

Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

На правах рукописи

Истомина Катарина Равилевна

**ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЗОЛЫ-УНОСА  
В ОБРАТНОЙ ЗАСЫПКЕ НА ХАРАКТЕР НАГРУЖЕНИЯ  
И КОНСТРУКТИВНЫЕ РЕШЕНИЯ ТОНКОСТЕННЫХ  
ПОДПОРНЫХ СТЕН**

2.1.1 - Строительные конструкции, здания и сооружения

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук, доцент,  
Бургонутдинов А. М.

Пермь - 2024

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	4
1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	10
1.1. Анализ вопроса использования подпорных сооружений.....	10
1.2. Обзор нормативной и технической литературы.....	16
1.3. Обзор методов расчета подпорных конструкций.....	18
1.4. Золой уноса как техногенный материал. Классификация и производство .....	23
1.5. Опыт российского и зарубежного использования золы-уноса .....	31
1.6. Выводы по главе 1 .....	36
2. ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ГРУНТА ЗАСЫПКИ .....	38
2.1. Методы определения физико-механических свойств грунтов .....	38
2.2. Используемые в лабораторных исследованиях материалы.....	39
2.2.1. Песчаный грунт.....	40
2.2.2. Особенности золы-уноса Рефтинской ГРЭС и пути ее утилизации 41	
2.2.3. Экологическая оценка зол-уноса	44
2.3. Определение физико-механических характеристик грунта обратной засыпки	48
2.4. Анализ полученных результатов.....	50
2.5. Выводы по главе 2 .....	52
3. ПРОВЕДЕНИЕ КОМПЛЕКСНОЙ РАСЧЕТНОЙ ОЦЕНКИ РАБОТЫ ПОДПОРНОЙ СТЕНЫ С ОБРАТНОЙ ЗАСЫПКОЙ, УКРЕПЛЕННОЙ ЗОЛОЙ УНОСА .....	53
3.1. Используемые в работе расчетные методы.....	53
3.2. Аналитический расчет зависимости активного давления грунта обратной засыпки от его прочностных характеристик.....	54
3.3. Численное моделирование напряженно-деформированного состояния уголковой подпорной стены .....	57

3.3.1. Расчетная схема уголкового подпорной стены	59
3.3.2. Результаты расчета	61
3.4. Численное моделирование напряженно-деформированного состояния тонкостенной (измененной) уголкового подпорной стены .....	70
3.4.1. Расчетная схема тонкостенной подпорной стены	70
3.4.2. Расчет нормативного коэффициента устойчивости	71
3.4.3. Расчет коэффициентов устойчивости конструкций	72
3.4.4. Расчет необходимой толщины тонкостенной подпорной стены высотой 5 метров .....	75
3.4.5. Анализ внутренних силовых факторов, возникающих в железобетонной конструкции стены	76
3.4.6. Расчет необходимого армирования железобетонной конструкции подпорной стены.....	79
3.5. Выводы по главе 3 .....	81
4. ЭКОНОМИЧЕСКОЕ СРАВНЕНИЕ ВАРИАНТОВ .....	83
4.1. Основные положения .....	83
4.2. Результаты сметных расчетов уголкового подпорной стены.....	84
4.3. Результаты сметных расчетов тонкостенной подпорной стены .....	85
4.4. Выводы по главе 4 .....	87
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....	90
ПРИЛОЖЕНИЕ А. ВНЕДРЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ .....	105

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы.** Федеральный закон Российской Федерации ФЗ-384 «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» одним из пунктов обеспечения механической безопасности определяет: «...отсутствие деформаций недопустимой величины строительных конструкций, основания здания или сооружения и геологических массивов прилегающих территорий». Одним из наиболее эффективных сооружений с точки зрения рационального использования городского пространства и уменьшения полосы отвода в конструкциях дорог в сложных условиях являются подпорные конструкции, на надежную эксплуатацию которых влияет тип применяемого в качестве обратной засыпки грунта. Физико-механические характеристики грунта влияют на величину и характер распределения активного давления на подпорную стену, и как следствие на устойчивость конструкции и ее эксплуатационную надежность.

В настоящее время активно развивается направление применения модифицированных типов грунта в целях экономии, ресурсосбережения и повышения времени эксплуатации конструкций. При этом особое значение приобретает возможность расширения использования отходов производства (в частности золы-уноса). Общая площадь золоотвалов в России (как действующих, так и законсервированных) в настоящее время составляет более 30 тысяч га земли, полностью извлеченных из хозяйственного оборота. Использование зольных отходов при устройстве обратной засыпки подпорных стен на улично-дорожной сети является новым направлением утилизации золы-уноса, поэтому определение оценка ее влияния на изменение закона распределения активного давления на подпорные стены является актуальной задачей.

### **Степень разработанности темы исследования.**

В настоящее время разработано достаточно большое количество методов модификации грунтов с целью повышения прочностных характеристик: уплотнение, закрепление, армирование. Одним из перспективным методов

является внесение в состав техногенных грунтов инертных составляющих, изменяющих механизм взаимодействия минеральных частиц грунта. К числу таких инертных можно отнести золу уноса, достаточно эффективно повышающего прочностные свойства грунта.

Однако многие вопросы его применения остаются не решенными, такие как:

- определение и экспериментальное подтверждение зависимости изменения прочностных характеристик от процентного содержания инертного вещества (золы уноса);

- количественное определение величины и закона распределения активного давления модифицированного грунта на подпорные конструкции;

В рамках этих положений определяются и решаются новые задачи с учетом факторов, оказывающих влияние на взаимодействие тонкостенных подпорных стен с модифицированным грунтом обратной засыпки.

**Цель работы** заключается в совершенствовании методики проектирования тонкостенных подпорных стен с обратной засыпкой из модифицированного золой уноса грунта.

**Задачи исследований:**

1. Анализ современного состояния вопроса (обзор и анализ проблем проектирования подпорных стен, обзор методов расчета, обзор используемых материалов);

2. Экспериментальное исследование физико-механических свойств модифицированного грунта обратной засыпки;

3. Численное моделирование напряженно-деформируемого состояния подпорных стен с обратной засыпкой модернизированным грунтом;

4. Определение внутренних силовых факторов в железобетонных конструкциях тонкостенных подпорных стен;

5. Разработка алгоритма проектирования конструкции тонкостенной подпорной стены с обратной засыпкой модифицированным грунтом.

## **Предмет и объект исследования**

*Объект исследования:* тонкостенные подпорные стены с обратной засыпкой из модифицированного золой уноса грунта;

*Предмет исследования:* воздействие изменения прочностных характеристик модифицированного грунта засыпки на величину и закон изменения активного давления на конструкцию тонкостенной подпорной стены.

**Научная новизна** заключается в разработке методики проектирования тонкостенной подпорной стены с назначаемыми прочностными характеристиками модифицированного грунта обратной засыпки, в том числе:

1. Определена область применения золы уноса для модификации грунта обратной засыпки подпорных стен.
2. Получена зависимость изменения прочностных модифицированного грунта в зависимости от массового содержания в смеси золы уноса.
3. Разработана методика регулирования величины активного давления на протяженные тонкостенные подпорные стены.

## **Теоретическая значимость работы:**

1. Определена зависимость расчетных прочностных характеристик модифицированного грунта от физико-механических характеристик исходного грунта и массового содержания золы уноса.
2. Обоснована возможность регулирования активного давления на тонкостенные подпорные стенки модификацией грунта обратной засыпки.

Работа выполнялась при поддержке гранта Российским фондом фундаментальных исследований «Конкурс на лучшие проекты фундаментальных научных исследований, выполняемые молодыми учеными, обучающимися в аспирантуре» в рамках научного проекта № 20-38-90104.

**Практическая значимость** работы состоит в обосновании возможности оптимизации конструкции протяженных тонкостенных подпорных стен проектируемой модификацией грунта обратной засыпки.

Основные результаты теоретических и экспериментальных исследований внедрены в ООО «Фреза» (г. Пермь), ООО «ПСП «Автомост» (г. Пермь).

**Методология и методы диссертационного исследования.** Использован экспериментально-теоретический метод. В теоретических и экспериментальных исследованиях использованы общие методы механики грунтов и деформируемого твердого тела. При анализе применены методы математического моделирования. Компьютерное моделирование выполнено в сертифицированном программном комплексе PLAXIS.

**На защиту выносятся:**

1. Экспериментальная зависимость изменения прочностных характеристик модифицированного грунта от массового содержания золы уноса.
2. Результаты численного эксперимента моделирования напряженно-деформируемого состояния системы «тонкостенная подпорная стена – модифицированный грунт».
3. Методика проектирования протяженных тонкостенных подпорных стен с модифицированным грунтом обратной засыпки.

**Достоверность результатов исследований и выводов** диссертационной работы обусловлена использованием методов математического планирования экспериментов, применением известных законов механики грунтов и выполнением экспериментальных исследований с помощью апробированных и поверенных контрольно-измерительных приборов и оборудования, а также проведением расчетов с применением сертифицированных расчетных программ.

**Апробация результатов.** Основные положения диссертации были доложены, опубликованы в трудах и получили одобрение на: Всероссийских молодежных конференциях аспирантов, молодых ученых и студентов «Современные технологии в строительстве. Теория и практика» (Пермь, 2016-2022 гг.); на III Всероссийской научно-технической конференции «Проектирование, строительство и эксплуатация транспортных сооружений» (Казань, 2019 г.); на II Всероссийской конференции с международным участием «Фундаменты глубокого заложения и проблемы геотехники территории», (Пермь, 2021).

**Публикации.** Основные положения диссертации и результаты исследований опубликованы в 8 печатных работах, в том числе 3 в ведущих рецензируемых научных изданиях.

**Личный вклад автора.** На основе изучения и обобщения Российского и международного опыта исследований проанализировано современное состояние основ механики модифицированных грунтов; определены цель и задачи решаемые в диссертационной работе; выполнены лабораторные опыты по определению зависимости изменения прочностных свойств модифицированного золой уноса грунта; численное моделирование НДС тонкостенной подпорной стены с обратной засыпкой из модифицированного грунта; разработка методики проектирования конструкции тонкостенной подпорной стены; внедрение полученных результатов в практику строительства; подготовка к публикации печатных работ.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы и приложений. Общий объем диссертации составляет 106 страниц, 26 рисунков, 14 таблиц. Список литературы содержит 152 наименования, в том числе 29 на иностранных языках.

# **1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ**

## **1.1. Анализ вопроса использования подпорных сооружений.**

Подпорные сооружения являются уникальными строительными конструкциями, предназначенные для использования в гражданском, промышленном, дорожном, гидротехническом строительстве и горном деле. Подпорные стены помогают решить проблемы невозможности устройства грунтового откоса с достаточной устойчивостью, оптимизировать использование пространства территорий в среде плотной городской застройки. При исследовании сфер использования подпорных сооружений, выделено дорожно-транспортное строительство в связи с развитием городов и, как следствие, необходимостью возведения новых транспортных магистралей. Зачастую строительство дорожной инфраструктуры вынужденно производится в стесненных условиях городской среды, или же на разнообразных местностях, отличающихся неоднородным рельефом (большими перепадами высот).

Уклон откоса зависит от вида грунта, его свойств, а также от условий производства работ. Зачастую, в связи с плотной городской застройкой и следующие за ней стесненные условия работы, для увязки проектируемой автомобильной дороги устраиваются рассматриваемые в настоящей работе подпорных сооружений.

По характеру взаимодействия с грунтом подпорные стены классифицируются на массивные, тонкостенные, гибкие и армогрунтовые в зависимости от конструктивных решений (Рисунок 1.1-1.2).

Массивные стены появились по мере появления в строительной индустрии новых материалов. Первоначально стенки возводились из камней, укладываемых друг на друга без связующего материала, в последствии начали применяться различные растворы. Как правило, массивные стенки имеют небольшую высоту, но занимают много места при их устройстве. Такие подпорные стены выполняются в основном из габионов, ранее из бута и бутобетона. Грунт оказывает давление на стенку, поэтому устойчивость стенки обеспечивается благодаря ее собственному

весу, давление грунта для удержания стенки не предусмотрено для данного типа подпорных сооружений.



Рисунок 1.1. Классификация подпорных стен

Дополнительные силы, удерживающие конструкцию подпорной стены за счет грунта, появляются в работе полу массивных подпорных стен. Они делятся на комбинированные, тонко-элементные (в частности угловые) и тонкие. Такие стенки выполняются в основном из железобетона, что позволило сохранить прочность конструкции с применением меньшего количества материала, а также разработать новые варианты закрепления стен в грунте.

Комбинированные стены отличаются тем, что удерживающие конструкцию силы создаются путем давления грунта на консольные части стенки. Т.е. стенка может выполняться из камней или блоков (как массивная стенка), при этом закрепляется с помощью железобетонных консолей в грунте.

Более распространенный вариант подпорных стен – тонкостенные подпорные стен. Они делятся на угловые, анкерные и контрфорсные. Они выполняются из железобетона и зачастую имеют форму уголка, закрепленного грунтом.

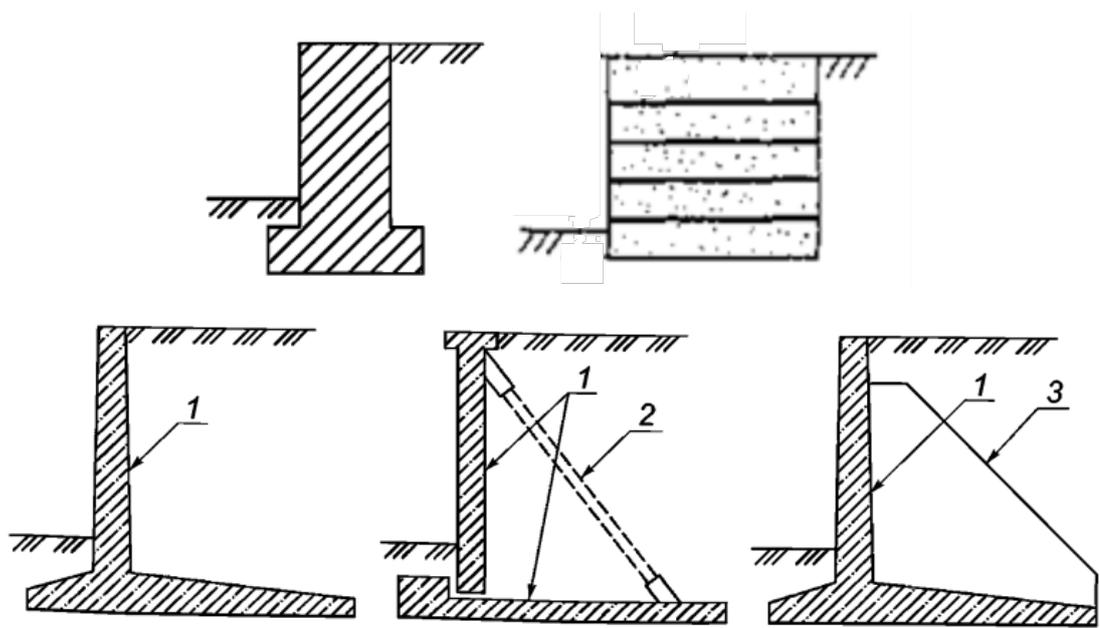
Устойчивость стены обеспечивается путем давления грунта на железобетонную часть стенки – горизонтальную фундаментную плиту, находящуюся в грунте.

Также различают тонкие подпорные стенки, состоящие из ограждающей части и анкера. Ограждающая вертикальная часть закрепляется в грунт консольно, его работа напоминает работу шпунта (сваи) в грунте, анкерная тяга дополнительно «прорезает» призму обрушения и закрепляет вертикальное положение подпорной стенки.

Гибкие подпорные стены могут быть выполнены из разных материалов, в том числе дерева, железобетона, металла. Они удерживают грунт от обрушения, сопротивляясь сдвигу и опрокидыванию за счет заделки и устраиваются без предварительной разработки грунта (вдавливанием, забивкой и т. д.).

Более современным вариантом исполнения подпорных стен являются подпорные армогрунтовые стены. Они состоят из облицовочного материала и армирующих элементов, являющихся неотъемлемой частью грунтового массива и тесно связывающих внешнюю часть подпорной стены с грунтом. В качестве армирующих элементов могут быть использованы металлические сетки, геосинтетические материалы и т.д. [44].

Одной из сфер применения подпорных стен является дорожное строительство. Создание транспортных связей в условиях сложного рельефа (при высоких перепадах высот) вынуждает решать данную проблему путем устройства подпорных стен, особенно в стесненных условиях строительства. Так, в зависимости от расположения дороги относительно склонов разделяют подпорные стены по их расположению относительно земляного полотна: низовые и верховые. Низовые подпорные стены удерживают грунтовой массив с низовой стороны насыпи (полу насыпи), верховые же защищают от обрушения откосы выемок и полу выемок на верховой части склона.



1 – подпорная конструкция; 2 – анкерная тяга; 3 - контрфорс

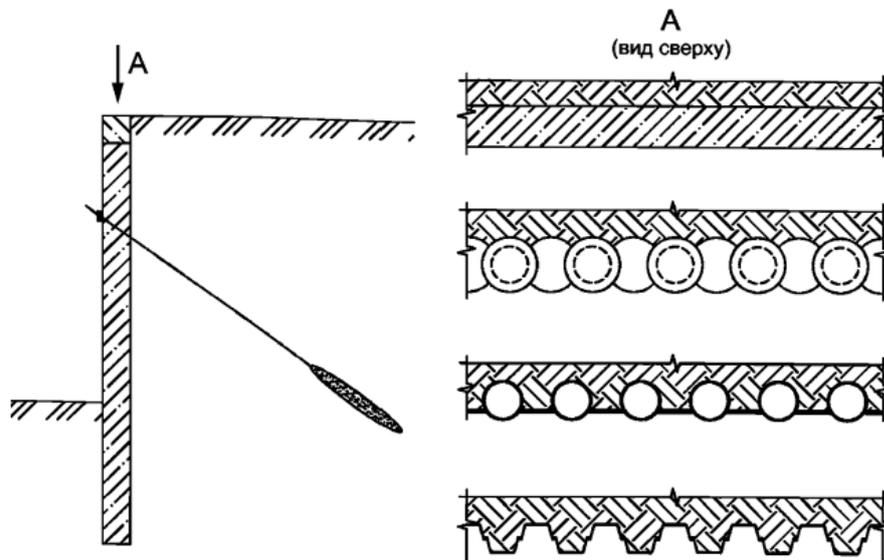


Рисунок 1.2. Схемы подпорных конструкций (Слева направо, сверху вниз: массивная; армогрунтовая; уголково консольная; уголково анкерная; уголково контрфорсная; гибкая, в т.ч. свайная железобетонная; из буросекущих свай; из металлических труб; шпунтовая)

На конструкции подпорных стен действуют нагрузки различных типов: вертикальные, горизонтальные, редко наклонные, временные и постоянные. Основное воздействие на подпорные сооружения оказывают давление грунта,

собственный вес подпорной стены, нагрузка от внешних источников, находящихся на поверхности проектируемого сооружения.

Проектирование подпорных стен автомобильных дорог необходимо рассчитывать с учетом горизонтальных и вертикальных внешних нагрузок, расположенных на призме обрушения, в том числе нагрузки от транспортных единиц автомобильных и городских дорог.

Массив грунта, стремящийся сдвинуться от воздействия горизонтального давления, называется призмой обрушения. При воздействии на призму обрушения временных или постоянных нагрузок давление на стену увеличивается. По типу конструкций подпорных стен выделяются стены с вертикальной задней гранью лицевой плиты и с наклонной. Также и поверхность грунта засыпки может быть горизонтальной (в большинстве случаев) или же под углом к горизонту (обычно уклон направлен в сторону подпорной стены).

В работе подпорной стены и грунта присутствуют такие явления как активное и пассивное давление. Активным давлением является давление на стену от грунта, пассивным – давление конструкции на грунт (также известен как отпор грунта) [40,44]. Устойчивость таких подпорных стен обеспечивается превышением интенсивности пассивного давления над активным.

Давление грунта на подпорные стены обуславливается их конструктивными особенностями, такими как наклон стены, ее жесткость, разгружающих элементов и т. д, а также от свойств самого грунта, от характера перемещений, поворота и прогиба подпорной конструкции.

Активное и пассивное давления вычисляются следующим образом:

$$E_A = \frac{\gamma_0 \cdot H^2}{2} \cdot tg^2\left(45 - \frac{\varphi}{2}\right) \quad (1.1)$$

$$E_{II} = \frac{\gamma_0 \cdot H^2}{2} \cdot tg^2\left(45 + \frac{\varphi}{2}\right) \quad (1.2)$$

где  $\gamma_0$ -удельный вес грунта, кН/м<sup>3</sup>;

H -высота подпорной стенки, м;

$\varphi$ –угол внутреннего трения грунта, °.

Но при решении сложных задач в современной инженерной практике принято использовать численные методы расчета для определения давления грунта на подпорную конструкцию и напряженно-деформированное состояние в целом. При решении простых задач допускается использование аналитических и графоаналитических методов определения значений пассивного и активного давления грунта, возникающие в системе работы подпорной стенки и грунтового массива.

Проектирование подпорных стен – очень сложно в расчете и очень ответственно при его выполнении, поскольку на практике известно много случаев «выхода из строя» подпорных стен в процессе их эксплуатации.

Основных причин обрушения подпорных стен выделяется две: потеря прочности и потеря устойчивости. Принципиальные схемы обрушения представлены на рисунке 1.3.

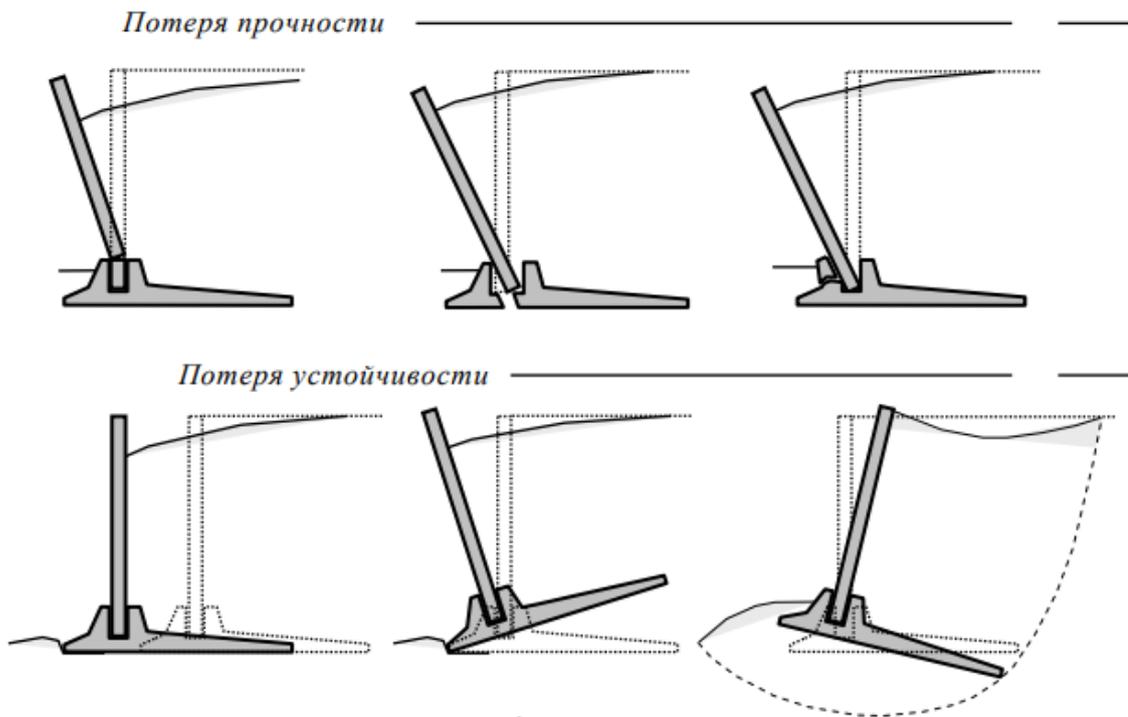


Рисунок 1.3. Схемы разрушения подпорных стен

На рисунках представлены тонкостенные подпорные стенки, на которых наглядно видны смещения конструкции. В первом случае причиной обрушения

является низкая прочность материала стены, нарушения в узлах соединения элементов. В случае на рисунке ниже прочность материала и стыки удовлетворяет конструктивно, но смещение стенки от ее проектного положения (потеря устойчивости) происходит по причине излишнего давления грунта или же его сползания, что в прочем также прямо пропорционально зависит от физико-механических свойств грунта засыпки.

В процессе исследований и совершенствования конструкций подпорных стен разрабатываются множество проектных решений самих подпорных сооружений, комбинирование их с свайными элементами, создание армогрунтовых стен и тому подобное, но, к сожалению, в качестве улучшения эффективности работы подпорной стены и грунта не берется во внимание сам грунт, а именно изменение его характеристик, влияющих на поведение грунта.

## **1.2. Обзор нормативной и технической литературы**

Проектирование подпорных стен несет в себе конструктивные решения по устройству их в грунте, расчеты и проверки. Так как подпорные стены применяются давно и пользуются популярностью при увязке сооружаемых конструкций с существующей местностью, в нормативно-технической базе существует несколько документов, регламентирующих требования к подпорным конструкциям, их проектированию и возведению.

По результатам анализа нормативной документации в рамках Российского нормативно-технического регулирования, ниже приведен перечень нормативных документов, регламентирующих проектирование, применение и производство подпорных сооружений:

- СП 43.13330.2012 «Сооружения промышленных предприятий» (Актуализированная редакция СНиП 2.09.03-85);

- СП 101.13330.2023 «Подпорные стены, судоходные шлюзы, рыбопропускные и рыбозащитные сооружения» (Актуализированная редакция СНиП 2.06.08-87);

- СП 35.13330.2011 «Мосты и трубы» (Актуализированная редакция СНиП 2.05.03-84);

- СП 22.13330.2016 «Основания зданий и сооружений» (Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83\*);

- СП 45.13330.2017 «Земляные сооружения, основания и фундаменты. Актуализированная редакция СНиП 3.02.01-87 (с Изменениями N 1, 2)»;

- СП 63.13330.2018 «Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения»;

- СП 436.1325800.2018 «Инженерная защита территорий, зданий и сооружений от оползней и обвалов. Правила проектирования»;

- СП 381.1325800.2018 «Сооружения подпорные. Правила проектирования»;

- ОДМ 218.2.027-2012 «Методические рекомендации по расчету и проектированию армогрунтовых подпорных стен на автомобильных дорогах»;

- Рекомендации по совершенствованию методов конструирования и технологии повышения общей устойчивости конусов и откосов земляного полотна (для опытного применения);

- Рекомендации по проектированию и строительству устоев диванного типа для малых и средних автодорожных мостов;

- Руководство по проектированию подпорных стен и стен подвалов для промышленного и гражданского строительства;

- Рекомендации по проектированию подпорных стен и стен подвалов;

Проектирование подпорных стенок и стен подвалов необходимо осуществлять, основываясь на чертежи генерального плана (горизонтальная и вертикальная планировка), результаты инженерно-геологических изысканий, а также с учетом технологического задания, содержащего данные о нагрузках и особые требования к проектируемой конструкции.

