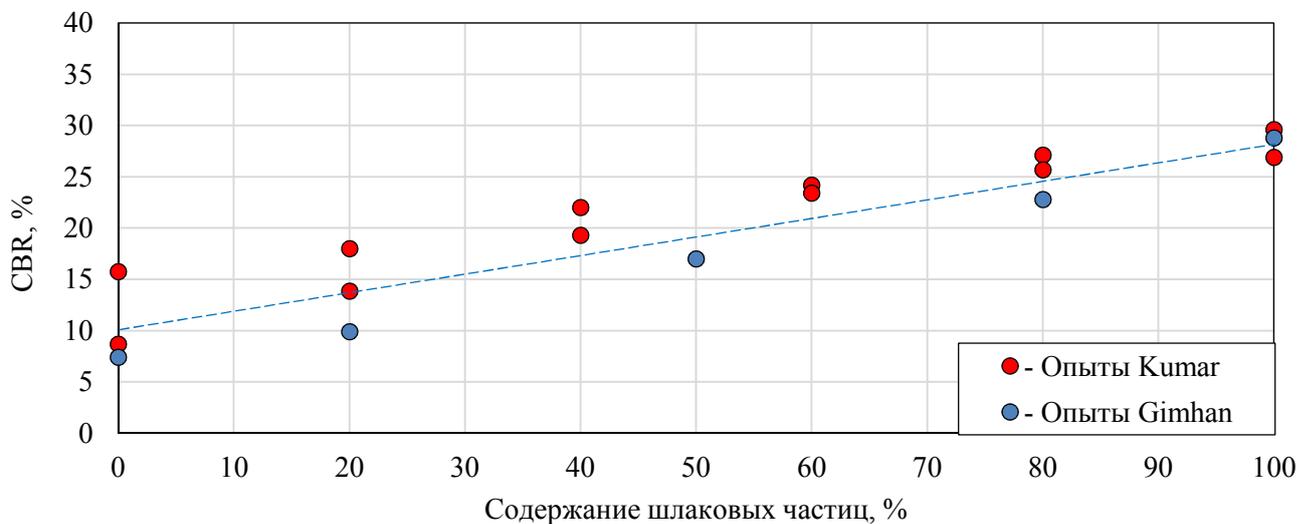


Рисунок 3.23 – Зависимость CBR ЗШС от содержания плотных шлаковых частиц

Рост CBR указывает и на рост модуля упругости материала и модуля деформации ЗШС, поскольку существующие форм связи указывают на прямой, нелинейный характер корреляции (п. 3.3).

На основании обобщения вышеизложенных исследований нами получены эмпирические зависимости для прогнозирования влияния содержания шлака на основные механические параметры ЗШС (таблица 3.9).

Таблица 3.9 – Зависимости механических характеристик ЗШС от содержания шлака

Название параметра	Тип ЗШС	Уравнение
Угол внутреннего трения	Мелкозернистая	$\varphi_m = \varphi_3 \cdot (1 + 0,218 III)$
	Среднезернистая	$\varphi_c = \varphi_3 \cdot (1 + 0,290 III)$
<p>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; III – содержание шлаковой фракции (частиц размером более 0,1 мм) в долях единицы.</p>		
Удельное сцепление	Мелкозернистая малосвязная	$c_{mm} = c_3 \cdot (1 + 0,01 \cdot c_3) \cdot 6 \cdot III$
	Мелкозернистая связная	$c_{mc} = c_3 \cdot (1 - 0,01 \cdot c_3) \cdot 6 \cdot III$
	Среднезернистая малосвязная	$c_{cm} = 0$
	Среднезернистая связная	$c_{cc} = c_3 \cdot (1 - III)$
<p>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; III – содержание шлаковой фракции (частиц размером более 0,1 мм) в долях единицы.</p>		
Натурный модуль упругости	Мелкозернистая с пористым шлаком	$E_{mn} = E_n \cdot (1 - 0,74 III)$
	Среднезернистая с пористым шлаком	$E_{cn} = E_n \cdot (1 - 0,64 III)$
	ЗШС с плотным шлаком	$E_n = E_n \cdot (1 + 1,96 III)$
<p>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; III – содержание шлаковой фракции (частиц размером более 0,1 мм) в долях единицы.</p>		
<p>Примечание: Принято нестандартное деление ЗШС на связных и малосвязные. Условная граница деления ЗШС по этому показателю: удельное сцепление 15 кПа. Под плотным шлаком понимают шлак, получаемый в системе жидкого шлакоудаления, а под пористым – твёрдого шлакоудаления.</p>		

3.6 Изменение прочностных параметров золошлаковых смесей при циклическом воздействии транспортных средств

В зависимости от дорожных условий, а также режимов движения автомобилей на дорожную одежду действуют различные силы взаимодействия между колесами автомобиля и дорожной конструкцией [166]. К ним относятся силы, нормальные к поверхности проезжей части, и силы, касательные к поверхности проезжей части, которые, в свою очередь, подразделяют на силы, направленные вдоль траектории движения колес и силы, направленные перпендикулярно к траектории движения колес.

Напряжения, возникающие в дорожной одежде при проезде автомобиля от действия нормально- и тангенциально направленных сил, затухают с глубиной (см. рисунок 3.24).

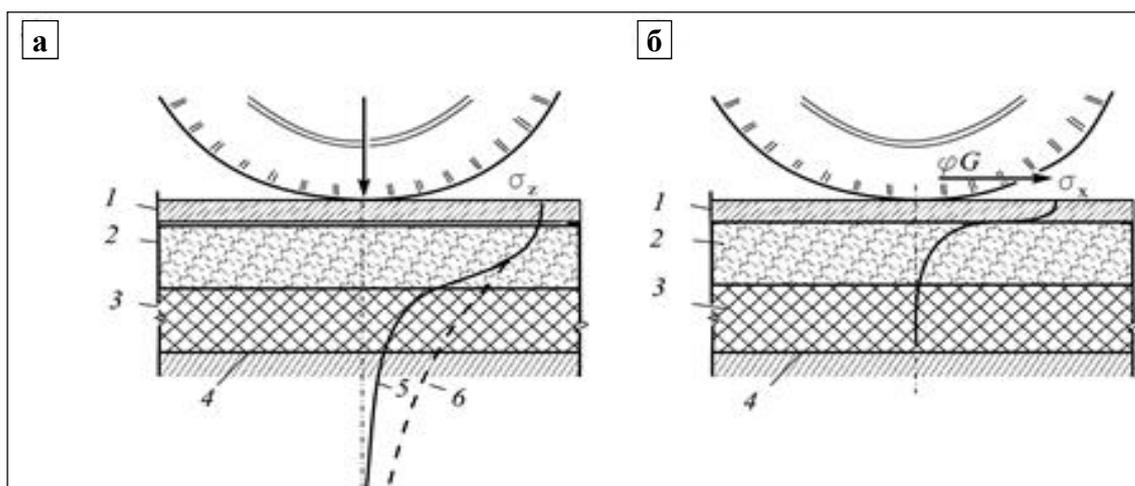


Рисунок 3.24 – Напряжения от колес автомобилей в многослойной дорожной одежде: а – эпюра вертикальных напряжений; б – эпюра горизонтальных напряжений; 1 – покрытие; 2 – основание; 3 – дополнительный слой основания; 4 – подстилающий грунт; 5 – эпюра напряжений в дорожной одежде; 6 – эпюра напряжений в однородном грунте

Следует отметить, что напряжения в дорожной конструкции, обусловленные действием касательных сил на покрытие, сравнительно быстро затухают по мере удаления от поверхности в глубину и наиболее опасны в пределах верхних слоёв. Поэтому касательные силы учитывают лишь при оценке прочности и сдвигоустойчивости самого покрытия.

Нормальные силы от давления колеса (веса автомобиля), воздействующие на дорожную одежду, являются основной расчётной нагрузкой для проектирования и расчёта на прочность дорожной конструкции.

Анализируя эпюры напряжений на рисунке 3.25, можно сделать вывод, что в рабочем слое земляного полотна возникают в основном нормальные напряжения и именно их воздействие необходимо учитывать в ходе исследований. Для лабораторных испытаний, также необходимо знать интенсивность нагрузок и время их действия.

Согласно [166] давление от колес автомобиля уменьшается по глубине дорожной одежды за счёт распределения его на большую площадь. Поэтому, в грунте земляного полотна оно существенно ниже, чем на покрытии. Их время действия также отлично от действия колесной нагрузки на покрытие.

На рисунке 3.25 представлены суммарные значения напряжений, которые образуются как от подвижной нагрузки в земляном полотне, так и от сил тяжести расположенных выше масс грунта и дорожной одежды. Толщина дорожной одежды, рассчитанной на движение тяжёлых автомобилей, обычно составляет не менее 60 – 70 см.

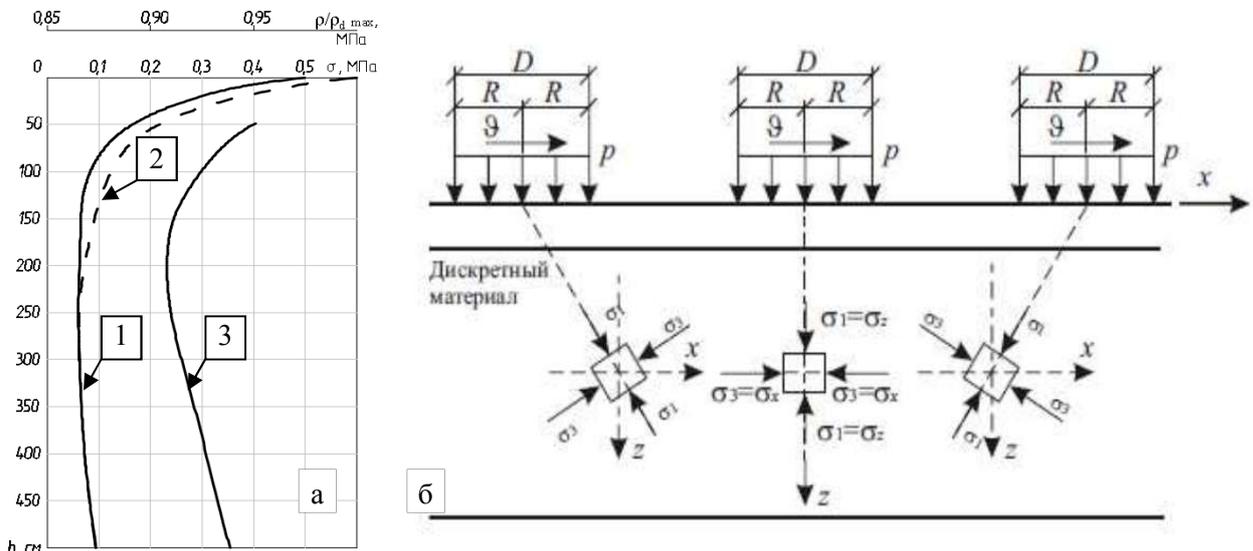


Рисунок 3.25 – Распределение напряжений в земляном полотне автомобильной дороги: а – по глубине при дорожных одеждах нежёсткого типа; б – при проезде колеса по поверхности 1 – при нагрузке Н-13; 2 – при автомобиле МАЗ-205; 3 – кривая стабильной плотности

Поэтому на основании графика можно полагать, что расчётное напряжение, действующее на поверхности земляного полотна от подвижной нагрузки, не превышает 0,15 – 0,20 Мпа (150 – 200 кПа). В то же время, экспериментальные изме-

рения *А.М. Кривисского* показывают, что при дорожных одеждах нежёсткого типа и современных типах транспортных средств напряжение на поверхности грунта находится в пределах 0,02 – 0,11 МПа (20 – 110 кПа).

Измерения, проведённые в то же время Британской дорожной лабораторией, показали, что напряжение на границе между низом дорожной одежды и верхом грунтового основания, в зависимости от типа покрытия, при нагрузке на колесо, равной 1 тс, находится в пределах 0,008 – 0,042 МПа (8 – 42 кПа). Это значительно меньше, чем показали эксперименты *А.М. Кривисского* [167].

Считается [168], что продолжительность воздействия контактных давлений на дорожное покрытие для грузовых автомобилей составляет 0,01 – 0,05 с, для легковых – 0,005 – 0,01 с. В связи с характером деформирования нежёстких дорожных одежд и реологическими особенностями поведения асфальтобетона под колесами автомобилей, время действия давления в рабочем слое земляного полотна повышается. Согласно данным [30], время действия давления от транспортных средств на рабочий слой земляного полотна непосредственно под дорожной одеждой (где наиболее тяжёлые условия работы грунта) равно примерно 0,1 с.

В разное время были выполнены исследования по изучению влияния многократных циклических кратковременных нагрузок на свойства грунтов рабочего слоя. В экспериментах, изложенных в [169], порядок приложения циклической нагрузки осуществляли следующим образом. На рычаге прибора ГПП-30, было установлено устройство, позволяющее превращать постоянную статическую нагрузку в кратковременную циклическую. При проведении эксперимента нагрузка составляла 100 кПа, время действия вертикальной нагрузки на образец составило 0,1 – 0,3 с, а интервал между нагружениями 0,3 – 0,5 с.

Этот способ приложения нагрузки отличается от натурального некоторыми факторами. Во-первых, грунт, работая в кольце прибора ГПП-30, не подвергается боковому расширению, а, следовательно, его напряжённо-деформированное состояние не в полной мере соответствует действительности. Во-вторых, время приложения нагрузок и релаксации напряжений, не в полной мере соответствуют реальным данным.

В работе [170] опубликованы исследования свойств грунта под действием многократной нагрузки. Нагрузка прикладывалась с частотой 1 цикл в минуту,

что явно не соответствует действительному времени действия автотранспортной нагрузки. Кроме того, давление в 300 кПа в слоях рабочего слоя, является значительно завышенным, даже для тяжёлой техники.

Иной принцип нагружения использовался в работах инженера Омского филиала СоюзДорНИИ, *А.С. Пилипенко* [171], труды которой нашли применение при написании нормативно-методического документа [60]. Для проведения исследований, был использован прибор, собранный на основе стабилметра М-2, путём замены механизма статического приложения нагрузки на устройство кратковременного многократного нагружения.

Лабораторные исследования проводили при продолжительности действия нагрузки 0,12 с и времени отдыха 0,97 с. За одну минуту прикладывали 42 цикла нагрузки. Величина нагрузки, прикладываемой в ходе исследований, варьировалась от 50 до 300 кПа. Предложенные *А.С. Пилипенко* циклы нагружения на данный момент наиболее близко отражают процессы, происходящие в грунте под действием колёсной нагрузки. Однако и в этом случае давление по поверхности образца является постоянным, в то время как в естественных условиях, реакция окружающего грунта будет изменяема в процессе приложения нагрузки.

На основании изложенного в рамках нашего эксперимента было решено выполнить исследования в экспериментальном лотке, имеющим размеры 3х1,5 метра, с толщиной слоя ЗШС 1 м. Нагружение вели с помощью пневматической системы через жёсткий металлический штамп площадью 500 см². Характеристики цикла подбирали как в работе [170], время действия нагрузки 0,12 с и время отдыха, 0,97 с. Интенсивность нагрузки принимали 200 кПа (в связи с ростом нагрузки на дорожную одежду по сравнению с экспериментами *Кривисского*), в момент отдыха сохраняли давление 15 кПа, для имитации действия вышележащих слоёв дорожной одежды.

Непосредственной целью эксперимента было определение степени изменения прочностных параметров ЗШС после приложения определённого числа нагружений. Для проведения эксперимента лоток заполняли ЗШС слоями толщиной по 20 см.

Уложенную в слой ЗШС разравнивали и увлажняли до оптимальной влажности. По окончании увлажнения, отбирались пробы на влажность материала по [172].

Уплотнение осуществляли двумя стадиями: первичное уплотнение легкой виброплитой; окончательное уплотнение ручной трамбовкой. При уплотнении виброплитой выполняли 10 проходов по одному следу с перекрытием следа на одну третью ширины плиты. После чего проводили трамбование ручной трамбовкой весом 30 кг, заполненной свинцовой дробью, для усиления уплотняющего эффекта. Удары наносили с высоты 30 см, сериями по три, с перекрытием отпечатков на 40% площади. Уплотнение вели до достижения коэффициента уплотнения 0,95. Степень уплотнения контролировали с помощью режущих колец по [172]. После подготовки массива, на него устанавливали установку циклического нагружения и запускали программу испытаний (рисунок 3.26).



Рисунок 3.26 – Испытания по оценке влияния циклических нагрузок на свойства ЗШС:
а – схема испытательной установки; б – процесс отбора проб

В рамках программы испытаний к слою прикладывали 1, 10^3 , 10^4 , 10^5 , 10^6 нагружений. После приложения нужного числа циклов штамп снимали, поверхность выравнивали и в массив резали кольца от прибора среза (см. рисунок 3.5б).

Отобранные образцы помещали для хранения в эксикатор на срок не более трёх часов и последовательно испытывали в приборе прямого среза. Перед испытанием образец в течение 30 минут выдерживали в камере прибора под давлением 15 кПа (чтобы сохранять их напряжённо-деформированное состояние). Влажность

грунта определяли после испытания путём отбора проб из колец. Результаты испытаний показаны на рисунке 3.27.

Анализ экспериментальных данных показывает, что при низких коэффициентах уплотнения ($K_y = 0,85$) материал в ходе циклических нагрузок уплотняется как в зоне непосредственно под штампом, так и в зоне концентрации максимальных касательных напряжений. При повышении степени уплотнения, характер зависимости меняется, и прочностные параметры снижаются.

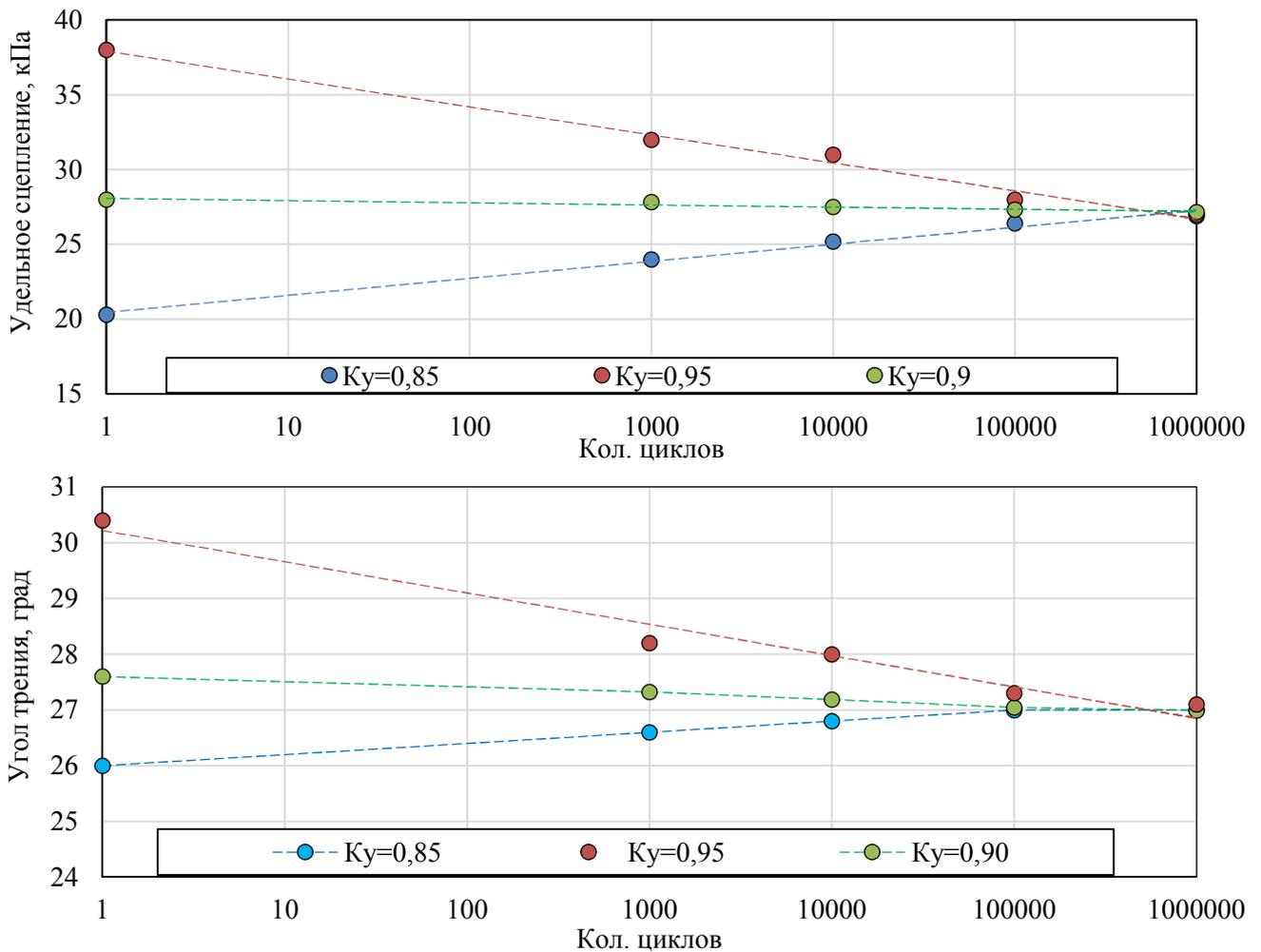


Рисунок 3.27 – Зависимость относительной величины удельного сцепления и угла внутреннего трения ЗШС от числа воздействий циклической нагрузки

Результаты проведённых исследований, позволили вывести зависимости описывающие изменения прочностных параметров ЗШС под воздействием циклических нагрузок в зависимости от структуры материала, характеризующейся её плотностью, выраженной через коэффициент уплотнения. Полученные зависимости приведены в таблице 3.10.

Таблица 3.10 – Зависимости, характеризующие прочностные параметры ЗШС после воздействия многократных циклических нагрузок

Тип уравнения	Уравнение регрессии	R ²
Удельное сцепление		
Логарифмическое	$c = [(-0,4561 \cdot K_y + 0,41) \cdot \ln(N) + 1] \cdot c_{cm}$	0,97
Угол внутреннего трения		
Логарифмическое	$\varphi = [(-0,115 \cdot K_y + 0,10) \cdot \ln(N) + 1] \cdot \varphi_{cm}$	0,98
Где: C – удельное сцепление, кПа; K_y – коэффициент уплотнения; N – число приложений расчётной нагрузки, шт; c_{cm} – статическое удельное сцепление, кПа; φ – угол внутреннего трения, град; φ_{cm} – статический угол внутреннего трения, град.		

Выводы по третьей главе

1. Анализ методов определения параметров механических характеристик грунтов показал, что для низкокальциевых и гидратированных в отвале высококальциевых золошлаковых смесей пригодны все те же методы, что и для природных грунтов.

На основании анализа состояния вопроса и обзора методов исследований выбраны методы исследования параметров механических характеристик ЗШС необходимые для всесторонней оценки этих параметров и их изменения в ходе эксплуатации сооружения и сопоставления результатов исследований с зарубежными и отечественными данными.

2. Проведённые экспериментальные исследования прочностных характеристик ЗШС и сопоставление результатов с данными иностранных исследователей показали:

2.1 Сопротивление сдвигу ЗШС максимально при влажности близкой к оптимальной, и даже при влажности, соответствующей максимальной влагоёмкости, сохраняется на высоком уровне.

2.2 Рост плотности скелета ЗШС вызывает повышение прочности массива, однако, только до достижения максимальной плотности сухого грунта. При дальнейшем уплотнении прироста прочности не наблюдается, следовательно, переуплотнение ЗШС не целесообразно.

2.3 Значения прочностных параметров ЗШС несколько разнятся в зависимости от их происхождения, однако не уступают по прочности природным грунтам.

2.4 Общие зависимости изменения прочностных параметров ЗШС при изменении влажности и плотности схожи для всех смесей независимо от генезиса.

3. Для прогнозирования значений параметров механических характеристик выведены уравнения регрессии, позволяющие определять основные прочностные и деформационные параметры ЗШС (угол внутреннего трения, удельное сцепление, модуль упругости и коэффициент Пуассона) в широких интервалах плотности и влажности (K_y от 0,85 до 1,05; W от 0,30 до 1,0).

3.1 Выведены математические зависимости, связывающие различные деформационные параметры между собой, а также параметры модуля упругости, определённые при различных видах испытаний.

3.2 Впервые определены значения коэффициента Пуассона ЗШС, а также его значения при различных степенях уплотнения и влажности этого материала.

4. Анализ результатов экспериментов по определению параметров механических характеристик ЗШС при различном содержании шлаковой фракции позволил установить ряд закономерностей.

4.1 Изменения гранулометрического состава смеси по площади намыва в золоотвалах может оказать влияние на расчётную величину механических показателей этого техногенного грунта при проектировании земляного полотна из ЗШС.

4.2 Наличие явной корреляции между количеством шлаковых частиц, их типом (пористые, плотные) и свойствами ЗШС. Полученные эмпирические зависимости позволяют прогнозировать влияния содержания шлака на основные механические параметры ЗШС.

5 Выведена экспоненциальная зависимость для прогнозирования распределения шлаковых частиц по длине намыва ЗШС от выпуска из пульпопровода до водосборного колодца в золоотвале.

6 Получена формула для определения коэффициента неоднородности механических характеристик ЗШС на картах намыва. Этот коэффициент позволяет

учесть степень неоднородности механических характеристик ЗШС при проектировании земляного полотна из этого техногенного грунта.

7 Проведённые исследования по оценке влияния циклических нагрузок на прочностные параметры механических характеристик ЗШС показали, что имеет место влияние плотности на механизм изменения этих характеристик при действии циклических нагрузок. При минимальных значениях плотности происходит не снижение начальных параметров, а их увеличение.

Кроме того, установлено, что изменение плотности под штампом носит локальный характер и не отражает реального влияния транспортных нагрузок на земляное полотно. Поэтому для расширения и углубления знаний о влиянии циклических транспортных нагрузок требуются продолжить исследования на кольцевом стенде с различными типами дорожных одежд, плотностью и влажностью земляного полотна, и осевой нагрузкой.

4 ОПЫТНО-ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ ПРОВЕРКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

4.1 Конструктивно-технологические решения для сооружения насыпей земляного полотна из золошлаковой смеси

Большинство требований к конструктивным элементам земляного полотна, сооружаемого из природных грунтов, регламентировано и включено в нормативные документы по проектированию автомобильных дорог: СП 34.13330-2012 [173], ОДМ 218.2.094-2018 [174], Типовые материалы для проектирования ТП 503-0-48.87 Земляное полотно автомобильных дорог общего пользования [175] и др. ЗШС – это разновидность техногенных грунтов, относящихся к так называемым «особым грунтам». Нормативы требуют оценки их свойств, обоснования применения и индивидуальное проектирование земляного полотна.

В 2013 г. научным коллективом СибАДИ под руководством профессора В.В. Сиротюка был подготовлен основной нормативно-методический документ по применению золошлаков в дорожном строительстве РФ – ОДМ 218.2.031-2013. В этом документе рекомендован ряд параметров для конструирования и расчёта земляного полотна из ЗШС и предложены типовые поперечные профили земляного полотна автомобильных дорог. Поскольку сведения о механических свойствах ЗШС в тот период были ограничены, для повышения устойчивости земляного полотна были назначены более пологие заложения откосных частей.

Проведённые нами исследования показали, что подобный запас прочности завышен. Это вызвало необходимость уточнить ранее рекомендованные конструкции. Для этого осуществлено их моделирование с использованием метода конечных элементов (МКЭ). Проверка результатов моделирования и оценки устойчивости откосов дополнительно проводилась с применением методов предельного равновесия (*Феллениуса-Петерсена, Шахунянца, Бишона*) [176]. Формулы, использованные для оценки устойчивости откосов, приведены в таблице 4.1.

Моделирование проводилось в программных комплексах Plaxis 2D, Z-Soil, реализующим МКЭ. При этом были учтены данные об особенностях формирова-

ния напряжённого состояния в массиве ЗШС, полученном во второй главе данной работы. Параметры моделей были приняты исходя из результатов лабораторных исследований, представленных в третьей главе.

