

На правах рукописи

ИСТОМИНА КАТАРИНА РАВИЛЕВНА

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

2.1.1 - Строительные конструкции, здания и сооружения

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Пермь - 2024

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет».

Научный руководитель: **Бургонутдинов Альберт Масугутович**
доктор технических наук, доцент

Официальные оппоненты: **Бондарев Борис Александрович**
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «Липецкий государственный
технический университет», профессор кафедры
строительного материаловедения и дорожных
технологий (г. Липецк)
Рябухин Александр Константинович
кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «Кубанский государственный
аграрный университет имени И.Т. Трубилина»,
заведующий кафедрой строительных
материалов и конструкций

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Южно – Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова (г. Новочеркасск)

Защита диссертации состоится 29 января 2025 г. в 14-00 часов на заседании диссертационного совета Пермского национального исследовательского политехнического университета Д ПНИПУ.05.20 по адресу: 614990, г. Пермь, Куйбышева, 109 ауд.202.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» (сайт <http://pstu.ru>).

Автореферат разослан « ____ » _____ 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д ПНИПУ.05.20,
кандидат технических наук, доцент

М.О. Карпушко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 изменение 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 приложения. Общий объем диссертации составляет 106 страниц, 26 рисунков, 14 таблиц. Список литературы содержит 152 наименования, в том числе 29 на иностранных языках.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе проведен обзор существующих типов подпорных конструкций, проведен обзор методов расчета и анализ конструктивных особенностей подпорных сооружений. При оценке воздействий на подпорные сооружения одним из основных параметров является закон распределения активного давления грунта, зависящий от физико-механических свойств грунтов обратной засыпки. Основные требования к подпорным стенам направлены на обеспечение надежности конструкций и оснований, при этом расчетные значения усилий, напряжений, деформаций, перемещений не должны превышать предельные значения, установленных нормами проектирования.

Выполнен анализ методов определения химического состава и механических свойств зол-уноса, определены места расположения тепловых электростанций и золошлакоотвалов на территории Российской Федерации. 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. Одни из первых исследований механических свойств золы, как материала (техногенного грунта) были проведены в 1972 году в США А.М. DiGioia и W.L. Nuzzo. Их эксперименты привели к выявлению зависимости (росту) угла внутреннего трения от плотности сухого грунта (при ее возрастании).

Исследован опыт использования золы-уноса в качестве добавок к грунтам. Отмечено, что в научной литературе отсутствует информация о применении песчаного грунта модифицированного золой уноса при устройстве обратных засыпок подпорных стен. В СССР исследования проводились с 1968 года с фокусированием на применении золы-уноса в cemento- и асфальтобетонах, а также при укреплении грунтов. В 1978 г. В. А. Мелентьев опубликовал работу, освещающую исследования физико-механических свойств зол, однако публикация имеет обзорный характер, проблематика применения золы в качестве техногенных грунтов рассмотрена не в полном объеме.

Вопросами улучшения грунтовых массивов в настоящее время посвящены исследования ученых Л.Б. Маслова, З.Г. Тер-Мартirosяна, А.З. Тер-Мартirosяна А.С. Акулецкого, И.К. Папсуенко, С.Г. Безволева, А.Н. Богомолова, Б.А. Бондарева, И.Г. Овчинникова, А.М. Бургонутдинова и др.. Анализ научных публикаций и результатов экспериментов показал, что одна из основных областей применений зол-уноса – дорожное строительство, потому как фокус исследований золы-уноса направлен в сторону применения в качестве добавок в основание грунта автомобильной дороги как вяжущего, и как минерального порошка в составе асфальтобетонных слоев. Кроме того, наряду с добавлением золы-уноса в состав дорожных конструкций, возможно внесение ее в качестве добавки к грунтам обратной засыпки для подпорных стен. Искусственному улучшению свойств грунтов обратной засыпки для стабилизации работы системы «подпорная стена - грунт» уделяется не так много внимания, что делает изучение золы-уноса в составе грунта перспективным и уникальным направлением исследования.

Вторая глава посвящена изучению воздействия золы-уноса на изменение физико-механических характеристик модифицированного грунта. Проведены лабораторные исследования прочностных характеристик при различном объеме золы уноса в качестве модифицирующей добавки.

Многолетний российский и зарубежный опыт использования золы-уноса в качестве добавки показал, что одной из проблем постоянного внедрения золы-уноса в состав материалов и применения ее являются трудности в производстве золы-уноса со стабильными свойствами, основной причиной чего является использование в качестве исходного сырья различных углей, имеющих разный химический состав. В работе была рассмотрена зола-уноса Рефтинской ГРЭС, выбранная по следующим параметрам: материал в достаточной степени однороден, более чем на 90% состоит из алюмосиликатов, две трети из которых приходится на SiO_2 , несгоревшие частицы, являющиеся вредными примесями, в рассматриваемом материале практически отсутствуют.