Необходимо отметить, что помимо влияния на существующие сооружения и инженерные коммуникации при проектировании подпорных конструкций, следует учитывать и возможное влияние окружающей застройки и городской инфраструктуры на проектируемое сооружение, в том числе:

- транспортные динамические воздействия (как от наземного, так и от подземного транспорта);
- перераспределение нагрузок ввиду демонтажа существующих строений на площадках строительства;
- необходимость проведения работ по демонтажу или ремонту подземных сооружений и фундаментов;
- необходимость демонтажа, выноса, переустройства подземных коммуникаций;
- возможность аварийных утечек из водонесущих подземных коммуникаций;
- необходимость проведения археологических изысканий;
- необходимость реконструкции или усиления окружающей застройки.

### **1.3. Обзор методов расчета подпорных конструкций**

При проектировании подпорных сооружений и анализе их работы в совокупности с грунтом обязательно выполнение группы расчетов и проверок, а именно: расчет по несущей способности (первой группе предельных состояний), поверочный расчет по внешней и внутренней устойчивости, расчет на скольжение, расчет на опрокидывание [58,59,129,148]. Расчеты необходимы для обоснования устойчивости стены, а также с целью учесть все факторы, влияющие на устройство подпорных конструкций, особенности грунтовых условий и применяемых материалов.

Расчетом по первой группе предельных состояний – по несущей способности – определяется устойчивость стены относительно сдвига и опрокидывания (для гравитационных стен), также устойчивость основания под подошвой подпорной конструкции, прочность элементов и узлов соединения деталей. Расчет по второй группе предельных состояний устанавливает возможные деформации основания и трещиностойкость элементов стены.

В соответствии с первым предельным состоянием несущая способность конструкции будет обеспечена при выполнении следующего условия:

$$N \leq F, \quad (1.3)$$

где  $N$  – расчетное усилие, определяемое при наиболее тяжелой комбинации расчетных нагрузок и воздействий;

$F$  – наименьшая возможная несущая способность поперечных сечений элементов конструкций, подвергаемых нагружению, расчетное усилие вычисляется от суммы всех нагрузок.

Условие надежности конструкции по второй группе предельных состояний является гарантия сохранения эксплуатационных показателей конструкции с учетом изменчивости прочностных и деформационных свойств материалов. Другими словами, при расчете по второй группе предельных состояний должно соблюдаться условие:

$$E \leq [E] \quad (1.4)$$

где  $E$  – величина обратимых деформаций, возникающих в результате действия эксплуатационных нагрузок;  $[E]$  – соответствующая предельная величина, установленная нормами или заданная при проектировании и гарантирующая нормальную эксплуатацию конструкции.

Выполнение требований второй группы предельных состояний в общих случаях содержит расчеты по деформациям (прогибам, перемещениям и пр.), а также по образованию и раскрытию трещин.

Большую роль при расчете подпорных стен несут в себе коэффициенты надежности по нагрузке. При расчете по первой группе предельных состояний значения коэффициентов зависят от типа нагрузки, воздействующей на подпорную конструкцию, при расчете по второй группе предельных состояний коэффициент принимается равный единице. Но при действии нагрузок от грунта (вертикальное давление от массива грунта и боковое давление) для расчета используют характеристики грунта – угол внутреннего трения и удельное сцепление, а коэффициент надежности по нагрузке принимают единицу.

Одним из основных критериев оценки устойчивости подпорных стен является коэффициент устойчивости. В Российских нормативах различаются коэффициенты устойчивости для откосов и подпорных сооружений. Согласно ОДМ 218.2.066-

2016 «Методические рекомендации по использованию анкерных свай и микросвай в составе мероприятий инженерной защиты автомобильных дорог» [98]:

*коэффициент устойчивости (запаса устойчивости): Числовая величина, отражающая степень устойчивости склона. Если коэффициент больше единицы, склон (откос) считается устойчивым. Величина коэффициента меньше единицы соответствует нарушению устойчивого состояния склона и наступлению оползневой стадии. Коэффициент приблизительно равный единице означает состояние предельного равновесия грунтового массива, как правило, предшествующее оползневой стадии.*

Однако, для системы подпорных сооружений термин «коэффициент устойчивости» означает следующее: в соответствии с [123] в аналитических моделях для выбранной поверхности скольжения следует определять как отношение удерживающих и сдвигающих сил или же как отношение сдвиговой прочности грунта к касательным напряжениям. В численных расчетах значение коэффициента устойчивости принимается равным числу, на которое следует разделить начальные расчетные значения прочностных параметров грунта обеспечивая, чтобы часть грунтового массива, расположенного непосредственно около подпорного сооружения, перешла в состояние предельного равновесия. Значение расчетного коэффициента устойчивости должен быть не меньше нормированного допустимого, определяемому согласно [120] и зависящего от условий работы и категории ответственности проектируемой конструкции (для подпорных стен автомобильных дорог класс ответственности – второй согласно [84]).

Аналитический метод расчета подпорных конструкций подразумевает под собой некоторые допущения и упрощения, которые обеспечивают большой запас устойчивости стен, точность вычислений имеет большую погрешность. Поэтому аналитические методы применяются в основном для решения простых задач механики грунтов, не учитывая влияние многих факторов, таких как особые грунтовые условия, влияние строительного процесса возведения стен.

На практике в настоящее время активно применяется численный метод расчета опорных стен [99]. Численные методы представляют собой методы решения задачи, сводящиеся к конечному числу арифметических действий. В основе расчета могут лежать следующие методики:

- Метод конечных элементов;
- Метод граничных элементов;
- Метод конечных разностей.

Широко используемым методом среди трех является метод конечных элементов (далее МКЭ). Данный метод отличается простой физической интерпретацией основных вычислительных операций. Принцип действия заключается в создании рассчитываемой конструкции в виде модели из различных элементов конечных размеров, которые соединены конечным числом связей.

МКЭ состоит из бесконечного массива, где выделяется необходимая область, разделенная на малые подобласти для того, чтобы считать внутри них среду однородной и изотропной. В каждой подобласти свойства среды охарактеризовываются постоянными характеристиками:  $E$ ,  $\mu$ ,  $\gamma$ . Вышеуказанные подобласти и являются конечными элементами, которые функционируют друг с другом в узлах через узловые силы -  $F$  и узловые перемещения  $\delta$ . Исходные данные, которые вводятся в расчетную схему, состоят из следующих параметров: число конечных элементов, общее число узлов и координаты этих узлов; число типов элементов с разными физико-механическими свойствами; значения физико-механических свойств для каждой группы элементов, значения напряжений и перемещений, характеризующие граничные условия.

МКЭ дает возможность смоделировать напряженно-деформированное состояние моделей грунта любой формы, что невозможно выполнить аналитически. Стоит отметить, что вышеописанный метод конечных элементов позволяет решать всевозможные задачи для математического моделирования различных неоднородностей.

Одно из достоинств – приспособляемость к геометрии рассматриваемой области, задаваемым граничным условиям.

МКЭ используется в инженерной практике более 40 лет, с середины 1970-х годов [4]. С начала 1990-х с развитием программных обеспечений, используемых для геотехнических расчетов, такие расчётные комплексы как Feadam, Sage-Crisp, Plaxis и другие основывались на МКЭ.

В методе граничных элементов рассматриваются значения переменных только на границе области, то есть разбиение на элементы происходит лишь на поверхности модели. Данный метод имеет значительное преимущество при рассмотрении областей больших размеров, особенно таких, в которых часть границы находится в бесконечности.

Метод конечных разностей позволяет составить алгебраическое уравнение из граничных условий и дифференциального уравнения. Данный метод позволяет решать задачи со сложной геометрией, однако учет граничных условия является очень трудоемкой задачей.

Имеют место быть и эмпирические методы, которые основаны на непосредственном исследовании, наблюдении и изучении уже реально существующих конструкций – объектов исследования. В данных расчетах используют эмпирические коэффициенты, получаемые путем ранее проведенных исследований. Эмпирические методы просты в использовании, однако, для своей реализации требуют большого количества предварительных экспериментальных работ.

Но в сравнении численных методов с аналитическим и эмпирическим, он является самым рациональным в применении, учитывает многие условия задач, влияющих факторов, поведение грунта и т.д. Стоит отметить, что точность результатов также зависит от задаваемой модели грунта. Модели грунтов предназначены для описания взаимосвязей между напряжением и деформацией. В зависимости от вила грунта выбирается модель, которая правдоподобнее и достовернее описывает поведение грунта.

Поэтому задаваемая модель грунта отражает в себе физико-механические характеристики исследуемого грунта. При внесении добавок в грунт меняются его

свойства и, следовательно, поведение при его нагружении или воздействии на подпорные конструкции.

#### **1.4. Зола уноса как техногенный материал. Классификация и производство**

Зола-уноса является пирогенным техногенным материалом, который образуется в результате сжигания твердых видов топлива. Зола представляет собой мелкодисперсный минеральный порошок с размерами частиц порядка 3-315 мкм, образующийся в процессе его сгорания твердого топлива и осевший из дымовых газов золоулавливающими устройствами [133]. Зола-уноса улавливается при помощи специальных электрофильтров. Так как состав золы-уноса неоднородный и отличается частицами различных размеров. Частицы более крупных улавливаются циклонами, а мелкие - с помощью электрофильтров, при этом определенная фракция золы улавливается на конкретном поле электрофильтра. После сбора золы-уноса из дымовых газов электрофильтрами, она отправляется в силосные склады при помощи специального пневмотранспорта, либо складировается в золоборники для дальнейшей реализации [97].

На территории России расположено 79 золоотвалов, на которых складировются золошлаковые отходы работы различных ТЭЦ и ГРЭС. Схема расположения представлена на рисунке 1.4. Характеристики некоторых ТЭЦ и ГРЭС приведены в таблице 1.1.



Рисунок 1.4. Карта-схема расположения электростанций и золошлакоотвалов Российской Федерации

Таблица 1.1. Характеристики некоторых ТЭЦ и ГРЭС (начало)

№	Наименование	Характеристика	Сжигаемое сырье	Состав золы
1	Черепетская ГРЭС, золоотвал № 4	Электрическая мощность - 450 МВт, тепловая мощность -172 Гкал/час	Каменный уголь Кузбасса марки «Д» и «Г»	Недожог до 0,8% SiO <sub>2</sub> 59,1-62,1 Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 5,3-9,5 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 19,7-20,6 CaO 2,8-5,6 MgO 1,8-2 SO <sub>3</sub> 0,02-0,3 Na <sub>2</sub> O 0,8-1 K <sub>2</sub> O 2,7-3,6 TiO <sub>2</sub> 0,7-0,8
2	Каширская ГРЭС	Электрическая мощность 1910 МВт. Тепловая мощность 458 Гкал/ч.	Кузнецкий уголь	Недожог до 15% SiO <sub>2</sub> 59,2 Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 8,1 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 24,3

				CaO 2,6 MgO 0,5 SO3 1,3 Na2O3 0,63 K2O 2,3
3	Верхнетагильская ГРЭС	Электрическая мощность 1 497 МВт, тепловая мощность 480 Гкал/ч,	Экибастузский уголь	Недожог до 10% SiO2 36,57-30,32 Fe2O3 3,09-2,75 Al2O3 15,86-11,29 CaO 0,95-0,47 MgO 0,37-0,32 SO3 0,47-0,31 Na2O3 0,3-0,22 K2O 0,47-0,31 TiO2 0,79-0,48
4	Гусиноозёрская ГРЭС	Электрическая мощность 1100 МВт. Тепловая мощность 224,5 Гкал/ч	Окино-Ключевской уголь	Недожог не более 0,5-1,5% SiO2 57 Al2O3 25,6 TiO2 1,7 Fe2O3 8,7 CaO 3,3 MgO 2,1 K2O 1,1 Na2O 0,5
5	Южноуральская ГРЭС	Электрическая мощность 747 МВт. Тепловая мощность 320 Гкал/час.	Челябинский уголь 3Б, Майкубенский уголь 3Б	Недожог до 4,5% SiO2 51,5-44 Fe2O3 9,8-9,9 Al2O3 22,1-23,3 CaO 3,5-4,6 MgO 2,4-2,6 SO3 1,3-1,6 Na2O3 0,9-1,1 K2O 1,7-1,9 TiO2 1,1-1,2

Таблица 1.1. Характеристики некоторых ТЭЦ и ГРЭС (окончание)

6	Харанорская ГРЭС	электрическая мощность 665 МВт, тепловая мощность 329,3 Гкал/час.	Харанорский, Уртуйский уголь	Недожог до 15% SiO <sub>2</sub> 59,2 Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 8,1 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 24,3 CaO 2,6 MgO 0,5 SO <sub>3</sub> 1,3 Na <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 0,63 K <sub>2</sub> O 2,3
7	Омская ТЭЦ-4	Электрическая мощность 1565,2 МВт. Тепловая 3795,24 Гкал/ч.	Основное и резервное топливо – экибастузский каменный уголь, природный газ, растопочное – мазут	Недожог до 4,5% SiO <sub>2</sub> 36,57-30,32 Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 3,09-2,75 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 15,86-11,29 CaO 0,95-0,47 MgO 0,37-0,32 SO <sub>3</sub> 0,47-0,31 Na <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 0,3-0,22 K <sub>2</sub> O 0,47-0,31 TiO <sub>2</sub> 0,79-0,48

Одни из первых исследований механических свойств золы, как материала (техногенного грунта) были проведены в 1972 году А.М. DiGioia и W.L. Nuzzo (США) [6]. В ходе экспериментов была выявлена тенденция к росту угла внутреннего трения при условии возрастания плотности сухого грунта, а также определено наличие сцепления грунта при его природной влажности, в водонасыщенном и сухом состояниях – наоборот, отсутствие сцепления.

Ученые Gray и Lin изучали зависимость удельного веса и прочностных характеристик материала от формы частиц, химического и гранулометрического состава, также ими были рассмотрены свойства морозного пучения [9].

В 1990 г. J. R. Martin опубликовал исследование характеристик зол-уноса в целях оценки их применения в дорожном строительстве. В работе отмечено повышенное водопоглощение и низкий коэффициент фильтрации, а также оценено влияние морозного пучения. Отмечено, что особенности структуры золы способствуют формированию кристаллов льда в процессе замерзания без

выпучивания грунта, при условии, что влажность не достигает полной влагоемкости [23].

Исследования в СССР проводились с 1968 г. В основном изучение свойств золы были направлены на решение вопросов об использовании золы-уноса в цементно- и асфальтобетонах, а также при укреплении грунтов и создании вяжущих.

В 1978 г. В. А. Мелентьев опубликовал работу, освящающую исследования физико-механических свойств зол, однако публикация имеет обзорный характер, проблематика применения золы в качестве техногенных грунтов рассмотрена не в полном объеме. [49]

Опыт исследований золы-уноса с точки зрения улучшения свойств и характеристик усиливаемых материалов (цементно- и асфальтобетона, грунта) открывает перспективы для дальнейшего углубленного изучения влияние золы-уноса в зависимости от ее первоначальных параметров, задаваемых ей еще на стадии сжигания твердого топлива.

По результатам анализа нормативно-технической документации, выделены следующие параметры классификации золы: химический состав, фазовый минералогический состав, дисперсность (остаток на сите) и содержание несгоревших частиц углерода (потери при прокаливании).

Стоит выделить определение золы-уноса согласно ГОСТ 25818-2017 «Золо-уноса тепловых электростанций для бетонов. Технические условия» [83]: *зола-уноса - мелкая, состоящая преимущественно из шарообразных стекловидных частиц пыль, образующаяся при сгорании мелко смолотого угля и обладающая пуццолановыми свойствами и/или гидравлической активностью.*

ГОСТ регламентирует классификацию зол-уноса по виду сжигаемого угля:

- антрацитовые (А), образующиеся при сжигании антрацита, полуантрацита и тощего каменного угля;
- каменноугольные (КУ), образующиеся при сжигании каменного угля, кроме тощего;
- бурогоугольные (БУ), образующиеся при сжигании бурого угля.

Еще одна характеристика, по которой классифицируются золы-уноса – их химический состав. Выделяют кислые (К) золы – такие как антрацитовые, каменноугольные и буроугольные золы, содержащие оксид кальция до 10% масс; основные (О) - характеризующиеся буроугольными, которые содержат оксид кальция в процентном соотношении более 10.

*Кислая* или кремнистая зола-уноса представляет собой тонкодисперсную пыль, частицы которой имеют преимущественно сферическую форму и обладают пуццоланическими свойствами. Основными химическими компонентами такой золы являются реакционноспособные диоксид кремния  $\text{SiO}_2$ , массовая доля которого превосходит 25%, а также оксида алюминия  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Массовая доля свободного оксида кальция не превышает 1%, а реакционноспособного оксида кальция - менее 10%.

*Основная* или кальциевая зола-уноса - тонкодисперсная пыль с гидравлическими и (или) пуццоланическими свойствами. Химический состав основной золы уноса представляет собой реакционноспособный оксид кальция  $\text{CaO}$  (массовая доля реакционноспособного оксида кальция  $\text{CaO}$  составляет более 10%), диоксид кремния  $\text{SiO}_2$  и оксид алюминия  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Богатые известью золы-уноса с содержанием реакционноспособного  $\text{CaO}$  от 10% до 15% по массе содержат не менее 25% реакционноспособного  $\text{SiO}_2$ . [21].

В дополнении, сложные как химический так и минералогический составы в золах обуславливаются протеканием непростых физико-химических процессов при высоких температурах в диапазоне от 1200 до 1600°C в процессе сжигания топлива. В связи с этим химически связанная вода силикатов и алюмосиликатов сепарируется, карбонаты разлагаются, реакции проходят в твердой фазе, идет плавление, кристаллизация, стеклообразование, силикатообразование и т.д. В золах может содержаться от 0,5 до 20 % а иногда более несгоревших частиц твердого топлива, что зависит от вида углей и условий их сжигания [132].

Так как технология получения золы-уноса путем сжигания топлива влияет на дальнейшие приобретаемые золой свойства, существует разделение золы-уноса по категориям в зависимости от потерь при прокаливании, измеряющихся в

процентном соотношении от массы. Так, при потерях менее 2% золе присваивается категория А, а при потерях более 9% - категория Г.

Также состав и свойства золы-уноса напрямую зависят от способов и продуктов ее образования. На строение золы-уноса значительно влияет топливо, его особенности и процесс сжигания. На рисунке 1.5 представлены факторы, отражающиеся в химическом и минерально-фазовом составе золы-уноса.

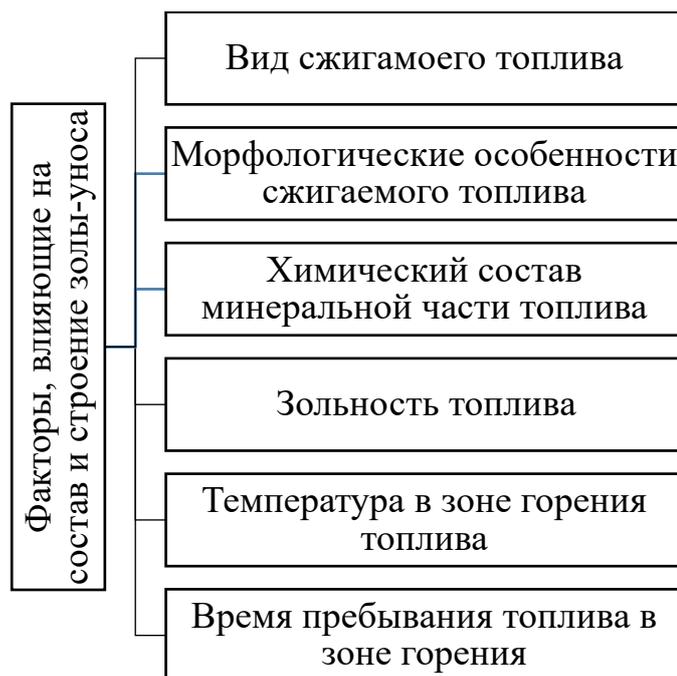


Рисунок 1.5. Факторы, влияющие на состав и строение золы-уноса

Еще одна классификация зол-уноса в зависимости от вида и качества топлив представлена на рисунке 1.6. Зола разделяется на сланцевые, торфяные и угольные, которые, в свою очередь, делятся на антрацитовые, каменные и золы бурых углей. Последняя классификация была ранее рассмотрена в соответствии с ГОСТ 25818-2017 [83].



Рисунок 1.6. Классификация зол-уноса в зависимости от вида и качества топлив

Торфяная зола отличается достаточно высоким содержанием СаО (примерно 23-30%). Но химический состав таких зол неоднороден, что объясняется различным составом минеральной составляющей торфов с разных месторождений и залеганий. К примеру, низинные торфы наполнены окисью кальция, а верхние торфы богаты кремнеземом. Огромное влияние на свойства торфяной золы оказывает технология сжигания топлива и способ улавливания золы-уноса. Так, торфяная зола-уноса имеет лучшие свойства при сжигании торфа в измельченном состоянии при температуре 1000 - 1150°, при этом содержание несгоревшей органической части в золе не превысит 5%. Применение торфяной золы рационально в создании вяжущих из-за обладания золы самостоятельными вяжущими свойствами. Также, по причине малого содержания в торфяной золе фосфорно-калийных соединений способствует ее применению в качестве удобрения для растительных культур.

Сланцевая зола характеризуется наличием в исходном составе золы свободного или гидративного оксида кальция СаО и сульфатов кальция. Сланцевая зола является продуктом переработки диспергированного горючего сланца, применяющего в качестве технологического топлива на тепловых электростанциях [137]. Основными составляющими сланцевой золы являются двухкальциевый

силикат  $2\text{CaO SiO}_2$  и трехкальциевого алюмината  $3\text{CaO Al}_2\text{O}_3$ . Также в строении золы присутствуют до 11% свободного несвязанного оксида кальция  $\text{CaO}$ , около 30% стекловидной фазы, до 17% сульфатов кальция и т.п. Сланцевая зола рассматривается как высокоэффективный активный компонент в составе растворов и бетонов, т.е. в качестве самостоятельного вяжущего [137]. Она широко применяется в бетонных и цементных составах, так как при использовании такой золы в качестве минеральной добавки отмечается снижение потребности в воде при производстве твердеющих смесей по сравнению с без добавочными или включающими иные добавочные компоненты [105].

Угольная зола улавливается при сжигании на ТЭС каменных углей с различных месторождений. В основном в угольной золе-уноса содержится оксид кремний  $\text{SiO}_2$  и алюминия  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , а содержание оксида кальция  $\text{CaO}$  не превышает 5%. Угольная зола имеет обширную область применения в сравнении с выше упомянутыми видами зол, ее применение приветствуется в сфере создания строительных материалов, в дорожном строительстве, в аграрной сфере и т.д.

Во времена СССР требования к составу золы-уноса и ее применению регламентировали Ведомственные строительные нормы ВСН 185-75 «Технические условия по использованию зол-уноса и золошлаковых смесей от сжигания различных видов твердого топлива для сооружения земляного полотна и устройства дорожных оснований и покрытий автомобильных дорог» [35], принятые Министерством транспортного строительства СССР в 1975 году, но в 2013 году документ утратил свою силу. Сейчас взамен выпущен Отраслевой дорожный 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» [101], принятый Росавтодором (Федеральное дорожное агентство) в 2013 году.

### **1.5. Опыт российского и зарубежного использования золы-уноса**

Все виды зол являются уникальными в своих областях применения благодаря сложному составу и отличительным свойствам, которые приобретаются ими в

зависимости от совокупности многих факторов производства, первоначального сырья и так далее.

В качестве добавок золы-уноса используют при стабилизации грунтов, то есть при укреплении деформируемых и сильнодеформируемых оснований, таких как пески и торфяники. При цементации грунтов также с целью экономии материалов добавляют в состав растворов золы-уносы. [36,66]. Кроме того, зола-уноса является альтернативной заменой части цемента в составе строительных материалов. Причинами этого являются достоинства золы-уноса, а именно: уменьшение расхода воды без воздействия на подвижность смеси, уменьшение вероятности развития усадочных деформаций при твердении смеси, облегчение процесса укладки бетонных смесей. Стоит отметить, что при введении золы-уноса в состав смесей в связи с медленной скоростью гидратации замедляются сроки схватывания.

Одна из основных областей применений зол-уноса – дорожное строительство.

Разнообразный состав и свойств золы позволяет применять ее во многих элементах дорожных конструкций. Зола может быть добавлена в основание грунта автомобильной дороги как вяжущее, и как минеральный порошок в состав асфальтобетонных слоев.

Российский опыт использования золы-уноса охватывает разные сферы применения золы и разные месторождения. Так, зола-уноса с Владимирской ТЭЦ благодаря своим полученным при сгорании топлива свойствам применяется в качестве добавки для укрепления грунтов, что способствует снижению расхода цемента на 20% и получению требуемых физико-механических свойств улучшенного грунта. Также зола-уноса с этой ТЭЦ применима для усиления малопрочных известняков, что имеет практическое доказательство: зола была введена совместно с негашеной известью в слой известкового щебня автомобильной дороги Ладога-Лунево [51,126].

Кроме того, в случае переувлажнения связных грунтов зола-уноса используется в целях осушения верхней части грунтового массива, состоящего из них. При возникновении проблемы уплотнения основания из-за большой

влажности, добавление золы-уноса в количестве 20-35% по массе улучшаемого грунта влажность приближается к оптимальной за счет связывания лишней воды (примерно в течение 4 суток) [89].

На Ангарском горном комбинате применяется зола-уноса в качестве алюмосиликатного компонента в сырьевой смеси (заменитель глиняной составляющей) для создания строительных материалов – бетон, кирпич, асфальтобетон и т. п. Более того, около 100 тыс. тонн зол-уноса используется как активная минеральная добавка, и благодаря этому не только сокращается количество отходов от сжигания топлива, но и уменьшается на 30 кг удельный расход топлива на обжиг 1 тонны клинкера [94].

Также, в истории нашей страны имеет место быть опыт использования золы-уноса Бурштынской ГРЭС в технологиях производства на Здолбуновском цементно-шиферном комбинате (1981 г.). Зола-уноса использовалась в качестве активной минеральной добавки в количестве 22 тыс. тонн, что сэкономило 0,7 млн кВтч электроэнергии.

Сейчас наибольшее распространение получили золы КАТЭК (Канско-Ачинских бурых углей), потому как эти золы составляют 40% от общероссийских запасов. На данных углях функционируют ТЭЦ-3 г. Новосибирска, три ТЭЦ г. Красноярска, ТЭЦ г. Барнаула, и др., общее количество зол в отвалах от этих ТЭЦ составляет 24 млн. тонн. Более того, ТЭЦ-3 в г. Новосибирске производит в отвалы 200 тонн такой золы-уноса. Отличительной особенностью зол с таких переработок является наличие самостоятельных вяжущих свойств по причине обладания ими клинкерных минералов  $\text{CaO}_{\text{своб.}}$ , гипса [68].