Таблица 4.1 – **Использованные методы предельного равновесия**

Название	Формула коэффициента устойчивости
Метод Bishop (Бишона)	$K_3 = \frac{1}{\sum_i W_i \cdot \sin \alpha_i} \cdot \sum_i \frac{c_i \cdot b_i + (W_i - u_i \cdot b_i) \cdot \tan \varphi_i}{\cos \alpha_i + \frac{\tan \varphi_i \cdot \sin \alpha_i}{FS}}$
	<p>где u_i – пластовое давление в блоке; c_i, φ_i – действительные значения параметров грунта; W_i – вес блока; α_i – угол наклона сегмента поверхности скольжения; b_i – ширина блока (в горизонтальной плоскости).</p>
Метод Fellenius/Petterson	$K_3 = \frac{1}{\sum_i W_i \cdot \sin \alpha_i} \cdot \sum_i \left[c_i \cdot l_i + (N_i - u_i \cdot l_i) \tan \varphi_i \right]$
	<p>где N_i – нормальная сила на сегмент поверхности скольжения.</p>
Метод Г.М. Шахуняца	$K_3 = \frac{\sum_{i=1}^n \left[(P_{N_i} - U_i) \tan \varphi_i + c_i \cdot l_i + \left P_{Q_{i,ud}} \right \frac{\cos \varphi_i}{\cos(\alpha_i - \varphi_i)} \right]}{\sum_{i=1}^n P_{Q_{i,sd}} \frac{\cos \varphi_i}{\cos(\alpha_i - \varphi_i)}}$
	<p>где $P_{Q_{i,sd}}$ – активные силы, способствующие сползанию; $P_{Q_{i,ud}}$ – силы, удерживающие сползание блока.</p>
Метод конечных элементов (МКЭ)	$K_f = \frac{\sigma_n \operatorname{tg} \varphi' + c'}{\sigma_n \operatorname{tg} \varphi_r + c_r}$
	<p>где c' и φ' – исходные параметры; σ_n – фактическое нормальное напряжение; c_r, φ_r – параметры прочности, сниженные в ходе расчёта.</p>

Для моделирования была выбрана гипотетическая дорога с параметрами, соответствующими первой технической категории. Рассматривались насыпи высотой до 12 м. В качестве основания для модели выбран пойменный участок левобережной части р. Иртыш в г. Омске. Использование этого участка связано с тем, что это один из неблагоприятных участков по грунтово-гидрологическим условиям. Кроме того, этот участок находится в зоне перспективной застройки с вероятным строительством подобной дороги.

Для проверки результатов, в качестве основания моделей также использовались участки аналогичные местности на транспортной развязке на пересечении

автомобильной дороги на 87-м км ж/д перегона Михнево-Жилево в Ступинском районе Московской области (г. Кашира) и транспортной развязки на пересечении трассы М-5 Урал и Лыткаринского Шоссе.

Для проверки общей устойчивости земляного полотна из ЗШС приняты модели насыпей высотой 3, 6 и 12 м. Заложение откосов приняли по рекомендациям СП 34.13330-2012 для природных грунтов. На первом этапе проводили пластический анализ конструкции, после чего выполняли расчёт устойчивости земляного полотна с использованием *shear reduction method*.

Моделирование в программе Plaxis 2D производили с использованием опции «stage construction», позволяющей задавать промежутки времени возведения каждого кластера насыпи, что более точно позволяет оценить процессы консолидации основания и устойчивость конструкции на всех этапах строительства.

При расчёте устойчивости учитывали деформации сетки конечных элементов, вызванные осадками основания. Расчётная нагрузка НК, принятая по ГОСТ Р 52748–2007 [177], прикладывалась к верху земляного полотна и равномерно распределялась по методу эквивалентного слоя грунта. Модель сетки конечных элементов и результат пластического анализа для насыпи высотой 12 м приведены на рисунке 4.1.

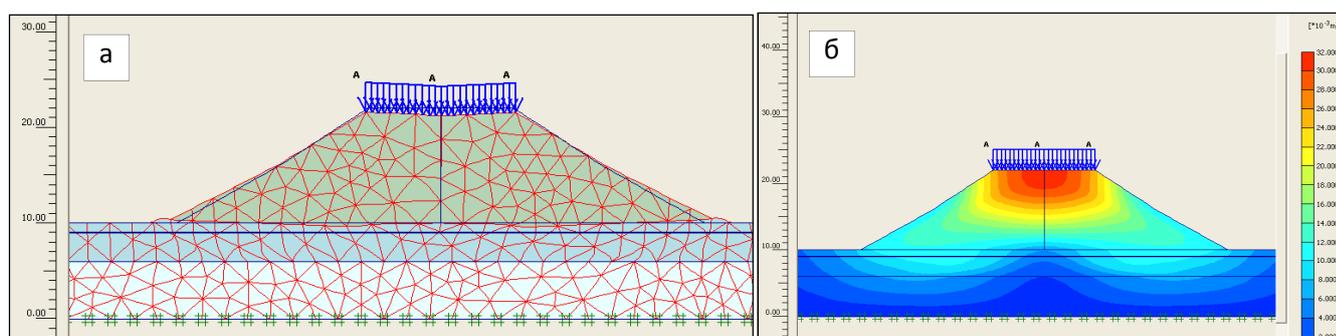


Рисунок 4.1 – Модель насыпи из ЗШС высотой 12 м.: а – сетка конечных элементов насыпи; б – изополе вертикальных осадок стадии Plastic analysis

В ходе анализа деформаций оценивали итоговую осадку сооружения и степень изменения геометрических параметров. В соответствии с этим были внесены изменения в сетку конечных элементов модели. После чего была проведена оценка устойчивости насыпей земляного полотна. Изополя сдвигающих напряжений и перемещений, полученные в ходе моделирования, показаны на рисунке 4.2.

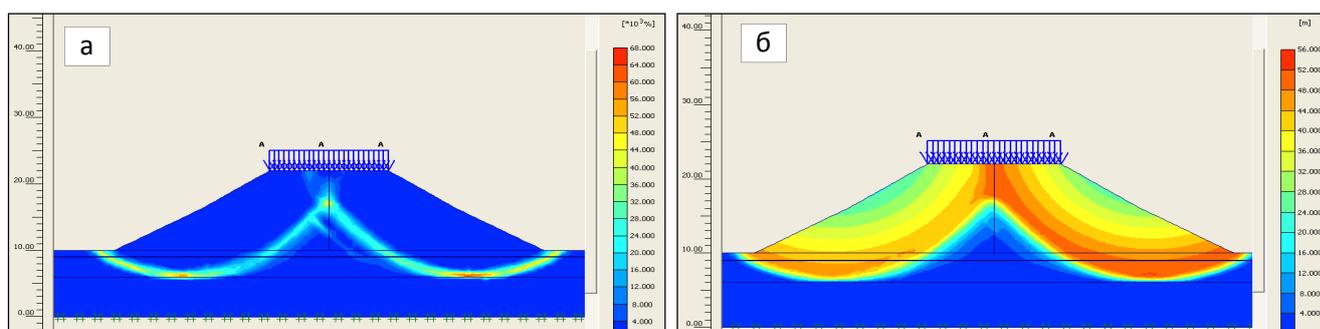


Рисунок 4.2 – Результат оценки устойчивости с применением shear reduction method:
а – изополе сдвигающих напряжений; б – изополе перемещений

Анализ устойчивости конструкций показал, что ЗШС может быть использована как материал для сооружения насыпей автомобильных дорог высотой до 12 м на участках с первым и вторым типами местности по условиям увлажнения без каких-либо отличий от типовых решений.

Конструкции земляного полотна для строительства на третьем типе местности по условиям увлажнения разрабатывали с учётом мероприятий по защите рабочего слоя земляного полотна от переувлажнения или замены в нём ЗШС на песчаный грунт. Итоговые конструктивные решения (поперечные профили) представлены в приложениях Б (I-II техническая категория) и В (III-V техническая категория).

4.2 Результаты строительства и обследования опытного участка насыпи

Для проверки результатов теоретических и экспериментальных исследований осенью 2010 г построен участок насыпи из ЗШС ТЭЦ-5 г. Омска и, для сопоставления результатов, из суглинка лёгкого. Цель строительства этого опытного участка: осуществить мониторинг водно-теплового режима насыпи земляного полотна в естественных условиях, определить значения механических параметров ЗШС в насыпи, выявить особенности эрозионных процессов и проверить всхожесть травяных культур на откосах насыпи. Поперечный профиль дорожной конструкции опытного участка приведён на рисунке 4.3.

Конструкция земляного полотна представляет собой насыпь высотой 1,20 м, протяжённостью 12,0 м, ширина проезжей части – 4,0 м. Уклон поверхности проезжей части принят 20 % одностатный в сторону правого откоса.

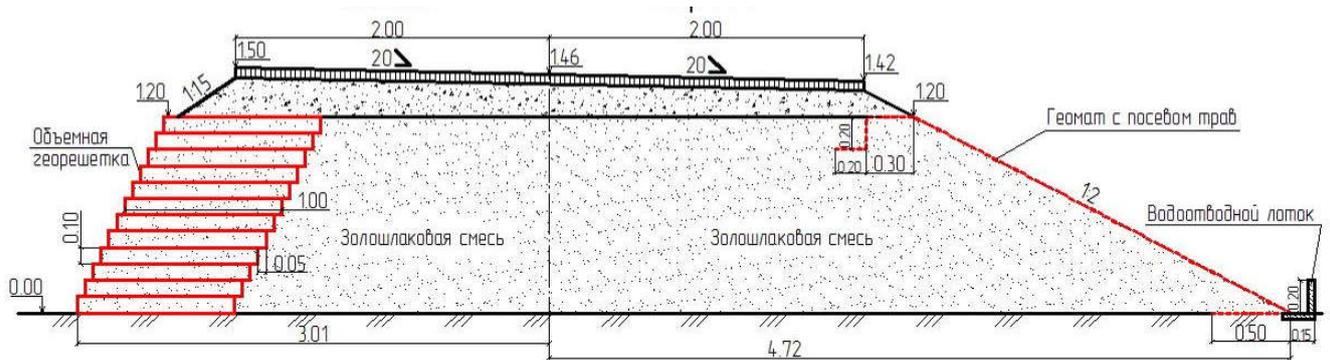


Рисунок 4.3 – Поперечный профиль дорожной конструкции опытного участка

Отсыпку насыпи из ЗШС осуществляли с влажностью смеси 40% слоями толщиной по 0,30 м. Уплотняли ЗШС и суглинок при помощи виброплиты и виброкатка (рисунке 4.4) до $K_{упл} = 0,95$.

На участке выполнили различные виды укрепления откосов земляного полотна геосинтетическими материалами. Слева откос укреплен объёмной георешёткой уложенной в виде подпорной стенки с заложением 1:0,5. Правый откос насыпи имеет заложение 1:2 и разделён на 4 равных участка, на которых применены разные конструкции укрепления (рисунке 4.5):

- геомат с подложкой из нетканого геотекстильного материала, покрытый слоем плодородного грунта с посевом трав (толщина геомата 0,013 м, слоя грунта – 0,1 м);
- геомат без подложки покрытый слоем плодородного грунта с посевом трав (толщина геомата 0,015 м, слоя грунта – 0,1 м);
- слой плодородного грунта с посевом трав толщиной 0,1 м;
- откос из уплотненной ЗШС без укрепления и без посева трав.



Рисунок 4.4 – Сооружение насыпи: а – общий вид насыпи; б – уплотнение откосов



Рисунок 4.5 – Укрепление правого откоса насыпи: а – укладка полотен геоматов; б – устройство плодородного слоя грунта с посевом трав поверх геоматов и откоса из ЗШС

По длине насыпь разделена на два участка при помощи вертикальной геомембраны из полиэтилена низкого давления марки HDPE толщиной 3,0 мм. Вдоль подошвы насыпи устроен лоток с покрытием дна из геомембраны (рисунке 4.6) для увлажнения земляного полотна при моделировании 2-го и 3-го типов местности по условиям увлажнения. Для этого один из участков насыпи подвергался принудительному периодическому дождеванию в течение месяца, а водоотводной лоток служил для удерживания воды у подошвы откоса. В период окончания дождевания проводили отбор проб ЗШС горизонтальным бурением со стороны правого откоса при помощи ручного бура и определяли фактическую влажность ЗШС по [172] на каждом участке моделирования.



Рисунок 4.6 – Укладка геомембраны и водоотводного лотка: 1 – устройство прорези в поперечном направлении на всю высоту насыпи; 2 – укладка геомембраны с засыпкой и уплотнением ЗШС; 3 – устройство лотка с отведением воды в трубу

Земляное полотно на опытном участке было отсыпано, спрופилировано и уплотнено в августе 2010 г. Вслед за этим пошли дожди, в том числе и ливневого характера. Всю зиму, весну и большую часть лета 2011 г. земляное полотно простояло без дорожной одежды и укрепления правого откоса. Основываясь на результатах этого жёсткого испытания, мы констатировали, что ни верх, ни откосная часть земляного полотна из ЗШС не претерпели существенных деформаций или разрушений, простояв без укрепления в течение года. Также за весь этот период не наблюдалось существенного пылеуноса с поверхности верха и откосов насыпи из ЗШС, его можно было сравнить с пылеуносом близлежащих дорог с грунтовым покрытием.

Дорожная одежда на опытном участке состоит из щебёночного основания, уложенного непосредственно на ЗШС или на георешётку из полипропилена, и асфальтобетонного покрытия.

В рамках исследования процессов водно-теплового режима в естественных условиях с 2010 по 2013 гг. осуществляли мониторинг опытной конструкции. Контролировали температуру и глубину промерзания земляного полотна посредством двух термокос МЦДТ 0922, заложенных в золошлаковую и суглинистую части насыпи на этапе строительства. Результаты контроля представлены на рисунке 4.7.

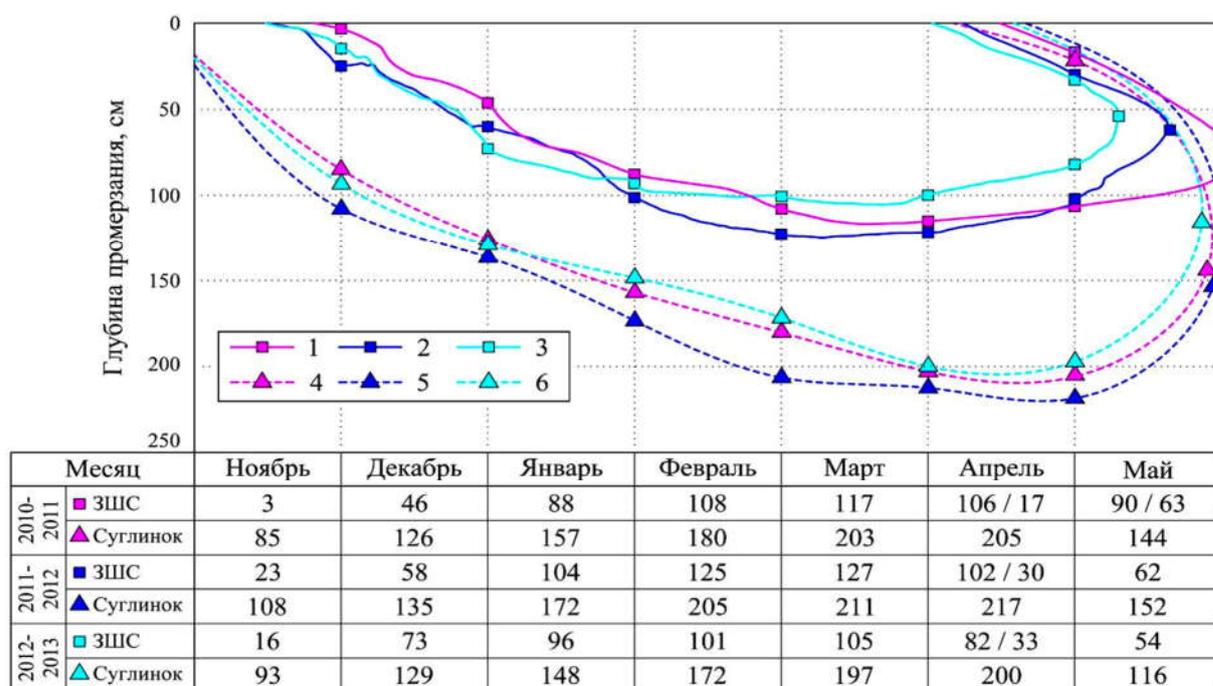


Рисунок 4.7 – Динамика промерзания грунтов в насыпи на опытном участке: 1, 2, 3 – кривые промерзания и оттаивания ЗШС за зимние периоды 2010 – 2011 гг., 2011 – 2012 гг., 2012 – 2013 гг. соответственно; 4, 5, 6 – тоже для насыпи из суглинка лёгкого

В течение трёх лет вели еженедельную оценку деформаций морозного пучения поверхности покрытия с использованием нивелира. Это позволило определить степень морозного пучения в реальных погодных-климатических условиях. Результаты оценки представлены на рисунке 4.8.

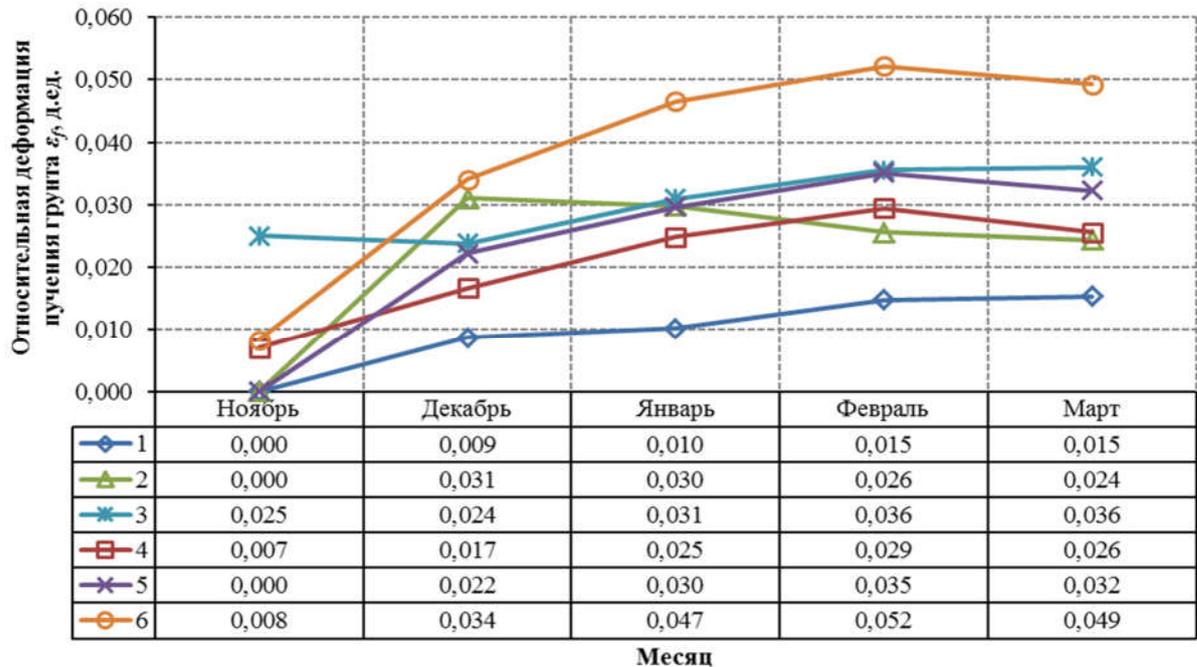


Рисунок 4.8 – Динамика величины морозного пучения: 1, 2, 3 – насыпь из ЗШС при первом, втором и третьем типе местности по условиям увлажнения соответственно; 4, 5, 6 – то же для насыпи из суглинка лёгкого

Мониторинг опытного участка в течение трёх лет показал, что глубина промерзания насыпи из ЗШС не превосходит 1,2 м, в то время как для суглинка, в тех же условиях, она составляла 2,2 м [41, 178, 179]. Это является существенной особенностью этого техногенного грунта и говорит о низкой теплопроводности ЗШС.

Полученные данные показали, что при 1-м и 2-м типах местности по условиям увлажнения (согласно [173]) ЗШС является непучинистым или слабопучинистым грунтовым материалом, следовательно, по этому параметру, может применяться в земляном полотне без ограничений.

Повышение её влажности, характерное для 3-го типа местности по условиям увлажнения, вызывает несколько большие деформации морозного пучения и ЗШС в таком случае относиться к пучинистым грунтам. Следовательно, при строительстве на 3-м типе местности по условиям увлажнения требуется выполнение специальных мероприятий, рекомендованных в ОДМ 218.2.031-2013 и [173].

Испытания, проведённые в лаборатории и на опытном участке, доказали, что с позиции водно-теплового режима ЗШС пригодна для строительства земляного полотна на 1-м и 2-м типах местности по условиям увлажнения. ЗШС пригодна для строительства земляного полотна ниже рабочего слоя на 3-м типе местности (если не предусмотрены мероприятия по снижению деформации пучения) [41].

В рамках исследования механических показателей ЗШС оценивали несущая способность земляного полотна и дорожной одежды. Для этого определяли эквивалентный модуль упругости на поверхности и по слоям, используя метод штамповых испытаний.

Модуль упругости земляного полотна на опытном участке оценивали дважды: сразу после его возведения (в июле 2010 г) и в период июля-ноября 2017 г. Помимо этого несущую способность дорожной конструкции на опытном участке оценивали после строительства дорожной одежды (летом 2013 г.) с применением методики штамповых испытаний и установкой динамического нагружения. Первый цикл испытаний проводили по методике Э.В. Костерина [180]. Измерение модуля упругости выполняли путём установки жёсткого штампа на поверхности земляного полотна в трёх точках участка.

Поскольку влажность оказывает решающее влияние на модуль упругости грунтов, испытания вели при разной влажности ЗШС. Увеличение влажности до значений, соответствующих расчётному периоду, осуществляли посредством дождевания поверхности. Для испытаний применялся жёсткий металлический штамп диаметром 0,33 м. Нагрузку передавали посредством гидравлического цилиндра с максимальным усилием 40 кН, который устанавливали в подрессоренную часть грузового автомобиля (рисунок 4.9).

Нагрузку прикладывали ступенями до достижения максимального расчётного значения. На каждой ступени нагружения измеряли перемещения штампа в вертикальном направлении (осадку). Результаты измерения значения модулей упругости приведены на рисунке 4.11.



Рисунок 4.9 – Проведение штамповых испытаний

Второй цикл испытаний выполняли по методике ОДМ 218.5.007-2016 [137]. Испытания проводили в четырёх точках поверхности участка. Для испытания были сделаны отверстия в покрытии, а щебёночное основание разобрано вручную.

Домкрат устанавливали в подрессоренную часть загруженного автомобиля (рисунок 4.10). Индикаторы часового типа ИЧ-10 крепили к стальной балке, не допускающей перемещений под действием ветра, нагрузок и случайных прикосновений к ней.



Рисунок 4.10 – Проведение штамповых испытаний: а – водонасыщение ЗПС; б – установка нагружающего устройства; в – измерение осадок штампа при нагружении

Нагрузку на штамп прикладывали ступенями, как указано в [137], контроль нагрузки вели с помощью электронного динамометра ДЭП/3-1Д-50С-2. При ступени 0,33 МПа, были отмечены предельные деформации (5,0 мм), поэтому нагружение проводили только до этого уровня.

После испытаний земляного полотна с природной влажностью было проведено его водонасыщение посредством подачи воды в лунку (см. рисунке 4.10, а). Далее проводили повторные испытания по вышеуказанной методике. Контроль полученной влажности ЗПС в процессе испытаний проводили по ГОСТ 5180-

2015 [172] путём отбора проб после испытаний. Отбор проб осуществляли с поверхности и путём вертикального бурения земляного полотна для получения образцов с глубины 0,4 м и 0,8 м. Для каждой лунки отбирали не менее девяти образцов на влажность. Определение влажности ЗШС после испытаний проводили по методу высушивания до постоянной массы. Результаты измерения значения модулей упругости и их сопоставления с данными полученными в лаборатории приведены на рисунке 4.11 [181].

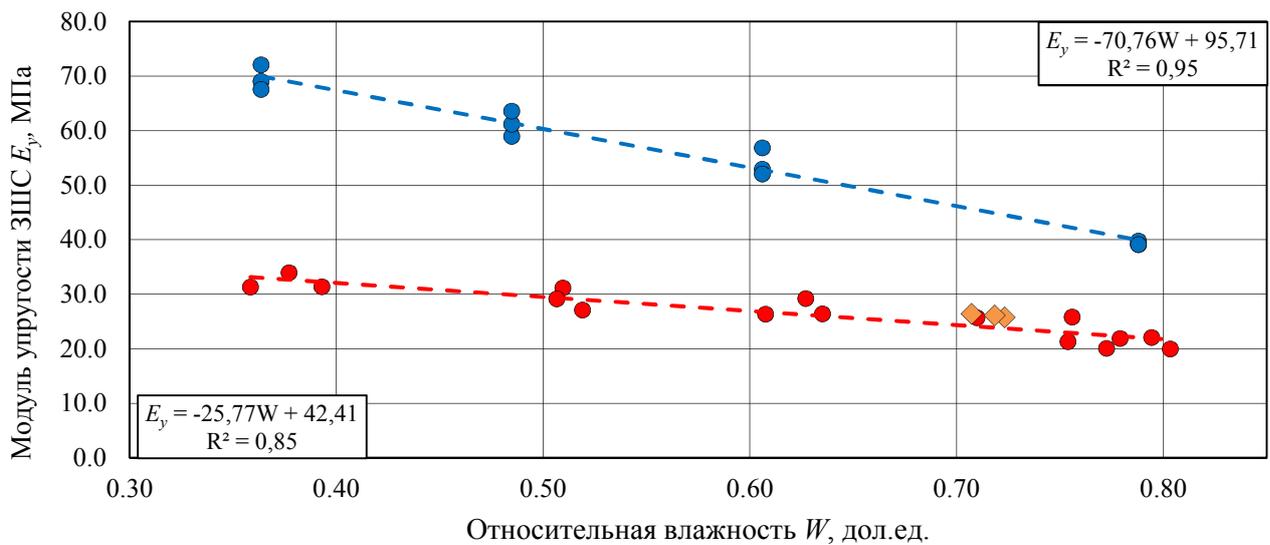


Рисунок 4.11 – Графики изменения модуля упругости при изменении влажности ЗШС:

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

В процессе проведения эксперимента была отмечена следующая особенность. При увлажнении земляного полотна приходила потеря воды не только за счёт частичного испарения, но и за счёт значительного дренирования влаги в нижележащие слои ЗШС. Несмотря на низкий коэффициент фильтрации ЗШС (0,02 м/сут.), влажность этого материала в течение суток падала с 50 до 30% по массе, а ещё через сутки – до 20%. Наблюдения на протяжении двух недель показали, что влажность ЗШС стабилизировалась на уровне 18%. Это подтверждает ранее выдвинутое положение [55] о быстром сбросе излишней влаги из ЗШС до уровня ниже оптимальной влажности.

Результаты экспериментов показывают существенное влияние влажности на несущую способность ЗШС. Этот факт ранее отмечался в исследованиях *Pandian*

[74]. Он определял CBR отвальных шлаков, золы-уноса и топливного шлака при насыщении их водой и получил похожие результаты. Сравнить данные из его работы с результатами наших испытаний можно в силу прямой связи модуля упругости и CBR [182-184].

Снижение модуля упругости ЗШС при увлажнении так же подтверждается опытами *Toth и др.* [61], в которых обнаруживается снижение несущей способности этого техногенного грунта при водонасыщении в 1,43 – 1,99 раза, в зависимости от условий испытаний. Подобное поведение характерно для большинства природных грунтов, что подтверждается опытами *Н.Н. Маслова* [185].

Установлено, что изменений несущей способности насыпи из ЗШС за семь лет (с 2010 г.) практически нет, несмотря на многочисленные природные деструктивные воздействия (водонасыщение – высушивание, замораживание – оттаивание). Не изменилась и первоначальная плотность ЗШС ($K_{\text{умл}} = 0,95$). Следовательно, увеличение прочности ЗШС со временем, отмеченное в работе *Н.И. Барац* [54], характерно только для ЗШС в золоотвале, уложенной гидромеханизированным способом с постепенным отводом избыточной влаги и возможным возникновением слабых конденсационно-кристаллизационных связей.

Результаты натурного эксперимента на насыпи сравнивали с результатами лабораторных исследований, проведённых по методике ВСН 29-76 [161] в рамках предыдущих исследований [164]. На графиках (рисунок 4.12) представлено сравнение результатов лабораторных и натуральных испытаний ЗШС.