Рефтинская ГРЭС является крупнейшей станцией по работе на твердом топливе и поставляющей энергию в 4 региона страны и, следовательно, имеющей наибольшее количество отходов.

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).

Исследуемый материал, а именно грунт засыпки, был получен путем соединения песка и золы-уноса Рефтинской ГРЭС в разных соотношениях: золы добавлялась в количестве по массе 5%; 10%; 15%; 20%. Химический состав используемой в работе золы уноса Рефтинской ГРЭС представлен в таблице 1:

Таблица 1. Химический состав золы-уноса

| № п/п | Химическое соединение | Массовая доля |
|-------|---|---------------|
| 1. | Диоксид кремния SiO_2 | 60,42% |
| 2. | Диоксид титана TiO_2 | 0,83% |
| 3. | Оксид алюминия (III) Al_2O_3 | 25,75% |
| 4. | Оксид железа (III) Fe_2O_3 | 5,95% |
| 5. | Оксид марганца смешанного Mn_3O_4 | 0,07% |
| 6. | Оксид магния MgO | 1,23% |
| 7. | Оксид кальция CaO | 0,93% |
| 8. | Оксид натрия Na_2O | 0,99% |
| 9. | Оксид калия K_2O | 0,52 |
| 10. | Оксид фосфора (V) P_2O_5 | 0,38% |
| 11. | Триоксид серы SO_3 | 1,16% |

В качестве основных физико-механических параметров модифицированного грунта были определены: гранулометрический состав смеси; плотность; плотность частиц; коэффициент пористости; оптимальная влажность; угол внутреннего трения и удельное сцепление; модуль общей деформации. Результаты определения приведены в таблице 2.

Таблица 2. Результаты определения физико-механических свойств грунтов

| Физико-механические свойства | Содержание золы, % | | | | | | | | | | | | | | |
|--|--------------------|------|------|--------------|------|------|--------------|------|------|--------------|------|------|--------------|------|------|
| | 0% | | | 5% | | | 10% | | | 15% | | | 20% | | |
| Плотность грунта, г/см ³ | 1.88 | | | 1.86 | | | 1.88 | | | 1.87 | | | 1.86 | | |
| | 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 ³ | 2.62 | | | 2.64 | | | 2.60 | | | 2.61 | | | 2.57 | | |
| | 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 ³ | 1.68 | | | 1.66 | | | 1.68 | | | 1.67 | | | 1.67 | | |
| | 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 | 0.557 | | | 0.590 | | | 0.550 | | | 0.562 | | | 0.541 | | |
| | 0.56 | 0.55 | 0.55 | 0.61 | 0.57 | 0.59 | 0.55 | 0.55 | 0.54 | 0.55 | 0.56 | 0.56 | 0.53 | 0.54 | 0.54 |
| Коэффициент водонасыщения, д.е. | 0.550 | | | 0.537 | | | 0.572 | | | 0.553 | | | 0.546 | | |
| | 0.55 | 0.54 | 0.54 | 0.53 | 0.53 | 0.53 | 0.56 | 0.57 | 0.57 | 0.55 | 0.55 | 0.55 | 0.54 | 0.54 | 0.54 |
| Коэффициент фильтрации, м/сут | 4.52 | | | 0.90 | | | 0.38 | | | 0.26 | | | 0.13 | | |
| | 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 |
| 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 | 22.2 | | | 21.2 | | | 17.4 | | | 16.0 | | | 15.4 | | |
| | 22. | 22.2 | 22.2 | 21.1 | 21.2 | 21.1 | 17.4 | 17.4 | 17.4 | 16.0 | 15.9 | 16.0 | 15.3 | 15.4 | 15.4 |

*в первой строке указано среднее значение проведенных испытаний, во второй – значение по каждому исследованию.

Статистический анализ полученных результатов показал, что:

- величина угла 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:

$$\varphi(i) = -0.0086i^2 + 0.0048i + 34.971 \quad (1)$$

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

$$c(i) = -0.3202i + 0.2627 \quad (2)$$

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

$$E(i) = -0.009i^2 - 0.5571i + 22.689 \quad (3)$$

где: i – процентное содержание золы уноса в модифицированном грунте.