Несмотря на обширное и давнее применение зол-уноса в основном в сфере строительства, Российские электростанции поставляют не так много золы для ее использования в дальнейшем. На 2010 год российские электростанции предоставили на рынок сбыта всего 1,2 млн т угольной золы-уноса. Стоит отметить, что основное производство золы сконцентрировано в Сибири и на Урале (около 70% угольных электростанций), стабильная поставка в дальние районы от этих

пунктов затруднена, это значительно сужает масштаб распространения золы-уноса на территории нашей страны.

Также одной из проблем постоянного внедрения золы-уноса в состав материалов и применения ее в других отраслях являются трудности в производстве золы-уноса со стабильными свойствами, причиной чего обуславливается использование в качестве исходного сырья различных углей, имеющих разный химический состав. К тому же, в перечне российской нормативно-технической документации предусмотрено недостаточное количество стандартов, которые бы регламентировали мониторинг золы и конечного продукта с достаточно стабильными свойствами и показателями.

Что касается зарубежья, то применение золы-уноса сильно оптимизировано, а количество отвалов в разы меньше по сравнению с российскими показателями.

Еще в 1990 году была создана Европейская Ассоциация продуктов сжигания угля (ЕСОВА) с целью гарантии высококачественного производства золы. На сегодняшний день ассоциация имеет в своем составе 18 полноправных членов от 11 европейских стран и сотрудничает с соседними странами, такими как Американская Ассоциация угольной золы (АСАА), Центр утилизации угля в Японии (ССУЈ), Национальное правление угольной золы Израиля (НСАВ) и другие.

Среди стран Западной Европы выделяется Франция по использованию топливных отходов ТЭС, в частности золы-уноса [96]. Основное направление применения – дорожное строительство. В зависимости от гранулометрического состава золы, ее свойств, она применяется в теле грунтовой насыпи (в качестве техногенного грунта), в нижних слоях основания дорожной одежды (смесь золы-уноса с известью и гипсом), а также в качестве добавочного компонента с вяжущими свойствами в асфальтобетонных покрытиях. Также, при невозможности устройства карьеров и насыпей из естественных грунтов (по причине неудовлетворяющих физико-механических свойств для этого), для возведения насыпей используются влажные золы-уноса.

Известен опыт применения золы-уноса, получаемой в процессе сжигания каменного угля, в Англии в 60-х годах. Основная область применения – возведение насыпей, устройство дорожных одежд, но эффективность данной использования наблюдается только при низкой морозостойкости золы. В случае применения в составе дорожной одежды бетонных слоев, применение золы также возможно, исследования показали, что с внесением золы-уноса в состав бетонной смеси положительно влияет, т.е. увеличивает прочность бетона [40].

В Соединенных Штатах Америки проводились экспериментальные исследования возможности использования золы для возведения гидротехнических насыпных сооружений [151]. Результаты по определению сопротивления сдвигу показали наличие в золе сцепления при ее увлажнении, появление которого связано с поверхностным натяжением в поровой воде. Также, во время лабораторных испытаний было отмечено, что длительность процесса консолидации составляет несколько минут, в то время как осадка насыпи происходит на протяжении всего периода строительства.

Зола-уноса может применяться не только в песчаных, но и глинистых грунтах, как показали исследования и дальнейшее применение золы-уноса в Польше, в частности в дорожном строительстве [42]. Сравнительный анализ внесения золы-уноса в глинистое основание и добавления цемента в тот же грунт доказал, что при внедрении золы прочность слоя набирается медленнее, а количество дней для достижения необходимых параметров морозостойкости после добавления золы превышает количество дней при аналогичном укреплении грунта цементом в 1,5 раза.

Теория использования золы-уноса в составе строительных изделий, в грунтах и основаниях имеет практическое подтверждение в современном строительстве. Примерами применения золы-уноса являются: скоростная дорога Эйзенхауэр в г. Чикаго, США; башня Пикассо высотой 157 метров, возведенная в Мадриде, Испания; башня Коммерцбанк во Франкфурте, Германия; дамба Пулорен во Франции; тоннель под Ла-Маншем связывающий Францию и Великобританию; взлетно-посадочная полоса в аэропорту Эйндховен, Нидерланды.

Использование золы-уноса в наши дни является актуальным не только из-за обширной области ее применения, но и снижения выбросов в атмосферу. В России в процессе выработки электроэнергии при сжигании твердого топлива образуется около 50 тонн в год отходов золошлаковых смесей. В связи с дефицитом свободных территорий в стране и большим количеством отходов (в т. ч. золы) проблема загрязнений окружающей среды встает ребром. Именно поэтому применение экологически целесообразных материалов, снижающих количество выбросов и увеличивающих безотходное производство играет важную роль в проектировании и выборе технологий изготовления строительных конструкций.

### **1.6. Выводы по главе 1**

Объектами настоящего исследования являются подпорные конструкции, их устойчивость и работа в грунте, усиленном путем внедрения золы-уноса в состав обратной засыпки. По результатам анализа состояния вопроса, исследования золы-уноса, обзора опыта применения золы, сформулированы следующие выводы:

1. Исследование подпорных стен сконцентрировано на улучшении их конструктива и способах закрепления в грунте, при этом уделяется немного внимания искусственному улучшению свойств грунтов обратной засыпки для стабилизации работы системы «подпорная стена - грунт», что является перспективным направлением в области создания оптимальных конструкций, позволяющие улучшить прочностные и деформационные характеристики грунтов.

2. В настоящий момент в российских нормативных документах представлены аналитические методы расчета подпорных сооружений, которые целесообразно применять при решении простых задач механики грунтов, в то время как численные методы направлены на расчет подпорных стен с учетом всех влияющих факторов, начиная от материалов стен и заканчивая способом возведения конструкций.

3. Применение золы уноса в качестве строительного материала является актуальной задачей с точки зрения утилизации отходов производства ТЭС,

ликвидации скопления зольных производных и улучшения экологической обстановки страны.

4. Применение отходов теплоэнергетики позволит, во-первых, уменьшить их количество на золоотвалах, во-вторых, обеспечить безотходные производства и снизить нагрузку топливно-энергетического комплекса на окружающую среду.

5. В мировой научной литературе отсутствует информация о напряженно-деформированном состоянии песчаного грунта укрепленного золой уноса в качестве техногенного грунта при устройстве обратных засыпок подпорных стен.

## **2. ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ГРУНТА ЗАСЫПКИ**

### **2.1. Методы определения физико-механических свойств грунтов**

Как отмечалось ранее, опыт России и зарубежных стран в использовании золы подтверждает факт того, что зола-уноса положительно отражается на физико-механических характеристиках грунтов при добавлении ее в необходимых количествах. Проведено множество исследований и испытаний, результаты которых способствовали применению золы-уноса с ТЭС в различных отраслях строительства, в том числе при возведении дорожно-транспортных сооружений.

В рамках второй главы работы было определение прочностных и деформационных характеристик грунта, получаемого путем соединения песка и золы-уноса Рефтинской ГРЭС. Данный грунт в дальнейшем рассматривается в совместной работе с подпорной стеной в качестве обратной засыпки.

Определение физико-механических характеристик было определено несколькими методами согласно действующей нормативно-технической базе, согласно требованиям ГОСТ 12256-2014 [80], ГОСТ 12248-2010 [79], ГОСТ 5180-2015 [87].

Ареометрический метод основан на последовательном определении плотности суспензии грунта через определенные промежутки времени с помощью ареометра. По результатам определений рассчитывают диаметр и количество определяемых частиц по формуле или с помощью номограммы согласно нормативным документам.

Влажность песков определялась по ГОСТ 5180-2015 [87]. весовым методом.

Лабораторными испытаниями также определяются прочностные характеристики грунта. Прочностные свойства грунтов описывают поведение грунта, находящегося под воздействием нагрузок (равных или превышающих критические). Такие характеристики определяются только путем разрушения грунта – разрыв или же сдвиг. Прочностные характеристики в свою очередь зависят от физико-механических параметров грунта.

Основными прочностными показателями грунта, используемые в расчетах, являются угол внутреннего трения и удельное сцепление. Данные параметры были определены методом одноплоскостного среза прибором ПСГ-3М.

Метод одноплоскостного среза позволяет определять необходимые прочностные характеристики грунта в приборах одноплоскостных срезов, получаемых от параметров сдвига части образца грунта под одновременным действием касательной нагрузки, прикладываемой к образцу, и нормальной нагрузки (перпендикулярной плоскости среза).

Первостепенной деформационной характеристикой грунта служит модуль деформации. Модуль деформации - приращение механического напряжения, вызывающее единичное приращение относительной деформации грунта соответствующего вида (сдвига, линейного или объемного сжатия) и рассчитываемое как отношение приращения приложенных напряжений к возникшему при этом общему приращению деформаций грунта. В настоящем исследовании модуль деформации определялся по ГОСТ 12248-2010 [79] методом компрессионного сжатия с помощью прибора КПр-1.

## **2.2. Используемые в лабораторных исследованиях материалы**

Согласно нормативной документации, регламентирующей положения по проектированию подпорных стен [124,121], в качестве грунта обратной засыпки необходимо использование дренирующих крупнообломочных или песчаных грунтов, таким образом, в роли грунта засыпки был выбран песок мелкозернистый, просушенный до воздушно-сухого состояния.

Для добавления в грунт обратной засыпки была выбрана зола-уноса, вырабатываемая Рефтинской ГРЭС, так как данная ГРЭС является крупнейшей по работе на твердом топливе и поставляющей энергию в 4 региона страны (Пермский край, Свердловскую, Тюменскую и Челябинскую области) и, следовательно, имеющей наибольшее количество отходов.

### 2.2.1. Песчаный грунт

Для исследования был выбран песок мелкий, гранулометрический состав, определенный ареологическим методом, песка представлен в Таблице 2.1.

Таблица 2.1. - Гранулометрический состав песка

>10	10-5	5-2	2-1	1,0-	0,5-	0,25-	0,10-	0,05-	0,01-	<
				0,5	0,25	0,10	0,05	0,01	0,002	0,002
-	-	-	0,30	2,50	41,15	51,45	0,63	2,38	1,27	0,32

Полученные значения физико-механических свойств песка представлены в Таблице 2.2.

Таблица 2.2. - Физико-механические свойства песка

№ п/п	Характеристика	Ед. изм.	Значение
1	Плотность, $\rho$	г/см <sup>3</sup>	1,63
2	Удельный вес, $\gamma$	кН/м <sup>3</sup>	15,974
3	Плотность частиц грунта, $\rho_s$	г/см <sup>3</sup>	2,652
4	Коэффициент пористости	б/р	0,557
5	Коэффициент фильтрации	м/сут	4,52
6	Влажность	%	0,117
7	Удельное сцепление, $c$	кПа	0,33
8	Угол внутреннего трения, $\varphi$	град	35,0
9	Модуль общей деформации, $E_0$	МПа	22,24

Согласно ГОСТ 25100-2020 [82] исследуемый грунт относится к грунту плотному и средне деформируемому.

### 2.2.2. Особенности золы-уноса Рефтинской ГРЭС и пути ее утилизации

Рефтинская ГРЭС является второй по мощности теплоэлектростанцией в России, и в то же время крупнейшей по работе на твердом топливе. ГРЭС располагается в Свердловской области и служит источником энергоснабжения для Свердловской, Тюменской, Челябинской областей и Пермского края. Электрическая мощность ГРЭС составляет 3800 МВт, тепловая – 350 Гкал/ч. Основным топливом для работы ГРЭС является экибастузский каменный уголь с теплотворной способностью 16,3 МДж/кг, зольностью на сухую массу 43,3%.

Строительство Рефтинской ГРЭС было начато в 1963 году и велось в две очереди. На первом этапе были установлены шесть энергоблоков мощностью 300 МВт с прямоточными двухкорпусными котлоагрегатами паропроизводительностью по 950 т/ч, а на втором - четыре энергоблока, каждый мощностью по 500 МВт с прямоточными котлоагрегатами, паропроизводительностью по 1650 т/ч.

В 2015 году был открыт комплекс сухого золошлако-удаления, который и по сей день остается уникальным по своему масштабу. Таким образом в окрестностях рассматриваемой ГРЭС возведено несколько домов с использованием производимой золы. Стоит отметить, что появление система сухого золошлако-удаления способствовало сохранению нескольких сотен гектаров леса от вырубки и снизило водопотребление при организации складов золы.

В данных емкостях возможно размещение 28 тыс. тонн золы. Система сепарации зольных отходов позволяет утилизировать практически весь объем золы с ГРЭС (около 5 млн в год). Снабжение золой окружающих областей производится с помощью транспортных и автомобильных сообщений, при этом железнодорожные пути подведены непосредственно к емкостям хранения золы. Оставшийся объем золы, который не утилизируется в дальнейшее производство отправляется в золоотвал №2 путем транспортирования на труболенточном конвейере. Исторически на Рефтинской ГРЭС было организовано два золоотвала, первый из них – площадью 440 гектаров - был построен в 1970 году, и уже в 1996 году заполняемость золоотвала была 100%. Тогда было принято решение о

рекультивации золоотвала, в 2008 году данный проект был признан лучшим экологическим проектом года на конкурсе Министерства природных ресурсов РФ «Природоохранные технологии». Таким образом, сейчас на электростанции расположен один действующий золоотвал, вместимости которого должно хватить на 35 лет работы ГРЭС.

Как отмечалось ранее, отделенную золу-уноса широко используют в строительной отрасли из-за ее уникальных способностей сочетаться с различными видами материалов.

Зола – уноса Рефтинской ГРЭС обладает рядом ценных свойств. Материал в достаточной степени однороден, на 90% состоит из алюмосиликатов, причем, около трети приходится на  $\text{SiO}_2$ . Несгоревшие частицы, являющиеся вредными примесями, в рассматриваемом материале практически отсутствуют. Зола – уноса состоит из аморфной и кристаллической фазы. Процент содержания аморфной фазы составляет более 70%, вследствие чего зола обладает более высокой активностью, например, в отличии от кварцевого песка. Аморфная составляющая в основном представлена стеклом. Аморфная фаза составляет более 70 %, благодаря чему зола обладает более высокой активностью, например, в отличии от кварцевого песка. Также стоит отметить, что аморфная фаза в основном представлена стеклом. Кристаллическая фаза состоит из кварца, полевых шпатов, муллита и прочих минералов из класса силикатов. Удельная поверхность золы-уноса Рефтинской ГРЭС - 280-350  $\text{м}^2/\text{кг}$ , средняя плотность находится в диапазоне от 1980  $\text{кг}/\text{м}^3$  до 2000  $\text{кг}/\text{м}^3$ , а насыпная в пределах 720-750  $\text{кг}/\text{м}^3$ . Влажность золы составляет 0,1-0,2%. Зола – уноса обладает пониженным значением удельной эффективной активности ЕРН (93 Бк/кг), что свидетельствует о достаточной степени экологичности продукта. Все вышеуказанные свойства способствуют эффективному использованию золы-уноса Рефтинской ГРЭС в технологии изготовления автоклавного газобетона [96].

Одной из основных областей применения золы-уноса является ее применение для изготовления стеновых неармированных изделий из ячеистого бетона автоклавного твердения - твинблоков (по ГОСТ 31360-2007). Ячеистый бетон

состоит из вяжущих составляющих, песка или золы, газообразователя и воды. Известь и цемент содержат  $\text{CaO}$ , который имеет существенное значение для процесса отвердевание смеси (смесь становится более пластичной, удобоукладываемой). Входящий в состав ячеистого бетона песок/зола вводит в процесс  $\text{SiO}_2$ . В автоклаве при воздействии высокого давления и высокой температуры из компонентов  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$  образуется новый минерал – тоберморит ( $\text{C}_4\text{S}_5\text{H}_5$ ). Формирование новых минералов тоберморитовой структуры образует ячеистый бетон автоклавного твердения (газобетон). Автоклавная обработка способствует образованию более высоких физико-химических свойства изделий из газобетона по сравнению, например, с пенобетонными изделиями.

Химический состав золы уноса Рефтинской ГРЭС, используемой в исследовании, представлен в таблице 2.3.

Таблица 2.3. Химический состав золы уноса Рефтинской ГРЭС

№ п/п	Химическое соединение	Массовая доля
1.	Диоксид кремния $\text{SiO}_2$	60,42%
2.	Диоксид титана $\text{TiO}_2$	0,83%
3.	Оксид алюминия (III) $\text{Al}_2\text{O}_3$	25,75%
4.	Оксид железа (III) $\text{Fe}_2\text{O}_3$	5,95%
5.	Оксид марганца смешанного $\text{Mn}_3\text{O}_4$	0,07%
6.	Оксид магния $\text{MgO}$	1,23%
7.	Оксид кальция $\text{CaO}$	0,93%
8.	Оксид натрия $\text{Na}_2\text{O}$	0,99%
9.	Оксид калия $\text{K}_2\text{O}$	0,52
10.	Оксид фосфора (V) $\text{P}_2\text{O}_5$	0,38%
11.	Триоксид серы $\text{SO}_3$	1,16%

### 2.2.3. Экологическая оценка зол-уноса

На территории нашей страны уровень опасности отходов как для здоровья человека, так и для окружающей природной среды регулируется нормативными документами. Одним из основных документов, регламентирующих оценку влияния отходов, в том числе от промышленных производств, является «Критерии отнесения опасных отходов к классу опасности для окружающей природной среды», утвержденные приказом МПР №511 от 15.06.2001 г. Но фактически документ утратил свою силу и был заменен на «Критерии отнесения отходов к I-V классам опасности по степени негативного воздействия на окружающую среду», утвержденные приказом Минприроды России от 4 декабря 2014 года N 536. Критерии, указанные в документе, предназначены для юридических лиц, деятельность которых непосредственно связана с образованием отходов. Также критерии используются Федеральной службой по надзору в сфере природопользования и ее территориальных органов. Стоит отметить, что действие критериев не распространяется на биологические отходы, радиоактивные отходы, медицинские отходы.

Основными критериями классификации отходов на I-V классы опасности по степени негативного воздействия на природную среду являются:

1. степень опасности отхода для окружающей среды;
2. кратность разведения водной вытяжки из отхода, при которой вредное воздействие на гидробионты отсутствует.

Согласно пункту 16 упомянутых выше Критериев для установления класса опасности зол (образованных при сжигании углей) водная вытяжка из которых характеризуется повышенным содержанием (содержание сухого остатка в исследуемой водной вытяжке более 6 г/дм), применяется Критерий 2.

Также, в дополнении к Критериям отнесения опасных отходов к классу опасности для окружающей природной среды в нашей стране действует СП 2.1.7.1386-03 «Санитарные правила по определению класса опасности токсичных отходов производства и потребления» [136], утвержденные Минздравом РФ 16.06.2003 г., содержащие гигиенические требования и критерии по определению

класса опасности отходов производства и потребления по степени их токсичности. Основной целью санитарных правил является предотвращение вредного воздействия токсичных отходов. Как и Критерии, санитарные правила не распространяются на радиоактивные, биологические, медицинские отходы, а также на пожароопасные отходы.

Согласно рассмотренным документам, оценка степени опасности отходов может определяться путем расчета или же проведением экспериментов. Расчетный метод дает приблизительную оценку опасности отходов на основании компонентного состава отходов. Поэтому приоритет в определении степени опасности отдается экспериментальному методу. Но принцип определения опасности в обоих методах одинаков: путем совместного анализа гигиенических, токсикологических и других характеристик компонентов отходов устанавливаются значения коэффициентов степени опасности каждого элемента отхода, далее на основе полученных коэффициентов определяются показатели степени опасности этих компонентов, и, далее, по суммарной составляющей находится общее значение показателя опасности всего отхода. Так определяется основной показатель, по которому устанавливается принадлежность отхода к тому или иному классу опасности.

В связи с ростом возможностей применения золы-уноса в производстве материалах и в других отраслях деятельности человека, возникает вопрос о степени опасности зольных отходов для человека и для окружающей среды. Ведь состав зол неоднороден, свойства зол зависят полностью от их состава. Поэтому степень опасности зол является совокупностью степени опасности отдельных компонентов, содержащихся в них.

В золах, получаемых путем сжигания углей, преобладает наличие минералов, присущих осадочным породам. Уголь является разновидностью осадочных пород, которые наиболее распространены в природной среде обитания, в том числе среде обитания человека. Поэтому минеральная часть углей генетически схожа с осадочными породами. Минеральная часть углей с кислым составом золы на 65% состоит из глинистых минералов. Расчетом степени опасности почв [70]

определено, что для окружающей среды и для здоровья человека, компоненты отходов из зол, состоящие из химических элементов типичных для основных типов почв – соответственно в осадочных породах – классифицируются как неопасные.

Согласно исследованиям [46], потенциальную опасность для среды обитания человека и его здоровья представляют элементы кадмий, магний, медь, мышьяк, никель, ртуть, свинец, стронций, хром и цинк, содержание которых в зольных отходах не превышает 0,3%, несмотря на различный состав зол. После проведения расчетов, даже при малом содержании данных элементов в зольных отходах, доля этих компонентов в показателях степени опасности достигает 10 % при расчете класса опасности для ОПС и в среднем 45 % — при расчете класса опасности для человека.

Учитывая тот факт, что в сумме опасные элементы имеют незначительное превышение над фоновым содержанием в осадочных породах, их, в большинстве случаев, недостаточно для присвоения зольным отходам опасной категории. Это было также подтверждено биотестированием водных вытяжек зольных отходов от сжигания углей с кислой золой, что показало принадлежность зол практически всех месторождений (включая Рефтинскую ГРЭС) к 5 классу опасности – практически неопасные отходы для ОПС.

В зарубежных странах уже давно зольные отходы считаются неопасными.

Еще в 1989 году в г. Базеле, Швейцария, была принята Конвенция по контролю за трансграничной перевозкой опасных отходов и их удалением. А в 1992 году страны-члены Организации по экономическому сотрудничеству и развитию (ОЭСР) ввели систему контроля за трансграничной перевозкой отходов [128]. В данном документе представлено три списка отходов - Красный, Желтый и Зеленый – классифицирующие в зависимости от их опасности. В Зеленый список, в который входят вещества, не ни одним из опасных свойств, таких как токсичность, канцерогенность, тератогенность, мутагенность, экотоксичность (согласно Директиве ЕС 91/689/ЕЕС по опасным отходам [5]), входят золы-уноса. Стоит отметить, что Базельская конвенция ратифицирована (утверждена) Федеральным

законом Российской Федерации №49-ФЗ от 25.11.1994 г., а это подтверждает признание зол на территории России безопасными.

Таким образом, в мире проведено множество исследований и экспериментов, подтверждающих неопасность зол-уноса для окружающей среды и здоровья человека. Это позволяет применять золы в производстве материалов, которые имеют непосредственный контакт с жизнью и деятельностью человека, без опасения возникновения отрицательного воздействия. Более того, многими работами ученых различных стран способствовали утверждению отсутствия опасности при использовании зольных отходов в нормативной документации.

Но при внедрении зол в строительное производство необходимо прохождения процедуры получения санитарно-эпидемиологического заключения, которое будет гарантировать безопасность применяемых зольных отходов, что занимает много времени, и, кроме того, дорого стоит. Поэтому учитывая опыт зарубежных и российских исследований, а также требования нормативных документов, стоит сузить ряд испытаний зол на определение их опасности. Это поможет упростить процесс использования зол в строительной индустрии.

Оценка химических показателей состава золы уноса, применяемой в исследовании в соответствии с нормируемыми (предельными) показателями, представлена в таблице 2.4.

Таблица 2.4. Оценка химических показателей золы уноса Рефтинской ГРЭС с предельно допустимыми значениями

<b>Химический показатель</b>	<b>Содержание, % по массе:</b>	<b>Предельное значение, % по массе:</b>
CaO	1,68	10
MgO	0,55	5
SO <sub>3</sub>	0,16	5
Na <sub>2</sub> O	0,45	1,5
K <sub>2</sub> O	0,52	1,5

Низкое содержание оксида кальция и оксида магния предопределяет неспособность к гидратации и самостоятельному твердению при контакте с водой, а отсутствие большого количества растворимых и слаборастворимых компонентов исключает вымывание.

Таким образом, зола уноса, применяемая в исследовании, относится к I классу опасности по критерию удельной эффективной активности природных радионуклеидов и может быть применима в строительстве и к V классу опасности по воздействию на окружающую природную среду (практически неопасные отходы).

### **2.3. Определение физико-механических характеристик грунта обратной засыпки**

В рамках настоящего исследования оценивается работа подпорной стенки с грунтом обратной засыпки, состоящего из песчаного грунта с добавлением золы уноса в разных соотношениях.

В качестве основных физико-механических параметров были определены гранулометрический состав смеси, прочностные характеристики - угол внутреннего трения и удельное сцепление, а также оптимальная влажность, плотность грунта, плотность частиц грунта, коэффициент пористости, а также модуль общей деформации, как показатель деформационной характеристики грунта.

Лабораторные испытания проводились на 4 образцах грунта, полученного путем смешения песка и золы в количестве по массе 5%, 10%, 15%, 20%.

При определении каждого показателя проводилось испытания трех образцов, впоследствии выявлено среднее значение каждого параметра.

Образцы имели цилиндрическую форму и следующие геометрические характеристики: размер образца 140 см<sup>3</sup>, высота 35 мм, диаметр 71 мм, площадь поперечного сечения 40 см<sup>2</sup>. В качестве грунта образцов были выбраны образцы с оптимальной влажностью равной 12%.

На начальном этапе была определена оптимальная влажность образцов, т.е. влажность грунта, при которой плотность грунта максимальная.

Для ее определения был подготовлен грунт к испытаниям: путем добавления к образцу необходимого количества воды и тщательного перемешивания. Были проведены испытания с относительной влажностью грунта 10, 12 и 13% и расходом песка в каждом случае 5000 г.

На основании полученных данных была определена наибольшая плотность смеси, которая была достигнута при относительной влажности 12 % и процентных соотношениях смеси 15 и 20 %.

После определения оптимальной влажности проводились испытания полученной смеси песка и золы-уноса по определению прочностных и деформационных характеристик.

Результаты представлены в таблицах 2.5 – 2.6.

Таблица 2.5 - Результаты определения гранулометрического состава грунта с содержанием золы 5, 10, 15, 20% по массе.