Сопоставление результатов определения модуля упругости ЗШС на лабораторных образцах по методике ВСН 29-76 [161] и на опытном участке (по методике ОДМ 218.5.007-2016 [137]) свидетельствует, что лабораторные испытания могут дать общую закономерность изменения параметра (E_y) под воздействием какого-либо фактора (W), однако численные значения этого параметра, полученные на лабораторных образцах, можно использовать при расчётах несущей способности дорожных конструкций с корректировкой. Это связано с масштабным фактором при испытаниях в лаборатории, влиянием жёсткой формы, в которой находится лабораторный образец при нагружении штампом. Кроме того, структура (а значит

и свойства) образцов, уплотнённых прессованием или ударной нагрузкой, отличается от образцов, полученных методами уплотнения, применяемыми на дороге (укатка, вибрация).

Испытания показали, что в целом исследованная ЗШС соответствует среднедеформируемым грунтам по Российской классификации, в то время, как по результатам опытов *Martin и др.* она может быть классифицирована, как малосжимаемый (с высокой жёсткостью) грунт [66].

На графиках 4.11 виден близкий характер закономерности изменения модуля упругости при росте влажности ЗШС, полученной в лабораторных условиях и на опытном участке. Снижение модуля упругости ЗШС в ходе натурального эксперимента составило 0,27 МПа при повышении относительной влажности на 0,01. Снижение модуля упругости ЗШС в рамках лабораторного исследования оказалось гораздо больше – 0,72 МПа на каждые 0,01 увеличения относительной влажности.

Таким образом, обе зависимости показывают устойчивое падение несущей способности (E_y) ЗШС при её дополнительном увлажнении, особенно при величине относительной влажности 0,7 и более. При этом следует отметить, что столь высокое водонасыщение ЗШС было осуществлено искусственно, из условий эксперимента. В реальных условиях происходит сброс воды из массива ЗШС до уровня относительной влажности 0,30 – 0,35, при котором несущая способность сооружения является максимальной (в рамках текущего исследования). Тем не менее, полученные результаты свидетельствуют, что при отсыпке насыпи из ЗШС «на воду», или при длительном подтоплении такой насыпи несущая способность нижних слоёв, находящихся в воде, будет достаточно мала. В этих случаях могут быть использованы различные способы повышения несущей способности ЗШС, например, способ, рекомендованный нами в патенте № 2614236 [186].

Оценка несущей способности всей конструкции опытного участка проводили по методу статического нагружения спаренным колесом автомобиля (по ОДН 218.1.052-2002 [187]). В исследовании был применен грузовой двухосный автомобиль, с нагрузкой на заднее колесо 30,3 кН и давлением воздуха в шинах 0,6 МПа (рисунок 4.12).



Рисунок 4.12 – Определение общего модуля упругости дорожной конструкции

Нагрузку на колесо проверяли с помощью переносных весов, обеспечивающих точность взвешивания 0,5 кН. Измерение деформаций покрытия осуществляли длиннобазовым рычажным прогибомером, измерительная пятка которого устанавливалась между баллонами спаренного заднего колеса. Определение модуля упругости производили в тех же поперечных сечениях, что и в первом цикле испытаний.

Расчёт модуля упругости дорожной конструкции произведен по рекомендациям ОДН 218.1.052-2002 [187] (таблица 4.2) по формуле:

$$E_A = 0,36 \frac{Q_K}{l}, \quad (4.1)$$

где E_A – модуль упругости дорожной конструкции при воздействии расчётной нагрузки, МПа;

Q_K – нагрузка на колесо используемого автомобиля, кН;

l – величина измеренного обратимого прогиба, см.

Таблица 4.2 – Результаты измерения упругих деформаций на поверхности покрытия

Номер опыта	Нагрузка на колесо автомобиля Q_K , кН	Величина измеренного обратимого прогиба l , см	Модуль упругости дорожной конструкции E_A , МПа
1	30,3	0,145	75,2
2	30,3	0,124	88,0
3	30,3	0,140	77,9

Результаты измерения деформаций показали, что модуль упругости на поверхности земляного полотна из ЗШС изменяется в пределах от 24 до 28 МПа, на поверхности основания – от 43 до 48 МПа, на поверхности покрытия – от 75 до 88 МПа. Стоит отметить, что модуль упругости дорожной конструкции, рассчитан-

ный по рекомендациям ОДН 218.046-01 [60], равен 76,5 МПа. Таким образом, разница между значением опытного модуля упругости на неармированных участках и теоретическим значением составляет всего 2% [41].

Испытания показали, что укладка георешётки под слой щебёночного основания привела к некоторому увеличению модуля упругости всей дорожной конструкции. Прирост на поверхности основания составил 8,5%, на поверхности покрытия – 14,9%.

Летом 2013 г. на опытном участке были проведены испытания модуля упругости при помощи установки динамического нагружения (УДН) ДИНА-3М (рисунок 4.13).



Рисунок 4.13 – Определение модуля упругости на поверхности покрытия при помощи УДН ДИНА-3М

Рекомендации по расчёту модуля упругости приведены в СТ СЭВ 5497-86 [188, 189]. Модуль упругости при динамическом нагружении определяли по формуле:

$$E_{vdi} = \frac{\pi \cdot d \cdot \sigma_i}{4W_{0i}} (1 - \mu^2) \quad (4.2)$$

Где d – диаметр нагружаемого штампа, мм ($d = 340$ мм);

μ – коэффициент Пуассона (для дорожных конструкций $\mu = 0,3$);

W_{0i} – амплитуда упругой деформации нагруженной поверхности, мм;

σ_i – контактное напряжение, МПа, определяемое по формуле:

$$\sigma_i = \frac{4F_i}{\pi \cdot d^2}; \quad (4.3)$$

где F_i – динамическое усилие, развиваемое падающим грузом, Н.

Результаты испытаний и расчёта модуля упругости по формуле (4.2) приведены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Определение модуля упругости при помощи УДН ДИНА-3М

Номер испытания	Амплитуда упругой деформации W_{0i} , мм	Модуль упругости дорожной конструкции E_{vdi} , МПа	Средний модуль упругости E_{vdi} , МПа
1	2,43	55,1	63,3
2	1,93	69,3	
3	2,04	65,6	

Значения динамического модуля упругости дорожной конструкции с использованием ЗШС в земляном полотне меньше статического модуля упругости в среднем на 21%.

4.3 Результаты проектирования и строительства пилотных участков насыпей из золошлаковых смесей на транспортных развязках

В России (СССР) ЗШС из отвалов ТЭС применяли для возведения земляного полотна с 70-х годов прошлого века при строительстве подъездных дорог в районе городов Омск, Тверь, Воркута, при строительстве автомобильных дорог МКАД-Кашира, Москва-Серпухов, Алтай-Кузбасс и др. К сожалению, после распада СССР, интерес к утилизации отходов угас и их применение отошло на второй план. Только недавно эти разработки начали снова использоваться в строительстве. Внедрить результаты исследований нам удалось на двух крупных объектах транспортной инфраструктуры, насыпи которых были отсыпаны из ЗШС Каширской ГРЭС-4 и Держинской ТЭЦ-22 (рисунок 4.14) (приложение Г и Д).

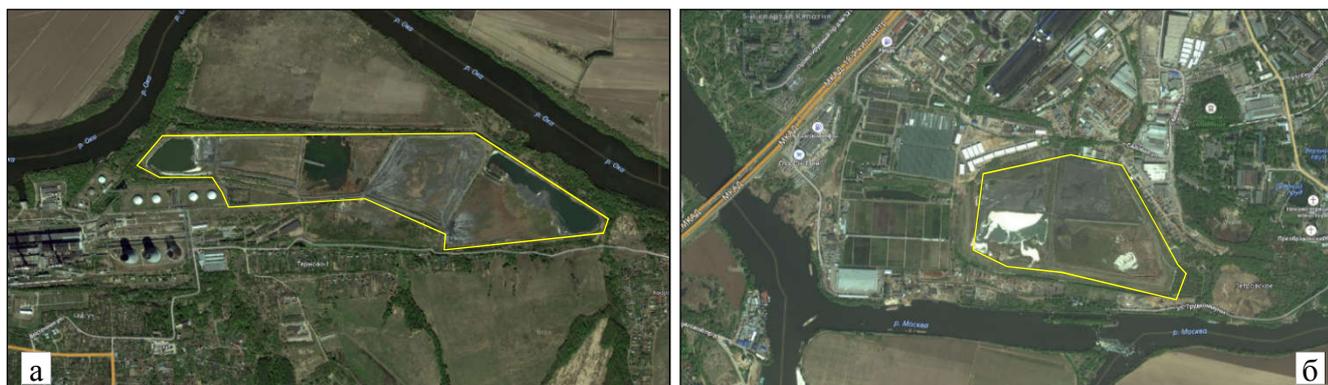


Рисунок 4.14 – Золоотвалы использованные в качестве источника материалов для строительства пилотных участков: а – отвал Каширской ГРЭС-4; б – отвал Держинской ТЭЦ-22

Особый интерес в Российской практике представляет объект, построенный с использованием ЗШС Каширской ГРЭС. Этот объект является первой в России транспортной развязкой на автомобильной дороге I В технической категории, с земляным полотном высотой до 15 м, построенным из ЗШС. Для сооружения земляного полотна использовано порядка 700 тыс. м³ ЗШС.

Развязка расположена на пересечении железнодорожных путей на 87-м км перегона Михнево – Жилево Московской железной дороги в Ступинском районе, вблизи д. Жилево (рисунок 4.15).

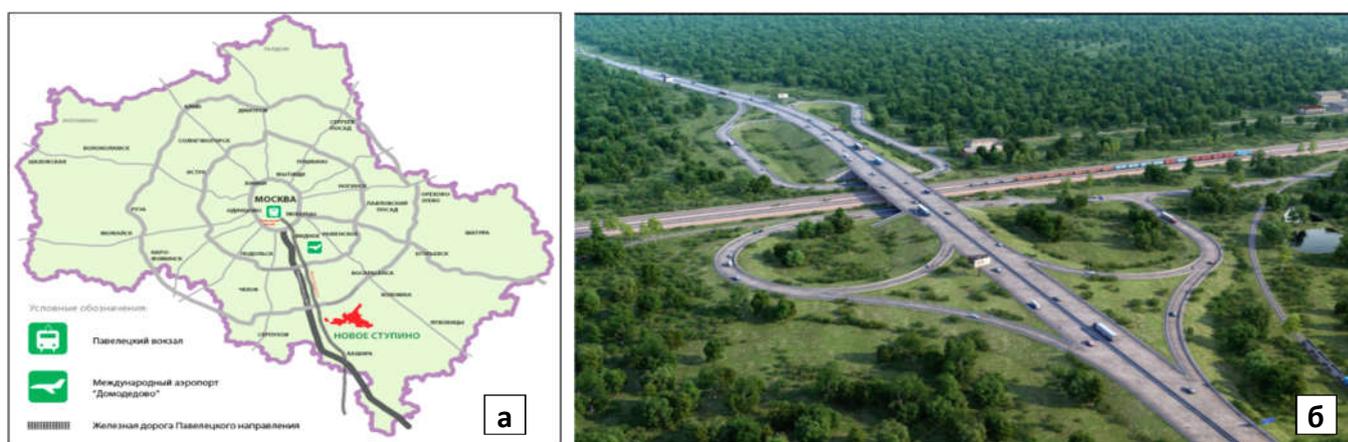


Рисунок 4.15 – Расположение развязки на дороге I в категории сооруженной из ЗШС Каширской ГРЭС-4 (а) и её 3D модель (б) (Кашира, Россия)

Выбор материала для сооружения насыпи был осуществлен решением технического совета Главного Управления дорожного хозяйства Московской области. В ходе обсуждения было рекомендовано генеральному подрядчику ОАО «Стройтрансгаз» применять в качестве грунта для сооружения земляного полотна ЗШС.

Для разработки этого «сосредоточенного резерва» техногенного грунта была выделена законсервированная секция золоотвала Каширской ГРЭС-4. Дальность транспортировки ЗШС из отвала до объекта составляла 40 км, тем не менее, проект оказался экономически обоснованным.

Ввиду значимости проектируемого объекта при расчёте устойчивости нами был использован комплексный подход (расчёт), включающий определение удерживающих и сдвигающих сил по трём различным методам: метод *Bishop* (*Бишоп*); метод *Fellenius/Petterson*; метод *Г.М. Шахунянца*.

Вначале проектных работ определяли устойчивость откосной части с заложё-

нием 1:2 (левая часть рисунок 4.16) и конструкции с устройством присыпных берм на различной высоте (правая часть рисунок 4.16). Для расчётов использовали значения механических параметров ЗШС, рекомендованные ОДМ 218.2.031-2013.

Оценка показала, что откос с заложением 1:2 не обеспечивает требуемый запас устойчивости. А конструкция с присыпными бермами обеспечивает необходимый коэффициент запаса, но требует на 17% большую ширину полосы отвода и на 13% увеличивает объём земляных работ.

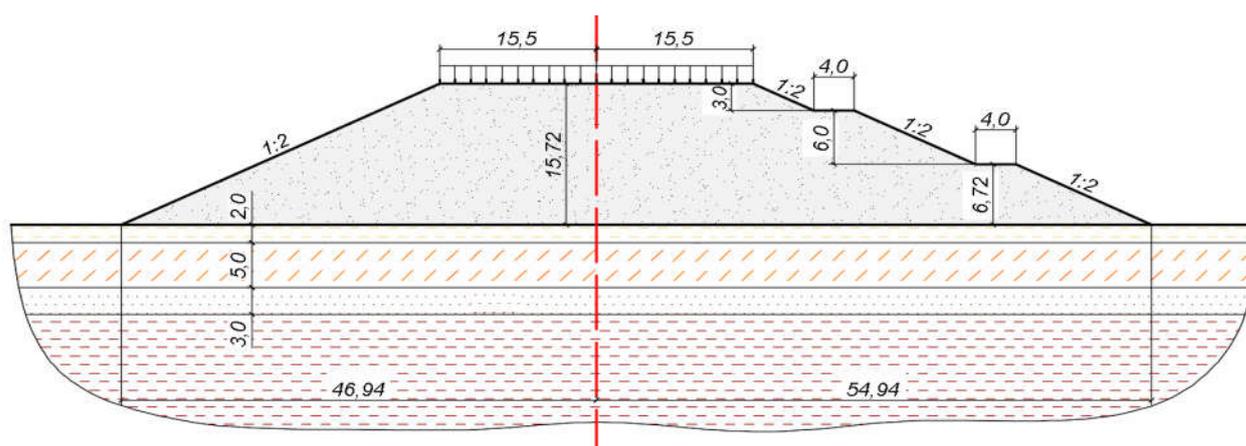


Рисунок 4.16 – Первоначальные расчётные конструкции земляного полотна из ЗШС

Поэтому было решено выполнить геотехнические изыскания на отвале Каширской ГРЭС-4. Специалистами ООО «ИнГео» (г. Москва) определялся ряд параметров этого техногенного грунта в том числе: природная влажность и плотность; угол естественного откоса (в сухом состоянии и под водой); угол внутреннего трения; удельное сцепление; модуль общей деформации; график стандартного уплотнения; характеристики просадочности; степень пучинистости.

После получения полного комплекса данных о свойствах ЗШС Каширской ГРЭС 4, нами были проведены дополнительные расчёты. При этом осуществлена попытка увеличить крутизну откоса с 1:2 до 1:1,5. Результаты комплексной оценки устойчивости откоса насыпи представлены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Результаты расчёта устойчивости откоса высокой насыпи из ЗШС Каширской ГРЭС (для прочностных параметров, определённых экспериментально)

Высота насыпи, м (заложение откоса)	Метод Bishop	Метод Fellenius/Petterson	Метод Шахунянца
	коэффициент запаса		
15,72 (1:2,00)	2,04	1,79	1,84
15,72 (1:1,75)	1,94	1,70	1,76
15,72 (1:1,50)	1,72	1,59	1,65

Высокие запасы прочности показали возможность строительства высокой насыпи из ЗШС с заложением 1:1,5, однако из опасения, что в процессе строительства возникнут нарушения технологии и отсутствия опыта работы с ЗШС у подрядной организации в проекте было принято заложение откоса 1:1:75 для всей высоты сооружения.

В ходе строительства не проводилась предварительная подготовка материала на отвале (как это предусматривает ОДМ 218.2.031-2013), а производители работ не регулярно контролировали качество привозимого материала. В результате периодически автосамосвалы доставляли на строительную площадку ЗШС с остатками растительности и включениями переувлажнённых глинистых грунтов (из прослоек при рекультивации золоотвала), что снижало качество земляного полотна (рисунок 4.17).

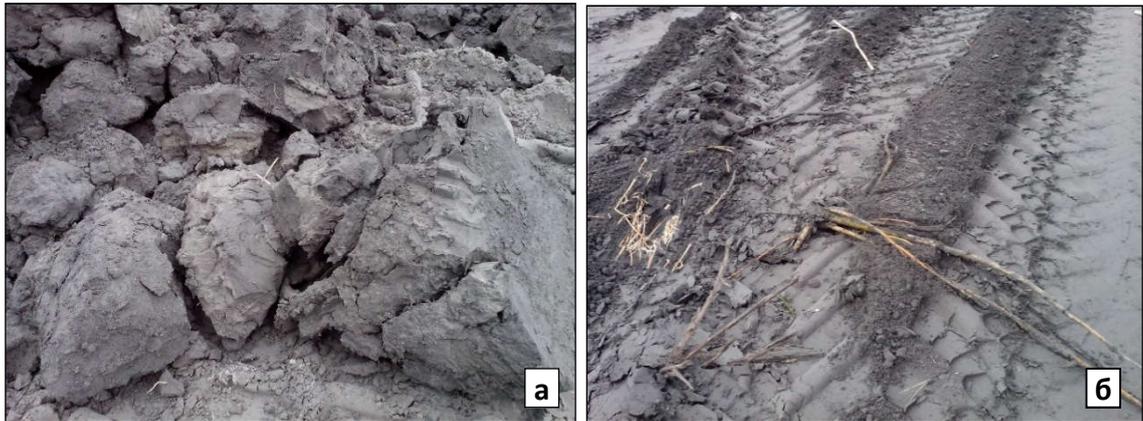


Рисунок 4.17 – Нарушение при отсыпке слоёв насыпи:
а – включения глинистых грунтов; б – включения растительных остатков

В основном эти включения удаляли вручную на строительной площадке, что существенно замедляло сооружение следующего слоя.

По этой причине требуется обратить внимание на следующие факты:

- в современных нормативных документах отсутствуют чёткие указания о допустимом содержании органических включений в теле насыпей;
- при сопоставлении ряда документов было установлено, что содержание органики в минеральном грунте не должно превышать 3% по массе (хотя проверить этот показатель при сооружении земляного полотна проблематично);
- выполнение соответствующих мероприятий на золоотвале в процессе подготовки его к разработке обязательны (удаление прослоек и растительного слоя)

поскольку наличие линз переувлажнённого глинистого грунта в теле насыпей из ЗШС приведёт к неравномерным деформациям земляного полотна.

Особенно эти положения касаются законсервированных секций золоотвалов.

Опыт работы на этом объекте показал целесообразность отказаться от прямой экскавации ЗШС с погрузкой в большегрузные автосамосвалы, с последующим разравниванием и уплотнением в насыпи в пользу использования бульдозера для предварительной буртовки этого техногенного грунта. Эта рекомендация помимо необходимости удаления инородных включений, позволяет уменьшить неоднородность свойств ЗШС по площади золоотвала. Рекомендуемые схемы подготовки и разработки ЗШС в отвале представлены на рисунке 4.18.

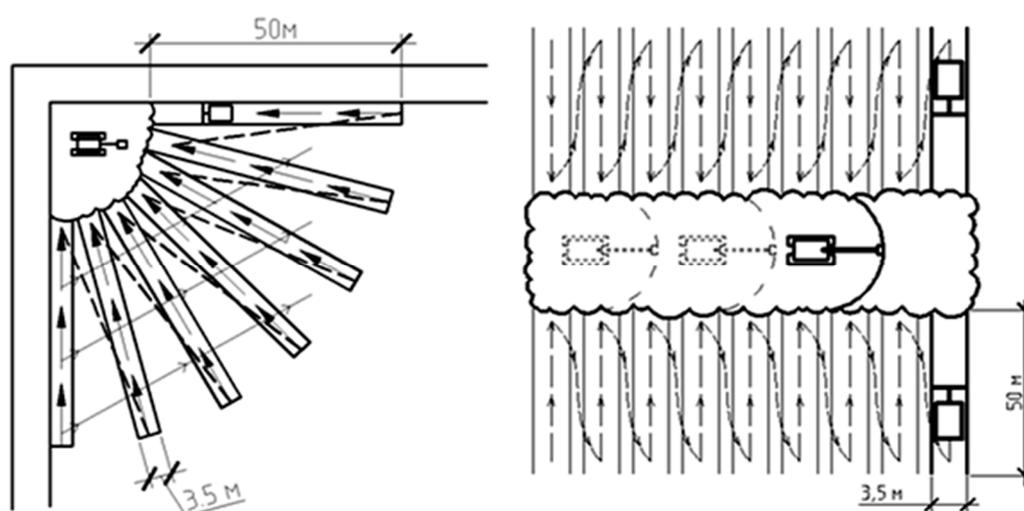


Рисунок 4.18 – Рекомендуемые схемы подготовки, разработки и погрузки ЗШС в золоотвале

Несмотря на отмеченные недостатки и некоторые недоделки, развязка была сдана в эксплуатацию 12.01.2016 (с участием губернатора Московской области Андрея Воробьёва) (рисунок 4.19).



Рисунок 4.19 – Окончание строительства объекта:
а – развязка в октябре 2015 г; б – развязка после укрытия откосов в мае 2016 г.

Поверхность откосов земляного полотна из ЗШС обладают сравнительно слабой противозерозионной устойчивостью и требуют защиты слоем растительного грунта, либо с помощью геосинтетического материала. При выборе геосинтетических материалов следует учесть, что при их использовании для укрепления откосов насыпей из легко размываемых (песок, ЗШС и т.п.) или плохо уплотнённых грунтов вода может попадать под геомат и размывать грунт под ним. Кроме того, материал необходимо закреплять не только анкерами, но и закапывать его в ровики, расположенные вдоль укрепленной части обочины и у подошвы откоса. Это значительно снижает опасность просачивания воды под полотно.

Завершение строительства земляного полотна осуществлялось в зимнее время, из-за этого откосные части не были отпланированы и укреплены. Всю зиму 2015 – 2016 гг. развязка функционировала без защиты откосов от эрозии. Это является нарушением технологии, которое не привело к значительным негативным последствиям на данном объекте. Хотя весной были отмечены небольшие размывы поверхности откосной части, в целом насыпь из ЗШС не подверглась существенным размывам (рисунок 4.20).



Рисунок 4.20 – Последствия оставления откосов без защиты в зимний период:
а – размыв песка из подстилающего слоя дорожной одежды; б – местная эрозия откосов насыпи из ЗШС.

Решение этой проблемы не требует каких-либо дополнительных мероприятий. Достаточно своевременно закрыть поверхность откоса, например, геоматом с обратным фильтром из нетканого геотекстиля, и небольшим слоем растительного грунта (до 7 см) с посевом трав.

Вторым уникальным объектом с земляным полотном из ЗШС, при проектировании и строительстве которого мы принимали непосредственное участие, была транспортная развязка, расположенная на пересечении Лыткаринского шоссе и магистрали М-5 «Урал» в Люберецком районе Московской области (рисунок 4.21).



Рисунок 4.21 – Развязка на трассе М-5 «Урал»: а – расположение плана на карте; б – развязка после сдачи в эксплуатацию в январе 2018 г.

После положительного результата, полученного на объекте в Кашире, правительством Москвы было подписано распоряжение, согласно которому, без специального обоснования, запрещается отвод земель под грунтовые карьеры для дорожного строительства в радиусе 40 км от золоотвалов. Поскольку проектируемая развязка находилась в 7 км от отвала Дзержинской ТЭЦ-22, было решено отсыпать земляное полотно из ЗШС из этого золоотвала.

При проведении инженерно-геологических изысканий были привлечены специалисты ООО «ИнГео» (г. Москва). Определялся тот же ряд параметров ЗШС, что и для объекта в Кашире.

Уникальность объекта заключается в его расположении в особо сложных условиях. Один из съездов проходит по заболоченному участку, другой простирается по территории свалки твёрдых бытовых отходов. Имели место так же сложности в технологии строительства, связанные с климатическими условиями. Ввиду значимости проектируемого объекта при расчёте устойчивости нами был использован тот же комплексный подход (расчёт), что и для объекта в Кашире, включающий определение удерживающих и сдвигающих сил по трём различным методам: *Bishop (Бушона); Fellenius/Petterson; Г.М. Шахуняца.*

В ходе строительства этого объекта были частично учтены наши рекомендации, данные при строительстве развязки в Кашире. А именно, частично была осуществлена подготовка отвала к разработке (рисунок 4.22).



Рисунок 4.22 – Подготовка отвала к разработке: а – сдвигка растительного слоя; б – уборка глинистых включений.

Однако, аномальные климатические условия конца лета-начала осени 2016 г. (длительные дожди) и недостоверные данные геологических изысканий внесли свои коррективы (так, вместо уровня грунтовых вод на глубине 4 метров, у подошвы насыпи протекал ручей). ЗШС складировалась в бурт у ручья, который весной превратился в небольшое озеро. Поэтому ЗШС подвергалась длительному увлажнению атмосферными осадками и поверхностными водами, которые не давали ЗШС «сбросить» воду вниз, как обычно.

В результате подрядчик начал отсыпать земляное полотно из материала с влажностью значительно выше оптимальной и близкой к влажности при полном водонасыщении. Пока температура была положительной, испарение влаги из слоя ЗШС позволило осуществлять отсыпку и уплотнение материала с требуемой плотностью. Однако со снижением температуры воздуха и смеси, испарение замедлилось, и у подрядчика возникли проблемы, связанные с уплотнением слоёв (рисунок 4.23). Поэтому окончание земляных работ было перенесено на весну.



Рисунок 4.23 – Строительство на объекте в ноябре 2016 г.: а – разработка бурта экскаватором; б – последствия избыточной влажности ЗШС

Дополнительный опыт, полученный нами на данном объекте, подтвердил, что ЗШС легко поглощает и также быстро «сбрасывает лишнюю воду». Поэтому ЗШС с избыточной влажностью нужно отсыпать в промежуточный бурт, а через 4 – 6 дней укладывать в насыпь. Причём влажность ЗШС перед уплотнением должна находиться в пределах допустимой. Точно установить границы допустимой влажности ЗШС (как и любого грунта) можно только пробным уплотнением в конкретных условиях. Попытка уплотнить ЗШС (как и любой грунт) виброкатками с влажностью, превышающей допустимую, ведёт к виброразжижению этого грунта.

При определении допустимого коэффициента увлажнения ЗШС важно помнить, что, как многие песчаные грунты, ЗШС не имеют чётко выраженной величины оптимальной влажности и максимальной стандартной плотности (рисунок 4.24).

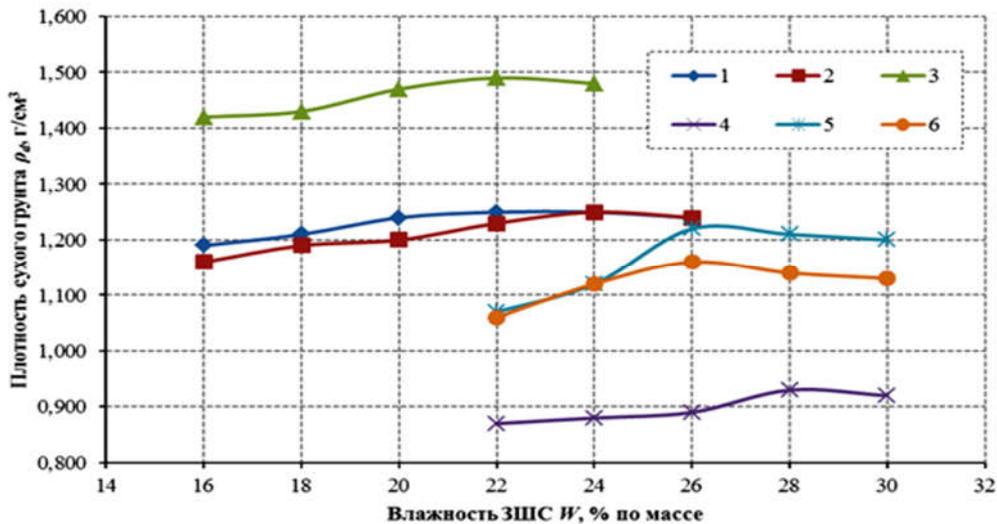


Рисунок 4.24 – Типичные графики стандартного уплотнения шести проб ЗШС

Поэтому за оптимальную влажность следует принимать значение локального максимума на графике стандартного уплотнения или влажность перед зоной отжатия воды при уплотнении. Кроме того, оптимальная влажность ЗШС значительно выше чем у большинства природных грунтов. Как отмечалось нами выше, причиной этого является высокая микропористость зольных частиц, предопределяющая повышенное водопоглощение этого техногенного грунта.