Зависимости изменения прочностных и деформационных свойств модифицированного грунта приведены на рисунке 1 (угол внутреннего трения), рисунке 2 (удельное сцепление) и рисунке 3 (модуль общей деформации).

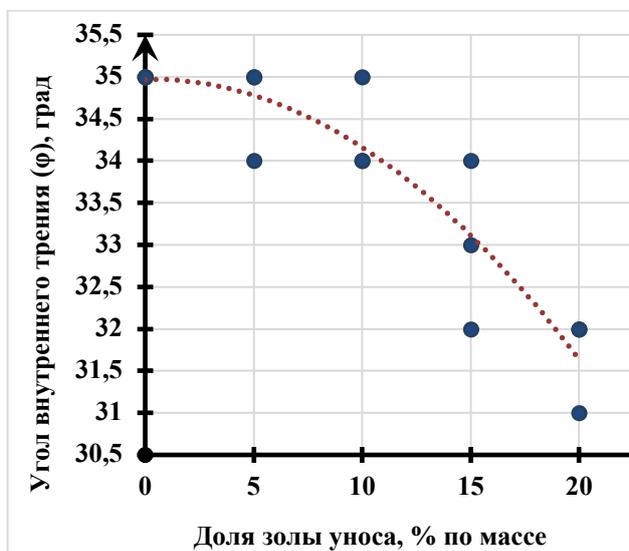


Рисунок 1. Зависимость угла внутреннего трения от содержания золы-уноса по массе

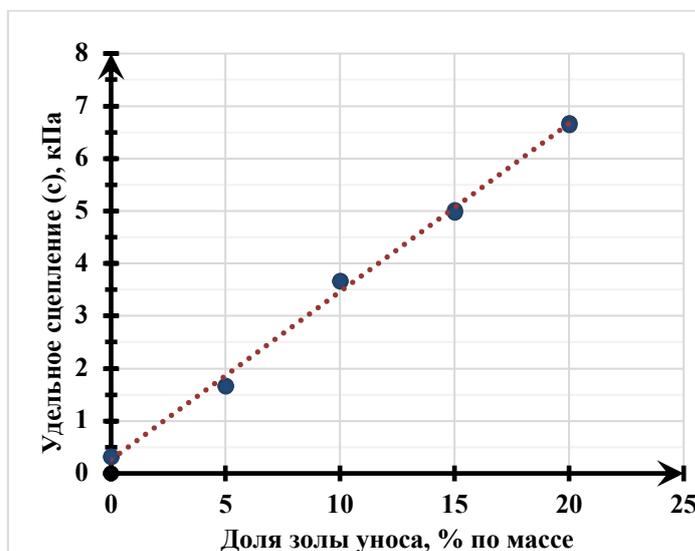


Рисунок 2. Зависимость удельного сцепления от содержания золы-уноса по массе

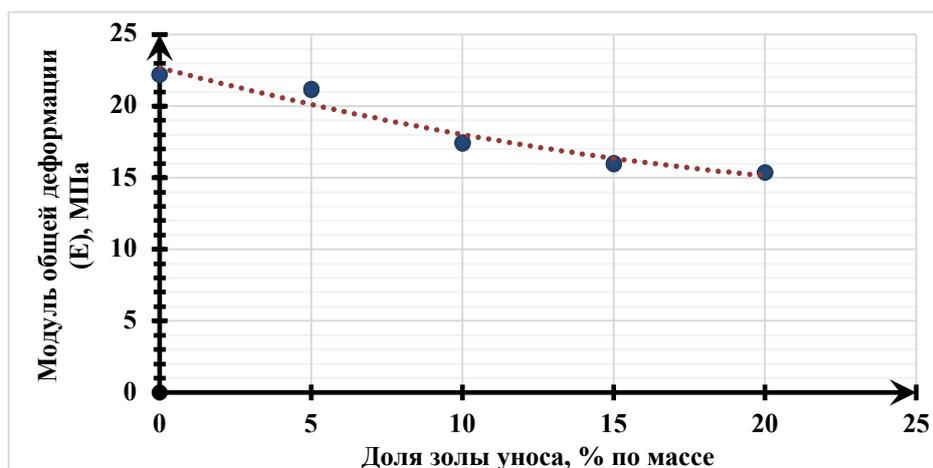


Рисунок 3. Зависимость модуля общей деформации от содержания золы-уноса по массе

В третьей главе приведены результаты компьютерного моделирования взаимодействия подпорной стены с грунтом обратной засыпки, укрепленной золой-уноса. В рамках исследования рассмотрены несколько видов подпорных стен и проведено несколько вариантов моделирований напряженно-деформированного состояния подпорных конструкций, устроенных с обратной засыпкой из «улучшенного» грунта с различным содержанием в нем золы-уноса.