>10	10-5	5-2	2-1	1,0-0,5	0,5-0,25	0,25-0,10	0,10-0,05	0,05-0,01	0,01-0,002	< 0,002
-	-	-	0,30	2,50	41,15	51,45	0,63	2,38	1,27	0,32

Таблица 2.6 (начало) - Физико-механические характеристики грунта с содержанием золы уноса

Физико-механические свойства	Содержание золы, %														
	0%			5%			10%			15%			20%		
Плотность грунта, г/см <sup>3</sup>	<b>1.88</b>			<b>1.86</b>			<b>1.88</b>			<b>1.87</b>			<b>1.86</b>		
	1.88	1.87	1.88	1.86	1.86	1.87	1.88	1.88	1.88	1.86	1.88	1.88	1.86	1.87	1.86
Плотность частиц грунта, г/см <sup>3</sup>	<b>2.62</b>			<b>2.64</b>			<b>2.60</b>			<b>2.61</b>			<b>2.57</b>		
	2.63	2.62	2.62	2.64	2.64	2.65	2.59	2.6	2.61	2.60	2.61	2.61	2.57	2.57	2.57
Плотность сухого грунта, г/см <sup>3</sup>	<b>1.68</b>			<b>1.66</b>			<b>1.68</b>			<b>1.67</b>			<b>1.67</b>		
	1.68	1.68	1.68	1.66	1.67	1.66	1.67	1.69	1.68	1.67	1.67	1.66	1.67	1.67	1.67
Коэффициент пористости	<b>0.557</b>			<b>0.590</b>			<b>0.550</b>			<b>0.562</b>			<b>0.541</b>		
	0.56 0	0.55 5	0.55 7	0.61 0	0.57 0	0.59 0	0.55 0	0.55 2	0.54 9	0.55 9	0.56 8	0.56 0	0.53 8	0.54 2	0.54 4
Коэффициент водонасыщения, д.е.	<b>0.550</b>			<b>0.537</b>			<b>0.572</b>			<b>0.553</b>			<b>0.546</b>		
	0.55 2	0.54 9	0.54 9	0.53 6	0.53 8	0.53 7	0.56 8	0.57 4	0.57 3	0.55 3	0.55 5	0.55 2	0.54 4	0.54 4	0.54 9
Коэффициент фильтрации, м/сут	<b>4.52</b>			<b>0.90</b>			<b>0.38</b>			<b>0.26</b>			<b>0.13</b>		
	4.54	4.50	4.53	0.89	0.92	0.89	0.36	0.36	0.41	0.25	0.26	0.26	0.13	0.13	0.12

Таблица 2.6 (окончание) - Физико-механические характеристики грунта с содержанием золы уноса

Угол внутреннего трения, град	35			35			34			33			32		
	35	35	35	34	35	35	35	34	34	32	33	34	32	32	31
Удельное сцепление, кПа	0.33			1.67			3.67			5.00			6.67		
	0.32	0.33	0.33	1.68	1.66	1.66	3.66	3.67	3.67	5.02	5	4.97	6.68	6.68	6.64
Модуль деформации, Мпа	22.24			21.20			17.46			16.02			15.41		
	22.25	22.27	22.21	21.18	21.24	21.19	17.41	17.49	17.49	16.00	15.98	16.08	15.39	15.42	15.41

#### 2.4. Анализ полученных результатов

По сводной таблице 2.6 наблюдается, что при добавлении золы уноса в песчаный грунт происходит резкое уменьшение коэффициента фильтрации (значение коэффициента фильтрации при добавлении даже 5% золы уноса по массе составляет лишь порядка 20% от значения коэффициента фильтрации исходного песчаного грунта). Однако, стоит отметить, что при дальнейшем добавлении количества золы уноса уменьшение коэффициента фильтрации происходит не так стремительно, при последующем добавлении каждые 5% уменьшение коэффициента фильтрации происходят на примерно 50%.

По результатам экспериментов были построены графики, определяющие тенденцию изменения физико-механических параметров в зависимости от количества золы-уноса в испытываемом грунте. График для угла внутреннего трения изображен на рисунке 2.1, для удельного сцепления - на рисунке 2.2.

Проведенный анализ полученных значений показал, что угол внутреннего трения уменьшается, при увеличении количества золы-уноса в единице объема песка, зависимость близка к линейной, но в более точном приближении описывается функцией квадратного уравнения:

$$\varphi(i) = -0.0086i^2 + 0.0048i + 34.971 \quad (2.1)$$

Удельное сцепление увеличивается, при увеличении количества золы-уноса в единице объема песка, зависимость описывается линейной функцией:

$$c(i) = -0.3202i + 0.2627 \quad (2.2)$$

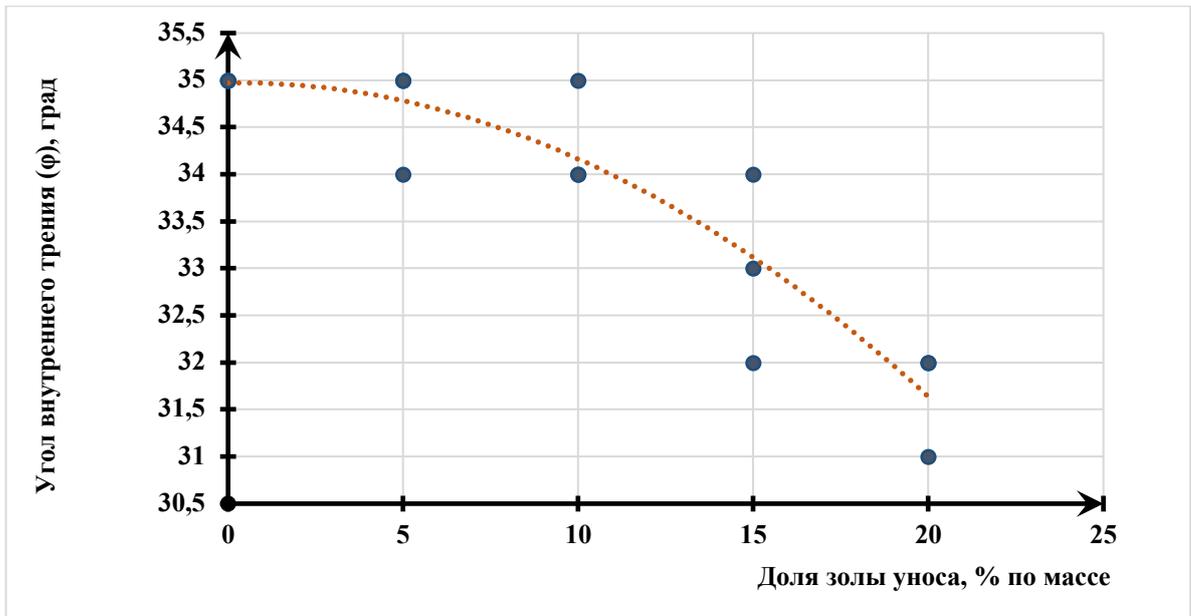


Рисунок 2.1. График зависимости угла внутреннего трения от содержания золы-уноса по массе

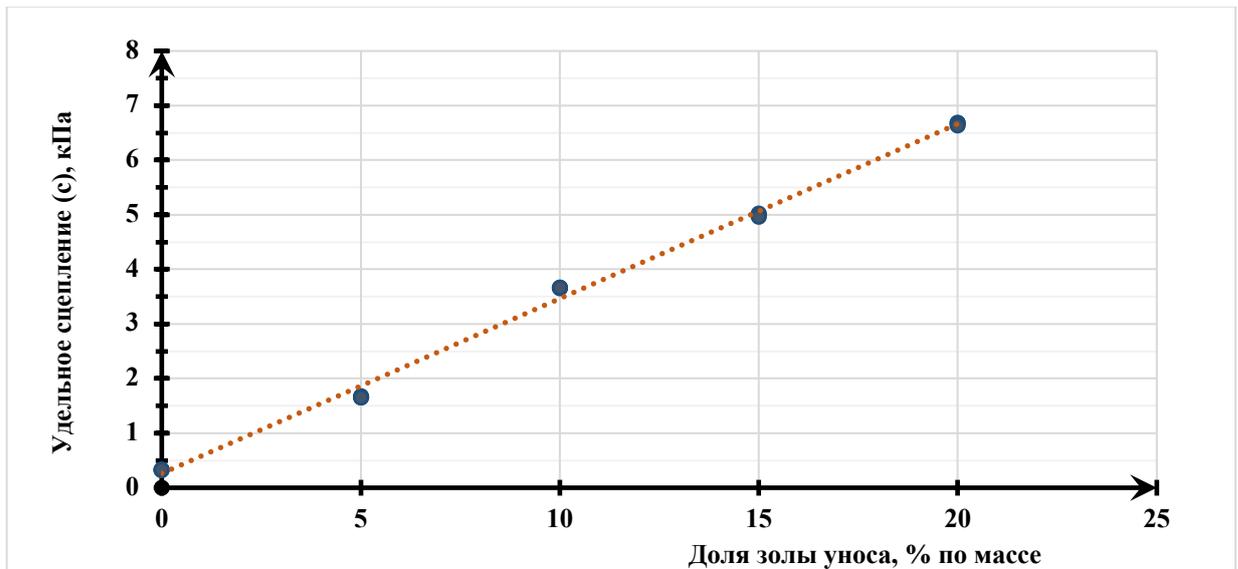


Рисунок 2.2. График зависимости удельного сцепления от содержания золы-уноса по массе

Значение модуля общей деформации при добавлении золы в песок уменьшается, зависимость описывается функцией квадратного уравнения:

$$E(i) = -0.009i^2 - 0.5571i + 22.689 \quad (2.3)$$

График зависимости модуля общей деформации от содержания золы-уноса по массе представлен на рисунке 2.3.

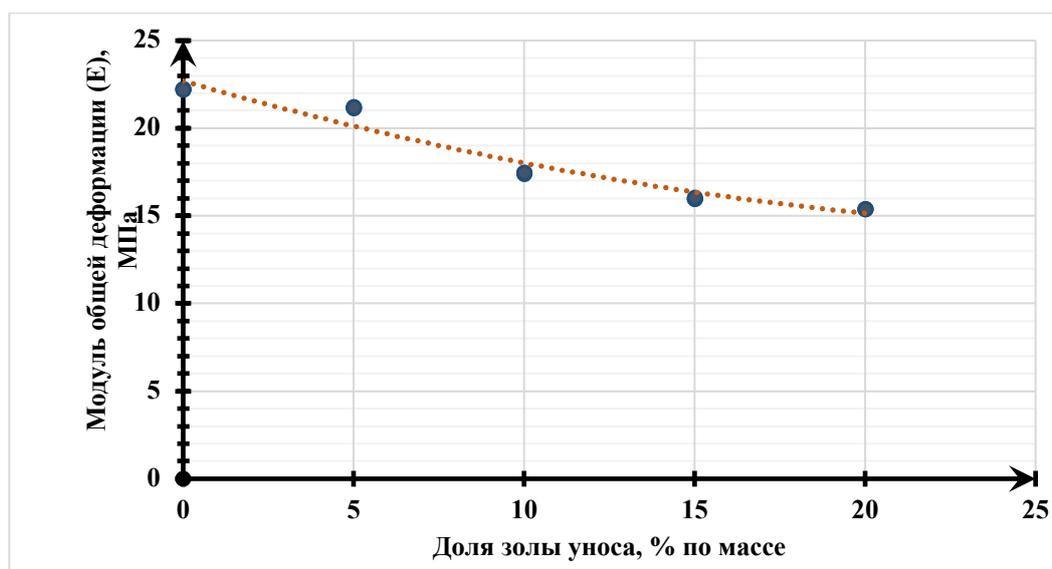


Рисунок 2.3. График зависимости модуля общей деформации от содержания золы-уноса по массе

## 2.5. Выводы по главе 2

1. Проведенный анализ полученных значений показал, что при увеличении количества золы-уноса в единице объема песка угол внутреннего трения уменьшается, а удельное сцепление увеличивается. Зависимость близка к линейной.

2. При добавлении золы-уноса в песчаный грунт происходит резкое уменьшение коэффициента фильтрации, однако при последующем добавлении золы в песчаный грунт снижение значения коэффициента фильтрации идет менее интенсивно.

3. Модуль общей деформации при добавлении золы в песок уменьшается. Зависимость близка к линейной. При добавлении золы-уноса в песчаный грунт  $E$  уменьшается на 4-8%.

4. Экологическая оценка золы-уноса показала отсутствие опасности для окружающей среды и здоровья человека при ее использовании в производстве материалов, которые имеют непосредственный контакт с жизнью и деятельностью человека, что подтверждается нормативной документацией российского и зарубежного нормативно-технического регулирования.

### **3. ПРОВЕДЕНИЕ КОМПЛЕКСНОЙ РАСЧЕТНОЙ ОЦЕНКИ РАБОТЫ ПОДПОРНОЙ СТЕНЫ С ОБРАТНОЙ ЗАСЫПКОЙ, УКРЕПЛЕННОЙ ЗОЛОЙ УНОСА**

#### **3.1. Используемые в работе расчетные методы**

В современном представлении механики грунтов, существует несколько основополагающих подходов к определению и расчету напряженно-деформируемого состояния грунтового массива. Часть из них основаны на механике сплошных сред, как например теория давления грунтов на подпорные стены Шарля Огюстена Кулона и условие прочности Кулона-Мора о зависимости предельных касательных напряжений от среднего нормального напряжения.

Характеристики грунта, требуемые для проведения расчетов устойчивости массивов грунта на базе критерия прочности Кулона-Мора, служат удельное сцепление и угол внутреннего трения грунта. Они не применяются при решении задач, связанных с расчетом напряжений и деформаций, однако необходимы для расчета зон, где закон Гука не выполняется и в которых напряжения превышают критические значения.

В целях решения геотехнических задач при проектировании подпорных конструкций необходимо проведение комплексной оценки напряженно-деформированного состояния грунта, анализа работы подпорной стенки совместно с грунтом обратной засыпки, т.е. определение устойчивости конструкций с учетом влияющих нагрузок.

Однако, существуют параметры, при которых, согласно аналитическим методам расчета, происходит изменение поведения конструкции в целом. Так, например, при изменении угла внутреннего трения и удельного сцепления грунта обратной засыпки подпорной стены, ведет преимущественно к изменению значения активного давления, являющимся основным фактором поведения конструкции. Поэтому определение изменение активного давления при изменении прочностных характеристик грунтов может спрогнозировать работу конструкции стены (чем меньше величина активного давления, тем выше устойчивость подпорной стены). В работе был проведен аналитический расчет изменения

величины активного давления грунта обратной засыпки подпорных стен от изменения свойств грунтов обратной засыпки.

Однако, несмотря на это, для полной оценки работы конструкции необходимо провести анализ напряженно-деформированного состояния сооружения в целом.

В данной работе численный эксперимент применяется для определения зависимостей прочностных и деформационных параметров конструкции от физико-механических характеристик грунта, который используется для обратной засыпки подпорной стенки автомобильных дорог. Для решения данных задач наиболее часто используется метод конечных элементов. Реализация данного метода невозможно выполнить «вручную» и осуществляется в современных программных комплексах.

Для оценки эффективности использования золы-уноса в грунте засыпки с разным количеством ее содержания в ней было выполнено компьютерное моделирование подпорной стенки. Для создания модели использован программный комплекс PLAXIS, являющийся лидирующим методом выполнения геотехнических расчетов.

### **3.2. Аналитический расчет зависимости активного давления грунта обратной засыпки от его прочностных характеристик**

Давление грунта на подпорные стены обуславливается их конструктивными особенностями, такими как наклон стены, ее жесткость, разгружающих элементов и т. д, а также от свойств самого грунта, от характера перемещений, поворота и прогиба подпорной конструкции.

Активное давления вычисляется следующим образом:

$$Ea = \frac{\gamma H^2 \operatorname{tg}^2\left(45 - \frac{\varphi}{2}\right)}{2} - 2cH \operatorname{tg}\left(45 - \frac{\varphi}{2}\right) + \frac{2c^2}{\gamma} \quad (3.1)$$

где  $\gamma$  – удельный вес грунта, кН/м<sup>3</sup>;

$H$  – высота подпорной стенки, м;

$\varphi$  – угол внутреннего трения грунта, °.

Как показали исследования в главе 2, значения угла внутреннего трения грунта зависят от содержания золы-уноса в грунте.

В работе были проведены расчеты изменения величины активного давления на подпорную стену от изменения значений угла внутреннего трения и сцепления грунта, согласно характеристикам, полученным во 2 главе.

Расчеты велись для подпорных стен высотой 1, 3, 5 и 7 метров. Результаты расчетов представлены на рисунках 3.1-3.4.

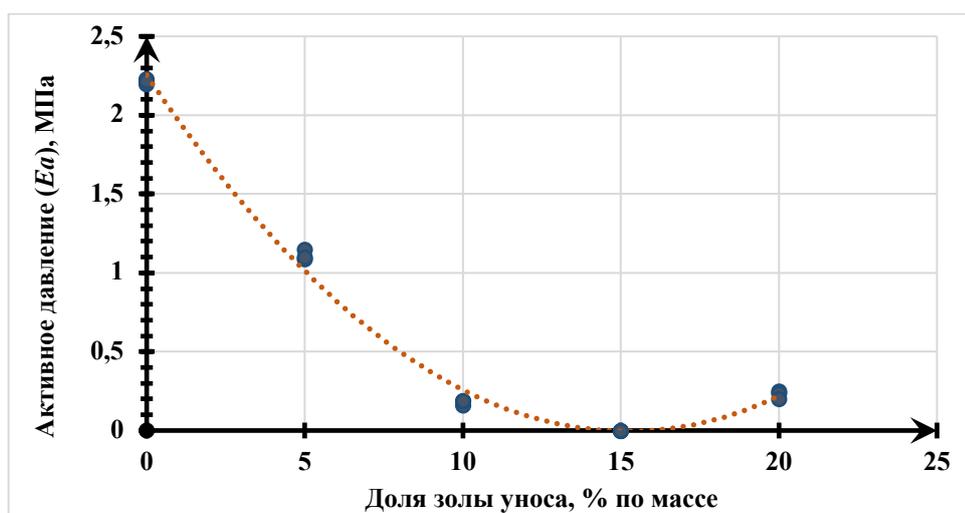


Рисунок 3.1. Изменение величины активного давления на стенку высотой 1 метр в зависимости от содержания в грунте золы-уноса

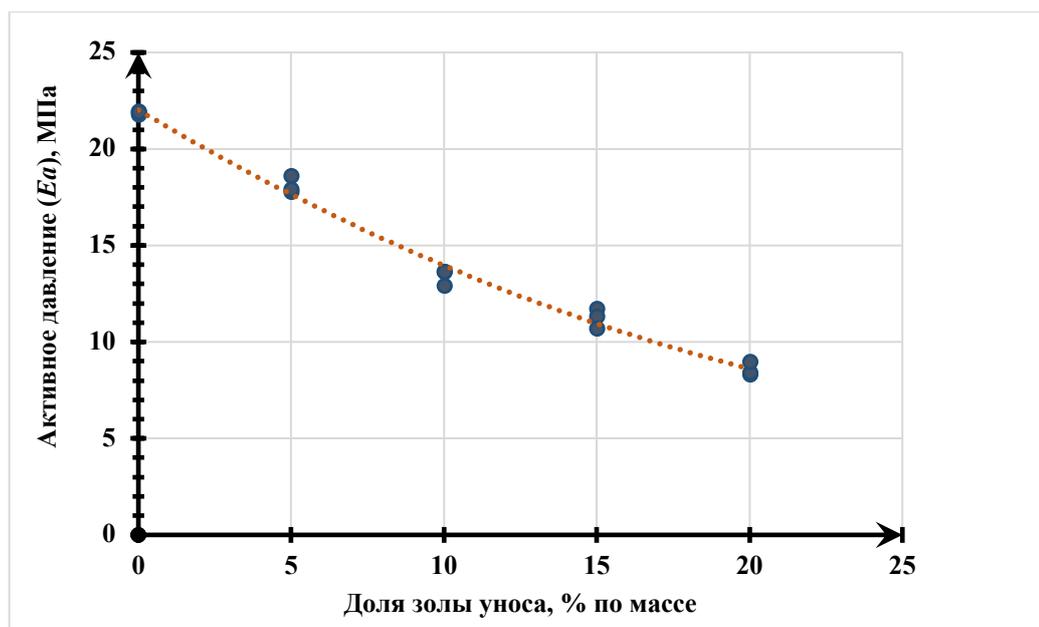


Рисунок 3.2. Изменение величины активного давления на стенку высотой 3 метра в зависимости от содержания в грунте золы-уноса

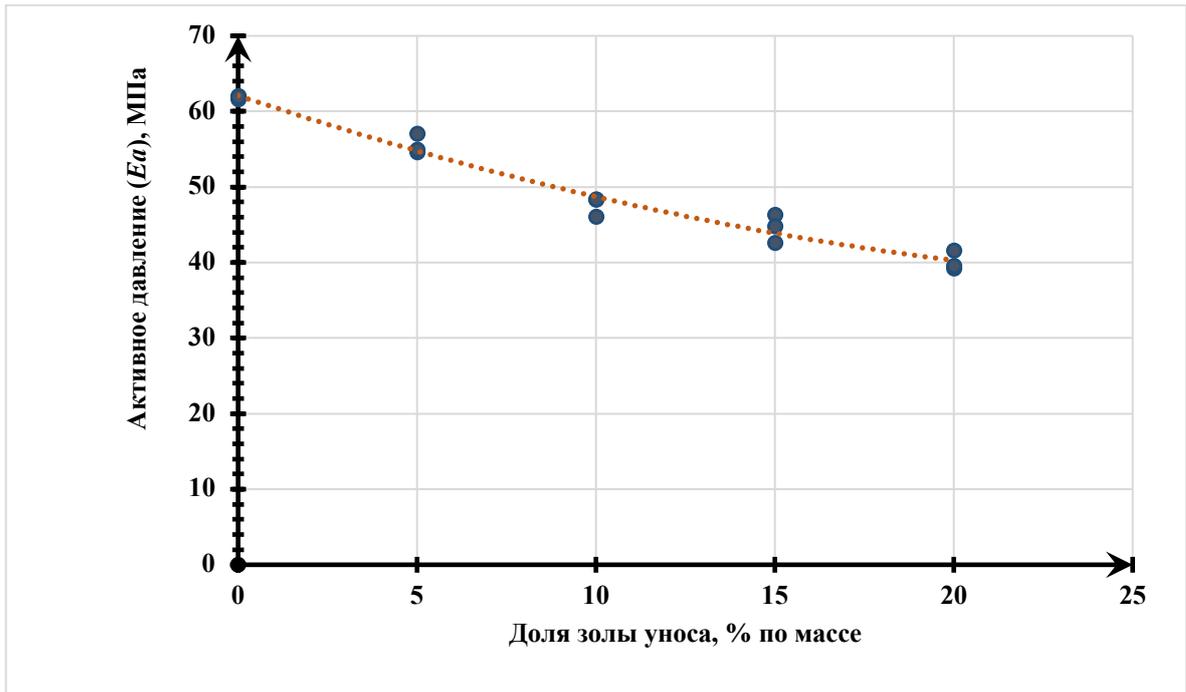


Рисунок 3.3. Изменение величины активного давления на стенку высотой 5 метров в зависимости от содержания в грунте золы-уноса

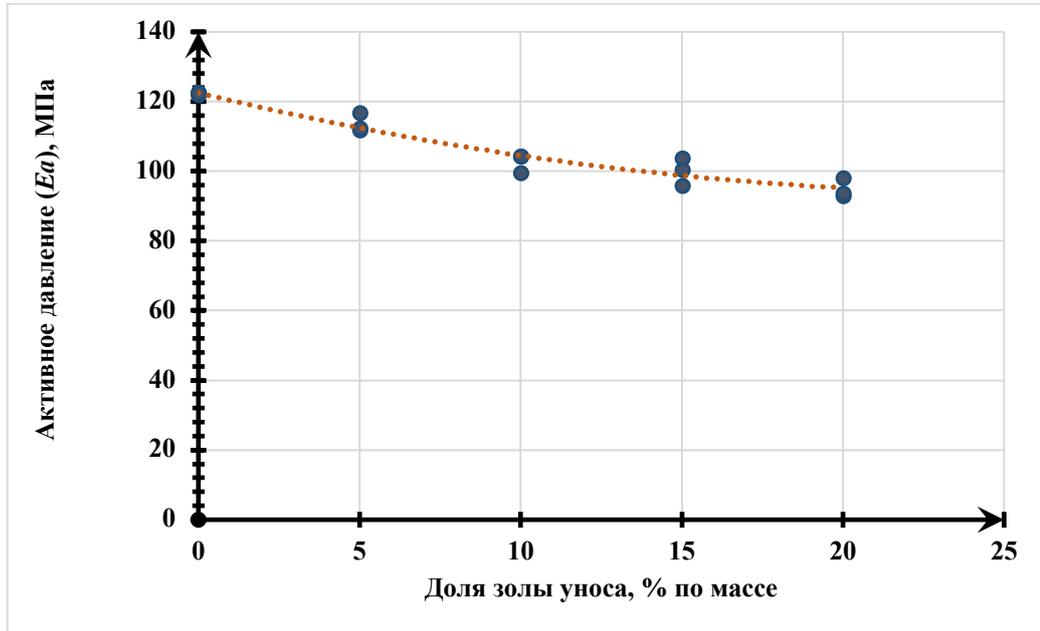


Рисунок 3.4. Изменение величины активного давления на стенку высотой 7 метров в зависимости от содержания в грунте золы-уноса

Из графического анализа видно, что:

- При высоте стены 1 метр величина активного давления на подпорную стену уменьшается до процентного содержания золы уноса в песчаном грунте 15% и затем снова увеличивается;
- При высоте стены 3 метра величина активного давления на подпорную стену уменьшается на  $\approx 4,6-5,96\%$ ;
- При высоте стены 5 метров величина активного давления на подпорную стену уменьшается на  $\approx 2,1-2,9\%$ ;
- При высоте стены 7 метров величина активного давления на подпорную стену уменьшается на  $\approx 1,1-2,0\%$ .

Таким образом, основной вывод по данным аналитических расчетов заключается в том, что при небольших высотах (до 1 метра) эффективнее добавлять золу в количестве 15% по массе, а также что с увеличением высоты подпорных стен эффективность добавления зол-уноса в грунт в части снижения значения активного давления грунта становится менее эффективно.

### **3.3. Численное моделирование напряженно-деформированного состояния уголковой подпорной стены**

В целях решения геотехнических задач при проектировании подпорных конструкций необходимо проведение комплексной оценки напряженно-деформированного состояния грунта, анализа работы подпорной стены совместно с грунтом обратной засыпки, определение устойчивости конструкции с учетом влияющих нагрузок.

Как отмечалось ранее, численные расчеты выполнялись в программном комплексе PLAXIS. Расчет экспериментальной модели основан на использовании модели Мора-Кулона, которая отражает простую нелинейную модель поведения грунта. Работа конструкции подпорной стены оценивается путем применения такого типа расчета, как расчет пластического состояния. Этот тип расчета принимается при необходимости выполнения расчета упругопластических деформаций без учета эффекта больших деформаций.

Упруго-пластическая модель Мора-Кулона в значительной степени повторяет поведение упругой модели при малых деформациях, когда нагрузки невелики и элементы защитных сооружений справляются с давлением без существенных смещений.

Комплексная оценка напряженно-деформируемого состояния грунта выполнялась при помощи модели Мора-Кулона с учетом прохождения подпорной конструкции упруго-пластической стадии работы.

Метод конечных элементов заключается в создании рассчитываемой конструкции в виде модели из различных элементов конечных размеров, которые соединены конечным числом связей. Генерация сетки в программном комплексе выполняется с определенным шагом и по умолчанию принимается крупного типа с построением порядка 100 элементов. В данной работе было принято решение об использовании сетки среднего типа (порядка 250 элементов) в целях повышения точности расчетов пластической деформации и коэффициентов устойчивости, а также для более подробного представления протекающих процессов в теле массива, но в участке, являющегося объектом исследования (грунт обратной засыпки), размер сетки дополнительно уменьшен (принята сетка мелкого типа), в том числе и из-за меньших размеров рассматриваемой области в сравнении с постоянными элементами грунта.