В целом же все отмеченные недостатки являются результатом нарушений технологии строительства, разработки или хранения материала. И при правильном производстве работ с ЗШС вышеуказанные проблемы не возникают.

Второй крупный объект, на котором внедрены и проверены результаты наших экспериментально-теоретических исследований, успешно сдан в эксплуатацию в январе 2018 г. В настоящее время развязка интенсивно эксплуатируется без каких-либо замечаний.

Выводы по четвертой главе

1. Моделирование в программе Plaxis 2D и оценка устойчивости откосов высоких насыпей из ЗШС с применением методов предельного равновесия (*Феллениуса-Петерсена, Шахунянца, Бишона*) показали, что использованием численных значений механических параметров, рекомендованных в ОДМ 218.2.031-2013, приводит к необходимости значительного уполаживания откосов (более чем 1:2), увеличению ширины полосы отвода и объёмов земляных работ. Расчёт устойчивости с использованием параметров ЗШС, рекомендованных нами, допускает устройство более крутых откосов (1:1,5) с соответствующим уменьшением объёмов работ.

2. Проверка достоверности расчётных значений механических параметров ЗШС, осуществлённая на опытном участке, показала, что полученные модели и численные значения параметров могут применяться при проектировании насыпей земляного полотна из ЗШС. Это позволило нам перейти к проектированию опытно-производственных объектов транспортной инфраструктуры.

3. Опытно-производственная проверка результатов экспериментально-теоретических исследований, осуществлённая при проектировании, строительстве и эксплуатации двух крупных и ответственных объектов (высокие насыпи на транспортных развязках), подтвердила достоверность наших рекомендаций по расчётным значениям механических характеристик ЗШС.

4. Непосредственное участие в сооружении земляного полотна из ЗШС на транспортных развязках, расположенных на пересечении железнодорожных путей на 87 км перегона Михнево – Жилево и на пересечении Лыткаринского шоссе и магистрали М-5 «Урал» в Московской области позволило нам приобрести дополнительный опыт и знания в области проектирования и строительства земляного полотна автомобильных дорог из ЗШС.

5 ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ И ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПРЕДЛАГАЕМЫХ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ

5.1 Экологическая оценка применения золошлаковых смесей для строительства насыпей земляного полотна

За рубежом вопрос об отсутствии у золошлаков ТЭС опасных свойств давно решён. Во всем мире ЗШО считаются неопасными (термин «токсичные» к золошлакам там не применяется). В марте 1989 г. в г. Базеле была принята Конвенция по контролю над трансграничной перевозкой опасных отходов и их удалением. В этом документе все отходы в зависимости от их опасности поделены на три списка: Красный, Желтый и Зелёный. Отходы, включённые в Зелёный список, не обладают ни одним из опасных свойств (токсичность, канцерогенность, тератогенность, мутагенность, экотоксичность), перечисленных в Директиве ЕС 91/689/ЕЕС по опасным отходам. Золошлаки ТЭС в этом документе включены в Зелёный список.

Базельская конвенция ратифицирована Федеральным законом Российской Федерации №49-ФЗ от 25.11.1994 г. Сам факт ратификации конвенции фактически является признанием того, что золошлаки ТЭС относятся к безопасным отходам.

В 2002 г. в Европейском сообществе введён в действие каталог отходов, в котором указано, какие отходы являются опасными, какие – нет. Золошлаки углей в этом каталоге отнесены к неопасным, (позиции 0 01 01 и 10 01 02 каталога). В США в каждом штате существуют свои критерии, по оценке класса опасности отходов.

Наиболее жёсткие требования к оценке опасности веществ и отходов, в частности, имеют место в штате Калифорния. Опасность отходов в этом штате определяется в первую очередь содержанием микроэлементов, для которых установлены предельные концентрации, выше которых отход относится к опасным. Однако установлено, что ни в одной стране мира содержание микроэлементов в золе ТЭС не превышает этих предельных значений [190]. Несмотря на то что некоторые СМИ РФ и Мира регулярно говорят обратное [191].

В России вопрос экологической опасности конкретных золошлаков требует обязательного документального подтверждения. Поэтому в рамках исследования рассмотрены следующие вопросы экологической оценки золошлаков:

- оценка химических составов ЗШС;
- оценка радиационной безопасности ЗШС;
- оценка принадлежности ЗШС к классу опасности для окружающей среды;
- проверена пригодность ЗШС, для роста травяного покрова на откосных частях земляного полотна;
- оценка пылеуноса ЗШС.

Первые три показателя можно условно отнести к традиционным и нормируемым различными документами. Два последних показателя не нормируются, но представляют научный и практический интерес при использовании ЗШС для строительства земляного полотна автомобильных дорог и планировочных насыпей.

5.1.1 Оценка традиционных и нормируемых показателей

Федеральные законы и подзаконные акты, регламентирующие применение золошлаковых отходов (ЗШО), делают основной акцент на экологической безопасности их использования. Поэтому для оценки возможности их применения проводится комплексная оценка экологической безопасности ЗШО. Основными экологическими требованиями, учитываемыми в этом случае, являются: химический состав и удельная эффективная активность естественных радионуклидов. На основе этих показателей определяется класс опасности материала по степени негативного воздействия на окружающую среду согласно ФЗ-89 «Об отходах производства» [192], в соответствии с Приказом МПР РФ от 04.12.2014 № 536 [193].

Оценка базируется на основе отнесения их к классу опасности для окружающей природной среды с использованием расчётного метода, подтверждённого биологическим тестированием и дополнительным контролем значения удельной эффективной активности природных радионуклидов ($A_{эфф}$, Бк/кг).

Поскольку большинство исследований имеет прикладной характер, и направлено на применение ЗШС в строительстве, применяемые в ходе испытаний методы базируются на действующей нормативной базе РФ.

Для анализа выбраны ЗШС Каширской ГРЭС-4, Дзержинской ТЭЦ-22, Омских ТЭЦ-4, Беловской ГРЭС, Кемеровской ГРЭС, Иркутской ТЭЦ-10, Ново-Иркутской ТЭЦ, Барабинской ГРЭС. Эти ЗШС являются производными от сжигания углей Донецкого, Экибастузского, Канско-Ачинского, Азейского, Мугунского и Кузнецкого углей, т.е. практически всех основных топливных углей РФ.

Определение химического состава золошлаков проводилось по методам ПНД, с использованием атомно-эмиссионного спектрального анализа. Исследования проводили для образцов, отобранных с различных участков золоотвалов. Кроме химического анализа, для некоторых образцов исследовали фазово-минералогический состав, который также влияет на свойства материалов.

По химическому составу ЗШС от сжигания Экибастузских, Кузнецких, Азейских, Мугунских и Донецких углей по Российской классификации, относятся к низкокальциевым, кислым и сверхкислым (инертным) ЗШС (см. таблицы 1.1 и 5.1).

Таблица 5.1 – Химический состав низкокальциевых ЗШС

Название электростанции	Сжигаемый уголь	Химический состав, в % по массе								
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	п.п.п.
Омская ТЭЦ-4	Экибастузский	71,8	16,6	4,6	2,4	1,1	2,0	0,4	0,2	0,9
Беловская ГРЭС	Кузнецкий	59,4	20,2	6,3	3,3	1,6	1,9	0,9	1,4	5,0
Кемеровская ГРЭС		57,6	24,3	7,4	2,0	1,1	1,9	0,7	0,8	4,2
Дзержинская ТЭЦ-22	Донецкий	51,9	19,8	12,7	2,4	0,9	2,1	1,0	0,2	8,9
Каширская ГРЭС-4		59,9	21,8	9,3	3,3	1,5	1,8	0,6	0,1	0,1
Иркутская ТЭЦ-10	Азейский и Мугунский	52,1	26,0	8,2	8,0	1,4	0,5	0,1	0,3	2,7
Ново иркутская ТЭЦ		49,4	22,2	15,8	7,3	1,8	0,6	0,1	0,3	1,9

Низкое содержание оксида кальция и магния предопределяет неспособность этих ЗШС к гидратации и самостоятельному твердению при контакте с водой. По американской классификации эти ЗШС можно отнести к классу F [194], как и большинство зол, исследованных в работах [64-85].

Преобладание в ЗШС породообразующих компонентов, таких как кремнезём, глинозем и гематит, обуславливают их инертность, стабильность химического состава и свойств. Большая часть компонентов этих золошлаков является нерастворимыми в воде. Слаборастворимые и растворимые в воде компоненты вымываются из ЗШС при их транспортировке в золоотвал виде пульпы и в течение хранения в отвале.

Золошлаки от сжигания Канско-Ачинских углей содержат большее количество оксида кальция и магния, что обуславливает их принадлежность к высококальциевым золоам (см. таблицы 1.1 и 5.2), имеющим способность к гидратации и самоцементации в присутствии воды.

Таблица 5.2 – Химический состав высококальциевых ЗШС

Название электростанции	Сжигаемый уголь	Химический состав, в % по массе								
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	п.п.п.
Новосибирская ТЭЦ-3	Канско-Ачинский	21,9	8,2	7,8	42,1	4,7	7,6	0,4	2,9	3,4

По классификации ASTM золошлаки от сжигания Канско-Ачинских углей соответствуют классу С и схожи по химическому составу с материалами, исследованными в работах [68, 81].

Гидролиз, гидратация и вымывание активных и растворимых компонентов в высококальциевых ЗШС также происходит при попадании их в багерную насосную, при подаче на золоотвал в виде пульпы и длительном хранении в отвале. Для отбора зол-уноса на некоторых ТЭС (в частности, на ТЭЦ-3 г. Новосибирска) имеются системы сухого золоотбора. Эти золы обладают высокой гидравлической активностью при затворении водой.

Оценка свойств радиоактивности производилась для всех образцов ЗШС с описанных выше золоотвалов с помощью бетта-гамма-спектрометрического комплекса. В соответствии с СанПин 2.6.1.2523-09 («НРБ 99/2009») и СП 2.6.1.2612-10 [195, 196]. Проведённые оценки степени радиоактивности, которые сводились к определению удельной эффективной активности природных радионуклидов, показали результаты, представленные в таблице 5.3.

Таблица 5.3 – Удельная эффективная активность природных радионуклидов, Бк/кг

Название электростанции	Омская ТЭЦ-4	Беловская ГРЭС	Кемеровская ГРЭС	Дзержинская ТЭЦ-22	Каширская ГРЭС-4	Иркутская ТЭЦ-10	Новоиркутская ТЭЦ-3
Удельная активность радионуклидов	81±19	166±18	177±7	93±18	193±11	124±18	93±8
Класс опасности	I (до 370 Бк/кг) Материалы пригодные для всех видов строительства						

Все исследованные ЗШС показали близкие значения уровня радиоактивности, не превышающие порог для присвоения им I класса по удельной эффективной активности природных радионуклидов (не имеющих ограничения в применении), как и ранее в работе [197]. Показатели удельной эффективной активности природных радионуклидов ЗШС большей части европейских государств существенно выше, тем не менее, ЗШО активно применяют в этих государствах в строительной отрасли.

Результаты сравнения показали, что ЗШС, образующиеся на ТЭС в РФ обладают низкой степенью радиоактивности. По этому показателю они ближе к ЗШС Польши и Испании, в то время как самыми радиоактивными оказались золы Балканского региона (Сербия, Греция, Турция), которые от 2-х до 15 раз более радиоактивны [198].

Причина радиоактивного фона ЗШС заключается в том, что любая горная порода и все грунты имеют определенный уровень радиационного фона и уголь не исключение. При сжигании, органическая часть угля выгорает, увеличивая концентрацию радиоактивных компонентов. Однако для всех исследованных ЗШС показатель эффективной активности оказался в пределах нормы для самого «нерадиоактивного» – I класса по удельной эффективной активности природных радионуклидов.

Определение класса опасности для окружающей природной среды выполняли и на основе биотестирования водных вытяжек из ЗШС. Присвоение класса опасности для ЗШС Каширской ТЭЦ-4 и Дзержинской ТЭЦ-22 проводили на основе оценки выживаемости двух культур гидробионтов – *Paramecium caudatum* и *Ceriodafnia affinis*, при разной концентрации раствора водной вытяжки, а для остальных смесей – *Daphnia magna Straus*, согласно ФР.1.39.2007.03222 [197] и *Scenedesmus quadricanda*, ФР.1.39.2007.03223 [198].

Оценка класса опасности для окружающей среды показала, что водная вытяжка из всех исследованных ЗШС не оказала существенного воздействия на жизнедеятельность культур гидробионтов. Все образцы показали отсутствие воздействия на популяцию гидробионтов, даже при тестировании чистой вытяжки. Результаты проведённых исследований представлены в таблице 5.4.

Таблица 5.4 – Результаты биотестирования водных вытяжек из образцов ЗШС

Название электростанции	Культура гидробионтов	Потери популяции, %	Присвоенный класс опасности
Омская ТЭЦ-4	<i>Daphnia magna</i> Straus	3,3	V (практически неопасные отходы)
	<i>Scenedesmus quadricanda</i>	9,0	
Беловская ГРЭС	<i>Daphnia magna</i> Straus	8,5	V (практически неопасные отходы)
	<i>Scenedesmus quadricanda</i>	5,8	
Кемеровская ГРЭС	<i>Daphnia magna</i> Straus	3,3	V (практически неопасные отходы)
	<i>Scenedesmus quadricanda</i>	-19,3	
Дзержинская ТЭЦ-22	<i>Paramecium caudatum</i>	0,0	V (практически неопасные отходы)
	<i>Ceriodaphnia affinis</i>	0,0	
Каширская ГРЭС-4	<i>Paramecium caudatum</i>	0,0	V (практически неопасные отходы)
	<i>Ceriodaphnia affinis</i>	0,1	
Иркутская ТЭЦ-10	<i>Daphnia magna</i> Straus	0,7	V (практически неопасные отходы)
	<i>Scenedesmus quadricanda</i>	1,9	
Новоиркутская ТЭЦ	<i>Daphnia magna</i> Straus	1,4	V (практически неопасные отходы)
	<i>Scenedesmus quadricanda</i>	2,1	

Таким образом, по нормируемым экологическим показателям все исследованные золошлаки могут применяться для всех видов сооружений без ограничений.

5.1.2 Пригодность золошлаковой смеси для роста травы на откосных частях земляного полотна

Оригинальный подход, подобранный для оценки ЗШС, как питательной среды для посева трав, являющихся обязательным элементом при благоустройстве планировочных насыпей.

В рамках этого подхода выполнено два отдельных исследования:

- проведены исследования всхожести семян многолетних трав в лабораторных условиях на образцах различных грунтовых смесей с внесением армирующих элементов;
- сооружён опытный участок из ЗШС с разными типами укрепления откос-

ных частей, состояние которых отслеживали в течение нескольких лет.

Для первой серии экспериментов *В.А. Шнайдер* использовались шесть опытных образцов. Каждая из сред была помещена в полипропиленовый контейнер шириной 18 см, длиной 25 см и высотой 13 см (рисунок 5.1) [201].

Для эксперимента использовали следующие среды:

- только ЗШС Омской ТЭЦ-4 слоем 8 см (образец № 1);
- композитный образец с нижним слоем из ЗШС (4 см), прослойка из геокомпозита, верхний слой из растительного грунта (4 см) (образец № 2);
- композитный образец с нижним слоем из супесчаного грунта (4 см), верхний слой из растительного грунта (4 см) (образец № 3);
- композитный образец с нижним слоем из ЗШС (4 см), прослойка из геомата, верхний слой из растительного грунта (4 см) (образец № 4);
- композитный образец с нижним слоем из речного песка (4 см), верхний слой из растительного грунта (4 см) (образец № 5);
- композитный образец с нижним слоем из ЗШС (4 см), верхний слой из растительного грунта (4 см) (образец № 6).

В каждый образец заливали одинаковое количество воды и высевали семена луговых трав. После чего все образцы помещались в лабораторную термокамеру с температурой воздуха 25 °С, влажностью 75% и освещением, эквивалентным уличному. Каждые два дня поливали образцы водой питьевого качества.

Прорастание семян наблюдали спустя четыре дня на всех образцах кроме № 1. Активнее всего рост происходил на моделях № 3 и № 5. На восьмой день эксперимента, появился травяной покров различной интенсивности на всех образцах. Самый густой покров отмечался на образцах № 3 и № 5, а минимальный – на образце № 6. К 14-му дню наблюдений наименьшая густота травы была отмечена на образце № 6, остальные образцы лишь немного отличались высотой (рисунок 5.1).

После 30 дней испытаний проанализировали корневую систему травы в каждом образце. Оказалось, что на всех моделях с верхним слоем из растительного грунта корни образовались только в пределах данного слоя (4 см). В моделях № 2 и № 4 корни не прошли сквозь слой геосинтетического материала, а в образце № 1 корни имели наибольшую длину – 8 см.

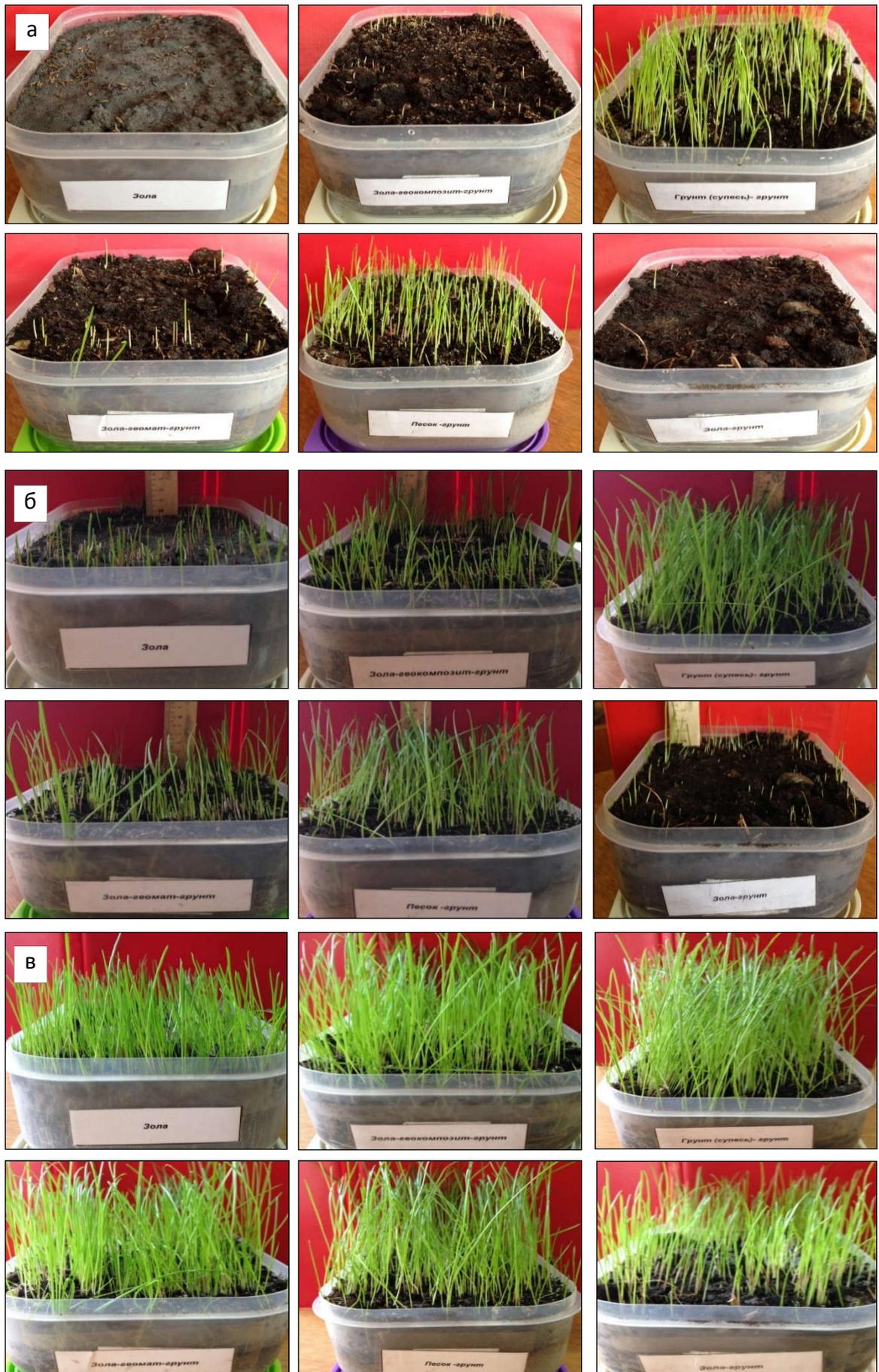


Рисунок 5.1 – Образцы для исследования развития травяного покрова
 а – 4-й день опыта; б – 8-й день опыта; в – 14-й день опыта.

При наличии геосинтетической прослойки, локализация корней в верхнем слое легко объясняется прочностью и слабой проницаемостью этого материала.

При исследовании слоистых сред наблюдается тенденция к заполнению только питательной среды. По всей видимости, при росте в лабораторных условиях растения заполняли корнями только верхний слой т.к. не нуждались в дополнительном питании от менее питательных слоёв.

В случае с образцом № 1 (только ЗШС Омской ТЭЦ-4 слоем 8 см), корни растений были вынуждены прорасти глубже в силу недостатка питательных веществ в ЗШС. Помимо знания о низкой плодородности ЗШС это говорит о необходимости стимуляции развития корневой системы растений, произрастающих на откосе насыпи из ЗШС, что будет создавать больший армирующий эффект. Низкая всхожесть растений, посеянных на ЗШС в ранние периоды, может способствовать эрозионному разрушению откосов. Поэтому целесообразно подбирать культуры более пригодные для роста на ЗШС и/или вводить в этот техногенный грунт удобрения [201].

Вторую серию экспериментов проводили на опытном участке насыпи из ЗШС Омской ТЭЦ-4 (см. п.4.2).

После сооружения насыпи, откос укрепляли представленными в п. 4.2 конструктивными решениями на полосах шириной 4 м. Посев трав (*Festuca rubra* и *Phleum pratense*) проводился ручным методом из нормы 40 г на м². Семена и траву поливали водой питьевого качества из расхода 0,01 м³ на м² площади в течение первого месяца. После чего проводился мониторинг состояния откосных частей.

После посева семян на откос не наблюдалось существенного роста травяного покрова. Были отмечены единичные растения, без создания покрова. Причём различий, связанных с типом укрепления, не наблюдалось.

Спустя год, в тот же период было отмечено увеличение количества растительности вида, не принадлежавшего *Festuca rubra* или *Phleum pratense*, что связано с попаданием на откос семян многолетних трав с окружающей территории.

На третий год был отмечен резкий прирост растительности с образованием плотного растительного покрова (рисунок 5.2).

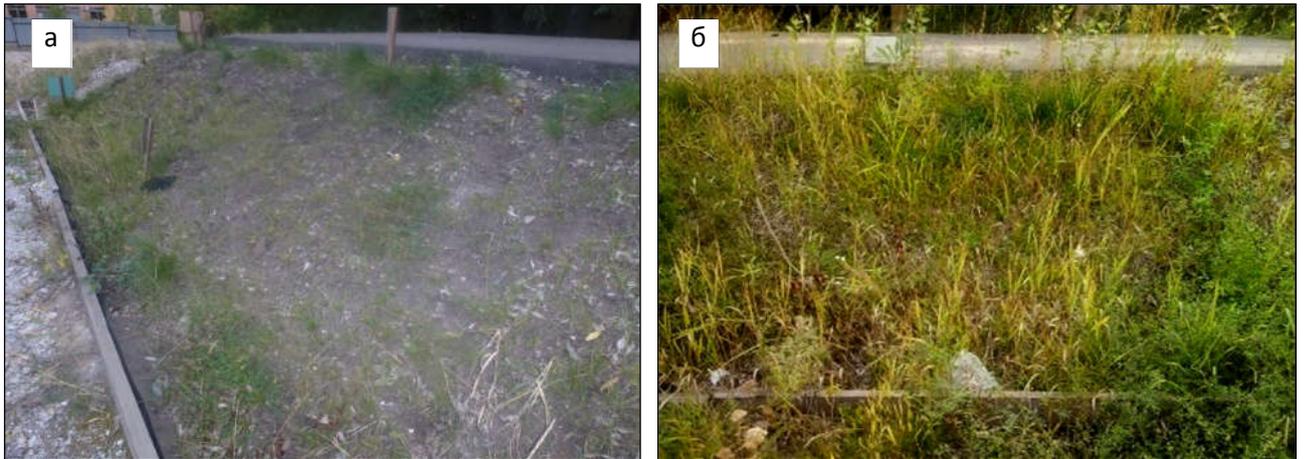


Рисунок 5.2 – Вид откосной части: а – в сентябре 2012 г.; б – в сентябре 2013 г.

После этого участок был задействован для других испытаний (см. п.4.2).

В 2018 г. мы вернулись к исследованию травяного покрова. Первый срез для определения плотности травяного покрова был произведён в августе, повторные в сентябре и октябре. Для обозначения границ среза использовали алюминиевую рамку, площадью 0,185 м². При отборе проб её прикладывали к откосной части насыпи и срезали травяной покров, попавший внутрь рамки (рисунок 5.3).



Рисунок 5.3 – Срез и взвешивание травы

Для сравнения так же провели отбор проб на откосе из суглинистого грунта. Срезанную траву взвешивали на технических весах (см. рисунок 5.3).

Для идентификации всех трав, полученных после срезания на всех участках, использовали интернет-источники и энциклопедии. Результаты определения плотности и видов травяного покрова сведены в таблицу 5.5.

Таблица 5.5 – Сведения о видовом составе трав и их плотности

№ участка	Преобладающие виды травы	Плотность травы по датам среза, г/м ²		
		08.2018	09.2018	10.2018
I	Овсяница Кислица обыкновенная	414,05	182,16	372,43
II	Овсяница Чистец	3405,40	742,70	814,05
III	Пырей ползучий Горец птичий	2309,73	803,24	557,84
IV	Овсяница Клевер	384,86	168,65	543,24
V	Овсяница Горец вьюнковый	383,24	169,73	309,73

Помимо численных показателей плотности травяного покрова был определен видовой состав покрова [202]:

- на I участке (уложен геомат с подложкой из нетканого геотекстильного материала) произрастали: кислица обыкновенная (*Oxalis acetosella*), овсяница (*Festuca*), одуванчик обыкновенный (*Taraxacum officinale*), сныть обыкновенный (*Aegopodium podagraria*);

– на II участке (уложен геомат, покрытый слоем растительного грунта) произрастали: овсяница (*Festuca*), одуванчик обыкновенный (*Taraxacum officinale*), чистец (*Stachys*);

– на III участке (уложен только слой растительного грунта) произрастали: пырей ползучий (*Elymus repens*), горец птичий (*Polygonum aviculare*), осот пылевой (*Sonchus arvensis*);

– на IV участке (откос из уплотненной ЗШС без укрепления и без посева трав) произрастали: пырей ползучий (*Elymus repens*), одуванчик обыкновенный (*Taraxacum officinale*), клевер (*Trifolium*), овсяница (*Festuca*), хвощ полевой (*Equisetum arvense*);

– на V участке (откос из уплотнённого суглинка без укрепления) произрастали: одуванчик обыкновенный (*Taraxacum officinale*), клен (*Acer*), овсяница (*Festuca*), горец вьюнковый (*Fallopia convolvulus*).

По результатам проведённых исследований можно сделать выводы.

На откосе насыпи из ЗШС лучше растут: овсяница (I, II, IV, V участки), кислица обыкновенная (I участок), чистец (II участок), пырей ползучий (III, IV участки), горец птичий (III участок), клевер (IV участок), горец вьюнковый (V участок). Их объединяет принадлежность к полевым травам, т.е. они произрастают самопроизвольно и не требуют никакого ухода.

Наиболее подходящий тип укрепления позиции прорастания трав является геоконкрет, т.к. плотность травяного покрова на данном участке была наибольшей по сравнению с остальными типами укрепления.