Для анализа выбрана подпорная стенка высотой 5 метров и с засыпкой из песка без добавления золы-уноса, данная модель «подпорная стенка-грунт» принята в рамках работы стандартной и с начальным набором параметров для исследования.

Анализ расчетных параметров показал, что горизонтальные перемещения при крупной сетке составляют 16,79 мм, при средней – 17,50 мм, погрешность результатов составляет порядка 4%.

В теории численного моделирования существует понятие правила Рунге, которое подразумевает, что изменение погрешности расчетов зависит от изменения количества конечных элементов в рассчитываемой модели с постоянным количеством проводимых итераций.

Чтобы уменьшить погрешность, было выполнено увеличение количества конечных элементов в исследуемом кластере грунта – обратной засыпке, т.к. большее давление на подпорную стенку оказывает обратная засыпка.

При таком разбиении, горизонтальные перемещения составили 17,46 мм, относительная погрешность в сравнении с средней сеткой равняется 0,2%.

Уменьшение размеров сетки позволило улучшить модель сходимости рассматриваемой конструкции, снизив показания погрешности необходимых параметров (перемещение, коэффициент устойчивости и т.п.).

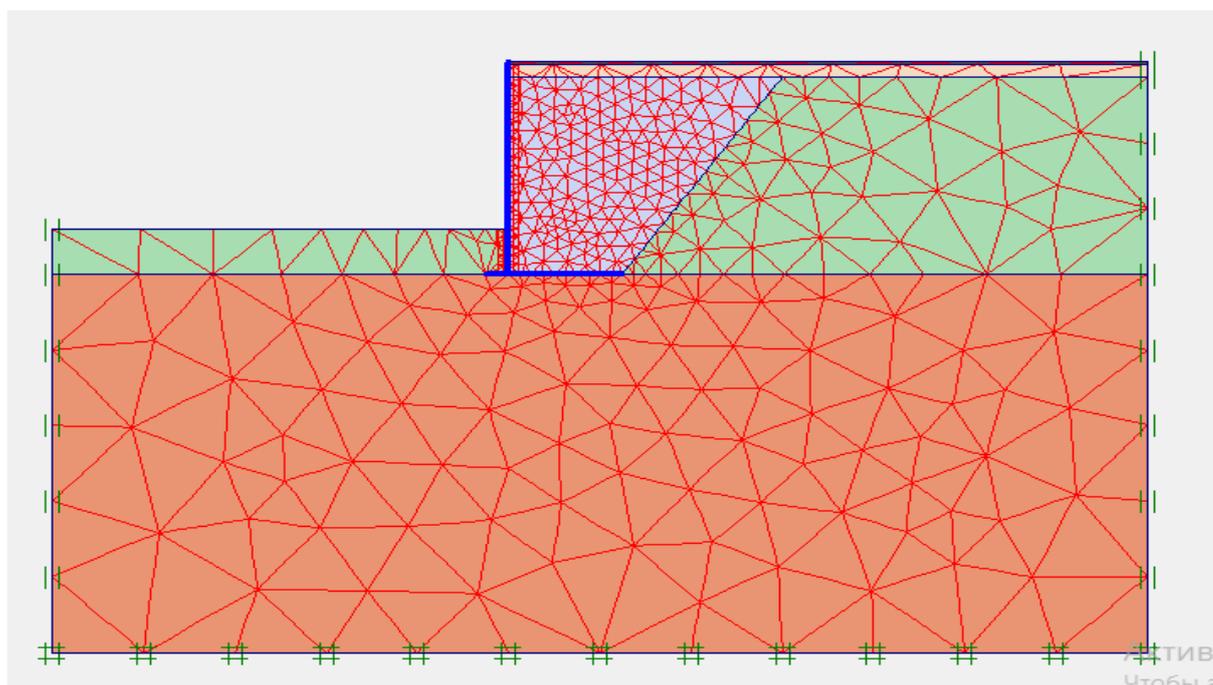


Рисунок 3.5. Разбиение сетки элементов для расчета в программе PLAXIS 2D

### 3.3.1. Расчетная схема уголковой подпорной стены

В качестве объекта исследования были выбраны железобетонные уголковые подпорные стенки высотой 1, 3 и 5 метров.

Предварительные размеры конструкции были назначены на основании Руководства по проектированию подпорных стен [109]. Точка приложения нагрузки была определена в соответствии с ГОСТ 32960-2014 [85], временная подвижная нагрузка от транспорта была приведена к равномерно распределенной нагрузке интенсивностью 75,6 кН/м. Расчетная схема представлена на рисунке 3.5.



Расчет проводился на использовании модели Мора-Кулона с учетом прохождения подпорной конструкции упруго-пластической стадии работы методом конечных элементов.

### 3.3.2. Результаты расчета

В целях определения эффективности использования в качестве грунта обратной засыпки песка с добавлением золы-уноса за определяющие характеристики приняты горизонтальные перемещения точек, расположенных в верхней части наружной грани подпорной стенки (точка А) и в ее основании на границе с грунтом засыпки (точка Б), а также коэффициент устойчивости конструкции. За крайние точки наружной грани, для которых были определены горизонтальные перемещения, принята наивысшая точка подпорной стенки и точка в ее основании.

Результаты расчета по определению значений горизонтальных, общих перемещений наружной грани и коэффициентов устойчивости сведены в таблицы 3.1-3.5.

Таблица 3.1 - Результаты расчета подпорной стены с обратной засыпкой из  
песка

№ точки	Высота	Горизонтальное перемещение облицовки, мм	
		От собственного веса	С учетом временной нагрузки
Высота подпорной стенки 1 метр			
А	1	0,63	0,66
Б	0	0,32	0,47
Коэффициент устойчивости			5,210
Высота подпорной стенки 3 метра			
А	3	1,28	1,45
Б	0	2,09	2,72
Коэффициент устойчивости			3,449
Высота подпорной стенки 5 метров			
А	5	1,59	1,87
Б	0	3,94	5,41
Коэффициент устойчивости			2,644

Таблица 3.2 - Результаты расчета подпорной стены с обратной засыпкой из песка с содержанием золы-уноса 5% по массе

№ точки	Высота	Горизонтальное перемещение облицовки, мм	
		От собственного веса	С учетом временной нагрузки
Высота подпорной стенки 1 метр			
А	1	0,64	0,66
Б	0	0,36	0,52
Коэффициент устойчивости			5,215
Высота подпорной стенки 3 метра			
А	3	1,25	1,43
Б	0	2,39	3,02
Коэффициент устойчивости			3,517
Высота подпорной стенки 5 метров			
А	5	1,53	1,78
Б	0	4,02	5,46
Коэффициент устойчивости			2,849

Таблица 3.3 - Результаты расчета подпорной стены с обратной засыпкой из песка с содержанием золы-уноса 10% по массе

№ точки	Высота	Горизонтальное перемещение облицовки, мм	
		От собственного веса	С учетом временной нагрузки
Высота подпорной стенки 1 метр			
А	1	0,36	0,52
Б	0	0,64	0,66
Коэффициент устойчивости			5,212
Высота подпорной стенки 3 метра			
А	3	1,12	1,32
Б	0	1,91	2,56
Коэффициент устойчивости			3,529
Высота подпорной стенки 5 метров			
А	5	1,47	1,74
Б	0	3,74	5,27
Коэффициент устойчивости			2,866

Таблица 3.4 - Результаты расчета подпорной стены с обратной засыпкой из песка с содержанием золы-уноса 15% по массе

№ точки	Высота	Горизонтальное перемещение облицовки, мм	
		От собственного веса	С учетом временной нагрузки
Высота подпорной стенки 1 метр			
А	1	0,23	0,42
Б	0	0,5	0,57
Коэффициент устойчивости			5,634
Высота подпорной стенки 3 метра			
А	3	1,1	1,3
Б	0	1,88	2,69
Коэффициент устойчивости			3,517
Высота подпорной стенки 5 метров			
А	5	1,47	1,79
Б	0	3,84	5,39
Коэффициент устойчивости			2,881

Таблица 3.5 - Результаты расчета подпорной стены с обратной засыпкой из песка с содержанием золы-уноса 20% по массе

№ точки	Высота	Горизонтальное перемещение облицовки, мм	
		От собственного веса	С учетом временной нагрузки
Высота подпорной стенки 1 метр			
А	1	0,49	0,57
Б	0	0,19	0,36
Коэффициент устойчивости			5,665
Высота подпорной стенки 3 метра			
А	3	1,07	1,26
Б	0	1,44	2,19
Коэффициент устойчивости			3,702
Высота подпорной стенки 5 метров			
А	5	1,41	1,69
Б	0	3,13	4,59
Коэффициент устойчивости			2,977

Для удобства проведения сравнительного анализа, полученные значения были выведены в графики зависимости величины горизонтального перемещения от высоты расположения точки. Графический анализ применен к стенкам высотой 3 и 5 метров, т.к. стенки высотой 1 метр имеют разные схемы деформаций (отклонение верхней части стенки, выпор центральной части стенки) в связи с их небольшой высотой.

Результаты расчетов горизонтальных перемещений подпорной стенки высотой 3 метра от собственного веса грунта представлено на рисунке 3.6, от приложенной нагрузки – на рисунке 3.7.

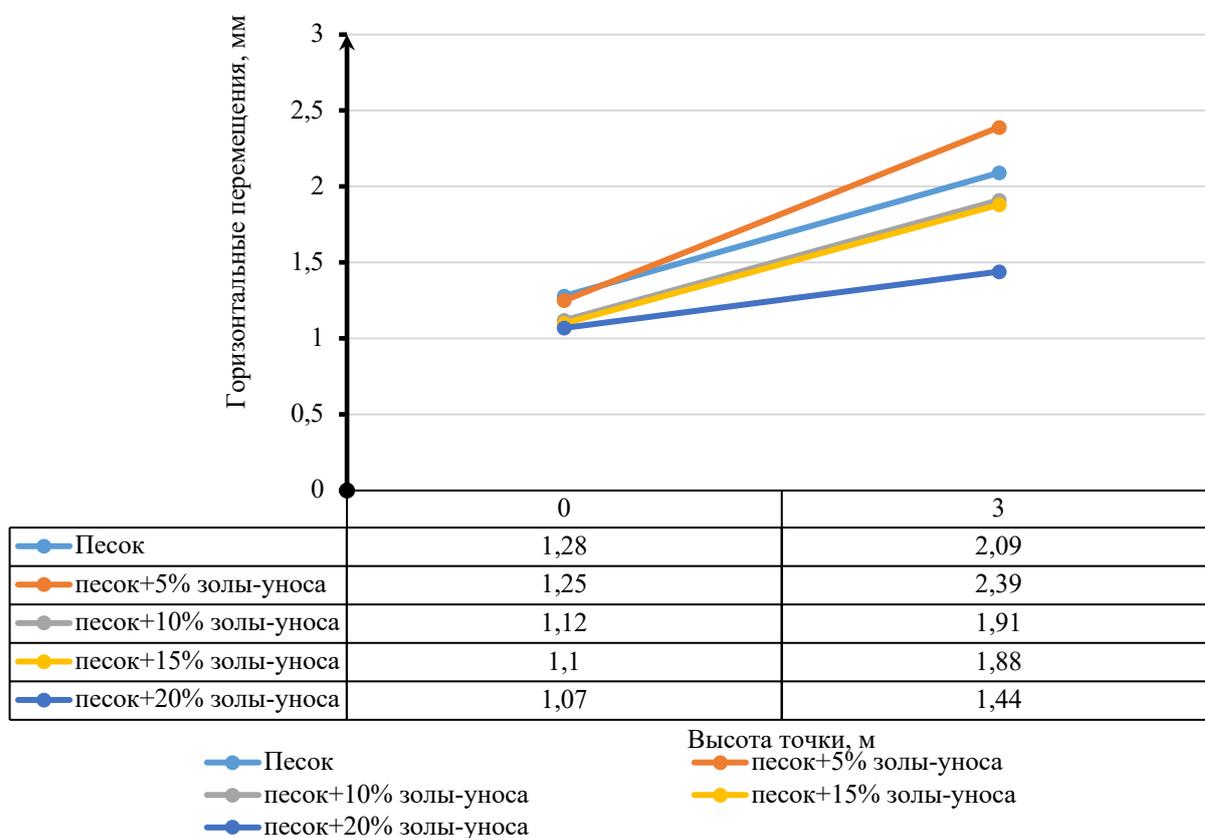


Рисунок 3.6. Значения горизонтальных перемещений в различных точках по высоте подпорной стены высотой 3 метра при действии собственного веса грунта

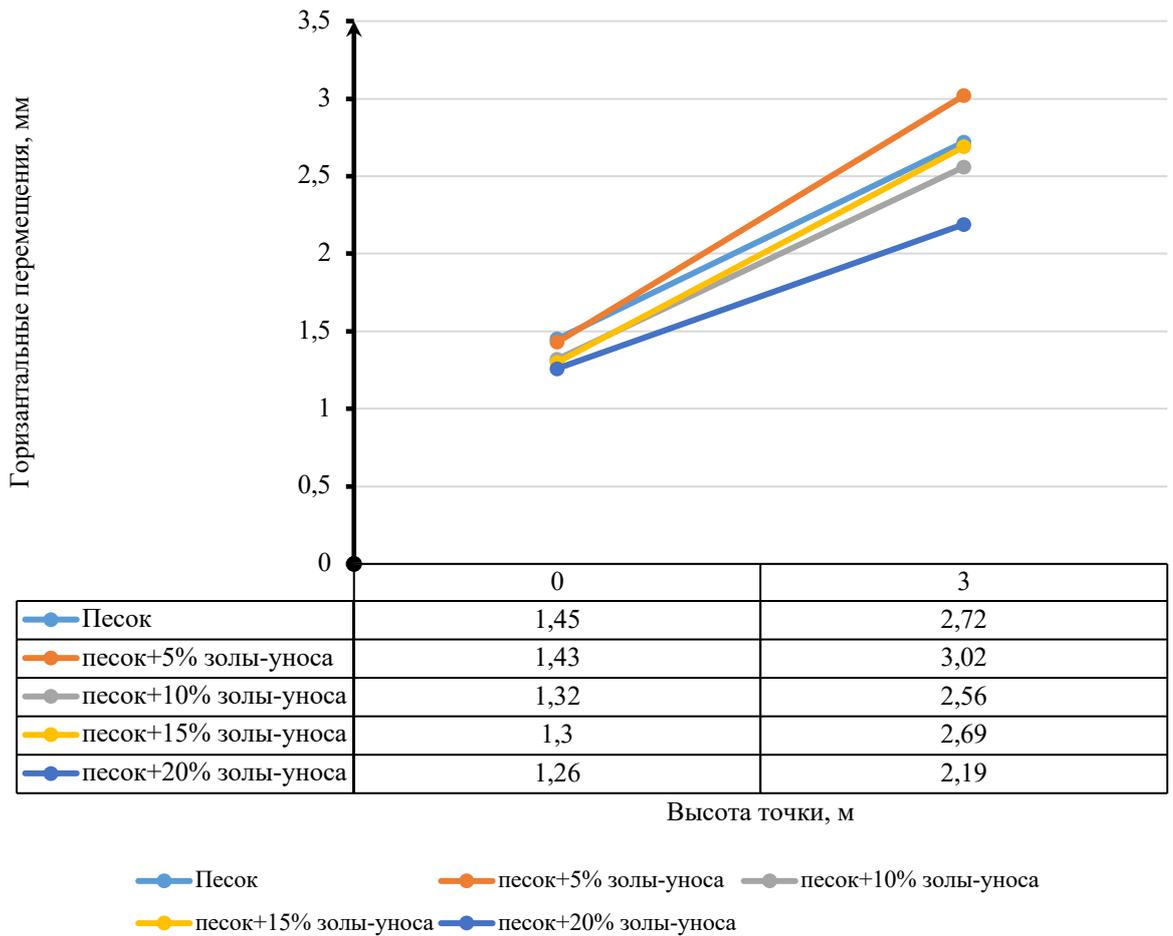


Рисунок 3.7. Значения горизонтальных перемещений в различных точках по высоте подпорной стены высотой 3 метра при действии временной нагрузке на призме обрушения

Результаты расчетов горизонтальных перемещений подпорной стенки высотой 5 метров от собственного веса грунта представлено на рисунке 3.8, от приложенной нагрузки – на рисунке 3.9.

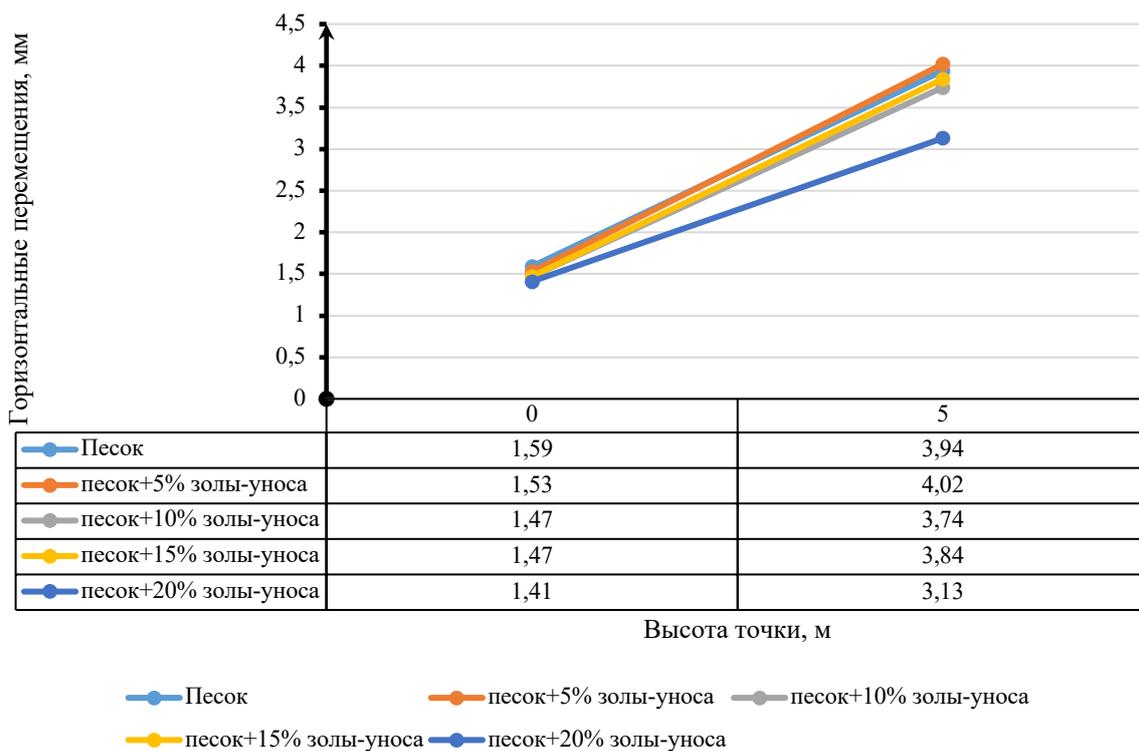


Рисунок 3.8. Значения горизонтальных перемещений в различных точках по высоте подпорной стены высотой 5 метра при действии собственного веса грунта

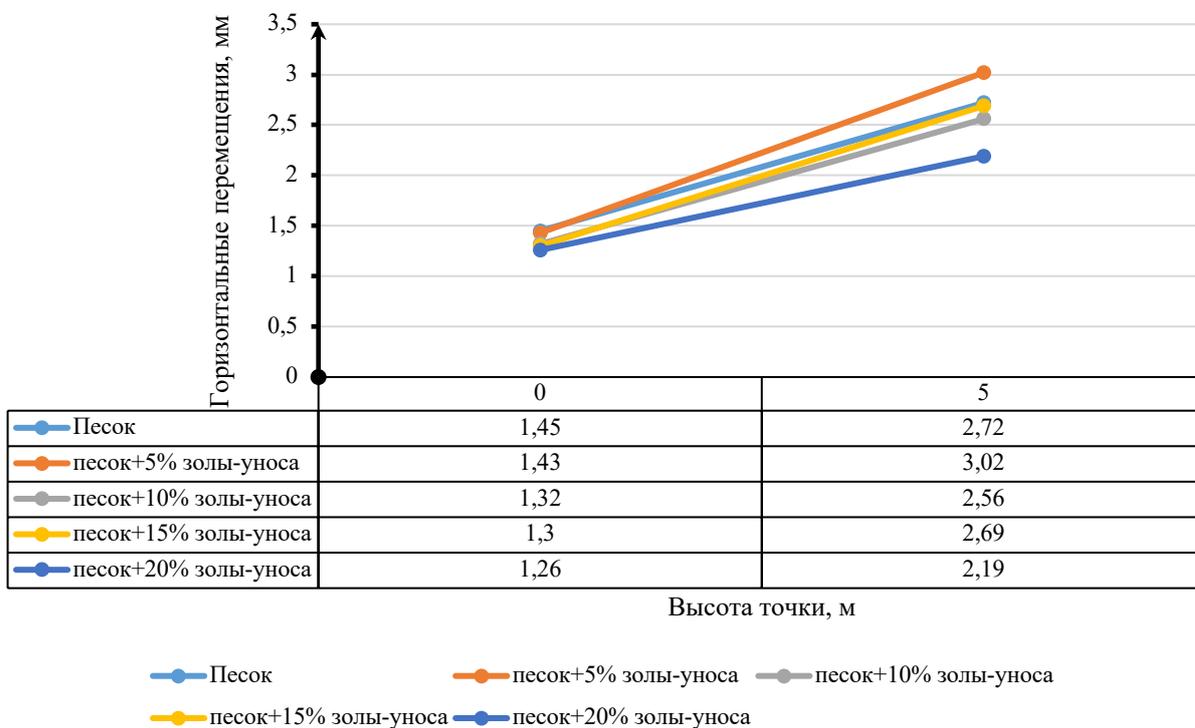


Рисунок 3.9. Значения горизонтальных перемещений в различных точках по высоте подпорной стены высотой 5 метра при действии временной нагрузки на призме обрушения

Коэффициенты устойчивости, рассчитанные при действии временной нагрузке на призме обрушения подпорной стенки, представлены на рисунке 3.10

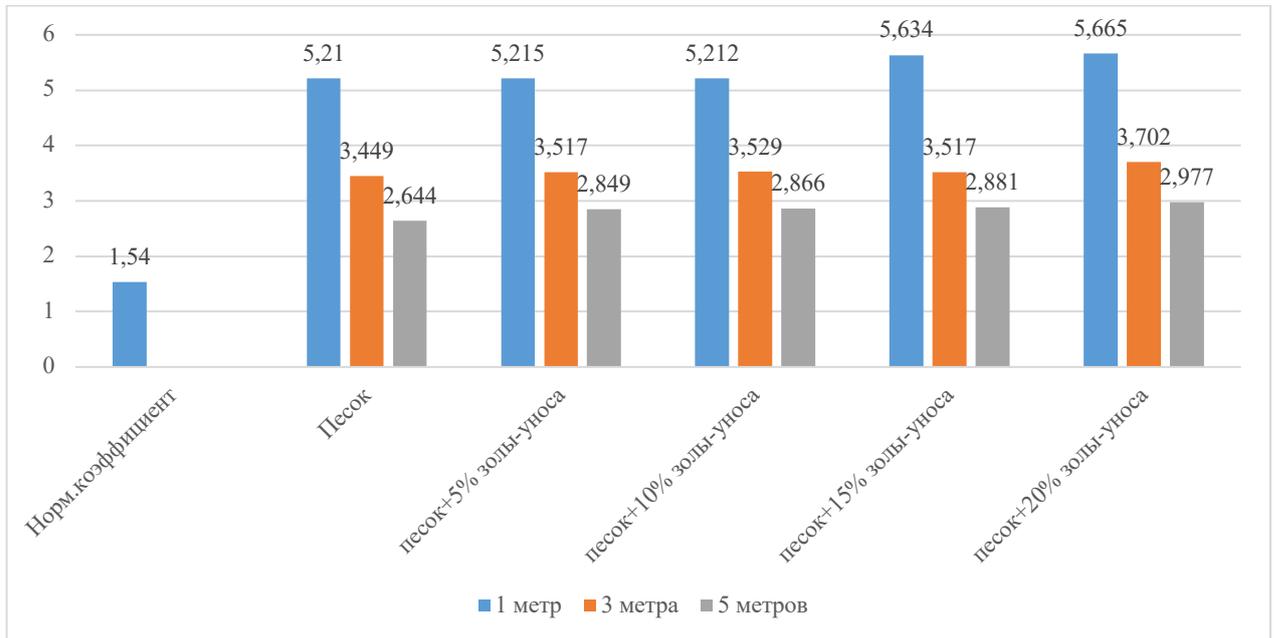


Рисунок 3.10. Значения коэффициентов устойчивости при действии временной нагрузке на призме обрушения

Анализ результатов показал, что при высоте стенки равной один метр деформация стенки происходит в основном в ее верхней части, об этом свидетельствуют большие горизонтальные перемещения в верхней точке стенки. При высоте 3 и 5 метров происходит выпор центральной части конструкции.

Горизонтальные перемещения в точках А и Б также уменьшаются в зависимости от процентного содержания золы-уноса в грунте засыпки.

Максимальный коэффициент устойчивости для подпорной стенки высотой 1 метр наблюдается в случае приложения временной нагрузки при добавлении золы-уноса в процентном соотношении 20% по массе и составляет 5,665, что больше коэффициента устойчивости при засыпке песком на 8,03%.

Для стенки высотой 3 метра, в связи с изменениями в поведении подпорной стены, коэффициент устойчивости значительно меньше, максимальное значение наблюдается также при добавлении 20% золы-уноса в песок и составляет 3,702.

В случае приложения временной нагрузки на призму обрушения, максимальное значение коэффициента устойчивости подпорной стенки высотой 5 метров равно 2,977, что превышает значение коэффициента при засыпке песком на 3,22%.

Повышение значений коэффициентов устойчивости близки к линейным.

Максимальные горизонтальные перемещения для подпорной стены высотой 5 метров приведены в таблице 3.6.

Таблица 3.6 - Результаты расчета подпорной стены высотой 5 метров с обратной засыпкой из песка с добавлением золы-уноса 5,10,15,20% по массе

	Доля золы по массе	0%	5%	10%	15%	20%
Максимальное значение горизонтальных перемещений, мм	Без приложения нагрузки	9,03	8,81	8,53	8,51	7,66
	С приложением нагрузки	15,10	14,95	14,80	14,31	13,53
Коэффициент устойчивости	С приложением нагрузки	2,644	2,849	2,866	2,881	2,977

По итогам сравнительного анализа максимальных значений горизонтальных перемещений, наблюдается уменьшение значений пропорционально количеству добавляемой золы-уноса в грунт засыпки на 15,2% в отсутствии временной нагрузки на призме обрушения и в случае приложения временной нагрузки – 10,4%. Коэффициент устойчивости увеличивается на 7,19% при добавлении золы-уноса в количестве 5% по массе, далее увеличение коэффициента составляет около 3%.

Для оценки горизонтальных перемещений подпорной стенки были выведены графики горизонтальных перемещений точек, расположенных по всей длине подпорной стенки. Графики представлены для каждого рассматриваемого варианта высоты подпорной конструкции (рисунки 3.11-3.13).

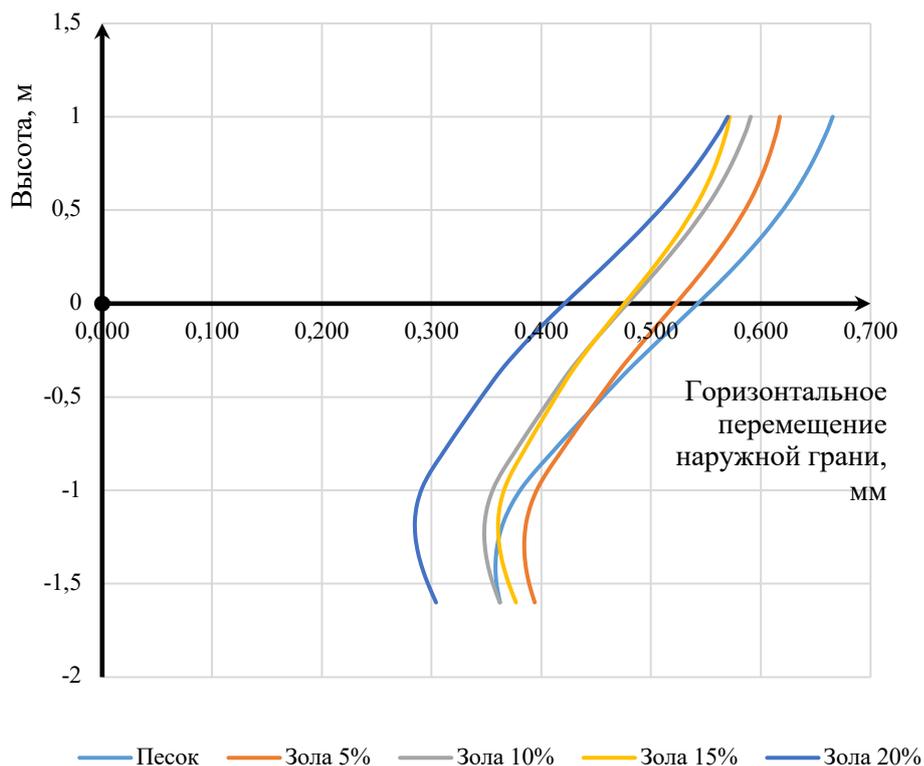


Рисунок 3.11. Значения горизонтальных перемещений всех точек по высоте подпорной стены высотой 1 метр при действии временной нагрузки на призме обрушения

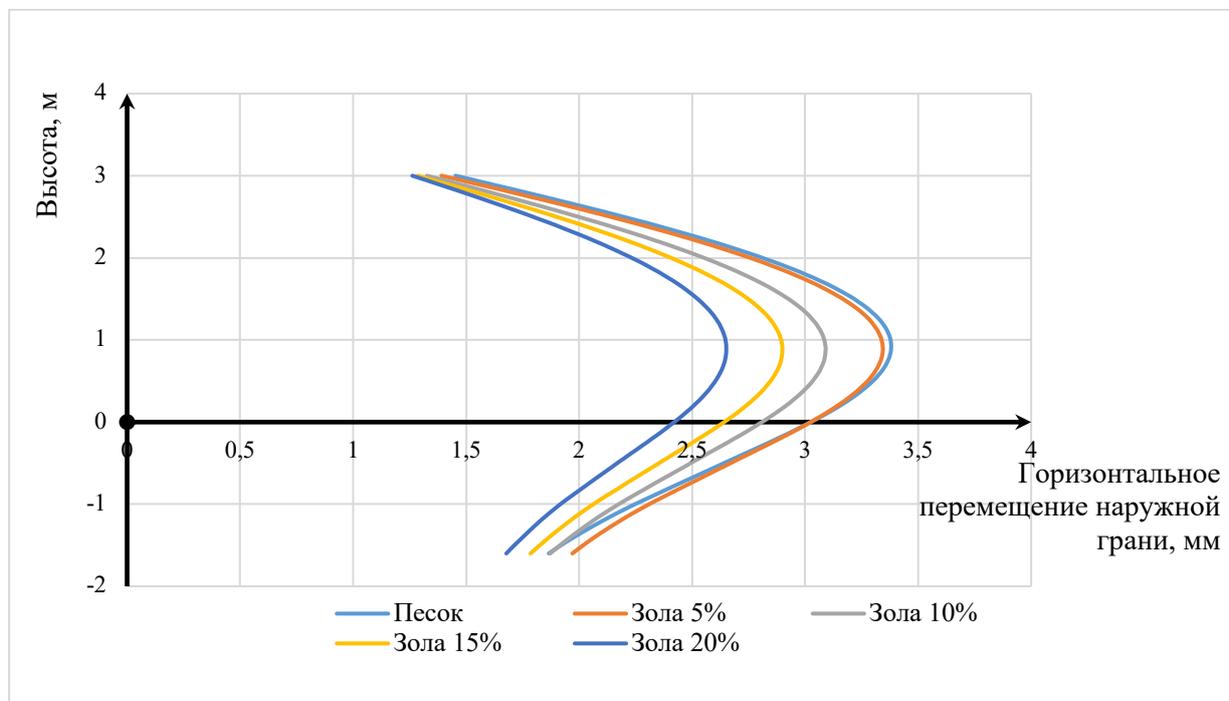


Рисунок 3.12. Значения горизонтальных перемещений всех точек по высоте подпорной стены высотой 3 метра при действии временной нагрузки на призме обрушения

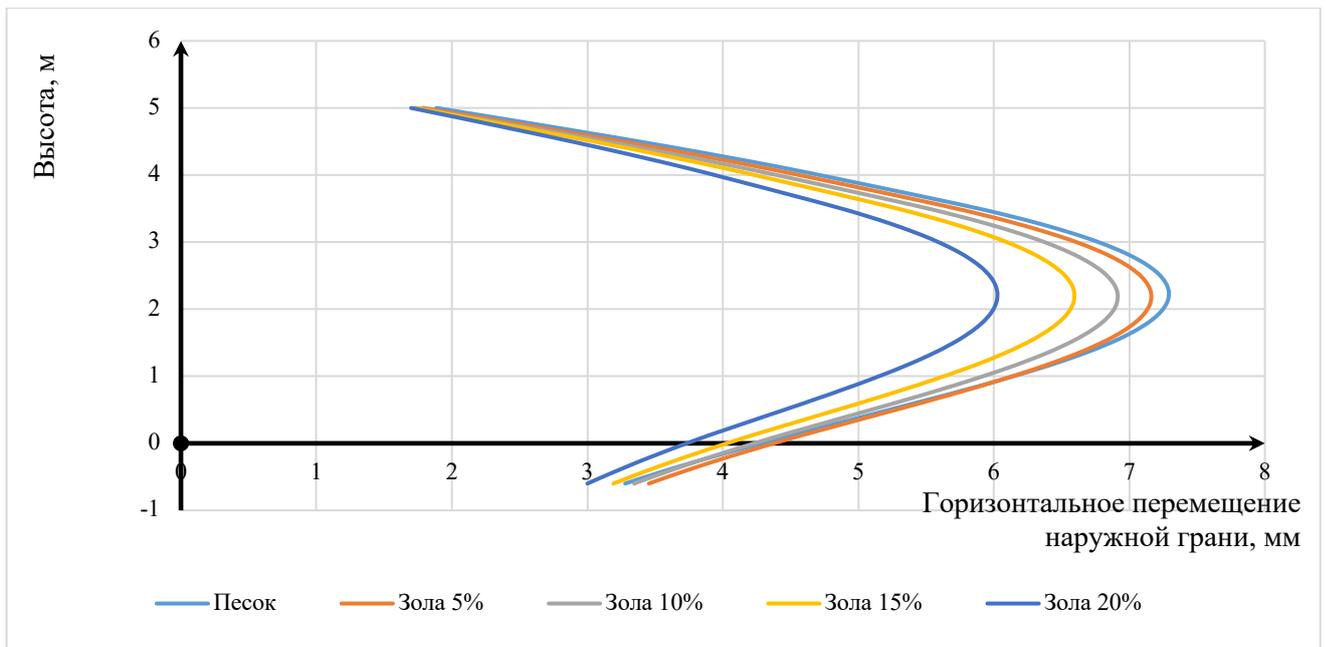


Рисунок 3.13. Значения горизонтальных перемещений всех точек по высоте подпорной стены высотой 5 метров при действии временной нагрузки на призме обрушения

Графический анализ наглядно отображает траекторию движения подпорной стенки в горизонтальном направлении. Горизонтальные перемещения уменьшаются с добавлением золы-уноса в песок с увеличением процента содержания золы-уноса в грунте обратной засыпки, наименьшие горизонтальные перемещения наблюдаются при содержании золы-уноса в песке 20% (для всех вариантов высотности подпорной стенки).

На рисунке 3.11 траектория перемещений подпорной стенки высотой 1 метр отличается от более высоких стенок в связи с малой высотой и смещением основания подпорной стенки.

### 3.4. Численное моделирование напряженно-деформированного состояния тонкостенной (измененной) уголкового подпорной стены

#### 3.4.1. Расчетная схема тонкостенной подпорной стены

Так как в вышеизложенном расчете была принята конструкция уголкового подпорной стены, предварительные размеры которой были назначены на основании графоаналитических методов, следует заметить, что принятые параметры подпорной стены (железобетонной части) обеспечивают прочность и

устойчивость даже без дополнительного укрепления грунтов. Хотя было доказано, что использование в грунтах зол-уноса рационально с точки зрения повышения устойчивости конструкций, были проведены дополнительные расчеты тонкостенной подпорной стены.

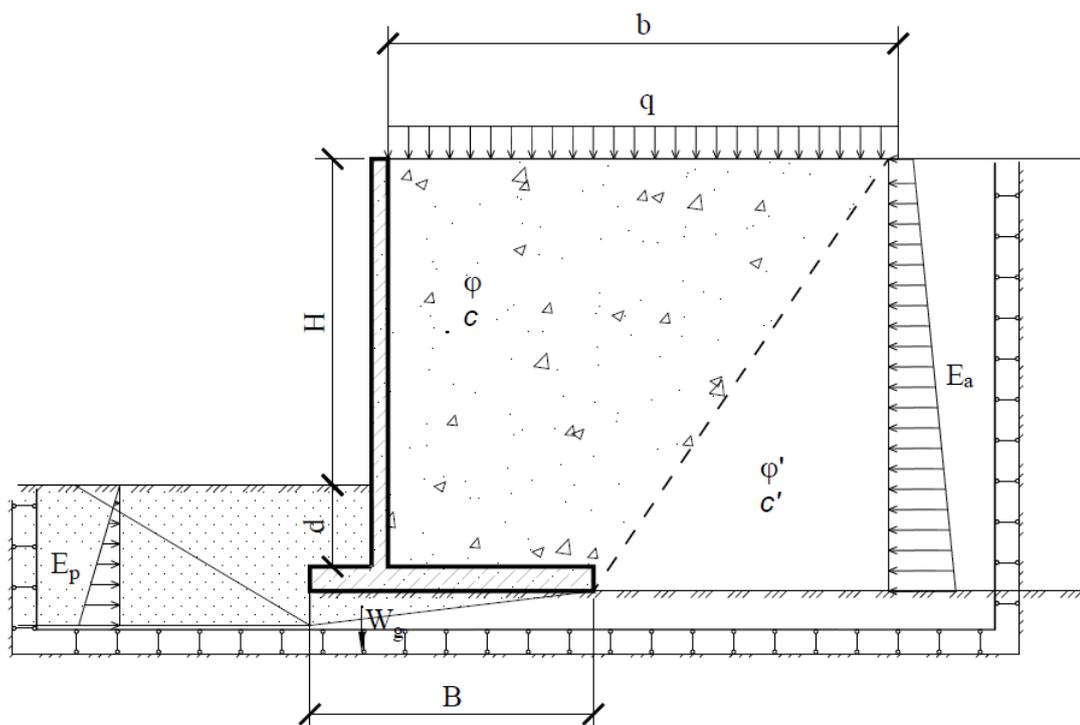


Рисунок 3.14. Расчетная схема (измененной) тонкостенной конструкции

Предварительные размеры конструкции были назначены конструктивно, минимально допустимыми с точки зрения технологии производства монолитных работ (с учетом защитного слоя бетона и возможностью укладки арматуры), и таким образом толщина железобетонной монолитной стены составила 155 мм.

Прикладываемая нагрузка была принята по всей призме обрушения.

Условия расчетной модели были заданы аналогично предыдущему расчету.

### 3.4.2. Расчет нормативного коэффициента устойчивости

С целью оценки коэффициентов устойчивости системы «подпорная стена-грунт» в соответствии с нормативной документацией [120] и [123] должно выполняться условие:

$$k_{st} \geq [k_{st}] \quad (3.2)$$

где  $k_{st}$  - расчетное значение коэффициента устойчивости;

$[k_{st}]$  – нормативное значение коэффициента устойчивости.

Нормативный коэффициент устойчивости определяется следующим образом:

$$[k_{st}] = \frac{\gamma_n \psi}{\gamma_d} \quad (3.3)$$

где  $\gamma_n$  - коэффициент надежности по ответственности сооружения (для 2 класса составляет 1,15);

$\psi$  - коэффициент условий работы, для основного сочетания эксплуатационного периода равен 1,0;

$\gamma_d$  - коэффициент условий работы, учитывающий характер воздействий, возможность изменения свойств материалов со временем, степень точности исходных данных, приближенность расчетных схем, тип сооружения, конструкции или основания, вид материала и другие факторы; устанавливается в диапазоне  $0,75 \leq \gamma_d \leq 1,00$  нормами проектирования отдельных видов сооружений. Для расчета нормативного коэффициента принято значение 0,75.

Таким образом, нормативный коэффициент устойчивости составляет 1,54.

### 3.4.3. Расчет коэффициентов устойчивости конструкций

В целях определения эффективности использования золы-уноса в грунте обратной засыпки для тонкостенной подпорной стенки были проведены численные эксперименты по определению коэффициентов устойчивости (основной критерий системы «подпорная стена-грунт»). Результаты сведены в Таблицу 3.7.

Таблица 3.7 – Результаты расчета коэффициентов устойчивости

Грунт обратной засыпки	Песок	Доля золы, % по массе			
		5	10	15	20
Высота 3 метра					
Коэффициент устойчивости, б/р	2,142	2,543	2,534	2,647	2,609

Высота 4 метра					
Коэффициент устойчивости, б/р	1,764	1,986	2,01	2,016	2,013
Высота 5 метров					
Коэффициент устойчивости, б/р	1,492	1,654	1,669	1,685	1,694
Высота 6 метров					
Коэффициент устойчивости, б/р	1,319	1,447	1,461	1,472	1,488
Высота 7 метров					
Коэффициент устойчивости, б/р	-	1,401	1,411	1,404	1,433

В соответствии с результатами определения коэффициентов устойчивости проведен сравнительный анализ для вариантов стен высотой 3, 4, 5 и 6 метров (рисунок 3.15).

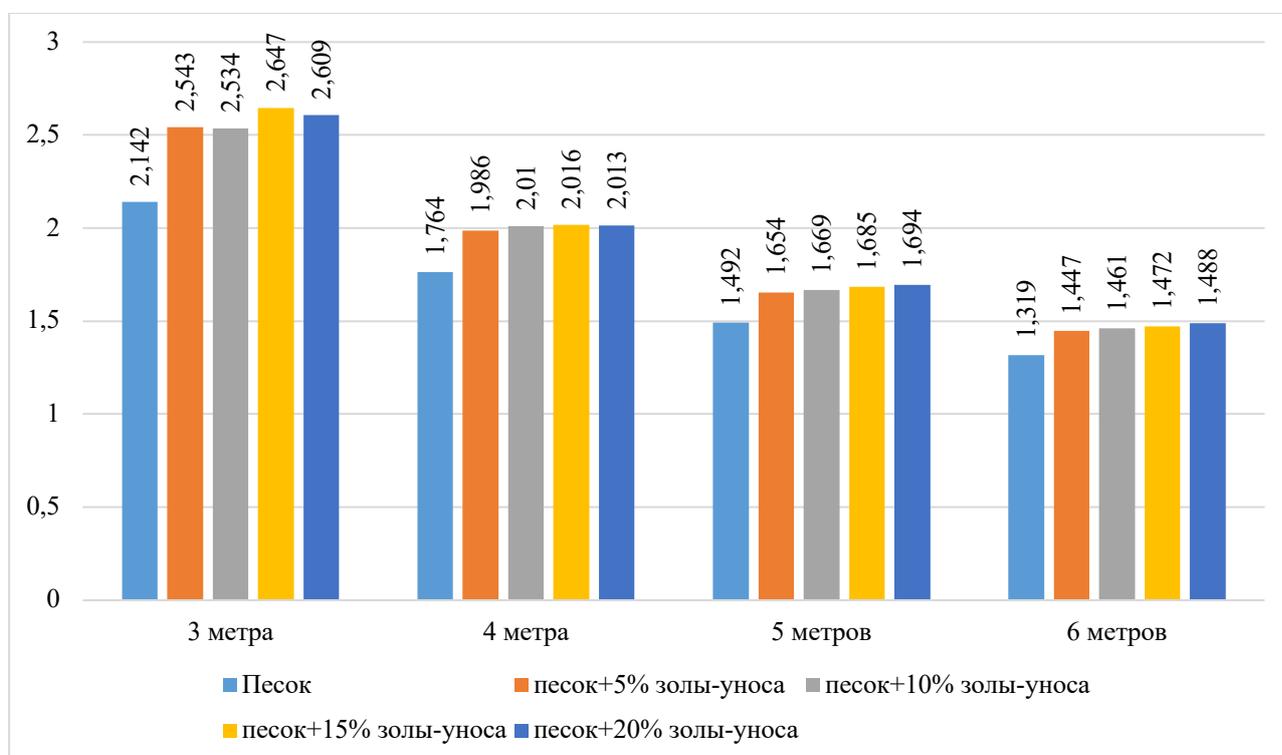


Рисунок 3.15. Значения коэффициентов устойчивости при действии временной нагрузки на призме обрушения

В случае трехметровой стенки, где устойчивость обеспечивается и при применении в качестве грунта обратной засыпки песка, максимальный коэффициент устойчивости наблюдается при добавлении золы-уноса в процентном соотношении 20% по массе и составляет 2,647, что больше коэффициента устойчивости при засыпке песком на 8,03%.

При высоте стенки высотой 5 метров и засыпкой из песка коэффициент устойчивости составляет 1,492, что ниже нормативного коэффициента устойчивости. С добавлением золы-уноса коэффициент повышается и становится выше нормативного уже при добавлении золы в количестве 5% по массе. Наибольший коэффициент устойчивости составляет 1,694, что больше коэффициента устойчивости с песком на 11,92% и выше нормативного на 9,09%.

Для подпорной стенки высотой 7 метров при засыпке из песка, устойчивость склона не обеспечена, подпорная конструкция неустойчива, что приводит к решению об увеличении толщины подпорной стенки до 0,5 метров. Тогда коэффициент устойчивости с обратной засыпкой из песка составляет 1,389 (что тоже ниже нормативного). При сохранении геометрических параметров подпорной стенки и улучшении характеристик грунта засыпки максимальный коэффициент устойчивости составляет 1,433 при добавлении золы-уноса 20% по массе (ниже нормативного). Из этого можно судить о том, что повышению устойчивости стенки высотой 7 метров достигается несколькими путями: увеличением сечения подпорной стенки (общая толщина конструкции более 0.5 метров); изменением свойств грунта обратной засыпки (добавлением золы более чем 20% по массе или использование альтернативных методов укрепления грунта); комплексный метод, включающий одновременное усиление грунта и увеличение толщины конструкций или изменение типа подпорной стены (к примеру, на уголковую, массивную или свайную). В каждом конкретном случае необходима конкретная оценка эффективности в том числе с учетом материальных затрат.

Расчеты коэффициентов устойчивости подпорных стен высотой 4 и 6 метров дали результаты, аналогичные со стенками высотой 3 и 7 метров соответственно: при высоте стены 4 метра устойчивость обеспечена и без укрепления грунтов

золами, при их добавлении – коэффициент повышается; при высоте 6 метров – нормативная устойчивость не обеспечена даже при добавлении 20% золы по массе. Таким образом в данном диапазоне высот оптимальным вариантом конструкции с предлагаемой обратной засыпкой являются стены высотой 5 метров.

Повышение значений коэффициентов устойчивости нелинейны в связи с одновременным уменьшением угла внутреннего трения пропорционально количеству добавляемой золы, и увеличением удельного сцепления. Причинами получения нелинейной зависимости путем численного эксперимента являются следующие особенности работы программного комплекса:

- коэффициент устойчивости численно вычисляется путем снижения характеристик угла внутреннего трения и удельного сцепления одновременно, что приводит к неравномерному изменению коэффициента устойчивости так как с добавлением золы угол внутреннего трения уменьшается, а сцепление увеличивается;

- количество итераций, определяющие конечное значение коэффициента устойчивости, зависят от имеющейся прочности и прочности при разрушении системы «подпорная стена - грунт», т.к. варианты грунта обратной засыпки обладают нелинейной тенденцией к улучшению их характеристик, это сказывается на непрямо пропорциональной связи коэффициентов с параметрами грунта;

- принимая во внимание нестабильность изменения физико-механических характеристик грунта с различным количеством вводимой золы и поведение грунта в модели Мора-Кулона, верификацию полученных значений следует проводить с применением модельных испытаний.

#### **3.4.4. Расчет необходимой толщины тонкостенной подпорной стены высотой 5 метров**

С целью выявления эффективности применения золы-уноса для подпорной стенки высотой 5 метров были проведены численные исследования по определению коэффициента устойчивости с грунтом засыпки из песка с различной толщиной подпорной стены. Результаты представлены в таблице 3.8.

Таблица 3.8. Зависимость коэффициентов устойчивости 5-метровой подпорной стены от ее толщины

Толщина подпорной стенки, м	0,155	0,2	0,3
Коэффициент устойчивости, б/р	1,492	1,532	1,553

Согласно полученным результатам, коэффициент устойчивости выше нормативного наблюдается при толщине стенки, равной 0,3 метра – превышение коэффициента составляет 0,8%. В то время как при добавлении золы в состав песка в количестве 5% по массе увеличивает коэффициент устойчивости до 1,654 (на 6,89%). Для полноценного анализа эффективности применения золы в сравнении с увеличением толщины подпорной конструкции – увеличение объема применяемого бетона – следует учитывать экономическую оценку (стоимость материалов и их транспортировку, а также стоимость строительных работ).

#### **3.4.5. Анализ внутренних силовых факторов, возникающих в железобетонной конструкции стены**

Как отмечалось ранее, в подпорных конструкциях возникает сложное напряженно-деформированное состояние, которое в свою очередь значительно влияет на внутренние силовые факторы, возникающие непосредственно в самой железобетонной конструкции.

В практике проектирования особое место занимает правильное представление взаимодействий сил в конструкции, а также связь между внешними и внутренними силами в элементах этих конструкций.

Для наглядного восприятия работы подпорной стенки различных высот с грунтом обратной засыпки с различным содержанием золы-уноса, а также визуального представления распределения внутренних силовых факторов и определения наиболее опасных с точки зрения прочности участков конструкции

целесообразно вывести значения и эпюры изгибающих моментов для исследуемой конструкции, которые отражают направление и значение изгибающихся волокон подпорной стены от приложенной нагрузки.

Предварительные расчеты по определению величин поперечных сил показали, что из-за своих малых значений они не являются определяющими и поэтому дальнейшие расчеты проводились только для изгибающих моментов.

В таблице 3.9 представлены значения максимальных значений изгибающих моментов для тонкостенной подпорной стенки толщиной 0,155 м.

Таблица 3.9. Значения максимальных изгибающих моментов, возникающих в конструкции ( $M_{max}$ )

Высота стены, м	Доля золы в модернизированном грунте, %				
	0%	5%	10%	15%	20%
	Значения $M_{max}$ при действии кратковременной нагрузки, кНм				
3	25,84	22,81	23,34	23,46	23,32
4	39,67	42,57	42,94	43,25	42,31
5	62,69	64,71	63,51	70,72	63,69
6	93,67	94,51	90,90	98,80	88,11
	Значения $M_{max}$ без действия нагрузки, кНм				
3	7,58	7,94	6,79	6,02	6,36
4	11,81	12,46	11,38	9,58	9,92
5	25,20	20,50	17,26	17,41	12,53
6	36,35	37,37	32,39	33,52	25,70

При выявлении зависимости значений моментов от процентного содержания золы в грунте обратной засыпки при заданной высоте подпорной стены, определено, что зависимость нелинейна, хотя тенденция к этому имеется.

При трехметровой подпорной стенке прослеживается явное уменьшение момента с добавлением золы в грунт обратной засыпки с дальнейшим уменьшением значения момента, зависимость близка к линейной. При увеличении высоты подпорной стенки происходит общее увеличение значения моментов в сравнительных строках «0%», «5%», «10%», «15%», «20%». Но стоит отметить, что при использовании грунта «песок-зола» идет скачок в большую сторону, что связано с увеличением высоты обратной засыпки в соответствии с высотой

подпорной стенки, т.е. увеличивается собственное давление грунта на нижние слои основания обратной засыпки.

Большинство полученных значений имеют в сравнительной строке «песок-зола» при одной и той же высоте стенки небольшую разность на ряду друг с другом, что говорит о недостаточной вариативности исходных данных: для подпорных стен небольшой высоты (3-6 метров) сложно выдвинуть точную функцию их поведения при использовании разных вариантов грунтов обратной засыпки. Более того, пропорционально количеству добавляемой золы одновременно происходит уменьшение угла внутреннего трения на небольшую величину, и увеличение удельного сцепления.

Также одной из причин нелинейности зависимости является изменение активного и пассивного давления грунта на стенку, которые в свою очередь вычисляются путем сложных формул с участием квадрата удельного сцепления, тангенса углов внутреннего трения, удельного веса грунта и т.п., что в дополнении к выше указанному приводит к нелинейной зависимости полученных значений моментов.

Эпюры изгибающих моментов представлены на рисунке 3.16.