Густота травяного покрова при укреплении откоса геоконкретом незначительно отличается от участка откоса из суглинка, что указывает на отсутствие негативного влияния ЗШС на прорастание травяных культур.

Трава для укрепления откосов из ЗШС должна иметь крепкую корневую систему, которая глубоко проникает в почву и имеет разветвленную приповерхностную сеть с многочисленными корешками, образующими плотный дерн. К таким травам относится овсяница, горец птичий [202].

5.1.3 Оценка пылеуноса золошлаковой смеси

При строительстве земляного полотна из ЗШС может проявляться существенный недостаток этого техногенного грунта – под действием движения воздушных масс с поверхности слоя могут уноситься мельчайшие частицы золы. Пылеунос не является полностью экологической характеристикой, скорее его следует отнести к области гигиенического воздействия. Тем не менее, если не принимать во внимание это свойство ЗШС, то в результате пыления могут возникнуть следующие проблемы:

- риск вреда здоровью (при попадании в глаза и/или дыхательные пути);
- повышенный износ техники (налипание золы на смазку и попадание в двигатель и механизмы машин);
- ветровая эрозия откосов до их укрепления.

По результатам экспериментов *Комонова С.В.* [203], интенсивность пыления ЗШС в наибольшей мере зависит от следующих факторов:

- фракционного состава ЗШС;
- влажности ЗШС;
- способ формирования массива.

Количество уносимых частиц зависит от их размера. В случае преобладания в слое агрегатов с диаметром менее 0,05 мм силы межмолекулярного взаимодействия настолько сильны, что оторвать отдельное зерно становится затруднительно. Похожая ситуация возникает если материал состоит из частиц с размером от 2,0 до 10,0 мм, только в этом случае унос затруднён не поверхностными силами, а высоким весом в сочетании с низкой парусностью. Наибольшей сдуваемостью отличаются частицы размера 0,05 – 1,0 мм. Графики зависимости пылеуноса золошлака от скорости ветра для разных размеров агрегатов при влажности 5 % по массе представлены на рисунке 5.4 (по данным [203]).

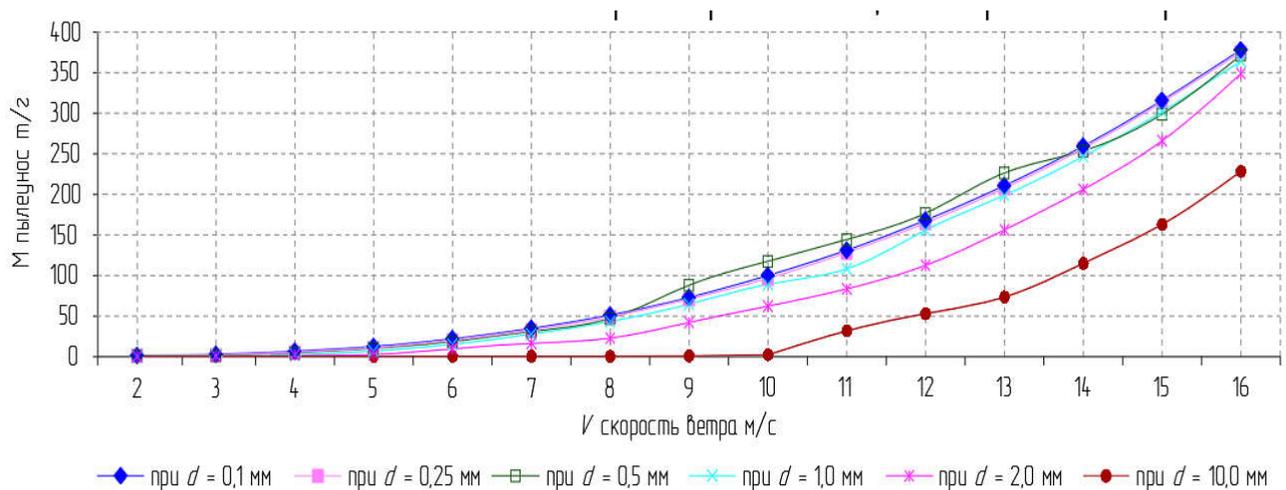


Рисунок 5.4 – Пыление частиц в зависимости от размера частиц и скорости ветра

Особую роль в процессе пыления играет вода. Наличие влаги на поверхности агрегатов создаёт связи, которые легко разрываются при высыхании. Пыление происходит при содержании воды порядка 3 – 5% (воздушно-сухое состояние материала) и почти прекращается при влажности свыше 10%. При влажности золошлака близкой к оптимальной, пылеунос даже под действием самых сильных ветров не представляет опасности. Зависимость пыления от влажности представлена на рисунке 5.5.

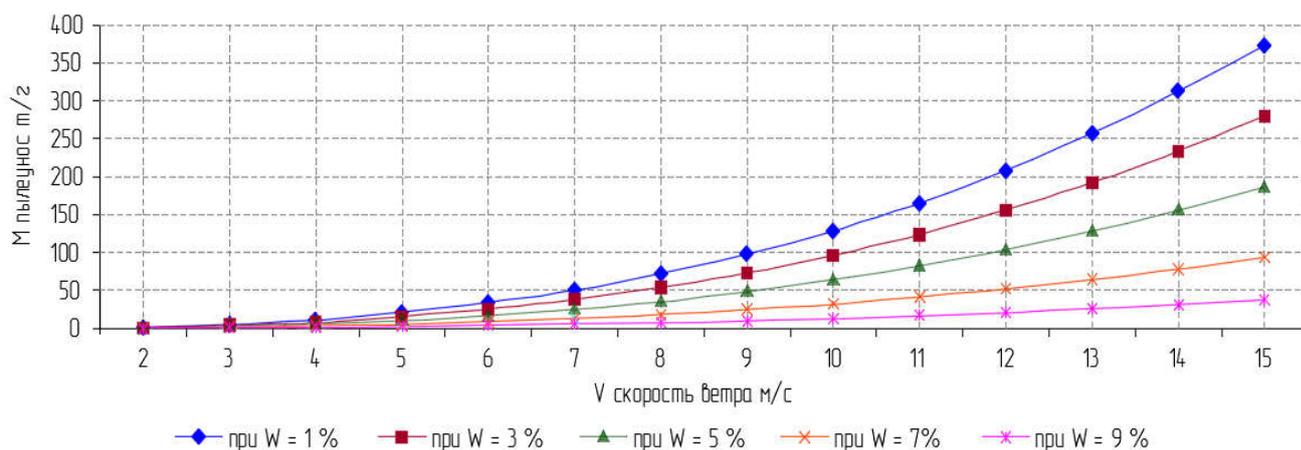


Рисунок 5.5 – Пыление ЗШС в зависимости от влажности

Интенсивность пыления существенно зависит от способа формирования слоя. Так, для свеженамытого участка она будет значительно ниже, чем для слоя насыпного неуплотнённого золошлака. Основопологающим в таком случае будет не влажность материала, а механическое зацепление отдельных агрегатов в ходе формирования слоя и сцепление за счёт образования химических связей.

Механическое зацепление частиц связано с параметром удельного сцепления, описанном в главе 3. А химическое взаимодействие агрегатов зависит от содержания свободного оксида кальция, магния и посторонних глинистых включений. Эти вещества способствуют образованию комков и корок, которые, в свою очередь, препятствуют переносу частиц. Данный процесс не характерен для низкокальциевых кислых и сверхкислых ЗШС. Однако золы Канско-Ачинского угольного бассейна с высоким содержанием оксидов кальция и магния, могут создавать такого рода структуры.

Пыление ЗШС возможно устранить достаточно простыми методами. Достаточно регулярно увлажнять поверхность материала водой, водным раствором глицерина (1 – 5%) или специальными растворами (таблица 5.6), что даёт более длительную защиту от пыления.

Таким образом, пылеунос не является серьезным препятствием для применения ЗШС в строительстве. Эффективность проведения строительных работ обеспечивается тщательным соблюдением интервалов увлажнения и объёма розлива пылеподавляющих веществ [204].

Таблица 5.6 – Специализированные составы для пылеподавления

Время года	Наименование состава	Расход на 1 м ² , кг	Срок службы, сут	Способ обработки
Сухое лето	Сульфонат лигнита	0,4	30 – 35	Внесение в разрыхленную поверхность и укатка
	Лигнодор	1,8	40 – 45	Розлив поливочными машинами по поверхности прикатанного слоя
Влажное лето	Сланцевое масло	1,5 – 2,0	40 – 50	Внесение в разрыхленную поверхность и укатка
	Гудрон	2,5 – 3,0	45 – 80	
	Битум жидкий	3,5	60	
	Битумные эмульсии на ССБ	3,0 – 4,0	35 – 45	Полив дороги в сухое время
	Лигнодор	1,8	40 – 45	Розлив поливочными машинами по поверхности прикатанного слоя
	25 % раствор хлористого кальция	1,5 – 2,0	2 – 5	Орошение поливочными машинами

В процессе транспортировки ЗШС автосамосвалами необходимо закрывать её тентом. Поскольку ЗШС быстро отдают влагу, то верхний слой при воздействии высоких летних температур за короткое время перейдёт в воздушно-сухое состояние, но начнёт терять частицы (пылить) при скорости ветра не менее 7 – 8 м/с.

5.2 Экономическая оценка применения золошлаковых смесей для строительства насыпей земляного полотна

Комплексный экономический эффект от многотоннажной утилизации ЗШО для сооружения земляного полотна автомобильных и городских дорог (в виде планировочных насыпей) имеет «веерную» схему.

Во-первых, интенсивное использование ЗШС увеличивает сроки эксплуатации существующих золоотвалов ТЭС без их реконструкции. Для справки: строительство новой секции отвала на 15 – 20 млн.т ЗШО или значительное увеличение дамбы, ограждающей существующий золоотвал, требует капитальных вложений не менее 1 – 2 млрд. руб. (ориентировочный срок эксплуатации каждой новой секции 8 – 10 лет).

Во-вторых, площадь одной секции золоотвала, как правило, составляет от 100 до 500 га. Эти ценные пригородные земли нужно изъять из оборота на десятки лет.

В-третьих, для строительства автомобильных дорог на пригородной территории требуются грунтовые карьеры с объёмом изъятия природных грунтов в объёмах, измеряемых десятками миллионов кубометров. Эти ценные земли также нужно изъять из оборота.

В-четвёртых, все затраты на утилизацию ЗШО (500 – 800 руб./т при среднем выбросе одной ТЭС 0,7 млн. т. ЗШО в год) и платежи за экологический вред, причиняемый городам (60 – 100 млн. руб. в год) от золоотвалов, энергетики относят на тариф энергетических ресурсов, которые они продают предприятиям и гражданам.

В-пятых, золошлаки ТЭС являются одним из основных отходов, ухудшающих 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, прием равенство приведённых затрат на сооружение единицы длины земляного полотна автомобильной дороги при использовании традиционных природных грунтов и нового материала (техногенного грунта – ЗШС).

В отличие от Методических рекомендаций по определению экономически рациональной области использования отходов ТЭС и ГРЭС в дорожном строительстве (СоюзДорНИИ, 1987 г.) [205], мы считаем, что виды и объёмы работ, некоторые технологические процессы и оборудование в базовом и новом вариантах строительства имеют некоторые отличия.

Для сравнения примем три вида грунтов для сооружения земляного полотна:

- ЗШС из отвала ТЭС (техногенный грунт – новый вариант);
- глинистый природный грунт (повсеместно распространённый природный грунт для земляного полотна – базовый вариант 1);
- песчаный природный грунт (часто используют для земляного полотна в Московской и других областях, иногда и других регионах – базовый вариант 2).

Рассмотрим виды работ, некоторые технологические процессы и оборудование, особенности ценообразования при использовании для земляного полотна разных грунтов.

Вариант с ЗШС:

а) инженерно-геологические изыскания в золоотвале (карьере техногенного грунта), которые должен выполнять (но, как правило, не выполняет) владелец «золопродукта»;

б) оплата техногенного грунта (отпускная цена ЗШС в РФ может колебаться по усмотрению владельца «золопродукта» от 0,1 до 100 руб./т);

в) разработка ЗШС экскаватором (бульдозером с фронтальным погрузчиком) с погрузкой в транспортные средства должна выполняться (но, как правило, не выполняется) владельцем «золопродукта»;

г) транспортировка ЗШС для послойной отсыпки земляного полотна (или в бурт);

д) разравнивание слоя бульдозером (автогрейдером);

е) доувлажнение или подсушивание ЗШС и уплотнение слоя катками;

ж) чистовая планировка слоя под отметку (автогрейдером).

Вариант с использованием для земляного полотна глинистых природных грунтов (базовый вариант 1) очевидны следующие изменения:

– выбор местоположения карьера, отвод и оплата земли для его разработки;

– инженерно-геологические изыскания с разработкой паспорта карьера и технологии его разработки;

– снятие и складирование растительного слоя;

Далее выполняются работы, указанные в п.п. в – ж, с некоторыми уточнениями:

– как правило, глинистые грунты относятся ко II группе по трудности разработки (ЗШС – к I группе), что снижает производительность машин при разработке грунта;

– после завершения добычных работ необходимо выполнить механическую и биологическую рекультивацию карьера;

– стоимость транспортировки глинистого грунта (оплата за тонно-километры) будет выше т.к. удельный вес этого грунта на 30 – 40% больше, чем ЗШС при равном объёме;

– количество проходов катка для уплотнения слоя глинистого грунта на 40 – 50% больше, чем для ЗШС.

Вариант с использованием природных песков (базовый вариант 2) отличается тем, что производитель работ, как правило, покупает песок в готовом карьере с его погрузкой техникой продавца. Далее следуют работы, указанные в п.п. г – ж, с одним уточнением: стоимость транспортировки песка будет выше т.к. удельный вес этого грунта на 40 – 50% больше, чем ЗШС при равном объеме.

Исходя из вышеуказанных предпосылок, построена номограмма для ориентировочного определения рациональной дальности возки ЗШС при сооружении земляного полотна по сравнению с природными грунтами (рисунок 5.6).

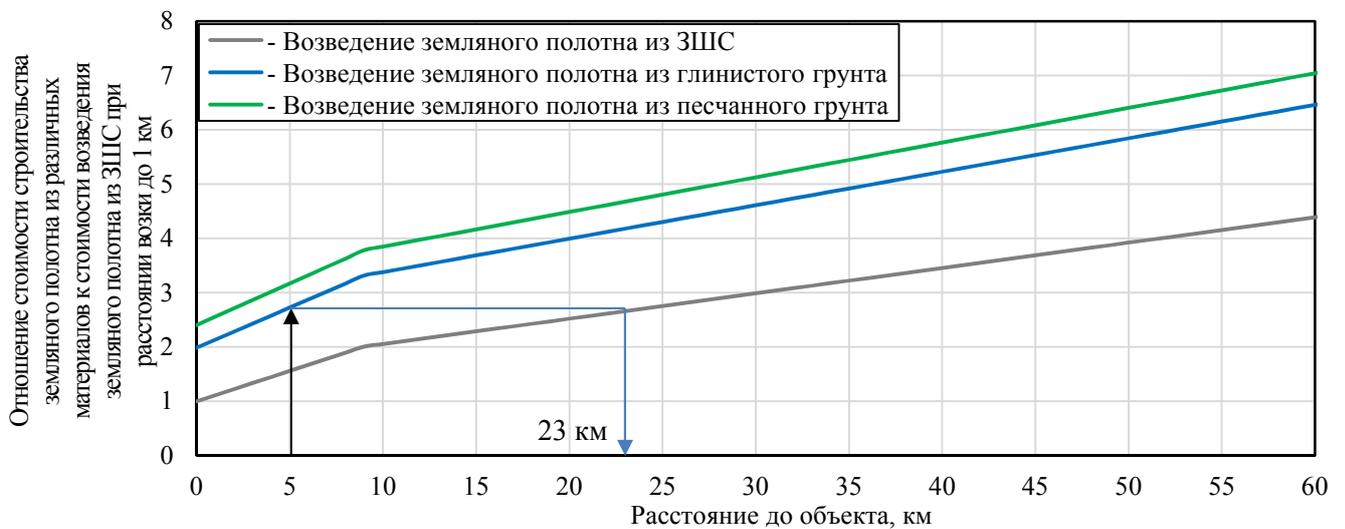


Рисунок 5.6 – Номограмма для определения обоснованной дальности возки ЗШС

Использование номограммы осуществляется следующим образом: расстояние от предлагаемого карьера природного грунта до участка дороги откладывается на горизонтальной оси (например, 5 км до карьера суглинка) и от него поднимается вертикальная линия до пересечения с линией номограммы соответствующей виду грунта (глинистого или песчаного). Из полученной точки проводят горизонтальную линию вправо, до пересечения с линией «возведение земляного полотна из ЗШС», от которой вниз опускают перпендикуляр на горизонтальную ось (для примера эта величина соответствует 23 км). Полученное значение расстояния до объекта и есть экономически обоснованное расстояние, при котором использование ЗШС в теле земляного полотна экономически оправдано при конкретном расстоянии до существующего карьера природного (глинистого или песчаного) грунта.

Основой для расчётов послужили единичные расценки ФЕР в редакции 2017 г [206, 207] и ФССЦпг 81-01-2001 в редакции 2019 г [208]. Полученная номограмма пригодна для расстояния возки от 0 до 60 км при механизированной разработке и строительстве земляного полотна. Группы работ, учтённые в рамках локальных сметных расчётов, приведены в таблице 5.7.

Таблица 5.7 – Технологическая последовательность, заложенная в методику

Порядок работ	Наименование операции (упрощенная технологическая последовательность)
Возведение земляного полотна из ЗШС	
1	Срезка мелкоколесья и кустарников с их сбором и складированием
2	Снятие слоя грунта, укрывающего отвал после рекультивации и перемещение в бурт
3	Устройство землевозных дорог
4	Разработка ЗШС по траншейно-веерной схеме с погрузкой в автосамосвалы
5	Доставка ЗШС автосамосвалами до объекта и выгрузка в кучи
6	Разравнивание и профилирование слоя
7	Уплотнение ЗШС катками с перекрытием следа
8	Финальная планировка верха насыпи и откосных частей
Возведение земляного полотна из глинистого грунта из отведённого резерва	
1	Срезка мелкоколесья и кустарников с их сбором и складированием
2	Снятие слоя растительного грунта, укрывающего карьер и его перемещение в бурт
3	Устройство землевозных дорог
4	Разработка грунта с погрузкой экскаватором в автосамосвалы
5	Доставка грунта автосамосвалами до объекта и выгрузка в кучи
6	Разравнивание и профилирование слоя
7	Уплотнение грунта катками с перекрытием следа
8	Финальная планировка верха насыпи и откосных частей
Возведение земляного полотна из песчаного грунта, приобретённого на карьере песка	
1	Погрузка песка в автосамосвалы на карьере
2	Доставка песка автосамосвалами до объекта и выгрузка в кучи
3	Разравнивание и профилирование слоя с его доувлажнением
4	Уплотнение песка катками с перекрытием следа
5	Финальная планировка верха насыпи и откосных частей

Расчёт затрат на строительство вели на основе локальных сметных расчётов, выполненных в соответствии МДС 81-35.2004 [209], МДС 81-25.2001 [210] и МДС 81-33.2004 [211].

Экономическая оценка показала возможность снижения стоимости земляного полотна при использовании ЗШС, даже в условиях отсутствия льгот и содействия со стороны ТЭС или регионального правительства. Величина этого экономического эффекта и рациональная дальность возки ЗШС всецело зависят от конкретных условий строительства и экологической политики в данном регионе.

Используя полученный график, зная расположение ближайшего карьера, можно установить при каком удалении от золоотвала будет экономически целесообразно возводить земляное полотно из ЗШС.

Кроме того, не стоит забывать, что большинство золоотвалов в РФ находятся в предельном режиме эксплуатации: свободная ёмкость их ограничена, либо они полностью заполнены. Поэтому ТЭС и управляющие компании заинтересованы в разработке отвалов в большом объёме. Эти обстоятельства сказываются на окончательной цене тонны ЗШС, доставленной к месту строительства, что не учтено в данной методике и реальная стоимость строительства может оказаться существенно ниже, что вызовет увеличение обоснованной дальности возки ЗШС.

Выводы по пятой главе

1. Все исследованные ЗШС относятся к I классу по удельной эффективной активности природных радионуклидов и могут применяться в строительстве без ограничений.

2. Все исследованные ЗШС отнесены к V классу опасности по воздействию на окружающую природную среду (практически неопасные отходы) и также могут применяться в строительстве без ограничений.

3. ЗШС могут служить средой для роста травяных культур, даже в случае посева их на неудобренный слой. Лучшие результаты даёт использования травосмесей на основе овсяницы и горца птичьего.

4. Пыление золошлаков при влажности их более 5 – 7% и скорости ветра менее 7 – 8 м/с практически отсутствует. Средняя фактическая влажность ЗШС даже в законсервированных золоотвалах составляет 10 – 20%, что позволяет укладывать этот техногенный грунт в насыпь без мероприятий по пылеподавлению. В случае высыхания ЗШС существует ряд простых методов пылеподавления на объекте.

5. Позитивные результаты наших исследования, опыт строительства двух крупных развязок с насыпями из ЗШС подтверждаются опытом европейских стран в области утилизации ЗШС: подавляющее большинство золошлаков не

имеют экологических ограничений для строительства насыпей земляного полотна автомобильных дорог и планировочных насыпей.

6. Комплексный экономический эффект от многотоннажной утилизации ЗШО для сооружения земляного полотна автомобильных и городских дорог (в виде планировочных насыпей) имеет «веерную» схему. Утилизация больших объёмов ЗШО:

- увеличивает сроки эксплуатации существующих золоотвалов ТЭС;
- снимает проблему изъятия сотен гектаров ценных пригородных земель для строительства новых отвалов и/или грунтовых карьеров;
- позволяет снизить тарифы за энергоресурсы ТЭС за счёт уменьшения платежей за экологический вред, причиняемый золоотвалами и их расширение;
- позволяет улучшить экологическую ситуацию в крупных городах, а с этим фактором связано качество и продолжительность жизни населения.

7. Предварительная экономическая оценка предлагаемых конструктивно-технологических решений использования ЗШС показывает существенное снижение стоимости земляного полотна даже в условиях отсутствия льгот и содействия со стороны ТЭС и/или регионального правительства. Возможным ограничением использования ЗШС является слишком большая дальность возки этого техногенного грунта к строящемуся объекту, что чрезмерно увеличит стоимость сооружения земляного полотна.

Заключение по диссертационной работе

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 методу 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, предложена соответствующая номограмма. При этом учтены различия в технологии строительства земляного полотна из ЗШС и природных грунтов.

Рекомендуемые направления дальнейших исследований

1. Установить значения коэффициентов динамичности для прогнозирования напряженного состояния при различных условиях эксплуатации земляного полотна автомобильных дорог из ЗШС;
2. Провести экспериментальные исследования на кольцевом стенде по оценке влияния реальных транспортных нагрузок на прочностные параметры ЗШС;
3. Оценить возможность и целесообразность строительства насыпей земляного полотна из золошлаковой смеси в районах с повышенной сейсмической активностью;
4. Теоретически и экспериментально обосновать расчётные значения механических параметров намывного массива из ЗШС.

Список литературы

1. Анализ показателей балансов электрической энергии и мощности ЕЭС России за IV квартал 2018 года. [Электронный ресурс]. – М.: ПАО «СО ЕЭС». Режим доступа: http://www.soups.ru/fileadmin/files/company/reports/ups-review/2018/ups_balance_analysis_2018q4_1.pdf, свободный. – Загл. с экрана.
2. Лунёв, А.А. Сопоставление деформационных параметров золошлаковой смеси, полученных в лабораторных и натуральных условиях / А.А. Лунёв, В.В. Сиротюк // Вестник ТГАСУ. – Томск, 2019. – № 2. – С. 215-227. DOI: 10.31675/1607-1859-2019-21-2-215-227
3. Bartov G. Environmental Impacts of the Tennessee Valley Authority Kingston Coal Ash Spill. 1. Source Apportionment Using Mercury Stable Isotopes / G. Bartov, A. Deonarine, T.M. Johnson, L. Ruhl, A. Vengosh, H. Hsu-Kim // Environmental Science & Technology. – Washington, D.C., 2012. – Vol. 47(4). – Pp. 2092-2099. DOI: 10.1021/es303111p
4. Deonarine A. Environmental Impacts of the Tennessee Valley Authority Kingston Coal Ash Spill. 2. Effect of Coal Ash on Methylmercury in Historically Contaminated River Sediments / A. Deonarine, G. Bartov, T.M. Johnson, L. Ruhl, A. Vengosh, H. Hsu-Kim // Environmental Science & Technology. – Washington, D.C., 2012. – Vol. 47(4). – Pp. 2100-2108. DOI: 10.1021/es303639d
5. Shin J. Article: Assessing the impact of coal ash exposure on soil microbes in the Dan River / J. Shin, A. Natanson, J. Khun, N. Odorizzi, J. DeCreny-Jackson, H. Fowowe, C. Jackson, S. Springthorpe, T. Rhodes, H. Lutz, J. Askey, L. Aleman, A. Ciccolella, B. Wesley, K. Lewis, D. Kuppinger, and L. DeFord-Watts. R. Article // BIOS journal. – 2017. – Vol. 88(2). – Pp. 72-85. DOI: 10.1893/BIOS-D-16-00006.1
6. Folgueras M.B. Coal and sewage sludge ashes as sources of rare earth elements / M.B. Folgueras, M. Alonso, F.J. Fernández // Fuel. – 2017. – Vol. 192. – Pp. 128-139.
7. Барахтенко В.В. Оценка потребительских характеристик изделий из высоконаполненного полимерно-минерального композиционного материала на основе поливинилхлорида и отходов ТЭС / В.В. Барахтенко // Инженерно-строительный журнал. – 2014. – № 3. – С. 17-24.
8. Физико-механические характеристики композиционных материалов на основе отходов производства с различными рецептурами / А.Е. Бурдонов [и др.] // Инженерно-строительный журнал. – 2012. – № 9. – С. 14-22.
9. Yao Z.T. A comprehensive review on the applications of coal fly ash / Z.T. Yao, X.S. Ji, P.K. Sarker, J.H. Tang, L.Q. Ge, M.S. Xia, Y.Q. Xi // Earth-Science Reviews. – 2015. – Vol. 141. – Pp. 105-121.
10. Сиротюк В.В. Особенности свойств зол уноса Экибастузских углей в связи с их применением в дорожном строительстве / В.В. Сиротюк // Межвузовский сб. Строительство и эксплуатация дорог. – Новосибирск, 1976. – С. 26-31.
11. Сиротюк В.В. Исследование технологии строительства дорожных оснований из грунтов, укрепленных цементом и золой уноса / Автореферат дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук: 05.23.11 – М.: СоюзДорНИИ, 1978. – 22с.
12. Методические рекомендации по конструкциям дорожных одежд с использованием местных материалов и отходов промышленности при строительстве автомобильной дороги Челябинск – Омск – Новосибирск / И.Л. Гурячков, Ю.Е. Никольский, В.П. Никитин, В.В. Сиротюк. – М.: СоюзДорНИИ, 1980. – 40с.
13. Лебедев М.С. Исследования реологических свойств битумных композиций, наполненных золами уноса различного состава / М.С. Лебедев, И.Л. Чулкова // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2016. – №11. – С. 47-52.
14. Толстой А.Д. Совершенствование состава и свойств порошковых бетонов с техногенным сырьем / А.Д. Толстой, И.А. Ковалева, К.Ю. Новиков // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – Белгород, 2016. – №2. – С. 19-24.
15. Трунов П.В., Алхимова Н.И. Лесовик В.С., Шадский Е.Е., Потапов В.В. К вопросу об использовании вулканического сырья Камчатки в качестве минеральной добавки // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – Белгород, 2014. №4. – С. 84-88.
16. Sushovan D. An Overview on the Use of Waste Plastic Bottles and Fly Ash in Civil Engineering Applications / D. Sushovan, M.B. Nadaf, J.N. Mandal // Procedia Environmental Sciences. – 2016. – Vol. 35. – Pp. 681-691.
17. Личман Н.В. Применение серы и золы ТЭЦ Норильского региона при строительстве и реконструкции гидротехнических сооружений / Н.В. Личман // Инженерно-строительный журнал. – Санкт-Петербург, 2011. – № 8. – С. 29-34.