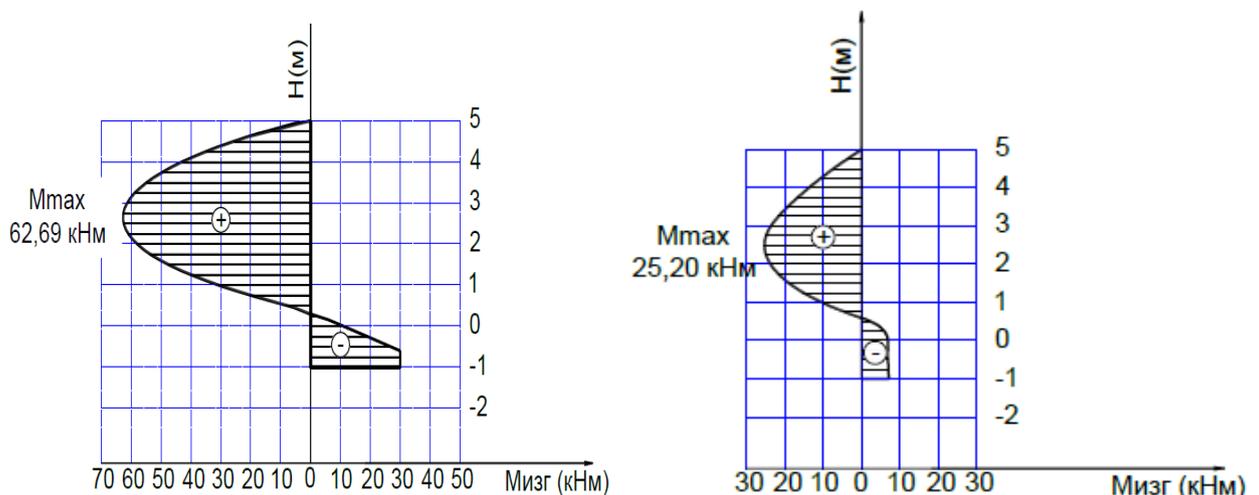


Рисунок 3.16. Эпюры изгибающих моментов: Для стены 5 метров с грунтом обратной засыпки с содержанием золы 0% под действием временной нагрузки (слева), для стены 5 метров с грунтом обратной засыпки с содержанием золы 0% без приложенной нагрузки (справа).

Характер деформирования лицевой поверхности тонкостенных подпорных стен аналогичен характеру деформирования гибких подпорных стен. Поэтому эпюра изгибающих моментов имеет знакопеременный вид, с переходом через «0» в уровне условной заделки.

### 3.4.6. Расчет необходимого армирования железобетонной конструкции подпорной стены

В инженерной практике расчеты бетонных и железобетонных конструкций производят по напряжениям, усилиям и деформациям, вычисленным от внешних воздействий на данные конструкции.

Основой расчета по прочности железобетонного сечения изгибаемого элемента служит условие, исходя из которого изгибающий момент от внешней нагрузки  $M$  не должен превышать предельный изгибающий момент  $M_{ult}$ , который может быть воспринят сечением элемента:

$$M \leq M_{ult} \quad (3.4)$$

Кроме того, расчет по прочности производят в зависимости от соотношения между значением относительной величины сжатой зоны бетона  $\zeta$  и значением граничной относительной высоты сжатой зоны  $\zeta_R$ , при котором предельное состояние элемента конструкции наступает одновременно с достижением в растянутой арматуре напряжения, равного расчетному сопротивлению  $R_s$ .

$$\zeta_R = \frac{0.8}{1 + \frac{\varepsilon_{s,el}}{\varepsilon_{b2}}} \quad (3.5)$$

$$\varepsilon_{s,el} = \frac{R_s}{E_s} \quad (3.6)$$

Необходимость в армировании сжатой зоны происходит в случаях, когда:

$$\alpha_m = \frac{M}{R_b b h_0^2} > \alpha_R = \zeta_R (1 - 0.5 \zeta_R) \quad (3.7)$$

где  $M$  – значение максимального изгибающего момента, действующего в сечении;  $R_b$  – сопротивление бетона сжатию.

В случаях необходимости армирования сжатой зоны, площадь армирования  $A_s$  и площадь армирования сжатой зоны  $A_s'$  определяются по формулам 3.8-3.9. В

случаях, когда армирование сжатой зоны не требуется, площадь арматуры определяется по формуле 3.10.

$$A_s = \frac{\xi_R R_b b h_0}{R_s} + A'_s \quad (3.8)$$

$$A'_s = \frac{M - \alpha_R R_b b h_0^2}{R_{sc} (h_0 - \alpha')} \quad (3.9)$$

$$A_s = \frac{R_b b h_0 (1 - \sqrt{1 - 2\alpha_m})}{R_s} \quad (3.10)$$

В работе был проведен расчет необходимой площади армирования конструкции исходя из максимальных значений изгибающих моментов, полученных в главе 3.4.5. Кроме того, после был проведен расчет на образование трещин и ширины их раскрытия, согласно [118] СП 63.13330.2018. Полученные результаты сведены в таблицу 3.10.

Таблица 3.10. Результаты расчета армирования железобетонной подпорной стены (начало)

	Доля золы уноса в грунте, %				
	0%	5%	10%	15%	20%
	<b>Высота стены 3 метра</b>				
Площадь арматуры по расчету, см <sup>2</sup>	6.21	5.41	5.55	5.58	5.55
Минимальная арматура при расчете на армирование	5d14	5d12	5d12	5d12	5d12
Принятая площадь арматуры при расчете на армирование, см <sup>2</sup>	7.695	5.655	5.655	5.655	5.655
Минимальная арматура при расчете на образование трещин	5d14	5d14	5d14	5d14	5d14
Принятая площадь арматуры, см <sup>2</sup>	7.695	7.695	7.695	7.695	7.695
	<b>Высота стены 4 метра</b>				
Площадь арматуры по расчету, см <sup>2</sup>	10.16	11.08	11.19	11.29	10.99
Минимальная арматура при расчете на армирование	7d14	6d16	6d16	6d16	6d16
Принятая площадь арматуры при расчете на армирование, см <sup>2</sup>	10.773	12.066	12.066	12.066	12.066
Минимальная арматура при расчете на образование трещин	9d14	6d18	6d18	9d14	9d14
Принятая площадь арматуры, см <sup>2</sup>	13.851	15.27	15.27	13.851	13.851

Таблица 3.10. Результаты расчета армирования железобетонной подпорной стены (окончание)

	<b>Высота стены 5 метров</b>				
Площадь арматуры по расчету, см <sup>2</sup>	18.77	19.68	19.14	22.42	19.22
Площадь арматуры по расчету в сжатой зоне, см <sup>2</sup>	1.5	2.42	1.87	5.15	1.95
Минимальная арматура при расчете на армирование	6d20	8d18	8d18	6d22	8d18
Принятая площадь арматуры при расчете на армирование, см <sup>2</sup>	18.852	20.36	20.36	22.806	20.36
Минимальная арматура при расчете на армирование в сжатой зоне	6d6	8d7	8d6	6d12	8d6
Принятая площадь арматуры при расчете на армирование в сжатой зоне, см <sup>2</sup>	1.698	3.08	2.264	6.786	2.264
Минимальная арматура при расчете на образование трещин	7d20	7d20	8d18	8d20	8d18
Принятая площадь арматуры, см <sup>2</sup>	21.994	21.994	20.36	25.136	20.36
Минимальная арматура при расчете на образование трещин в сжатой зоне	7d6	7d7	8d6	8d10	8d6
Принятая площадь арматуры в сжатой зоне, см <sup>2</sup>	1.981	2.695	2.264	6.28	2.264

Анализ полученных результатов показал, что не смотря на уменьшение расчетной площади арматуры при добавлении золы уноса в грунт, фактическое уменьшение армирования (при раскладке арматуры) наступает только при добавлении 20% золы уноса по массе в грунт обратной засыпки и при высоте подпорной стены равной 5 метров. Уменьшение площади армирования и эффективность применения модернизированного грунта в данном случае составит 5,6%.

### 3.5. Выводы по главе 3

1. Добавление зол уноса в песчаный грунт для обратной засыпки снижает значение активного давления грунта на подпорную стену во всех вариантах высотности, однако с увеличением высоты подпорных стен эффективность добавления зол-уноса в грунт в части снижения значения активного давления грунта становится менее эффективно.

2. Использование в грунтах обратной засыпки уголкового подпорных стен зол-уноса рационально с точки зрения повышения устойчивости конструкций.

3. При добавлении золы-уноса в грунт засыпки уменьшаются значения горизонтальных перемещений наружной грани подпорной стены: на 15,2% в отсутствие временной нагрузки на призме обрушения и в случае приложения временной нагрузки – 10,4%.

4. Использование зол уноса позволяет уменьшить материалоемкость железобетонных конструкций высотой 5 метров (на 48% экономии бетона и 5,6% - арматуры) , сохраняя при этом ее прочностные характеристики.

5. Повышение значений коэффициентов устойчивости нелинейны в связи с одновременным уменьшением угла внутреннего трения пропорционально количеству добавляемой золы, и увеличением удельного сцепления. Т.к. коэффициент устойчивости численно вычисляется путем снижения характеристик угла внутреннего трения и удельного сцепления, что приводит к неравномерному повышению коэффициента устойчивости.

6. При высоте подпорных стен от 6 метров и выше требуется проведения дополнительных мероприятий по увеличению устойчивости.

## 4. ЭКОНОМИЧЕСКОЕ СРАВНЕНИЕ ВАРИАНТОВ

### 4.1. Основные положения

Одним из критериев оценки эффективности применения технологий в современном строительстве наряду с их показателями надежности, является их стоимость.

В рамках настоящего исследования проведено экономическое сравнение вариантов устройства подпорной стенки с различными вариантами обратной засыпки, с различными количественными показателями добавления золы-уноса в песчаный грунт. Для сравнения экономических показателей были составлены локальные сметные расчеты на устройство одного погонного метра подпорной стены. Всего было составлено 5 расчетов: с типами засыпок, аналогичных в расчетах, приведенных в главе 3.

Сметная стоимость определена в соответствии с «Методикой определения стоимости строительной продукции на территории Российской -Федерации» МДС 81-35.2004 [90-92].

Локальные сметные расчеты выполнены в программе ГРАНД-Смета, базисно-индексным методом по Федеральным сборникам Единичных Расценок – ФЕР-2001, разработанных в уровне цен по состоянию на 1 января 2000 г.

Перевод сметной стоимости строительно-монтажных работ в текущие цены осуществлялся при помощи индексов пересчета сметной стоимости строительно-монтажных работ за II квартал 2022 г., разработанных Филиалом Федерального центра ценообразования в строительстве и промышленности строительных материалов по Пермскому краю. Стоимость материальных ресурсов в текущем уровне цен определена по данным прайс-листов фирм поставщиков. Следует отметить, что в расчетах была принята стоимость золы-уноса, равная 110 рублей/м<sup>3</sup>, что соответствует уровню средних цен зол-уноса Рефтинской ГРЭС в Пермском крае и данное значение может варьироваться в зависимости от объема и региона.

#### 4.2. Результаты сметных расчетов уголкового подпорной стены

Локальные сметные расчеты приведены в приложении Б.

Сметная стоимость работ по устройству одного погонного метра подпорной стены с различными вариантами засыпок представлена на рисунке 4.1. Результаты расчета сметной трудоемкости представлена на рисунке 4.2.

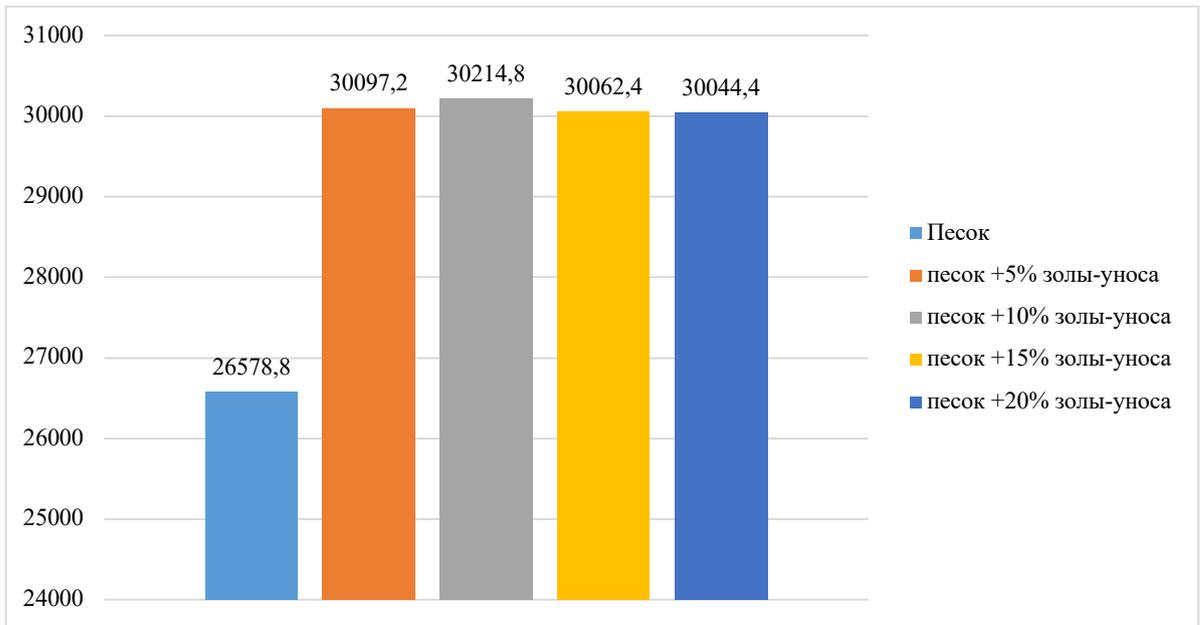


Рис. 4.1. Результаты расчета сметной стоимости работ

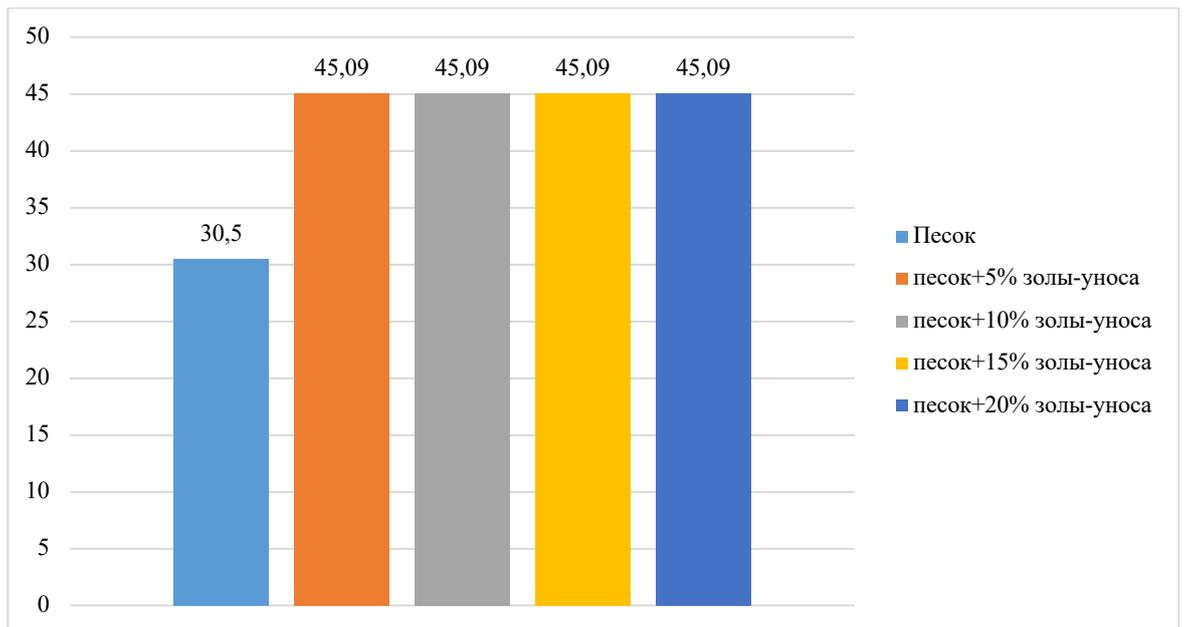


Рис. 4.2. Результаты расчета трудоемкости работ

Исходя из анализа сметной стоимости работ и соотношения золы-уноса с песком в грунте обратной засыпки можно сделать вывод о том, что наиболее экономически эффективным вариантом является использование грунта с добавлением золы-уноса 20% по массе в сравнении с другими вариантами засыпок с содержанием золы-уноса. Увеличение стоимости применения грунта с золой-уноса (20% по массе) составляет 11,53%. Разница в стоимости добавления золы-уноса в грунт небольшая – менее 1%. Расчет стоимости произведен на один погонный метр уголкового железобетонной подпорной стены, при определении стоимости работ не учтены затраты на транспортировки материала к месту строительства. Повышение стоимости устройства объясняется необходимостью проведения дополнительных работ, в частности – перемешивание грунта с золой. Следует отметить, что при увеличении процентного содержания зол-уноса в грунте стоимость повышается, что связано с более низкой стоимости золы по сравнению с песчаным грунтом.

Расчеты по определению сметной трудоемкости показали, что при использовании в качестве обратной засыпки грунта с добавлением золы-уноса сметная трудоемкость, по сравнению с устройством подпорной стены с применением песка, повышается на 32,36 %. Сметная трудоемкость повышается при добавлении золы уноса и не изменяется при использовании другого количества по массе и связана лишь с необходимостью смешивания грунта обратной засыпки с золой.

#### **4.3. Результаты сметных расчетов тонкостенной подпорной стены**

В главе 3.4.4 были проведены численные исследования по определению толщины подпорной стены для достижения необходимого условия устойчивости конструкции. Были проведены сметные расчеты по определению стоимости одного погонного метра тонкостенной стены толщиной 0,155 метров с грунтом, усиленным золой уноса, и железобетонной стеной толщиной 0,300 метров.

Результаты представлены на рисунке 4.3 и 4.4.

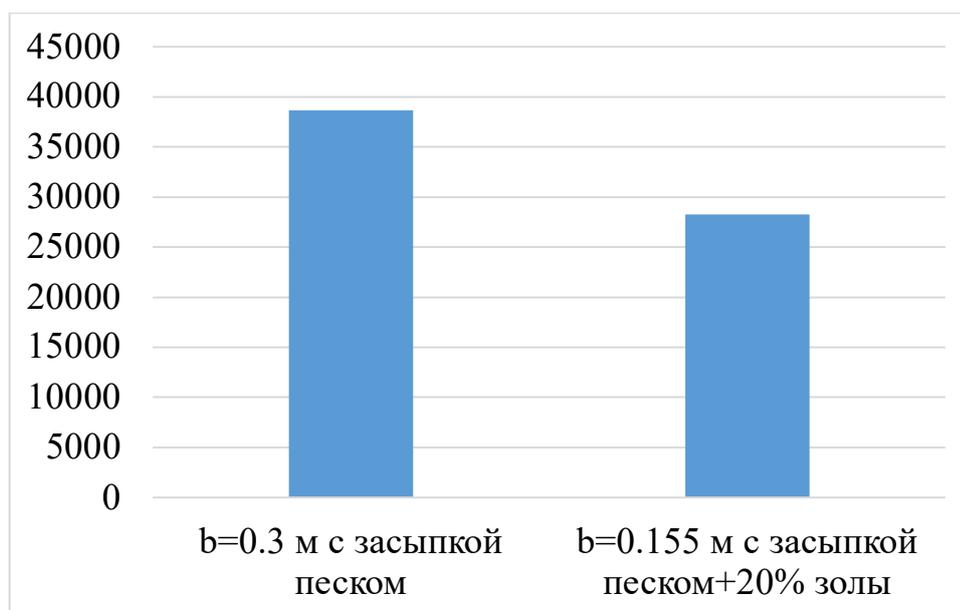


Рис. 4.3. Результаты расчета сметной стоимости работ

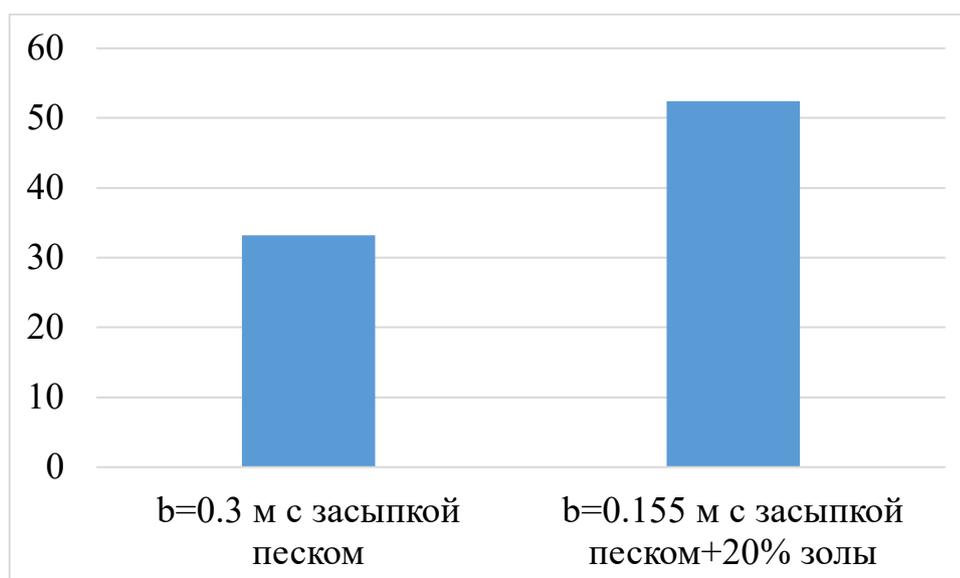


Рис. 4.4. Результаты расчета трудоемкости работ

Согласно графическому анализу сметной стоимости и трудоемкости работ, устройство тонкостенной подпорной стены с толщиной 0,155 м и засыпкой из песка с добавлением золы-уноса экономичнее на 26,91%. Это обусловлено уменьшением объема бетона для конструкции стены, несмотря на добавление золы-уноса в грунт. Сметная трудоемкость увеличивается на 36,73% в сравнении с устройством стены с засыпкой из песка в связи с необходимостью проведения дополнительных работ, в частности – перемешивание грунта с золой.

Оценка сметных показателей и результатов, проведенных в главе 3.4.4 численных исследований подтверждает эффективность применения золы-уноса в качестве добавки в грунт обратной засыпки с технической и экономической стороны – использование золы-уноса целесообразно для уменьшения объема применяемых материалов для подпорной стенки, однако доказанная эффективность соответствует конкретной рассматриваемой подпорной конструкции, для каждого отдельного случая проектирования подпорной стены следует проводить технико-экономическое сравнение вариантов.

#### **4.4. Выводы по главе 4**

1. При сравнении сметной стоимости работ определено, что увеличение стоимости применения грунта с золой-уноса (20% по массе) составляет 11,53%. Удорожание работ связано с добавлением золы-уноса к песку, затратами на приобретение, в дальнейшем на стоимость строительства в целом может влиять дальность перевозки материала к строительной площадке.

2. Сметными расчетами установлено, что стоимость работ возведения подпорной стенки с использованием грунта обратной засыпки с содержанием в нем золы-уноса в различном соотношении невелика – менее 1%.

3. При сравнении сметной трудоемкости работ выявлено, что содержание золы-уноса в грунте не влияет на сметную трудоемкость работ, по сравнению с песком трудоемкость при использовании укрепленного грунта возрастает на 32,36%, обусловлено это работами по внесению золы-уноса в состав грунта.

4. Устройство тонкостенной подпорной стены с толщиной 0,155 м и засыпкой из песка с добавлением золы-уноса экономичнее на 26,91%. Сметная трудоемкость увеличивается на 36,73% в сравнении с устройством стены с засыпкой из песка в связи с необходимостью проведения дополнительных работ, таких как перемешивание грунта с золой.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### Итоги экспериментально теоретических исследований

На основе выполненного комплекса экспериментальных и теоретических исследований обосновано применение золы уноса для модификации грунтов обратной засыпки с целью регулирования величины активного давления на тонкостенные подпорные конструкции:

1. Экспериментально определены зависимости изменения прочностных деформационных и фильтрационных характеристик модифицированного грунта с возрастанием процентного содержания золы уноса в смеси.

2. Численное моделирование НДС системы «подпорная стена – модифицированный грунт» показало:

- горизонтальные перемещения подпорной стены уменьшаются с увеличением процентного содержания золы-уноса;

- общая устойчивость системы повышается с увеличением процентного содержания золы уноса;

- использование модифицированного грунта обратной засыпки дает возможность уменьшать размеры поперечного сечения подпорной стены, не снижая общей устойчивости системы.

3. Определены пределы применимости использования модифицированного грунта обратной засыпки для тонкостенных подпорных стен по соотношению «высота – коэффициент общей устойчивости системы». Оптимальная высота тонкостенных подпорных стен находится в пределах 1,0 ...5,0 м.

### Рекомендации по внедрению результатов исследований

Анализ экономической эффективности подтверждает эффективность применения золы-уноса в качестве добавки в грунт обратной засыпки с технической (обеспечение коэффициента устойчивости) и экономической стороны (стоимость работ ниже на 26,91%).

Основные результаты теоретических и экспериментальных исследований внедрены в ООО «Фреза» (г. Пермь), ООО «ПСП «Автомост» (г. Пермь), используются в учебном процессе Пермского национального исследовательского

политехнического университета.

### **Перспективы дальнейшей разработки темы исследований**

Дальнейшие исследования в области проектирования системы «тонкостенная подпорная стена – модифицированный грунт обратной засыпки» должны быть направлены на развитие методов модификации не только песчаных, но и других типов грунтов. В качестве модифицирующего материала возможно рассмотрение применения сочетания инертных и химически активных добавок.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Arputha S.S., Narayanasamy P. Bio-efficacy of flyash-based herbal pesticides against pests of rice and vegetables // *Current Science*. 2007. Vol. 92 (6). pp. 811-816.
2. Bagchi S.S., Jadhan R.T. Pesticide dusting powder formulation using flyash - A cost effective innovation // *Indian Journal of Environmental Protection*. 2006. Vol. 26 (11). pp. 1019-1021.
3. Basu M., Pande M., Bhadoria P.B.S., Mahapatra S.C. Potential fly-ash utilization in agriculture: A global review // *Progress in Natural Science*. 2009. Vol. 19. pp. 1173-1186. DOI10.1016/j.pnsc.2008.12.006
4. Brinkgreeve, R.B.J., Shen, R.F.(2011). *Structural Elements & Modelling Excavations in Plaxis*, Power Point Presentation File, Delf, the Netherlands.
5. Council Directive of 12 December 1991 on hazardous waste (91/689/EEC). OJ L 377, 31.12.1991. 20 p.
6. DiGioia A.M., Nuzzo W.L. Fly Ash as Structural Fill // *Journal of Power Division*. 1972. Vol. 98. Iss. 1. Pp. 77-92.
7. *European Waste Catalogue and Hazardous Waste List*. Valid from 1 January 2002. 45 p.
8. G.W. Dawson, B.W. Mercer. *Hazardous Waste Management*. New-York:, 1986.
9. Gray D.H., Lin Y.K. Engineering properties of compacted fly ash // *J. Soil Mech. Found. Div.* - 1972. - Vol. 98, No 4. - P. 361-380.
10. 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.
11. Jambhulkar H.P., Shaikh S.M.S., Kumar M.S. Fly ash toxicity, emerging issues and possible implications for its exploitation in agriculture; Indian scenario: A

review //Chemosphere. 2018. Vol. 213. pp. 333-344. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2018.09.045

12. 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.