18. Baykala G. Highway embankment construction using fly ash in cold regions / G. Baykala, A. Edinçlilerb, A. Saygılıa // Resources, Conservation and Recycling. – 2004. – Vol. 42. – Pp. 209-222.
19. Haleema A. Critical factors for the successful usage of fly ash in roads & bridges and embankments: Analyzing indian perspective / A. Haleema, S. Luthrab, B. Mannana, S. Khuranaa, S. Kumarc // Resources Policy. – 2016. – Vol. 49. – Pp. 334-348.
20. Hadbaatar A. Study of Ash-Slag Wastes of Electric Power Plants of Mongolia Applied to their Utilization in Road Construction / A. Hadbaatar, N.A. Mashkin, N.G. Stenina // Procedia Engineering. – 2016. – Vol. 150. – Pp. 1558-1562.
21. Seymour J., Bozok O., Hughes A., Bodine B. Condition of coal ash embankments. [Online] URL: <http://www.flyash.info/2015/028-seymour-2015.pdf> (date of reference: 20.12.2016).
22. Фурсов В.В. Исследование свойств золошлаковых отходов тепловых электростанций для целей строительства / В.В. Фурсов, М.В. Балюра. // Труды Международной конференции по геотехнике «Развитие городов и геотехническое строительство». – СПб., 2008. – № 4. – С. 673-677.
23. Бирюков В.В. Энергопроизводство и утилизация золошлаковых отходов / В.В. Бирюков, С.Е. Метелев, В.В. Сиротюк, В.Р. Шевцов // Вестник Российского государственного торгово-экономического университета. Научный журнал. – М., 2008. – №2(23) – С. 221-229.
24. Ватин Н.И. Применение зол и золошлаковых отходов в строительстве / Н.И. Ватин, Д.В. Петросов, А.И. Калачев, П. Лахтинен // Инженерно-строительный журнал, 2011. – № 4. – С.16-21.
25. Кумар В. Возможности, преграды и решения проблемы летучей золы в энергетике Индии / Материалы II Международного научно-практического семинара «Золошлаки ТЭС: удаление, транспортировка, переработка, складирование. Москва, 23-24 апреля 2009 г. –М.: Издательский дом МЭИ, 2009. – С. 31-36.
26. Лунёв А.А. Применение золошлаковых смесей для вертикальных планировок и строительства городских дорог / В.В. Сиротюк, А.А. Лунёв // Техника и технологии строительства. – Омск: СибАДИ, 2015. – С. 24-31.
27. Sinha A.K. Investigation and design of fly ash road embankments in India by CPT / A.K. Sinha, V.G. Navanagi, S. Mathur, U.K. Guruvittal // 2nd International Symposium on Cone Penetration Testing, Huntington Beach, CA, USA. Volume 2&3: Technical Papers, Session 3: Applications, Paper No. 3-49
28. Francois D. Full-scale experimentations on alternative materials in roads: Analysis of study practices / D. Francois, A. Jullien, J.P. Kerzreho, L. Chateau // Waste management. – 2009. – Vol. 29. – Pp. 1076 -1083
29. Mukherjee P.S. Exploring Fly Ash Utilization in Construction of Highways in India / P.S. Mukherjee, G. Vesmawala // Journal of Mechanical and Civil Engineering. – 2013. – Vol. 8. – Issue 4. – Pp 23-32.
30. Кочеткова Р.Г. Техногенные грунты и их применение в дорожном строительстве – Научно-информационный сборник. – Информавтодор, М., 2002. – № 6.
31. Путилин Е.И. Применение зол уноса и золошлаковых смесей при строительстве автомобильных дорог / Е.И. Путилин, В.С. Цветков. – М.: Союздорнии, 2003. – 58 с.
32. Сиротюк В.В. Золошлаковая смесь для земляного полотна. «Автомобильные дороги» / В.В. Сиротюк, А.А. Лунёв, Е.В. Иванов // Ежемесячный информационно аналитический журнал. – М., 2016. – № 6(1015). – С. 72-79.
33. User Guidelines for Waste and Byproduct Materials in Pavement Construction. [Online] URL: <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/pavements/97148/019.cfm> (date of reference: 28.02.2017).
34. Collins, R. J. and L. Srivastava. Use of Ash in Highway Construction: Delaware Demonstration Project, Final Report. Electric Power Research Institute, Report No. GS-6540, Palo Alto, California, November, 1989.
35. Brendel, G. F. and P. E. Glogowski. Ash Utilization in Highways: Pennsylvania Demonstration Project. Electric Power Research Institute, Report No. GS-6431, Palo Alto, California, June 1989.
36. Mathur A. K. New segments in ash utilization- NTPC concern / A. K. Mathur, R. K. Khandekar // Proc. on Indian Power Station Conference, 2008. Pp. 627- 631.
37. Mathur A. K. Ash utilisation in NTPC / A. K. Mathur // Proc. Workshop on fly ash utilisation: Issues and strategies. –Bhopal, India. – Bhopal Chapter. – Pp. 41-45.
38. Shamshad A. Impact of Coal Based Thermal Power Plant on Environment and its Mitigation Measure International / A. Shamshad, M.H. Fulekar, and P. Bhawana // Research Journal of Environment Sciences. – 2012. – Vol. 1(4). – Pp. 60-64.
39. ОДМ 218.2.031-2013 Методические рекомендации по применению золы-уноса и золошлаковых смесей от сжигания угля на тепловых электростанциях в дорожном строительстве. – М.: ФГУП

- "ИНФОРМАВТОДОР", 2014. – 59 с.
40. СТО 82982783.001-2010. Материалы золошлаковые омских ТЭЦ для дорожного строительства. Технические условия. – Омск: Омский центр стандартизации и метрологии, 2011. – 71 с.
 41. Иванов Е.В. Обоснование применения золошлаковых смесей для строительства земляного полотна с учетом водно-теплового режима: дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук: 05.23.11 / Е.В. Иванов; СибАДИ. – Омск, 2015. – 165 с.
 42. Рациональное применение золы ТЭЦ: Результаты научно-практических исследований / Сост. Э.П. Гужулев, Ю.Т. Усманский. Омск: Омский гос. Ун-т, 1998. – 238 с.
 43. СТО 82982783.002-2011. Материалы золошлаковые ТЭС ОАО «ТГК-11» для вертикальной планировки территорий, исправления неудобий, обратных засыпок и рекультивации карьеров. Технические условия. Омск: Омский центр стандартизации и метрологии, 2011. 32 с.
 44. Барац Н.И. Искусственные грунты на территории г. Омска / Н.И. Барац // Вестник Моск. универ., сер. Геол. – 1974. – №4. – С. 109.
 45. Разработка математической модели для прогнозирования деформаций и разрушений в насыпях из золошлаковых смесей тепловых электростанций г. Омска [Текст]: отчет о НИР (промежуточ.): 42-44 / СибАДИ; рук. Сиротюк В. В. – Омск., 2016. – 113 с. – Исполн.: Иванов Е. В., Лунёв А. А., Сергеев С. А. – № ГР 01840051145. – Инв. № 0453433943.
 46. ГОСТ 25100-2011. Грунты. Классификация. – М.: Стандартинформ, 2013. – 20 с.
 47. ОДМ 218.2.006-2010 Рекомендации по расчету устойчивости оползнеопасных склонов (откосов) и определению оползневых давлений на инженерные сооружения автомобильных – М.: ФГУП "Информавтодор", 2011. – 114 с.
 48. Лунёв А.А. Сопоставление методов оценки устойчивости высокой насыпи из золошлаковой смеси / А.А. Лунёв, В.В. Сиротюк, Н.С. Безделов // Вестник СибАДИ. – 2016. – № 5 (50). – С. 106-114.
 49. ВСН 04-71 (Минэнерго СССР) Указания по расчету устойчивости земляных откосов (2-е изд-е). – Л.: ВНИИГ им.Б.Е.Веденеева, 1971. – 104 с.
 50. ОДМ 218.2.027–2012 Методические рекомендации по расчету и проектированию армогрунтовых подпорных стен на автомобильных дорогах. – М.: Росавтодор, 2013. – 64 с.
 51. Голубев А.И. Выбор модели грунта и её параметров в расчётах геотехнических объектов / А.И.Голубев, А.В.Селецкий // Труды международной конференции по геотехнике "Геотехнические проблемы мегаполисов (GEOMOS 2010). – 2010. – № 4. – С. 1727-1732.
 52. Brinkgreve R.B.J. PLAXIS – Finite Element Code for Soil and Rock Analysis. 2D Version 8. – The Netherlands. Rotterdam: A.A. Balkema, 1997. – 200 p.
 53. Строкова Л.А. Применение метода конечных элементов в механике грунтов / Л.А. Строкова. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – 143 с.
 54. Мельников Б.Е. Сравнительный анализ результатов моделирования упругопластического деформирования на основе критериев Мора-Кулона и Друкера-Прагера / Б.Е. Мельников, С.А. Ле-Захаров, А.С. Семёнов // XLI Неделя науки СПбГПУ. Материалы международной научно-практической конференции. – СПб. - 2012. Ч. 1 – С. 91-93.
 55. Фадеев А.Б. Параметры модели упрочняющегося грунта программы «Plaxis» / А.Б. Фадеев // Численные методы расчетов в практической геотехнике: сборник статей международной научно-технической конференции. – СПб, 2012. – С. 13-20.
 56. Федоренко Е.В. Метод расчета устойчивости путем снижения прочностных характеристик / Е.В. Федоренко // Транспорт Российской Федерации: науч. журнал. – Санкт-Петербург, 2013. – Вып. №6 (49) – С. 24-26.
 57. Соколова О.В. Подбор параметров грунтовых моделей в программном комплексе Plaxis 2D / О.В. Соколова // Инженерно-строительный журнал. – 2014. – №4. – С. 10-16.
 58. Строкова Л.А. Определение параметров для численного моделирования поведения грунтов / Л.А. Строкова // Известия Томского Политехнического университета. – 2008. Т.313. – No1. – С. 69-74.
 59. Пособие по проектированию земляного полотна автомобильных дорог на слабых грунтах. – М.: ФГУП "Информавтодор", 2004. 252 с.
 60. ОДН 218.046-01 Проектирование нежестких дорожных одежд. – М.: Информавтодор, 2001. – 145 с.
 61. МОДН 2-2001 Проектирование нежестких дорожных одежд. – М.: Государственный дорожный научно-исследовательский институт ФГУП "Союздорнии", 2002. – 154 с.
 62. ПНСТ 265-2018 Дороги автомобильные общего пользования. Проектирование нежестких дорожных одежд – М.: Стандартинформ, 2018. – 74 с.
 63. ВСН 197-91 Методические рекомендациям по проектированию жёстких дорожных одежд. – М.: ФГУП "ИНФОРМАВТОДОР", 2004. – 133 с.

64. DiGioia, A.M. Fly Ash as Structural Fill / A.M. DiGioia, W.L.Nuzzo // *Journal of Power Division, ASCE.* – Vol. 98(1). – Pp. 77-92.
65. Gray, D. H. Engineering Properties of Compacted Fly Ash / D. H. Gray, Y. K. Lin // *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Engineering Division, ASCE.* – Vol. 98. – No. 4. – Pp. 361-380.
66. Martin J. P. Properties and use of fly ashes for embankments / J.P. Martin, R.A., B.J. Collins, FJ Biehl // *Energy.* – Vol. 116(2). – Pp. 71–86.
67. Marto A. Compaction Characteristics and Permeability of Tanjung Bin Coal Ash Mixtures / A. Marto, A.R. Awang, A.M. Makhtar // *International Conference on Environment Science and Engineering IPCBEE.* – Vol.8 IACSIT Press, Singapore. – Pp. 134-137.
68. Indraratna, B., Nutalaya, P. and Koo, K.S. Engineering Behaviour of a Low Carbon Pozzolanic Fly Ash and its Potential as a Construction Fill / B. Indraratna, P. Nutalaya, K.S. Koo // *Canadian Geotechnical journal.* – Vol. 28. – Pp. 542-555.
69. Singh S. R. Utilization of fly ash in geotechnical construction / S. R. Singh, A. P. Panda // *Proc. Indian Geotechnical Conf., Madras.* – Vol. 1. – Pp. 547–550.
70. Muhandi Engineering Characteristics of Tanjung Bin Coal Ash / Muhandi, A.Marto, K.A. Kassim, A.M. Makhtar, L.F. Wei, Y.S. Lim // *Electronic Journal of Geotechnical Engineering.* – 2010. Vol. 15. Pp. 1117-1129.
71. Ossowski R. Mechanical properties of a dike formed from a soil-ash composite / R. Ossowski, K. Gwizdala // *Procedia Engineering.* – Vol. 172. – Pp .816 – 822.
72. Sikora Z. Geotechnical Aspects of Dike Construction Using Soil-Ash Composites / Z. Sikora, R. Ossowski // *Procedia Engineering.* – Vol. 57. – Pp. 1029-1035.
73. Bałachowski L. Mechanical properties of fly ash - dredged material mixtures on laboratory test / L. Bałachowski, Z. Sikora // *Studia Geotechnica et Mechanica.* – Vol. 35(3). – Pp. 3-11.
74. Pandian N.S. Fly ash characterization with reference to geotechnical application / N.S. Pandian // *Journal Indian Institute of Science.* – 2004. – Vol. 84. – Pp. 189-216.
75. Khan M.A. A study of multilayer soil-fly ash layered system under cyclic loading / M.A. Khan, A.Usmani, S.S. Shah, H. Abbas // *International Journal of Civil Engineering.* – Vol. 6. – No 2. – Pp. 73-89.
76. Prabakar J. Influence of fly ash on strength behavior of typical soil / J. Prabakar, N. Dendorkar, R.K. Morchhale // *Construction and Building Materials.* – 2004. – No. 18. – Pp. 263-267
77. Pal S. K. Shear strength behavior of Indian flu ashes / S. K. Pal, A. Ghosh // *Indian Geotechnical Conference Geotechnics in Infrastructure Development (GEOTIDE).* – 2009. – Vol. 1. – Pp. 18-22.
78. Jakka R.S. Shear Strength Characteristics of Loose and Compacted Pond Ash / R.S. Jakka, M. Datta, G.V. Ramana // *J.Geotech and Geol.* – Vol. 28(6). – Pp. 763-778.
79. Kumar D. Geotechnical Properties of Fly Ash and Bottom Ash Mixtures in Different Proportions / D. Kumar, N. Kumar, A. Gupta // *International Journal of Science and Research (IJSR).* – 2014. – Vol.3. – Issue 9. – Pp. 1487-1494.
80. Mohanty S. Geotechnical characterization of Panki and Panipat pond ash in India / S. Mohanty, N. R. Patra // *Geo-Engineering.* – 2015. – Vol. 6:13. – Pp. 1-18. DOI 10.1186/s40703-015-0013-4
81. Tiwari S.K. Strength Behavior of Compacted Fly Ash, Bottom Ash and their Combinations / S.K. Tiwari, A. Ghiya // *The Electronic Journal of Geotechnical Engineering.* – Vol. 18. – Pp. 3085-3106.
82. Kim B. Geotechnical Properties of Fly and Bottom Ash Mixtures for Use in Highway Embankments / B. Kim, M. Prezzi, R. Salgaro // *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering.* – Vol. 131. – Issue 7. – Pp. 914-924.
83. Muhunthan, B. Geotechnical Engineering Properties of Incinerator Ash Mixes / B. Muhunthan, R. Taha, J. Said // *J Air Waste Manag Assoc.* – 2004. Vol. 54(8). – Pp. 985-991.
84. Gimhan P. G. S. Geotechnical Engineering Properties of Fly Ash and Bottom Ash: Use as Civil Engineering Construction Material Engineer / P.G.S. Gimhan, J.P.B. Disanayaka, M. Nasvi // *Journal of the Institution of Engineers.* – Vol. 51. – Pp. 49-57. DOI: 10.4038/engineer.v51i1.7287
85. Gruchot A. Impact of a test method on the undrained shear strength of a chosen fly ash / A. Gruchot, T. Zydrón // *Journal of Ecological Engineering.* – Vol. 17. – Issue 4. – Pp. 41–49 DOI: 10.12911/22998993/63955
86. ВСН 185-75. Технические указания по использованию зол уноса и золошлаковых смесей от сжигания различных видов топлива для сооружения земляного полотна и устройства дорожных оснований и покрытий автомобильных дорог. – М.: Минтрансстрой СССР, 1976. – 21 с.
87. Сиротюк В.В. Особенности свойств зол уноса Экибастузских углей в связи с их применением в дорожном строительстве / В.В. Сиротюк // *Меж. вуз. сб. Строительство и эксплуатация дорог.* – Новосибирск, НИСИ, 1977. – С. 78-86.

88. Мелентьев В.А. Золошлаковые материалы и золоотвалы / В.А. Мелентьев, В.Г. Пантелеев, Э.Л. Лобник. – М.: Энергия, 1978. – 295 с.
89. Крутов В.И. Основания и фундаменты на насыпных грунтах. – М.: Стройиздат, 1988. – 224 с.
90. Дьяконов П.Ю. Утилизация отходов теплоэнергетики в дорожном строительстве / П.Ю. Дьяконов // Вестник МГСУ. – 2012. – №8. – С. 175-180.
91. Фурсов В.В. Исследование морозоустойчивости золошлаковых отходов тепловых электростанций для целей строительства / В.В. Фурсов, М.В. Балюра // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2013. – № 1. – С. 242-252.
92. Балюра М.В. Исследование строительных свойств золы Томской ГРЭС-2 / М.В. Балюра // Проблемы гидрогеологии, инженерной геологии, оснований и фундаментов: сб. науч. тр. – Томск: Изд-во ТГУ, 1988. – С. 97-104.
93. Сиротюк В.В. Результаты мониторинга опытного участка земляного полотна автодороги из золошлаковой смеси / В.В. Сиротюк, Е.В. Иванов // Материалы IV Международного научно-практического семинара «Золошлаки ТЭС: удаление, транспортировка, переработка, складирование. – М.: Издательский дом МЭИ, 2012. – С. 85-88.
94. Иванов Е.В. Экспериментальное исследование и математическое моделирование промерзания земляного полотна из золошлаковой смеси / Е.В. Иванов, А.Л. Исаков, В.В. Сиротюк // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. – Омск: СибАДИ, 2013. – Выпуск 3 (31). – С. 71-76.
95. Александров А.С. Совершенствование расчета дорожных конструкций по сопротивлению сдвигу. Ч 1. Состояние вопроса: Монография / А.С. Александров. – Омск: СибАДИ, 2015. – 292 с.
96. Кандауров И.И. Механика зернистых сред и её применение в строительстве. / И.И. Кандауров. – Л.: Стройиздат, 1988. – 280 с.
97. Coulomb C. A. Essai sur une application des règles des maximis et minimis à quelques problèmes de statique relatifs à l'architecture // Mem. Acad. Roy. Div. Sav. – 1776. – Vol. 7. – Pp. 343—387.
98. Boussinesq J. Application des potentiels a l'équilibre et du mouvement des solides elastiques. Gauthiers-Villars. – Paris, 1885. – 721 p.
99. Love A.E.H. A Treatise on the Mathematical Theory of Elasticity. New York: Dower Publications, 1944. – 643 p.
100. Love A.E.H. The stress Produced in a semi-infinite solid by Pressure on part of the Boundary // Philosophical Transactions of the Royal Society, London, 1928. – Series A, 228. – Pp. 377-420
101. Frolich O.K. Druckverteilung im Baugrunde. – Wien: Springer, 1934. – 188 p.
102. Harr M.E. Mechanics of Particulate Media. – McGraw-Hill, New York, 1977. – 543 p.
103. Радовский, Б.С. Первые представления о прочности и расчете дорожных одежд: дорожные одежды до XX века // Дорожная Техника. – 2012. – С. 120-133.
104. Клейн Г. К. Строительная механика сыпучих тел. – М., Стройиздат, 1977. – 256 с.
105. Leng J. Characteristics and Behavior of Geogrid Reinforced Aggregate under Cyclic Load. Ph.D. thesis. – North Carolina state university, 2002. – 152 p.
106. Расчет дорожных одежд переходного типа / В.Д. Казарновский [и др.] // Новое в проектировании конструкций дорожных одежд: тр. СоюздорНИИ. – М. 1988. – С. 50-61.
107. Mitchell J.H. The inversion of plane stress // Proc. Lond. Math. Soc., 1902. – Vol. 34. – Pp. 134-142.
108. Das B.M. Advanced soil mechanics. Third Edition. Taylor and Francis. New York, 2008. – 567 p.
109. Santamarina J.C. Soil Behavior at the Microscale: Particle Forces // Proc. Symp. Soil Behavior and Soft Ground Construction, in honor of Charles C. Ladd, 2001. – Pp. 1-32. DOI: [https://doi.org/10.1061/40659\(2003\)2](https://doi.org/10.1061/40659(2003)2)
110. Behringer R. P. Jamming in granular materials // Comptes Rendus Physique. – 2015. – Vol. 16. – Pp. 10-25. DOI: 10.1016/j.crhy.2015.02.001
111. Tadanaga T. Granular response to impact: Topology of the force networks / T. Tadanaga, H. A. Clark, T. Majmudar, L. Kondic // Phys. Rev. – 2018. – Vol. E 97. – № 012906. DOI: 10.1103/PhysRevE.97.012906.
112. Clark A.H., Petersen A.J., Kondic L., Behringer R.P. Nonlinear Force Propagation During Granular Impact // Phys. Rev. Lett. 2015. Vol. 114 No. 144502. DOI:<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.114.144502>
113. Bianchini A. Fröhlich Theory-Based Approach for Analysis of Stress Distribution in a Layered System: case Study // Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board, 2014. – Vol. 2462. – Pp. 61-67.
114. Пискунов В.Г. Расчет неоднородных пологих оболочек и пластин методом конечных элементов. – К.:

- Вища школа, 1987. – 200 с.
115. Тимошенко С.П. Теория упругости. – М.: Наука, 1979. – 560 с
 116. Матвеев С.А. Закономерности распределения напряжений в грунтовых основаниях внутрихозяйственных автомобильных дорог / С.А. Матвеев, Н.Н. Литвинов, Р.Е. Петров // Вестник Омского ГАУ, 2017. – № 4. – С. 233-239.
 117. Александров А.С. Совершенствование расчета дорожных конструкций по сопротивлению сдвигу. Часть 2. Модифицированные модели расчета главных и касательных напряжений / А.С. Александров, Г.А. Долгих, А.Л. Калинин // Инженерно-строительный журнал, 2016. – №2. – С. 51-68. DOI: 10.5862/МСЕ.62.6
 118. Gonzales C.R. Implementation of a New Flexible Pavement Design Procedure for U.S. Military Airports // Fourth LACCEI International Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology, Mayagüez, Puerto Rico. 2006. Pp 1-10.
 119. Gonzalez C.R. Development and validation of a stress-based procedure for the design of military flexible pavements. PhD thesis. Duke University [Электронный ресурс] URL: <https://www.ideals.illinois.edu/handle/2142/78316> (дата обращения: 12.09.2018).
 120. Муллер, Р.А. К статистической теории распределения напряжений в зернистом грунтовом основании / Р.А. Муллер // Основания и фундаменты грунтов, 1964. – № 4. – С. 4-6
 121. ПНСТ 1.2.418-1.018.18 «Дороги автомобильные общего пользования. Метод определения Калифорнийского числа (CBR) для оценки несущей способности грунта. М.: Стандартинформ, 2018. – 16 с.
 122. Семенова Т.В. Применение калифорнийского числа несущей способности и динамического конусного пенетрометра для оценки качества уплотнения грунта / Т.В. Семенова, Г.В. Долгих, Б.Н. Полугородник // Вестник СибАДИ. – 2013. – № 1. – С. 59-66.
 123. Heukelom W. Dynamic Testing of Pavements / W. Heukelom, C.R. Foster // Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE. – 1960. – Vol. 86. – No. SM1. – Pp. 1-28.
 124. Heukelom W. Dynamic Testing as a Means of Controlling Pavements During and After Construction. / W. Heukelom, A.J.G. Klomp // 1st International Conference on Structural Design of Asphalt Pavements. – 1962. – Vol. 203. – Pp. 495-510
 125. Green J. L., Hall J. W. Nondestructive Vibratory Testing of Airport Pavements Volume I: Experimental Test Results and Development of Evaluation Methodology and Procedure. Federal Aviation Administration Report No. FAA-RD-73-205-1. Washington: NTIS, 1975. P 214.
 126. Witzcak M. W. Use of Nonlinear Subgrade Modulus in AASHTO Design Procedure / M. W. Witzcak, X. Qi, M.W. Mirza // Journal of Transportation Engineering. – 1995. – Vol. 121. – No. 3. – Pp. 273-282.
 127. Powell W. D., Potter J. F., Mayhew H. C., Nunn M.E. The Structural Design of Bituminous Roads. Transport and Road Research Laboratory, TRRL Laboratory Report 1132. Crowthorne: Department of Transport, 1984. 62 p.
 128. Putri E.E., Kameswara N.S.V R., Mannan M. A. Evaluation of Modulus of Elasticity and Modulus of Subgrade Reaction of Soils Using CBR Test // Journal of Civil Engineering Research. – 2012. – Vol. 2. – Pp. 34-40.
 129. Guide for mechanistic-empirical design of new and rehabilitated pavement structures. Final document appendix CC-1: correlation of CBR values with soil index properties. Illinois: Ara, Inc, 2001. 204 p. Режим доступа: http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/archive/mepdg/2appendices_CC.pdf, свободный. – Загл. с экрана.
 130. Цытович Н.А. Механика грунтов (краткий курс): учебник для вузов. 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1983. – 228 с.
 131. Biarez J. Remarques sur des propriétés mécaniques des corps pulvérulents (anisotropie, écrouissage, élasticité-plasticité) // Cahier Creupe franc, études rhéol. – 1961. – №. 6 (3). – Pp. 40-43.
 132. Lee J. Assessment of K₀ correlation to strength for granular materials / J. Lee, T.S. Yun, D. Lee, J. Lee // Soils and Foundations. – 2013. – Vol. 53. – Issue 4. – Pp. 584-595. doi: <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2013.06.009>
 133. Federico A. At-rest earth pressure coefficient and Poisson's ratio in normally consolidated soils / A. Federico, G. Elia // Proceedings of the 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Alexandria, Egypt. – 2009. – Pp. 7-10. doi: 10.3233/978-1-60750-031-5-7.
 134. Brooker E. W. Earth Pressures at Rest Related to Stress History / Brooker E. W., Ireland H.O. / E.W. Brooker, H.O. Ireland // Canadian Geotechnical Journal. – 1965. – No. 2(1). – Pp. 1-15. doi: <https://doi.org/10.1139/t65-001>
 135. Mayne P. W. K₀–OCR relationships in soil / P. W. Mayne, F. H. Kulhawy // Journal of the Geotechnical Engineering Division. – 1982. – No. 6. – Pp. 851-872. doi:10.1016/0148-9062(83)91623-6

136. Баданин А.Н. Обоснование первой критической нагрузки на зернистую среду супесчаного основания / А.Н. Баданин, А.К. Бугров, А.В. Кротов // Инженерно-строительный журнал. – 2012. – № 9 (35). – С. 29-34. doi: 10.5862/МСЕ.35.4
137. ОДМ 218.5.007-2016. Методические рекомендации по определению модуля упругости статическим штампом. М.: ФГУП ИНФОРМАВТОДОР, 2016. – 24 с
138. Sirotiyuk V.V., Lunev A.A. Strength and deformation characteristics of ash and slag mixture / V.V. Sirotiyuk, A.A. Lunev // Magazine of Civil Engineering. – 2017. – No. 6. – Pp. 3–16. doi: 10.18720/МСЕ.74.1.
139. Смирнов А.В. Динамика дорожных одежд автомобильных дорог. – Омск: СибАДИ - Западносибирское книжное издательство, 1975. - 184 с.
140. ГОСТ 12248-2010. Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости. – М.: Стандартинформ, 2011. – 88 с.
141. Болдырев Г.Г. Методы определения механических свойств грунтов. Состояние вопроса. / Г.Г. Болдырев. - Пенза: Изд-во ПГУАС, 2008. – 696 с.
142. BS 1377-7 Methods of test for soils for civil engineering purposes. Shear strength tests (total stress). – London: British Standards Institution (BSI), 1990. – 56 p.
143. ASTM 6467 Standard Test Method for Torsional Ring Shear Test to Determine Drained Residual Shear Strength of Cohesive Soil. – West Conshohocken, P.A. ASTM International, 2013. – 7 p.
144. ГОСТ 20276-2012. Грунты. Методы полевого определения характеристик прочности и деформируемости. – М.: Стандартинформ, 2013. – 43 с.
145. Болдырев Г.Г. Определение деформационных характеристик грунтов различными лабораторными методами / Г.Г. Болдырев, Д.В. Арефьев, А.В. Гордеев // Инженерные изыскания. – 2010. – №. 8. – С. 16-23.
146. AASHTO T 307 Standard Method of Test for Determining the Resilient Modulus of Soils and Aggregate Materials – Washington, DC: American Association of State Highway and Transportation Officials, 1999. – 41 p.
147. ASTM D1195 Standard Test Method for Repetitive Static Plate Load Tests of Soils and Flexible Pavement Components, for Use in Evaluation and Design of Airport and Highway Pavements. – West Conshohocken, P.A.: ASTM International, 2015. – 3 p.
148. ASTM D1196. Standard Test Method for Nonrepetitive Static Plate Load Tests of Soils and Flexible Pavement Components, for Use in Evaluation and Design of Airport and Highway Pavements. – West Conshohocken, P.A.: ASTM International, 2016. – 3 p.
149. ASTM D2850 Standard Test Method for Unconsolidated-Undrained Triaxial Compression Test on Cohesive Soils. – West Conshohocken, P.A.: ASTM International, 2015. – 7 p.
150. ASTM D4767 Standard Test Method for Consolidated Undrained Triaxial Compression Test for Cohesive Soils. – West Conshohocken, P.A.: ASTM International, 2011. – 14 p.
151. ASTM D1883 Standard Test Method for California Bearing Ratio (CBR) of Laboratory-Compacted Soils. – West Conshohocken, P.A.: ASTM International, 2016. – 14 p.
152. ASTM D4429 Standard Test Method for CBR (California Bearing Ratio) of Soils in Place. – West Conshohocken, P.A.: ASTM International, 2009. – 7 p.
153. AASHTO T193 Standard Method of Test for The California Bearing Ratio. – Washington, DC: American Association of State Highway and Transportation Officials. – 12 p.
154. ГОСТ 22733-2002. Грунты. Метод лабораторного определения максимальной плотности. – М.: Госстрой России, ГУП ЦПП, 2003. – 16 с.
155. ГОСТ 20522-2012. Грунты. Методы статистической обработки результатов испытаний. – М.: Стандартинформ, 2013. – 16 с.
156. Лунёв А.А. экспериментальные исследования прочностных характеристик золошлаковой смеси / А.А. Лунёв, В.В. Сиротюк, Н.И. Барац // Вестник СибАДИ. – 2016. – №6 (51). – С.61-66.
157. Huang H. W. The use of bottom ash in highway embankments, subgrade, and subbases. Joint Highway Research Project, Final Report, FHWA/IN/JHRP-90/4. West Lafayette: Indiana Department of Transportation and Purdue University, 1990. 315 p.
158. Padam Raj. Thesis on compaction characteristics and shear parameters of pond ash. National Institute of Technology, Rourkela, 2010. 58 p.
159. Roberts, J. E. The compressibility of sands / J. E. Roberts, J. M. DeSouza // Proc., American Society for Testing and Materials. – No 58. – Pp. 1269–1277.
160. Lamb D. W. Ash disposal in dams, mounds, structural fills and retaining walls // Proceedings of the Third International Ash Utilization Symposium, U.S. Bureau of Mines, Information Circular. No. 8640.

- Рр. 170-179.
161. ВСН 29-76 (Минавтодор РСФСР). Технические указания по оценке и повышению технико-эксплуатационных качеств дорожных одежд и земляного полотна автомобильных дорог. – М.: Транспорт, 1977. – 102 с.
 162. ASTM D698–12. Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort. – West Conshohocken, P.A.ASTM International, 2012. – 13 p.
 163. ASTM D 1557 – 12. Test Method for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort. – West Conshohocken, P.A.ASTM International, 2012. – 12 p.
 164. Лунёв А.А. Результаты исследований деформационных характеристик золошлаковых смесей / А.А. Лунёв, В.В. Сиротюк, Е.В. Иванов // Вестник СибАДИ. – 2017. – № 1. – С. 103-110.
 165. Toth P. S. Coal ash as structural fill with special reference to Ontario experience / P.S. Toth, H.T. Chan, C.B. Cragg // Can. Geotech. – Vol. 25. – Рр. 694–704.
 166. Справочная энциклопедия дорожника. Том II. Ремонт и содержание автомобильных дорог / Л.П. Васильев, В.К. Апестин, В.И. Баловнев [и др.]; под ред. Л.П. Васильева. – М.: Инфрмавтодор, 2004. – 1129 с.
 167. Кривисский А. М. Принципы назначения конструкций одежд нежесткого дорожного типа на магистральных автомобильных дорогах [Текст]: дис. д-ра. тех. наук : 05.23.11 / Кривисский А. М.; — Ленинград, 1962. — 420 с.
 168. Смирнов А.В. Расчет дорожных конструкций автомагистралей на прочность и выносливость: монография / А.В. Смирнов. – Омск: СибАДИ, 2012. – 116 с.
 169. Каюмов, А.Д. Влияние многократных нагрузок на прочность лессового грунта / А.Д. Каюмов, Д.А. Махмудова // Наука и техника в дорожной отрасли. – 2012. – № 3. – С. 20-21.
 170. Дедов, В.Л. Расчет значения модуля упругости связных грунтов под воздействием повторных вертикальных нагрузок / В.Л. Дедов // Труды ТГТУ: сборник научных статей молодых ученых и студентов. Издательство ТГТУ. – Тамбов, 2006. – С. 137-139.
 171. Пилипенко, А.С. Воздействие на связный грунт кратковременных многократных нагрузок / А.С. Пилипенко // Строительство и эксплуатация автомобильных дорог в условиях Сибири / ОмПИ. – Омск, 1981. – С. 53-60.
 172. ГОСТ 5180-2015. Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик. – М.: Стандартинформ, 2016. – 20 с.
 173. СП 34.13330.2012. Автомобильные дороги. Актуализированная редакция СНиП 2.05.02-85 – М.: Госстрой России, 2013. – 98 с.
 174. ОДМ 218.2.094-2018 Методические рекомендации по проектированию земляного полотна автомобильных дорог общего пользования из местных талых и мерзлых переувлажненных глинистых и торфяных грунтов в зонах распространения многолетнемерзлых грунтов. – М.: Росавтодор, 2018. – 45 с.
 175. Типовые материалы для проектирования ТП 503-0-48.87 Земляное полотно автомобильных дорог общего пользования. – М.: Союздорпроект, 1987. – 55 с.
 176. Лунёв А.А. Обоснование устойчивости откосов высоких насыпей из золошлаковых смесей/ А.А. Лунёв, Е.В. Иванов, Г.М. Левашов // Техника и технологии строительства. – Омск, 2016. – №1 (5). – С. 76-82.
 177. ГОСТ Р 52748–2007 Дороги автомобильные общего пользования. Нормативные нагрузки, расчётные схемы нагружения и габариты приближения. – М.: Стандартинформ, 2008. – 9 с.
 178. Лунёв, А.А. Использование отходов теплоэнергетики для сооружения насыпей земляного полотна автомобильных дорог [Текст] / 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.
 179. Лунев А.А. Результаты определения глубины промерзания и степени морозного пучения опытного участка земляного полотна из золошлаковой смеси в 2010-2013 гг / А.А. Лунев // Доклад на Международной научно-практической конференции ФГБОУ ВПО «СибАДИ»: Инновационное лидерство строительной и транспортной отрасли глазами молодых ученых (03-07 февраля 2014) / – Омск, СибАДИ. 2014.
 180. Костерин Э.В. Методические указания к лабораторной работе «Определения штамповыми испытаниями модуля деформации песчаного основания и распределения в нем напряжений». – Омск: Изд. СибАДИ, 1993. – 12 с.
 181. Лунёв А.А., Сиротюк В.В. Влияние влажности на несущую способность земляного полотна из зо-

- лошлаковых смесей / А.А. Лунёв, В.В. Сиротюк // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – Белгород, 2017. – № 12. – С. 14-20.
182. Jayamali K.V.S.D. Empirical Correlations Between CBR and Index Properties for Sri Lankan Soils / K.V.S.D. Jayamali, U.P., Nawagamuwa // Conference: International conference on Geotechnical Engineering. – 2015. – Vol. 1. – Pp. 189-192.
183. Johnl A. Correlation Of CBR Value With Properties Of Red Soil / A. Johnl, A. Joson, J. Venia, K.B. Chandran, A. Chacko // International Research Journal of Engineering and Technology. – 2017. – Vol. 4. – Issue 3. – Pp. 2042-2044.
184. Rakaraddi P.G., Gomarsi V. Establishing relationship between CBR with different soil properties / P.G. Rakaraddi, V. Gomarsi // International Journal of Research in Engineering and Technology. – 2015. – Vol. 4. – Issue 2. – Pp. 182-188.
185. Маслов Н.Н. Основы механики грунтов и инженерной геологии: Учебник для вузов / Н.Н. Маслов. – М.: Изд-во Высшая школа, 1968. – 626 с.
186. Способ формирования набережных с использованием пульпы золошлаковых отходов: пат. 2614236 Российская Федерация: МПК Е 02 В 3/06. / Лунёв А.А., Сиротюк В.В; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО СибАДИ". – № 2015149068, заявл. 16.11.2015; опубл. 23.03.2017, Бюл. № 9. – 1 с.
187. ОДН 218.1.052-2002 Оценка прочности нежестких дорожных одежд. – М.: Росавтодор, 2003. – 33 с.
188. СТ СЭВ 5497-86. Дороги автомобильные международные. Определение несущей способности дорожных конструкций и их конструктивных слоев установкой динамического нагружения (УДН). – М.: Издательство стандартов, 1988. – 10 с.
189. Филимендигов В. П. Оценки прочности нежестких дорожных одежд установкой динамического нагружения / В. П. Филимендигов // Актуальные вопросы строительства и эксплуатации автомобильных дорог в условиях Сибири / СибАДИ. – Омск, 1983. – с. 77-81.
190. Дик Э.П. Оценка степени опасности золошлаковых отходов ТС для окружающей среды и здоровья человека/ Э.П. Дик, А.Н. Соболева // Материалы II научно-практического семинара «Золошлаки ТЭС: удаление, транспорт, переработка, складирование» (23–24 апреля 2009 г). — М.: Издательский дом МЭИ, 2009. – С. 65-68.
191. Адамс Т.Х. Изменение экологического законодательства в области обращения с побочными продуктами сжигания угля в США / Т.Х. Адамс, Д.С. Госс // Материалы II Международного научно-практического семинара семинара «Золошлаки ТЭС: удаление, транспорт, переработка, складирование» (23–24 апреля 2009 г). — М.: Издательский дом МЭИ, 2009. – С. 41-44.
192. Федеральный закон от 24.06.1998 N 89-ФЗ «Об отходах производства» Об отходах производства и потребления (с изменениями на 28 декабря 2016 года) Российская газета, 1998. 20 с.
193. Приказ Минприроды России (Министерства природных ресурсов и экологии РФ) от 04.12.2014 № 536 Об утверждении Критериев отнесения отходов к I-V классам опасности по степени негативного воздействия на окружающую среду. [Электронный ресурс]. – М. Официальный интернет-портал правовой информации, 2015. – Режим доступа: www.pravo.gov.ru, свободный. – Загл. с экрана.
194. ASTM C618-19 Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. – West Conshohocken, P.A.: ASTM International, 2019. – 5 p.
195. СанПин 2.6.1.2523-09 Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2009. – 70 с.
196. СП 2.6.1.2612-10 Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ 99/2010). – М.: Российская газета, N 210/1, 2010. – 84 с.
197. Vaasma T. Long-term modelling of fly ash and radionuclide emissions as well as deposition fluxes due to the operation of large oil shale-fired power plants / T. Vaasma, M. Kaasik, J. Loosaar, M. Kiisk, A. H. Tkaczyk // Journal of Environmental Radioactivity. – 2017. – Vol. 178-179. – Pp. 232-244.
198. Лунёв А.А. Некоторые экологические аспекты использования золошлаковых материалов в дорожном строительстве / Е.А. Беззубова, Е.В. Иванов, А.А. Лунев // Казанские научные чтения студентов и аспирантов – 2013» имени В.Г. Тимирязова: материалы международной научно-практической конференции студентов и аспирантов. - Казань: издательство «Познание» Института экономики, управления и права, 2013. – 540 с.
199. ФР 1.39.2007.03222 Методика определения токсичности воды и водных вытяжек из почв, осадков сточных вод, отходов по смертности и изменению плодовитости дафний: Федеральный реестр. М.: АКВАРОС, 2007. – 51 с.
200. ФР 1.39.2007.03223 Биологические методы контроля. Методика определения токсичности вод, водных вытяжек из почв, осадков сточных вод и отходов по изменению уровня флуоресценции хлоро-

- филла и численности клеток водорослей. Федеральный реестр. М.: АКВАРОС, 2007. – 47 с.
201. Стебенюк А. А. Образование травяного покрова на откосах земляного полотна / А.А. Стебенюк, Э. С. Насымбаева, В. А. Шнайдер // Молодежь и научно-технический прогресс в дорожной отрасли Юга России: сб. тр. науч. практич. конф. – Волгоград: ВолгГАСУ, 2014. – Вып. 14-16 мая. – С. 375-379.
 202. 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.
 203. Комонов, С.В. Экспериментальное исследование процесса пыления поверхности намывного пляжа золошлакоотвала / С.В. Комонов, Д.А. Озерский // ИНТЕРЭКСПО ГЕО-СИБИРЬ. – 2005. – №5. – С. 184-189.
 204. РД 153-34.0-02.108-98 Рекомендации по борьбе с пылением действующих и отработанных золошлакоотвалов ТЭС. – М.: СПО ОРГТЭС, 2001. – 28 с.
 205. Методические рекомендации по определению экономически рациональной области использования отходов ТЭС и ГРЭС в дорожном строительстве. – М.: СоюзДорНИИ, 1987. – 48 с.
 206. ФЕР 81-02-01-2001 Государственные сметные нормативы. Федеральные единичные расценки на строительные и специальные строительные работы. Сборник 1. Земляные работы. – М.: ФАУ ФЦЦС, 2017. – 131 с.
 207. ФЕР 81-02-27-2001 Федеральные единичные расценки на строительные и специальные строительные работы. Сборник 27. Автомобильные дороги. – М.: ФАУ ФЦЦС, 2017. – 72 с.
 208. ФССЦпг 81-01-2001 Государственные сметные нормативы. Федеральные сметные цены на перевозки грузов для строительства. М.: ООО "Стройинформиздат", 2019. – 250 с.
 209. МДС 81-35.2004 Методика определения стоимости строительной продукции на территории Российской Федерации (с Изменениями). – М.: Госстрой России, 2004. – 71 с.
 210. МДС 81-25.2001 Методические указания по определению величины сметной прибыли в строительстве. – М.: Госстрой России, 2001. – 13 с.
 211. МДС 81-33.2004 Методические указания по определению величины накладных расходов в строительстве (с Изменениями и Дополнениями). – М.: Госстрой России, 2013. – 30 с.

Приложение А
(Обязательное)

Таблица А1 – Коэффициенты для определения прочностных параметров мелкозернистой золошлакоооовой смеси при разной влажности и коэффициенте уплотнения на основе результатов испытаний на одноплоскостной срез по ГОСТ 12248-2010

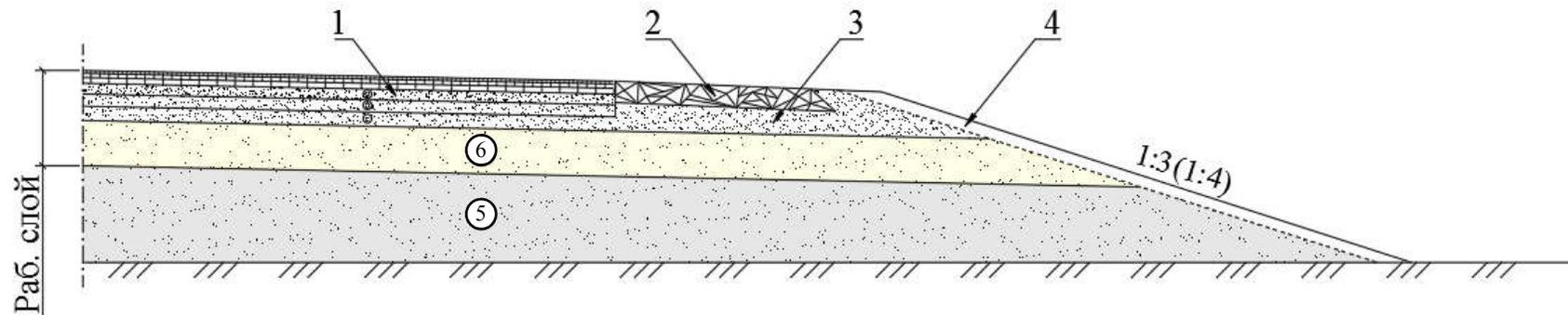
Коэффициенты для определения значения удельного сцепления										
	коэффициент уплотнения									
		0,90	0,92	0,94	0,96	0,98	1,00	1,02	1,04	1,06
Влажность в относительных единицах	0,30	0,116	0,314	0,516	0,650	0,734	0,787	0,828	0,875	0,947
	0,35	0,312	0,601	0,802	0,933	1,013	1,061	1,095	1,133	1,195
	0,40	0,524	0,814	1,013	1,142	1,218	1,260	1,287	1,317	1,368
	0,45	0,669	0,959	1,158	1,284	1,356	1,393	1,412	1,433	1,474
	0,50	0,757	1,047	1,245	1,368	1,436	1,467	1,479	1,491	1,522
	0,55	0,794	1,085	1,282	1,402	1,466	1,491	1,496	1,499	1,520
	0,60	0,791	1,082	1,277	1,395	1,454	1,473	1,471	1,465	1,475
	0,65	0,754	1,045	1,239	1,354	1,409	1,422	1,412	1,398	1,397
	0,70	0,693	0,984	1,177	1,289	1,339	1,346	1,329	1,305	1,294
	0,75	0,615	0,907	1,098	1,207	1,253	1,254	1,228	1,196	1,174
	0,80	0,530	0,821	1,011	1,117	1,158	1,153	1,120	1,078	1,045
	0,85	0,445	0,736	0,924	1,027	1,063	1,052	1,011	0,960	0,916
	0,90	0,368	0,659	0,845	0,945	0,977	0,959	0,910	0,850	0,795
	0,95	0,309	0,600	0,784	0,880	0,907	0,883	0,826	0,756	0,691
1,00	0,275	0,565	0,747	0,840	0,862	0,832	0,767	0,688	0,611	
Коэффициенты для определения значения угла внутреннего трения										
	коэффициент уплотнения									
		0,90	0,92	0,94	0,96	0,98	1,00	1,02	1,04	1,06
Влажность в относительных единицах	0,30	0,930	0,948	0,972	1,000	1,032	1,067	1,104	1,143	1,182
	0,35	0,872	0,893	0,919	0,950	0,985	1,023	1,062	1,104	1,146
	0,40	0,836	0,859	0,887	0,920	0,957	0,998	1,040	1,084	1,128
	0,45	0,817	0,842	0,872	0,907	0,947	0,989	1,033	1,079	1,126
	0,50	0,812	0,839	0,871	0,908	0,949	0,993	1,040	1,088	1,136
	0,55	0,818	0,847	0,880	0,919	0,961	1,007	1,055	1,105	1,155
	0,60	0,832	0,862	0,897	0,937	0,980	1,027	1,077	1,128	1,180
	0,65	0,851	0,881	0,917	0,958	1,003	1,051	1,101	1,153	1,206
	0,70	0,871	0,901	0,938	0,979	1,025	1,074	1,125	1,178	1,232
	0,75	0,888	0,919	0,956	0,998	1,044	1,093	1,145	1,199	1,253
	0,80	0,900	0,931	0,968	1,010	1,056	1,106	1,158	1,212	1,267
	0,85	0,903	0,934	0,971	1,013	1,059	1,108	1,161	1,215	1,270
	0,90	0,894	0,925	0,961	1,003	1,048	1,098	1,149	1,203	1,258
	0,95	0,870	0,900	0,936	0,976	1,021	1,070	1,121	1,174	1,229
1,00	0,827	0,856	0,891	0,930	0,975	1,022	1,073	1,125	1,179	

Коэффициенты применяются к значению угла внутреннего трения и удельного сцепления, полученным при оптимальной влажности и коэффициенте уплотнения 0,95 – 0,98

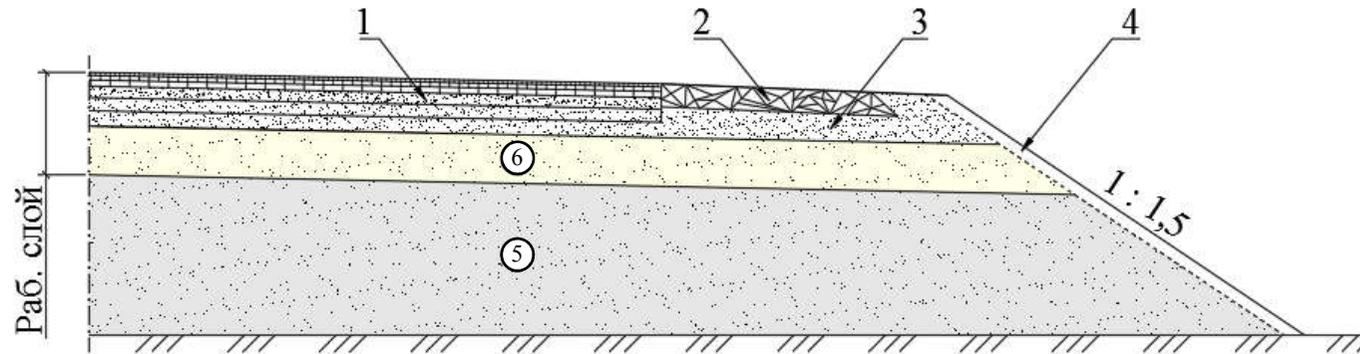
Приложение Б
(Обязательное)

Конструкции поперечных профилей земляного полотна из ЗШС для дорог I-II технической категории

Поперечный профиль земляного полотна из ЗШС на I типе местности по условиям увлажнения с высотой насыпи до 3 метров

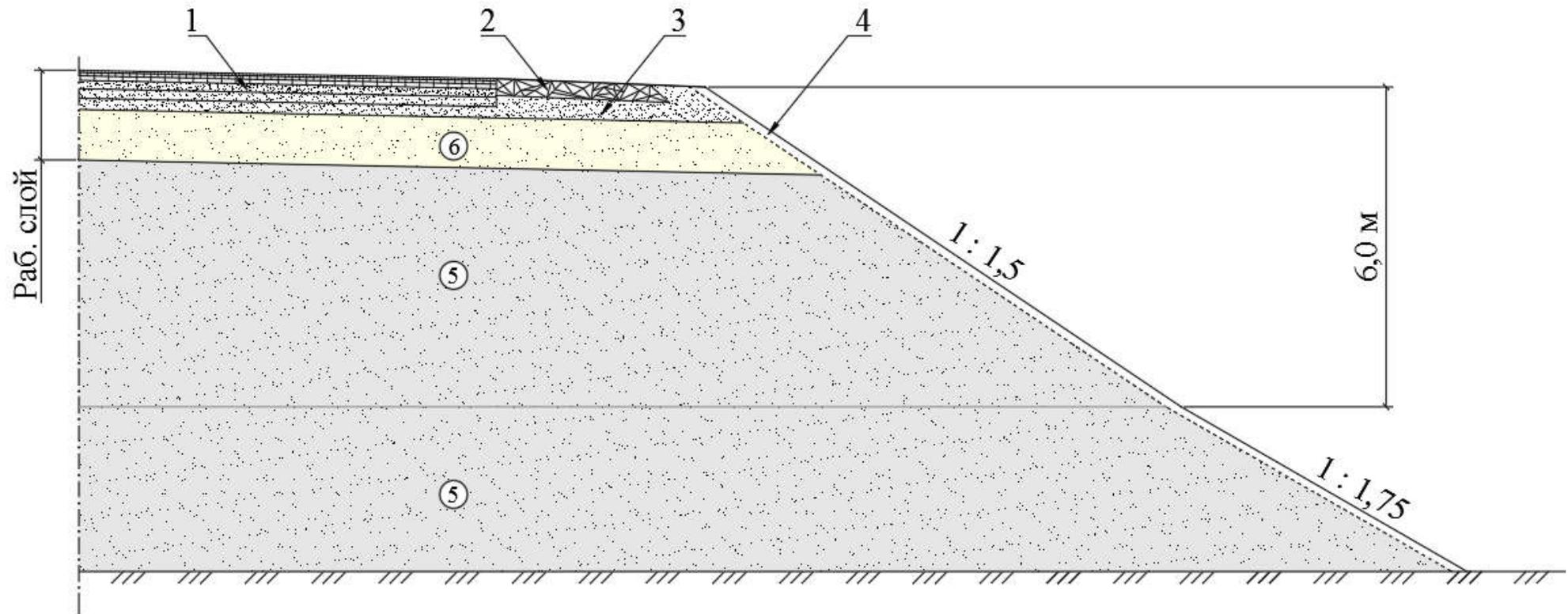


Поперечный профиль земляного полотна из ЗШС на I и II типе местности по условиям увлажнения с высотой насыпи от 3 до 6 метров



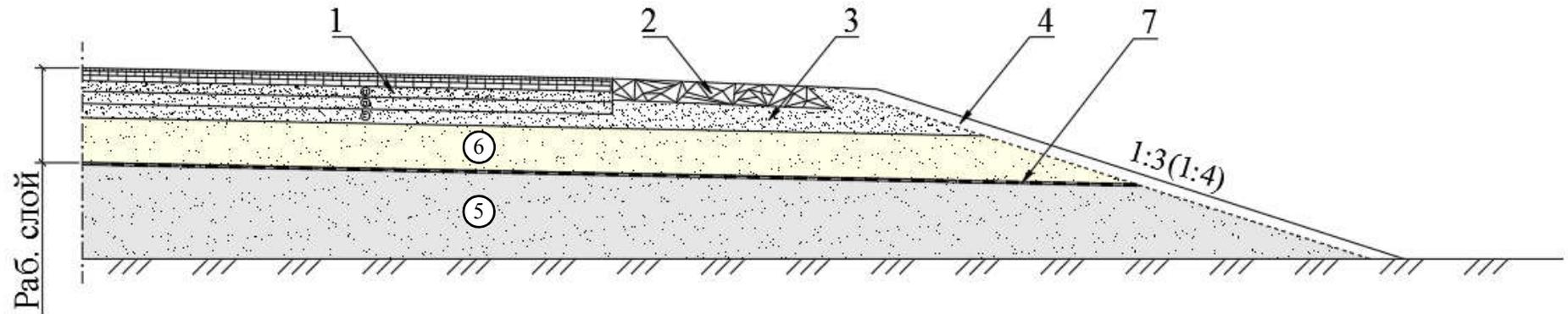
1 - дорожная одежда; 2 - укрепленная обочина (фракционированным щебнем); 3 - дренирующий слой из песка средней крупности; 4 - укрепление откосной части насыпи геоматом совместно со слоем растительного грунта (5-7 см) и посевом трав; 5 - земляное полотно из золошлаковой смеси; 6 - рабочий слой земляного полотна из стабильных (непучинистых, ненабухающих и непрасадочных) грунтов или укрепленной малыми дозировками неорганических вяжущих (известь, портландцемент) золошлаковой смеси.