13. Lahtinen P. Fly ash mixtures as flexible structural materials for low-volume roads : Dissertation for the degree of Doctor of Science in Technology. Helsinki, 2001. 102 pp.

14. Lahtinen P., Jyrävä H., Suni H. New methods for the renovation of gravel roads. Paper for IRF Regional Conference, European Transport and Roads. 1999. Lahti. 7 pp.

15. 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. Pp. 170-179.

16. Lee Y.-R., Soe J.T., Zhang S., Ahn J.-W., Park M.B., Ahn W.-S. Synthesis of nanoporous materials via recycling coal fly ash and other solid wastes: A mini review. Chemical Engineering Journal. 2017. DOI: 10.1016/j.cej.2017.02.124

17. Li Y., Cheng X., Cao W., Gong L, Zhang R., Zhang H. Fabrication of adiabatic foam at low temperature with sodium silicate as raw material. Materials and Design. 2015; pp.1008-1014

18. Madanbekov N.J., Osmonova B.J. Application in asphalt concrete mixtures a mineral powder from an ash carryover from the thermoelectric power center of Bishkek city. Vestnik KGUSTA .2016; pp. 99-103. (In Russian)

19. 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.

20. Padam Raj. Thesis on compaction characteristics and shear parameters of pond ash. National Institute of Technology, Rourkela, 2010. 58 p.

21. Panibratov YU. P., Staroverov V. D. Tekhnologii betonov. 2011. No. 1-2. p. 43-47

22. Proceedings of the Institute of Civil Engineers. 1989. vol 89. June.
23. Properties and use of fly ashes for embankments / J.P. Martin [et al.] // J. Energy Eng. American Society of Civil Engineers. - 1990. - Vol. 116, No 2. - P. 71-86.
24. 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.
25. 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.
26. Shenbaga. R. Kaniraj, V. Gayathri Geotechnical behavior of fly ash mixed with randomly oriented fiber inclusions / Geotextiles and Geomembranes. – 2003. - №21.
27. Tripathi R.C., Masto R.E., Ram L.C. Bulk use of pond ash for cultivation of wheat-maize-eggplant crops in sequence on a fallow land // Resources, Conservation and Recycling. 2009. Vol. 54. pp. 134-139. DOI: 10.1016/j.resconrec.2009.07.009
28. 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.
29. 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.
30. Ахмедьянова Л. В., Третьякова Е. М. Учебно-методическое пособие «Проектирование и расчет подпорных стен», Тольятти : ТГУ, 2018
31. Бартоломей А.А. Soil mechanics: Учеб. для студентов, обучающихся по направлению 653500 "Стр-во" / (2. изд., перераб. и доп.) Москва, 2003.
32. Бартоломей, А. А. Определение напряженного состояния однородного основания заглубленного фундамента / А. А. Бартоломей, А. Н. Богомолов // Основания и фундаменты в геологических условиях Урала. – 1997. – № 1. – С. 25-30. – EDN SDLNJP.

33. Безволев С.Г. Общая методика расчета напряженно-деформированного состояния массива грунта с упрочняющими или ослабляющими элементами // «ОФМГ».-2008.-№3.- С.2-8.
34. В.Н. Левченко. Опыт переработки золы-уноса Рефтин-ской ГРЭС // Материалы V конференции «Золошлаки ТЭС: удаление, транспорт, переработка, складирование», Москва, 24–25 апреля 2014 г. — М.: Полиграфический центр МЭИ, 2014. с. 91 – 94.
35. Ведомственные строительные нормы. 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». М, 1976.
36. Виноградов Б.Н., Высоцкая О.Б. Методы оценки качества зол ТЭС // Химия твердого топлива. – Москва, 1990. – № 4. – С. 139 – 143.
37. Виноградов Б.Н., Высоцкая О.Б. Методы оценки качества зол ТЭС // Химия твердого топлива. – Москва, 1990. – № 4. – С. 139 – 143.
38. Власова В.В. Разработка технологии комплексного извлечения полезных компонентов из золошлаковых отходов ТЭС Иркутской области: Дис. канд. техн. наук. – Иркутск, 2005 г. – 182 с.
39. Гончаров В.В. Конструктивно-технологические решения подпорных стен из сварного трубчатого шпунта для транспортного строительства: Дис канд. техн. наук. – Москва, 2011 г – 158 с
40. Государственный стандарт Российской Федерации. ГОСТ Р 52748-2007. Дороги автомобильные общего пользования. Нормативные нагрузки, расчетные схемы нагружения и габариты приближения. М.,2007.
41. Гребенщикова Е.А., Юст Н.А., Пыхтеева М.А. Влияние химической мелиорации путем внесения золошлаковых отходов на физико-химические свойства почвы // Вестник КрасГАУ. 2016. №. 6. С. 3-8.
42. Гурячков И.Л. Укрепление грунтов золошлаковыми материалами. - В кн.: Укрепленные грунты.М., Транспорт, 1982.

43. Делицын Л. М., Власов А. С. Необходимость новых подходов к использованию золы угольных ТЭС // Теплоэнергетика. – 2010. – № 4.
44. Джоунс К. Д. Сооружения из армированного грунта / Пер. с англ. В.С. Забавина; под ред. В. Г. Мельника. – М.: Стройиздат, 1989.
45. Дик Э.П., Машкович К.И., Васильченко З.А. Компонентный состав золошлаковых отходов ТЭС // Новое в российской электроэнергетике, 2003, №5.
46. Дик Э.П., Соболева А.Н. О классе опасности золошлаковых отходов ТЭС от сжигания кузнецких углей // Электрические станции. 2006. №1. С. 9-13
47. Дик Э.П., Соболева А.Н. Оценка степени опасности золошлаковых отходов ТЭС для окружающей среды и здоровья человека // Материалы II научно-практического семинара «Золошлаки ТЭС: удаление, транспорт, переработка, складирование», Москва, 23–24 апреля 2009 г. — М.: Издательский дом МЭИ, 2009. С. 65 – 68.
48. Докучаев В.В. Работы по исследованию почв, и оценке земель, учение о зональности и классификация почв / Сочинения, т. VI. М.-Л., 1951.
49. Золошлаковые материалы и золоотвалы / В.Г. Пантелеев, В. А. Мелентьев, Э. Л. Дробнин [и др.]; Под ред. В. А. Мелентьева. - М.: Энергия, 1978.-295 с.
50. 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.
51. Исаева Н.В. Композиционные материалы на основе золы уноса для укрепления грунтов. - Использование отходов промышленности при строительстве и эксплуатации автомобильных дорог в Нечерноземной зоне РСФСР. - Владимир, 1990
52. Інженерна геологія. Механіка ґрунтів, основи і фундамент : підручник / М. Л. Зоценко, В. І. Коваленко, В. Г. Хілобок, А. В. Яковлев. – Київ : Вища школа, 1992. – 408 с.

53. К вопросу об устойчивости вертикального откоса / А. Н. Богомолов, С. И. Шиян, А. В. Соловьев, И. В. Якименко // Вестник гражданских инженеров. – 2008. – № 4(17). – С. 40-43.

54. Кашапова К.Р. Анализ зависимости длины армирующих элементов от значения угла внутреннего трения грунта засыпки при проектировании армогрунтовых подпорных конструкций / Актуальные проблемы технических наук в России и за рубежом. - 2016.

55. Кашапова К.Р. Моделирование армогрунтовых устоев мостовых переходов методом конечных элементов / Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – 2015. - № 7-1 (18-1).

56. Кашапова К.Р. Планирование модельных экспериментов по исследованию работы подпорных стен, армированных горизонтальными геосинтетическими прослойками / Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. - 2016. - № 1.

57. Кашапова К.Р. Результаты модельных испытаний подпорной стенки с засыпкой из песчаного грунта / Строительство и архитектура. Опыт и современные технологии. – 2016. - №7.

58. Кашапова К.Р., Клевико В.И. Анализ внешней и внутренней устойчивости армогрунтовых подпорных стен / Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. – 2015. - №4.

59. Кашапова К.Р., Клевико В.И. Использование метода конечных элементов для моделирования работы подпорных конструкций с засыпкой из фиброармированного грунта / Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика. - 2015. - № 4 (20).

60. Кашапова К.Р., Клевико В.И. Результаты модельных испытаний по определению горизонтальных деформаций армогрунтовых подпорных стен / Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика. - 2016. - № 4 (24).

61. Клевеко В.И. Оценка напряженно-деформированного состояния армированных оснований в пылевато-глинистых грунтах: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Пермь, 2002.
62. Ковда В.А. Основы учения о почвах, М.:, 1973.
63. Козлитин В.А. Ячеистый бетон из отходов – лидирующий материал для жилищного строительства / В.А. Козлитин // Расширение региональной сырьевой базы вовлечением в оборот золошлаковых материалов ТЭЦ ОАО «ТГК- 11». С. 74–92
64. 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.
65. Коробецкий И.А., Шпирт М.Я. Генезис и свойства минеральных компонентов углей Новосибирск:, 1988.
66. Коробочкин В.В., Крашенинникова Н.С., Эрдман С.В., Фролова И.В. Химическая технология неорганических веществ: Лабораторный практикум. – Томск: Изд-во ТПУ, 2004. – 172 с.
67. Коробочкин В.В., Крашенинникова Н.С., Эрдман С.В., Фролова И.В. Химическая технология неорганических веществ: Лабораторный практикум. – Томск: Изд-во ТПУ, 2004. – 172 с.
68. Костин В.В. Опыт использования отходов ТЭС в производстве строительных материалов. – Новосибирск, 2001.
69. Кочеткова Р.Г. Техногенные грунты и их применение в дорожном строительстве – Научно-информационный сборник. – Информавтодор, М., 2002. – № 6.
70. Краткий справочник по геохимии / Г.В. Войткевич, А.Е.Мирошников, А.С.Поваренных и др. М.:, Недра, 1977.
71. Крутов В.И., Папсуенко И.К. Расчет армированных массивов. Труды института // Вып. 70. Стройиздат, М, 1980.

72. Крутов В.И., Папсуенко И.К. Устранение просадок лессовых грунтов от их собственного веса путем армирования лессовой толщи // Основания, фундаменты и механика грунтов №3, М.: Стройиздат, 1976. с. 17
73. 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.
74. Лунёв, А.А. Использование отходов теплоэнергетики для сооружения насыпей земляного полотна автомобильных дорог / А.А. Лунёв // Сборник: материалы Международной научно-практической конференции «Инновационные факторы развития транспорта» (19 – 20 ноября 2017 г.). – Новосибирск: Издательство СГУПС, 2017. – С. 32 – 33.
75. Маковецкий, О. А. Влияние неблагоприятных инженерно-геологических факторов на несущую способность фундаментов при реконструкции зданий / О. А. Маковецкий // Основания и фундаменты в геологических условиях Урала. – 1997. – № 1. – С. 40-43.
76. Маслов Л.Б. Численные методы механики. Курс лекций. - Иваново: Изд. ИГЭУ, 2006.- 128 с.
77. Маслов Н.Н. Основы механики грунтов и инженерной геологии: Учебник для вузов / Н.Н. Маслов. – М.: Изд-во Высшая школа, 1968. – 626 с.
78. Математические решения задачи термодинамических процессов в глинистых грунтах при электрохимическом закреплении // Вестник Пермского государственного технического университета. Охрана окружающей среды, транспорт, безопасность жизнедеятельности. – 2010. – № 2. – С. 100-107.
79. Межгосударственный стандарт. ГОСТ 12248-2010 «Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости». М, 2011.
80. Межгосударственный стандарт. ГОСТ 12256-2014 «Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава». М, 2019.

81. Межгосударственный стандарт. ГОСТ 23558-94 «Смеси щебеночно-гравийно-песчаные и грунты, обработанные неорганическими вяжущими материалами, для дорожного и аэродромного строительства», М., 2005.
82. Межгосударственный стандарт. ГОСТ 25100-2020 «Грунты. Классификация». М, 2020.
83. Межгосударственный стандарт. ГОСТ 25818-2017 «Золы-уноса тепловых электростанций для бетонов. Технические условия». М, 2017.
84. Межгосударственный стандарт. ГОСТ 27751-2014 «Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения». М., 2019.
85. Межгосударственный стандарт. ГОСТ 32960-2014 «Дороги автомобильные общего пользования. Нормативные нагрузки, расчетные схемы нагружения.». М, 2016.
86. Межгосударственный стандарт. ГОСТ 33757-2016 «Поддоны плоские деревянные. Технические условия», М., 2019.
87. Межгосударственный стандарт. ГОСТ 5180-2015 «Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик». М, 2016.
88. Мелентьев, В.А. Гидрозолоудаление и золоотвалы [Текст] /В.А. Мелентьев, Е.З.Нагли. – Л.: Энергия, 1968. – 232 с.
89. Методические рекомендации по использованию зол уноса Канско-Ачинских углей для осушения и укрепления грунтов земляного полотна и устройства оснований и морозозащитных слоев дорожных одежд. - Союздорнии. М., 1986.
90. Методический документ в строительстве. МДС 81-25.2001. Методические указания по определению величины сметной прибыли в строительстве. – М.: ЦИТП Госстроя РФ, 2004.
91. Методический документ в строительстве. МДС 81-33.2004. Методические указания по определению величины накладных расходов в строительстве. – М.: ЦИТП Госстроя РФ, 2004.

92. Методический документ в строительстве. МДС 81-35.2004. Методика определения сметной стоимости строительной продукции на территории РФ. – М.: ЦИТП Госстроя РФ, 2004.
93. Минералы и горные породы СССР. Справочник. М.: 1970.
94. Научно-исследовательская работа «Обоснование использования в матрице строительных конструкций золыуноса энергетического предприятия»  
КИРИЛЛОВА
95. He H., Dong Z., Peng Q., Wang X., Fan C, Zhang X. Impacts of coal fly ash on plant growth and accumulation of essential nutrients and trace elements by alfalfa (*Medicago sativa*) grown in a loessial soil // *Journal of Environmental Management*. 2017. Vol. 197. pp. 428-439. DOI10.1016/j.jenvman.2017.04.028
96. Опыт использования активных и неактивных зол уноса ТЭС Франции в дорожном строительстве (по материалам зарубежного опыта)./Экспресс-информация, вып. 18 «Повышение эффективности производства и качества дорожных работ». ЦБНТИ Минавтодора РСФСР.- М., 1977.
97. Осмонова Б. Ж. Обоснование и разработка технологии применения золы-уноса ТЭЦ г.Бишкек при устройстве асфальтобетонных покрытий: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Бишкек, 2018.
98. Отраслевой дорожный методический документ ОДМ 218.2.066-2016 «Методические рекомендации по использованию анкерных свай и микросвай в составе мероприятий инженерной защиты автомобильных дорог». М., 2016
99. Отраслевой дорожный методический документ. ОДМ 218.2.027-2012. Методические рекомендации по расчету и проектированию армогрунтовых подпорных стен на автомобильных дорогах. М., 2012.
100. Отраслевой дорожный методический документ. ОДМ 218.2.027-2012. Методические рекомендации по расчету и проектированию армогрунтовых подпорных стен на автомобильных дорогах. М., 2012.
101. Отраслевой дорожный 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». М., 2013.

102. Отраслевой дорожный методический документ. ОДМ 218.5.003-2010. Рекомендации по применению геосинтетических материалов при строительстве и ремонте автомобильных дорог. М., 2010.

103. Отраслевой дорожный методический документ. ОДМ 218.5.005-2010. Классификация, термины, определения геосинтетических материалов применительно к дорожному хозяйству. М., 2010.

104. П17-02 к СНБ 5.01.01–99. Проектирование и устройство подпорных стен и креплений котлованов. – Минск : Минстройархитектуры, 2003. – 94 с.

105. Применение зол и золошлаковых отходов в строительстве. Д.т.н., профессор Н.И. Ватин; ассистент Д.В. Петросов.

106. Прокопец В.С. Производство высокопрочных минеральных вяжущих на основе ЗШО Омских ТЭЦ // Расширение региональной сырьевой базы вовлечением в оборот золошлаковых материалов ТЭЦ ОАО «ТГК- 11». С. 116–127

107. Путилин Е.И. Применение зол уноса и золошлаковых смесей при строительстве автомобильных дорог / Е.И. Путилин, В.С. Цветков. – М.: Союздорнии, 2003. – 58 с.

108. 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. № 04534333943.

109. Руководство по проектированию подпорных стен и стен подвалов для промышленного и гражданского строительства. М, 1984

110. Рябов Ю. В., Делицын Л. М., Власов А. С., Бородина Т. И. Флотация углерода из золы уноса Каширской ГРЭС // Обогащение руд. – 2013. – № 4.

111. Рябов Ю. В., Делицын Л. М., Власов А. С., Голубев Ю. Н. Получение магнитных продуктов из золы уноса Каширской ГРЭС // Обогащение руд. – 2013. – № 6

112. Свод правил 101.13330.2012 «Подпорные стены, судоходные шлюзы, рыбопропускные и рыбозащитные сооружения» (Актуализированная редакция СНиП 2.06.08-87). М., 2012.;

113. Свод правил 22.13330.2016 «Основания зданий и сооружений» (Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83\*). М., 2016.;

114. Свод правил 35.13330.2011 «Мосты и трубы» (Актуализированная редакция СНиП 2.05.03-84). М., 2011.;

115. Свод правил 43.13330.2012 «Сооружения промышленных предприятий» (Актуализированная редакция СНиП 2.09.03-85). М., 2012.;

116. Свод правил 436.1325800.2018 «Инженерная защита территорий, зданий и сооружений от оползней и обвалов. Правила проектирования» М., 2018.;

117. Свод правил 45.13330.2017 «Земляные сооружения, основания и фундаменты. Актуализированная редакция СНиП 3.02.01-87 (с Изменениями N 1, 2)». М., 2017.;

118. Свод правил 63.13330.2018 «Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения». М., 2018.;

119. Свод правил, СП 78.13330.2012. Актуализированная редакция СНиП 3.06.03-85 (с Изменениями N 1, 2). М.: Минрегион России, 2013 год.

120. Свод правил. 116.13330.2012 «Инженерная защита территорий, зданий и сооружений от опасных геологических процессов. Основные положения». М., 2012.

121. Свод правил. СП 101.13330.2012. Подпорные стены, судоходные шлюзы, рыбопропускные и рыбозащитные сооружения (Актуализированная редакция СНиП 2.06.08-87). М., 2012.

122. Свод правил. СП 35.13330.2012. Мосты и трубы (Актуализированная редакция СНиП 2.05.03-84). М., 2012.

123. Свод правил. СП 381.1325800.2018 «Сооружения подпорные. Правила проектирования». М., 2018.

124. Свод правил. СП 43.13330.2012. Сооружения промышленных предприятий (Актуализированная редакция СНиП 2.09.03-85). М., 2012.

125. Свод правил. СП 78.13330.2012 «Автомобильные дороги», М., 2013.
126. Семенов В.А. Опыт использования местных природных материалов и отходов промышленности в дорожном строительстве - М., Транспорт, 1991.
127. Сиротюк В.В. Опыт и перспективы использования золошлаковых материалов в транспортном строительстве // Расширение региональной сырьевой базы вовлечением в оборот золошлаковых материалов ТЭЦ ОАО «ТГК-11». С. 37–52
128. Система контроля ОСЭР за трансграничной перевозкой отходов, предназначенных для переработки / Руководство. Париж:, 1995. 119 с.
129. Соколова В.Д., Клевеко В.И. Основные положения по расчету армогрунтового устоя моста / Будущее науки - 2014 Сборник научных статей 2-й Международной молодежной научной конференции. - 2014.
130. Соколова В.Д., Клевеко В.И. Применение армированного грунта в конструкции устоев моста / Экология и научно-технический прогресс. Урбанистика. –2014. – № 1.
131. Соловьев Л.П., Пронин В.А. Утилизация зольных отходов тепловых электростанций // Современные наукоемкие технологии. 2011.№ 3. С. 40-42.
132. Состав и свойства золы и шлака ТЭС / [В.Г. Пантелеев, Э.А.Ларина, В.А. Мелентьев и др.; под ред. В.А.Мелентьева]. – Л.: Энергоатомиздат, 1985. – 288 с.
133. Состав и свойства золы и шлака: справ.пособие / [В.Г. Пантелеев, Э.А. Ларина, В.А. Мелентьев и др.]. – Л.: Энергоатомиздат, 1985.– 285 с.
134. Сравнительный анализ моделей грунтовых оснований, применяемых при расчете транспортных сооружений / И. Г. Овчинников, Ю. П. Скачков, И. И. Овчинников, Б. С. Юшков // Региональная архитектура и строительство. – 2012. – № 3. – С. 61-69.
135. Статическая и циклическая долговечность композиционных материалов / Б. А. Бондарев, П. В. Комаров, А. Б. Бондарев, А. В. Пономарев // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. – 2008. – № 4(111). – С. 24-25.

136. СП 2.1.7.1386-03 «Санитарные правила по определению класса опасности токсичных отходов производства и потребления». М, 2003.
137. Судакас Д.Г. Сланцевая зола как компонент вяжущих систем : отчет / ОАО «Гипроцемент». СПб., 2009. 1 с.
138. Таразанов И.Г., Губаов Д.А. Итоги работы угольной промышленности России за январь-декабрь 2020 года // Уголь. 2020. № 3. С. 54-69. DOI: 10.18796/0041-5790-2020-3-54-69
139. Тер-Мартirosян З.Г., Тер-Мартirosян А.З., Акулецкий А.С. Напряженно-деформированное состояние слабых и насыпных грунтов, армированных железобетонными и грунтовыми сваями соответственно // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. Вып. 9. С. 1182–1190.
140. Тер-Мартirosян З.Г., Тер-Мартirosян А.З., Сидоров В.В. Опыт преобразования слабых водонасыщенных грунтов сваями конечной жесткости // Вестник МГСУ. 2018. Т. 13. №3 (115). С. 271-281.
141. Тимофеева Л.М. Армирование грунтов (теория и практика применения) / Пермский политехнический институт. Пермь, 1991.
142. Успенский С.К. Переработка и подготовка золошлаковых материалов к использованию // Расширение региональной сырьевой базы вовлечением в оборот золошлаковых материалов ТЭЦ ОАО «ТГК-11». С. 93–11
143. 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.
144. Цельковский Ю.К. Опыт промышленного использования золошлаковых отходов ТЭС // Новое в российской энергетике. 2000. № 2. С. 22–31.
145. Цельковский Ю.К. Утилизация золошлаковых отходов угольных ТЭС (законодательные и нормативно-технические документы). М. : ВТИ, 2014. 63 с.
146. Цимбельман Н. Я. Анализ работы угольных подпорных стенок с учетом окружающего грунта : дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01 /. - Владивосток, 2003.

147. Цытович Н.А. Механика грунтов (краткий курс): учебник для вузов. 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1983. – 228 с.
148. Шапиро Д.М., Тарасов А.А. Совершенствование расчета оснований подпорных стенок и армогрунтовых сооружений / Строительная механика и конструкции. – 2013. – Т. 1, № 6.
149. Шиян, С. И. К вопросу о минимальных значениях коэффициента бокового давления грунтов / С. И. Шиян, А. Н. Богомолов, О. А. Вихарева // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Естественные науки. – 2007. – № 6. – С. 110-114
150. Шубов Л.Я., Скобелев К.Д., Иванков С.И., Доронкина И.Г. Аналитическая оценка золошлаковых отходов как техногенного сырья (к обоснованию экологической промышленной политики) // Экология промышленного производства. 2018. № 3 (103). С. 15–23.
151. Шустер Дж.С., Хансен Р.Л. Зола уноса, как строительный материал для насыпных сооружений. American Society of Civil Engineers Journal of Power Division. 1972 torn 98.
152. Э.В. Сокол, Н.В. Максимова. Природа, химический и фазовый состав энергетических зол Челябинских углей. – Новосибирск, 2001. 110 с.

# ПРИЛОЖЕНИЕ А. ВНЕДРЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ



ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ  
ПРОЕКТНО-СМЕТНОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ

«АВТОМОСТ»

ИНН5905286563/КПП590501001  
614010, г. Пермь, ул. Клары Цеткин, д. 10а  
E-mail: mail@psp.avtomost.ru  
Сайт: avtomost.ru

Телефон (факс) 207-51-37

16 мая 2024 г.

УТВЕРЖДАЮ

Директор ООО «НСП «Автомост»

/ Ищенко С.Н.



АКТ

о применении результатов работы на соискание  
ученой степени кандидата технических наук по научной  
специальности 2.1.1. «Строительные конструкции, здания и сооружения»

Истоминой Катарины Равиленовны

На тему «Оценка влияния использования золы-уноса в обратной засыпке  
на тонкостенные подпорные стены»

Результаты исследований К.Р. Истоминой были использованы компанией (ООО «НСП «Автомост») для обоснования конструкций подпорных стен при проектировании ряда объектов в Пермском крае.

Результаты разработок К.Р. Истоминой, представленные в диссертации, способствуют использованию отходов сжигания угля на ТЭС (золы-уноса) в строительстве. Смесь золы уноса и песка в различном соотношении представляет собой новый материал, который можно применять в качестве обратной засыпке подпорных стен и других удерживающих конструкций. Применение этого материала приводит к снижению активного давления, действующего на подпорные стены, что, позволяет повысить их коэффициент устойчивости. Кроме того, данный подход к использованию в обратной засыпке подпорных стен нового материала способствует утилизации отходов производства (золы-уноса), что благотворно повлияет на экологическую ситуацию в Пермском крае.

Руководитель проектов ООО «НСП «Автомост»,  
кандидат технических наук

 / Сергеев А.С.



ИНН 5918219420 КПП 591801001  
e-mail: ooo\_freza@mail.ru

УТВЕРЖДАЮ



Учредитель ООО «Фреза»

\_\_\_\_\_ / Мымрин С.П.

о внедрении результатов кандидатской диссертационной работы  
**Истоминной Катаринны Равиленовны**

Комиссия в составе:

председатель Мымрин Сергей Павлович - учредитель ;

члены комиссии: Кобелев Владимир Сергеевич - главный инженер ;

Собянин Никита Михайлович - проектировщик,

подготовили данный акт о том, что результаты исследований диссертационной работы «Оценка влияния использования золы-уноса в обратной засыпке на тонкостенные подпорные стены», представленной для рассмотрения на соискание ученой степени кандидата технических наук, по научной специальности 2.1.1 . «Строительные конструкции, здания и сооружения» применялись в качестве рекомендаций при проектировании подпорных стен на объектах транспортной инфраструктуры в Пермском крае.

Использование представленных в диссертации рекомендаций по снижению активного давления действующего на подпорные стены, путем использования золы-уноса в обратной засыпке, позволит повысить их коэффициент устойчивости. Данный подход к использованию в обратной засыпке подпорных стен модифицированного материала весьма актуален при проектировании подпорных стен.

Председатель комиссии:

\_\_\_\_\_ / Мымрин С.П.

Члены комиссии:

Главный инженер ООО «Фреза»

\_\_\_\_\_ / Кобелев В.С.

Проектировщик ООО «Фреза»

\_\_\_\_\_ / Собянин Н.М.