Поперечный профиль земляного полотна из ЗШС на I и II типе местности по условиям увлажнения с высотой насыпи от 6 до 12 метров

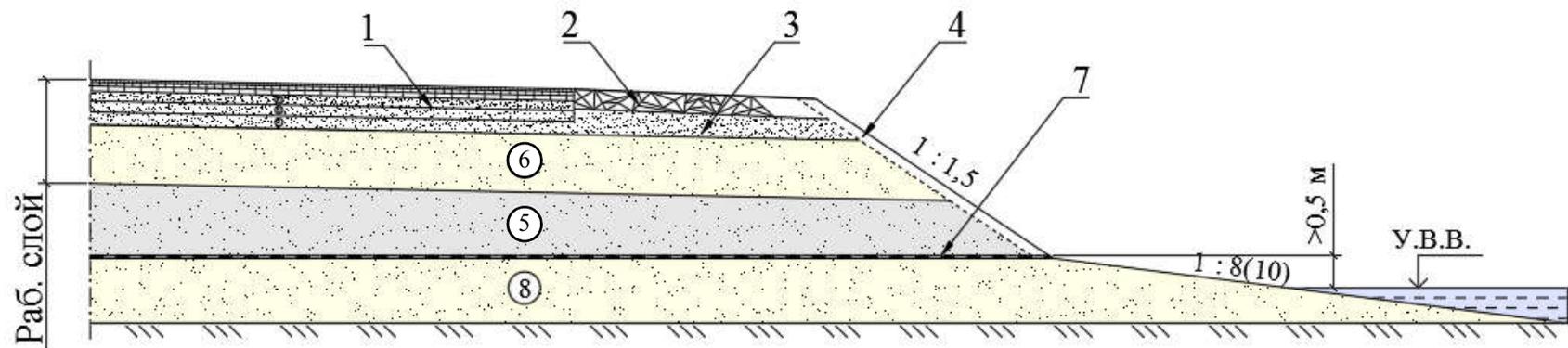


1 - дорожная одежда; 2 - укрепленная обочина (фракционированным щебнем); 3 - дренирующий слой из песка средней крупности; 4 - укрепление откосной части насыпи геоматом совместно со слоем растительного грунта (5-7 см) и посевом трав; 5 - земляное полотно из золошлаковой смеси; 6 - рабочий слой земляного полотна из стабильных (непучинистых, ненабухающих и непросадочных) грунтов или укрепленной малыми дозировками неорганических вяжущих (известь, портландцемент) золошлаковой смеси.

Поперечный профиль земляного полотна из ЗШС на II типе местности по условиям увлажнения с высотой насыпи до 3 метров

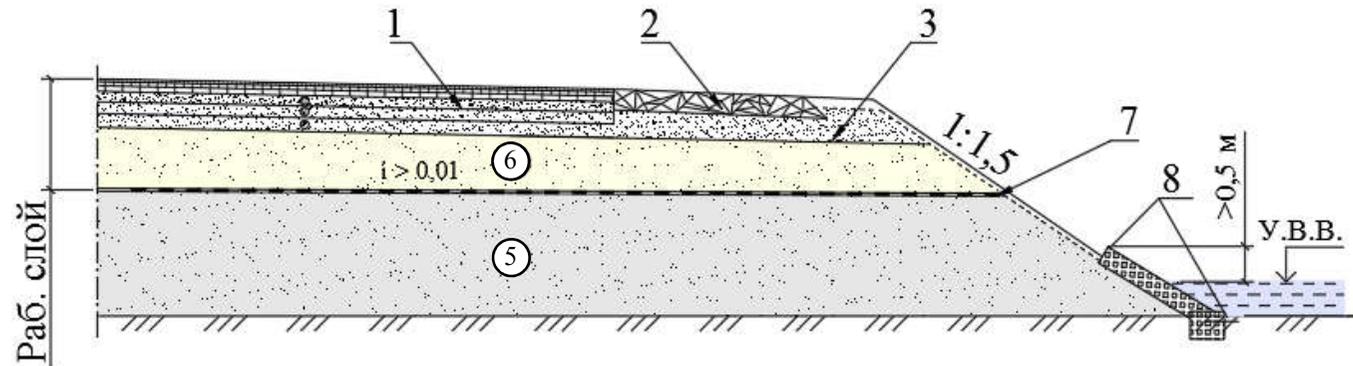


Поперечный профиль земляного полотна из ЗШС на III типе местности по условиям увлажнения (при отсыпке на воду с использованием пляжных откосов)

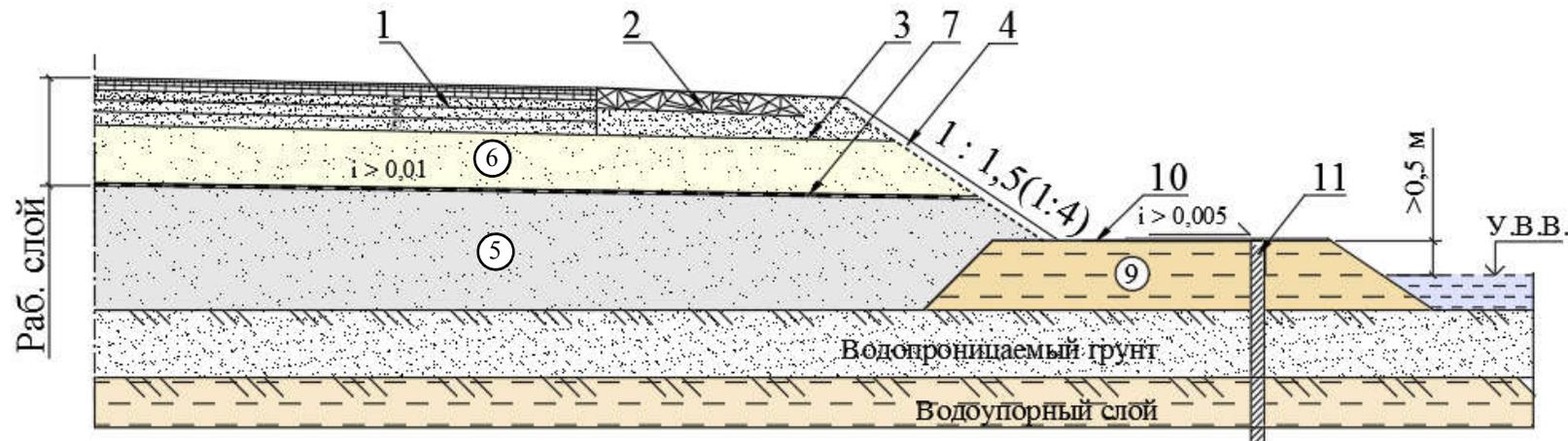


1 - дорожная одежда; 2 - укрепленная обочина (фракционированным щебнем); 3 - дренарующий слой из песка средней крупности; 4 - укрепление откосной части насыпи геоматом совместно со слоем растительного грунта (5-7 см) и посевом трав; 5 - земляное полотно из золошлаковой смеси; 6 - рабочий слой земляного полотна из стабильных (непучинистых, ненабухающих и непрасадочных) грунтов или укрепленной малыми дозировками неорганических вяжущих (известь, портландцемент) золошлаковой смеси; 7 - гидроизоляция; 8 - песок.

Поперечный профиль земляного полотна из ЗШС на III типе местности по условиям увлажнения
(при отсыпке на сухо с использованием матрасов Рено)



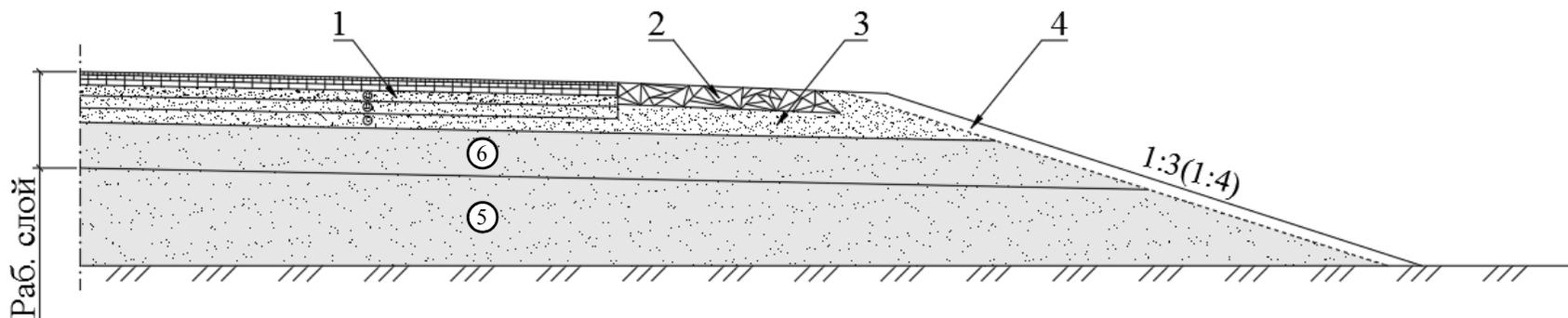
Поперечный профиль земляного полотна из ЗШС на III типе местности по условиям увлажнения
(при отсыпке насухо и близком расположении водоупорных слоев)



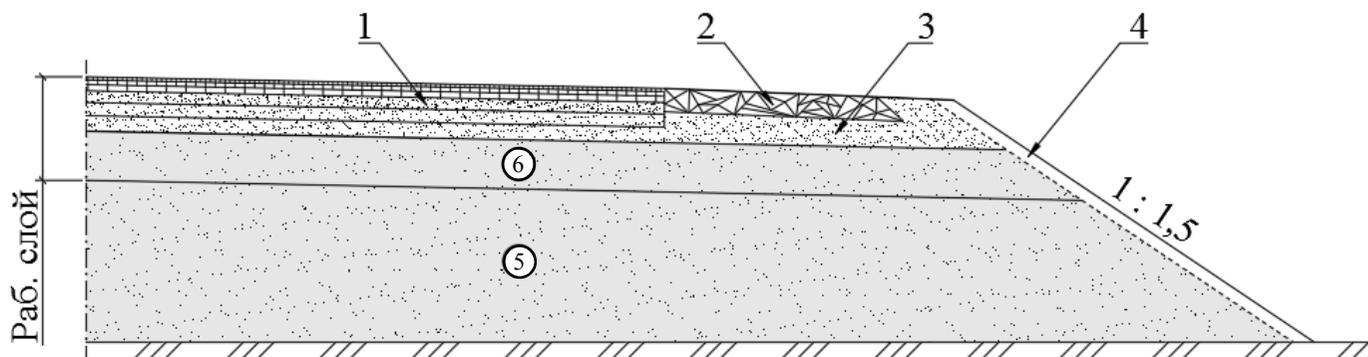
1 - дорожная одежда; 2 - укрепленная обочина (фракционированным щебнем); 3 - дренирующий слой из песка средней крупности; 4 - укрепление откосной части насыпи геоматом совместно со слоем растительного грунта (5-7 см) и посевом трав; 5 - земляное полотно из золошлаковой смеси; 6 - рабочий слой земляного полотна из стабильных (непучинистых, ненабухающих и непрасадочных) грунтов или укрепленной малыми дозировками неорганических вяжущих (известь, портландцемент) золошлаковой смеси; 7 - гидроизоляция; 8 - матрас Рено или габион; 9 - берма из глинистого грунта; 10 - непроницаемая геомембрана; 11 - водонепроницаемый экран.

Приложение В
(Обязательное)

Конструкции поперечных профилей земляного полотна из ЗШС для дорог III-V технической категории
 Поперечный профиль земляного полотна из ЗШС на I типе местности по условиям увлажнения с
 высотой насыпи до 3 метров

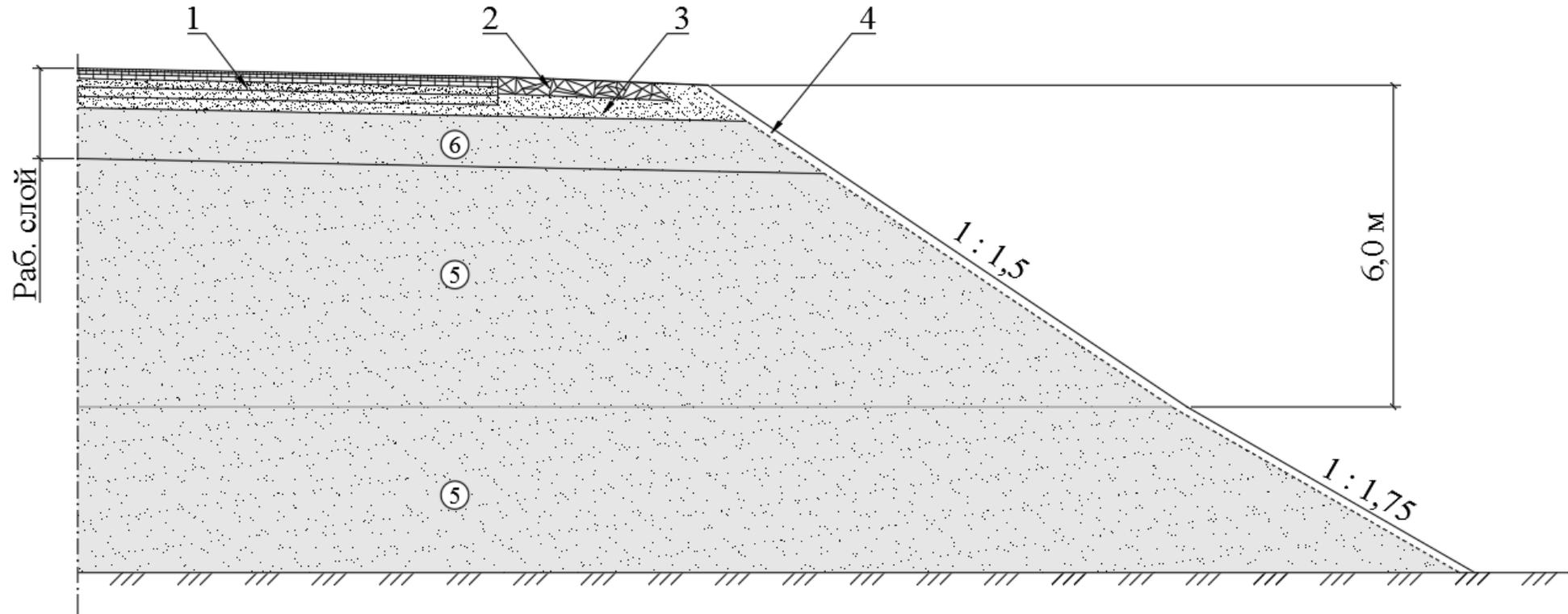


Поперечный профиль земляного полотна из ЗШС на I и II типе местности по условиям увлажнения с
 высотой насыпи от 3 до 6 метров



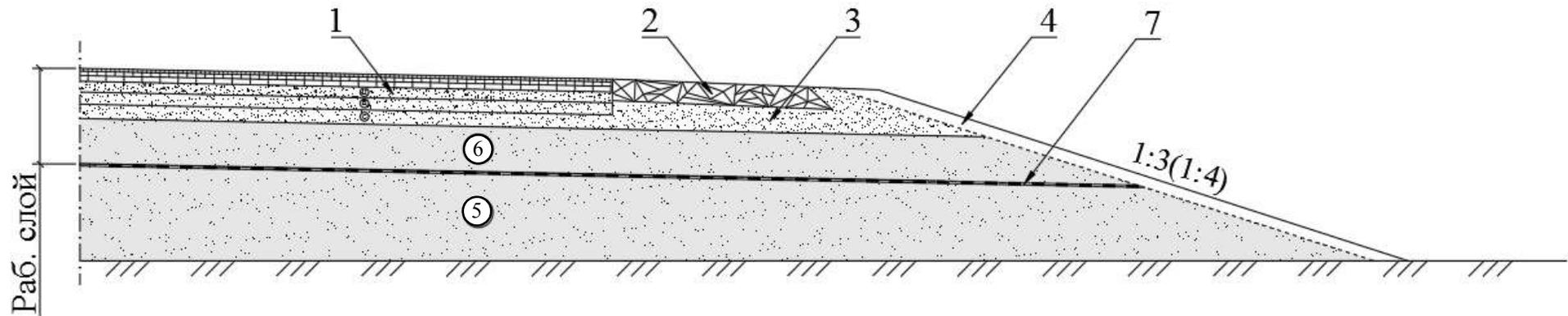
1 - дорожная одежда; 2 - укрепленная обочина (фракционированным щебнем); 3 - дренирующий слой из песка средней крупности; 4 - укрепление откосной части насыпи геотекстом совместно со слоем растительного грунта (5-7 см) и посевом трав; 5 - земляное полотно из золошлаковой смеси; 6 - рабочий слой земляного полотна из непучинистой или укрепленной малыми дозировками неорганических вяжущих (известь, портландцемент) золошлаковой смеси.

Поперечный профиль земляного полотна из ЗШС на I и II типе местности по условиям увлажнения с высотой насыпи от 6 до 12 метров

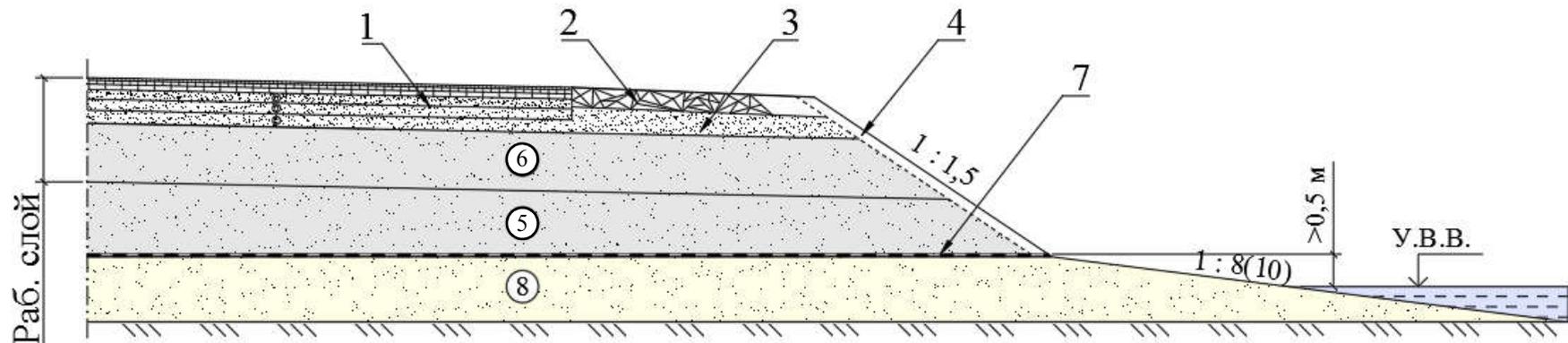


1 - дорожная одежда; 2 - укрепленная обочина (фракционированным щебнем); 3 - дренирующий слой из песка средней крупности; 4 - укрепление откосной части насыпи геоматом совместно со слоем растительного грунта (5-7 см) и посевом трав; 5 - земляное полотно из золошлаковой смеси; 6 - рабочий слой земляного полотна из непучинистой или укрепленной малыми дозировками неорганических вяжущих (известь, портландцемент) золошлаковой смеси.

Поперечный профиль земляного полотна из ЗШС на II типе местности по условиям увлажнения с высотой насыпи до 3 метров

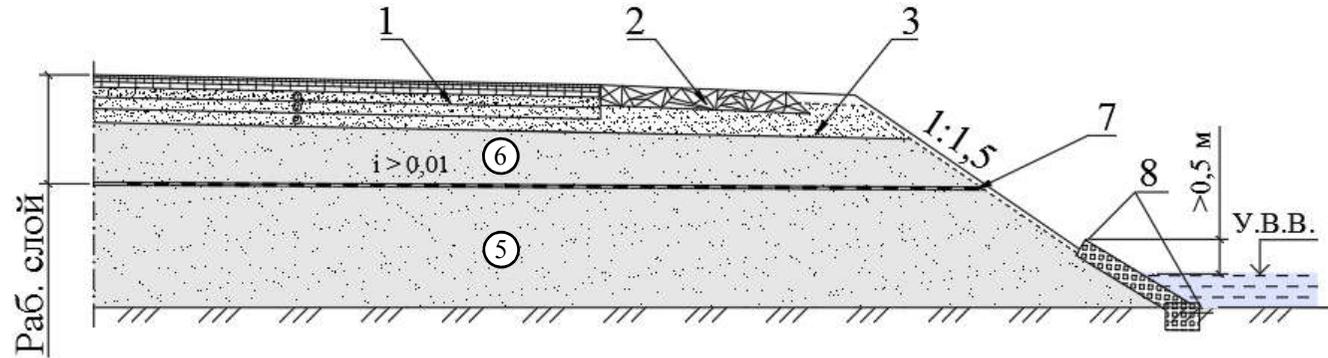


Поперечный профиль земляного полотна из ЗШС на III типе местности по условиям увлажнения (при отсыпке на воду с использованием пляжных откосов)

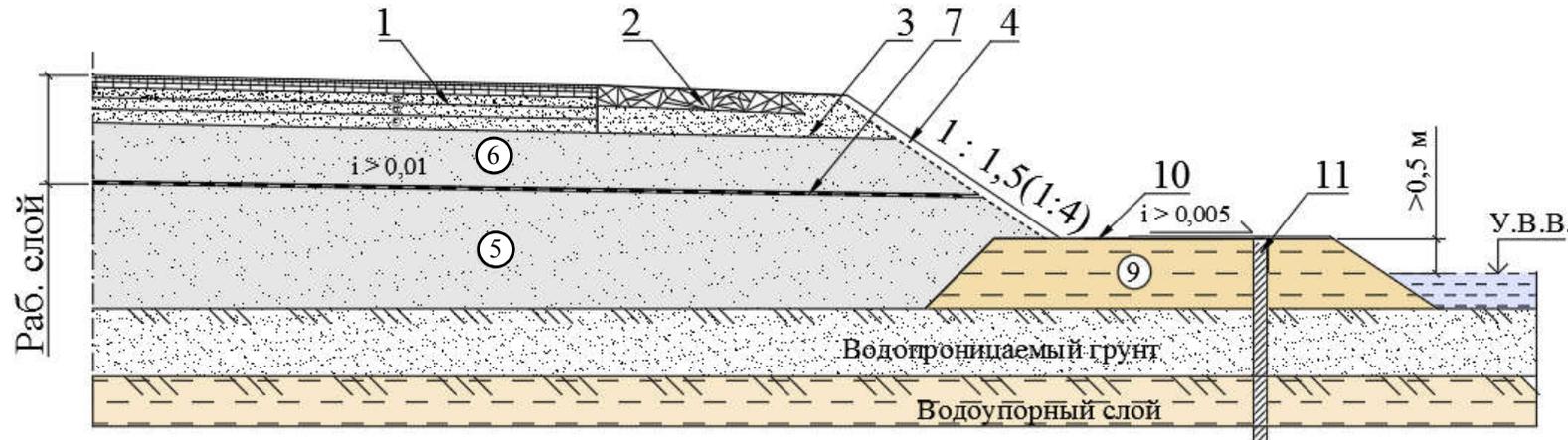


1 - дорожная одежда; 2 - укрепленная обочина (фракционированным щебнем); 3 - дренирующий слой из песка средней крупности; 4 - укрепление откосной части насыпи геоматом совместно со слоем растительного грунта (5-7 см) и посевом трав; 5 - земляное полотно из золошлаковой смеси; 6 - рабочий слой земляного полотна из непучинистой или укрепленной малыми дозировками неорганических вяжущих (известь, порландцемент) золошлаковой смеси; 7 - гидроизоляция; 8 - песок.

Поперечный профиль земляного полотна из ЗШС на III типе местности по условиям увлажнения
(при отсыпке на сухо с использованием матрасов Рено)



Поперечный профиль земляного полотна из ЗШС на III типе местности по условиям увлажнения
(при отсыпке насухо и близком расположении водоупорных слоев)



1 - дорожная одежда; 2 - укрепленная обочина (фракционированным щебнем); 3 - дренирующий слой из песка средней крупности; 4 - укрепление откосной части насыпи геоматом совместно со слоем растительного грунта (5-7 см) и посевом трав; 5 - земляное полотно из золошлаковой смеси; 6 - рабочий слой земляного полотна из непучинистой или укрепленной малыми дозировками неорганических вяжущих (известь, портландцемент) золошлаковой смеси; 7 - гидроизоляция; 8 - матрас Рено или габион; 9 - берма из глинистого грунта; 10 - непроницаемая геомембрана; 11 - водонепроницаемый экран.

Приложение Г
(справочная)

Акт внедрения научно-исследовательских разработок

УТВЕРЖДАЮ

Директор

ООО "Проектный институт
"Желдорпроект-Омск"



2016 г.

АКТ

внедрения научно-исследовательских разработок

Мы, нижеподписавшиеся, главный инженер проекта ООО "Проектный институт "Желдорпроект-Омск" Гаценко Вера Алексеевна, с одной стороны, и сотрудники кафедры «Проектирование дорог» ФГБОУ ВО «СибАДИ» д-р техн. наук, профессор Сиротюк Виктор Владимирович, канд. техн. наук Иванов Евгений Владимирович и аспирант Лунёв Александр Александрович, составили настоящий акт на предмет подтверждения внедрения научно-исследовательских разработок ФГБОУ ВПО «СибАДИ» по вопросу применения золошлаковых отходов тепловых электростанций в дорожном строительстве.

Внедрение осуществлено путём участия в проектировании и научно-техническом сопровождении инновационного проекта по строительству земляного полотна из золошлаковой смеси Каширской ГРЭС-4 на объекте: «Транспортная развязка автомобильной дороги с пересечением в разных уровнях железнодорожных путей на 87 км перегона Михнево-Жилево Московской железной дороги по адресу: Московская область, Ступинский район, вблизи д. Жилево». Объём использованной золошлаковой смеси на данном объекте составил около 700 тыс. м³.

Главный инженер проекта

В.А. Гаценко

Профессор, д-р техн. наук

В.В. Сиротюк

Доцент, канд. техн. наук

Е.В. Иванов

Аспирант

А.А. Лунёв

Приложение Д
(справочная)
Акт внедрения научно-исследовательских разработок

УТВЕРЖДАЮ
Генеральный директор
ООО «ДИЦ СибАДИ»
Левашов Г.М.

«20» _____ 2019 г.



АКТ

внедрения научно-исследовательских разработок

Мы, нижеподписавшиеся, генеральный директор ООО «ДИЦ СибАДИ» Григорий Михайлович Левашов, с одной стороны, и научный коллектив ФГБОУ ВО «СибАДИ» д-р техн. наук, профессор Сиротюк Виктор Владимирович, канд. техн. наук, доцент Иванов Евгений Владимирович и аспирант Лунёв Александр Александрович, составили настоящий акт на предмет подтверждения внедрения научно-исследовательских разработок коллектива, касательно применения золошлаковых смесей тепловых электростанция при строительстве насыпей земляного полотна автомобильных дорог.

Внедрение осуществлено путём использования разработок коллектива (отчёт по НИР по договору 23-16 от 21.04.16, отчёт по НИР по договору 37-16 от 12.12.2016) при проектировании и научно-техническом сопровождении проекта по строительству земляного полотна из золошлаковой смеси Дзержинской ТЭЦ-22 на объекте: «Транспортная развязка на расположенная на пересечении Лыткаринского шоссе и магистрали М-5 «Урал» в Люберецком районе Московской области».

Для строительства насыпи земляного полна использовано 500 тыс. м³ золошлаковой смеси.

Профессор, д-р техн. наук

В.В Сиротюк.

Канд. техн. наук

Е.В. Иванов

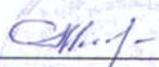
Аспирант

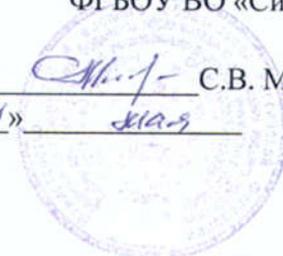
А.А. Лунёв

Приложение Е
(справочная)
Акт внедрения научно-исследовательских разработок

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе
ФГБОУ ВО «СибАДИ»

 С.В. Мельник
« 21 »  2019 г.



АКТ

внедрения в учебный процесс результатов диссертационной работы

Настоящим актом подтверждается внедрение в учебный процесс в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)» исследований аспиранта Лунёва А.А. (руководитель д-р техн. наук, профессор Сиротюк В.В.), полученных при работе над диссертацией на тему «Обоснование расчётных значений механических характеристик золошлаковых смесей для проектирования земляного полотна».

Результаты исследований, разработанные конструктивно-технологические решения, предложенные в работе, используются при чтении лекций, в курсовом и дипломном проектировании при подготовке студентов на кафедре «Проектирование дорог» по направлениям:

08.03.01. «Строительство» по профилю подготовки бакалавров «Автомобильные дороги»;

08.04.01. «Строительство» по профилю подготовки магистров «Изыскания и проектирование автомобильных дорог»;

08.05.01. «Строительство уникальных зданий и сооружений» по профилю подготовки специалистов «Строительство автомагистралей, аэродромов и специальных сооружений»;

08.06.01 «Техника и технология строительства», аспирантура, научная направленность: «Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей».

Результаты исследования используются также на занятиях по повышению квалификации инженерно-технического персонала дорожной отрасли РФ.

Декан факультета
«Автомобильные дороги и мосты»



М.С. Перфильев

Заведующая кафедрой
«Проектирование дорог»



О.А. Рычкова