Анализа работы подпорной стены совместно с грунтом обратной засыпки, т.е. определение устойчивости конструкций с учетом влияющих нагрузок выполнено путем проведения численного эксперимента, который отражает зависимость прочностных и деформационных параметров конструкции от физико-механических характеристик грунта, который используется для обратной засыпки

подпорной стены автомобильных дорог. Но перед построением численной модели, проделан аналитический расчет зависимости активного давления грунта обратной засыпки от его прочностных характеристик.

Активное давления вычисляется по выражению:

$$Ea = \frac{\gamma H^2 \operatorname{tg}^2\left(45 - \frac{\varphi}{2}\right)}{2} - 2cH \operatorname{tg}\left(45 - \frac{\varphi}{2}\right) + \frac{2c^2}{\gamma} \quad (4)$$

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.

На рисунках 4-7 отражена выявленная в ходе аналитических расчетов и дальнейшего их анализа зависимость величины активного давления от содержания в грунте засыпки золы-уноса и высоты подпорной стены.

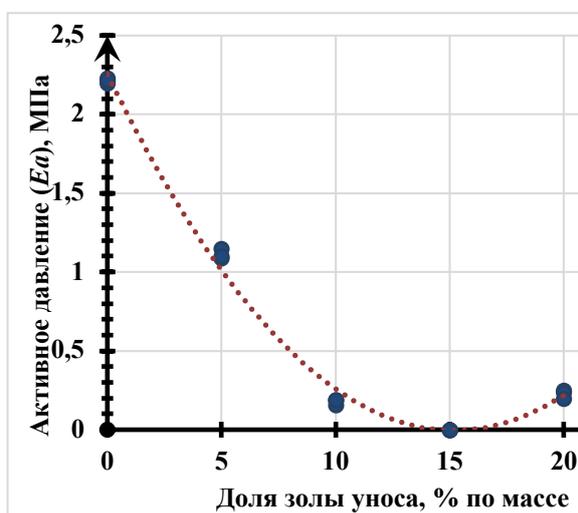


Рисунок 4. Изменение величины Ea на стену высотой 1 метр

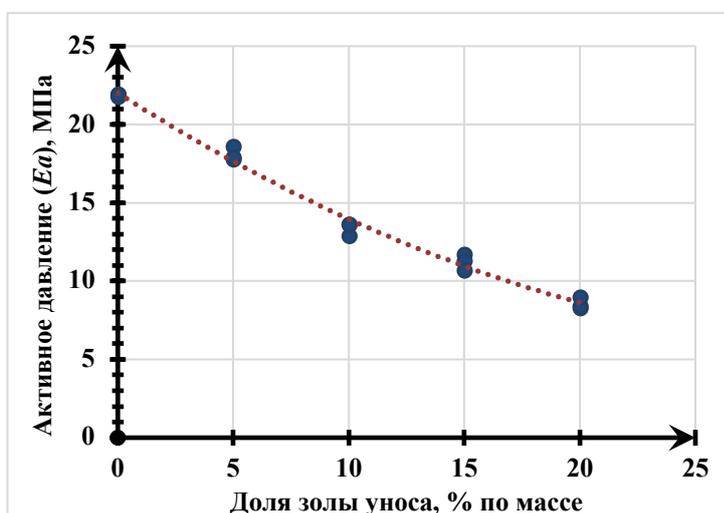


Рисунок 5. Изменение величины Ea на стену высотой 3 метра

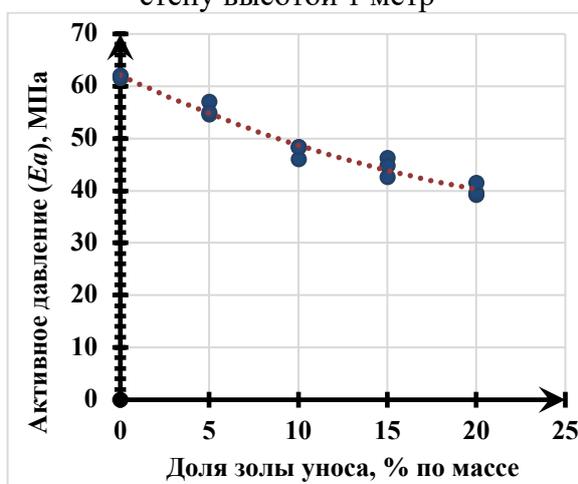


Рисунок 6. Изменение величины Ea на стену высотой 5 метров

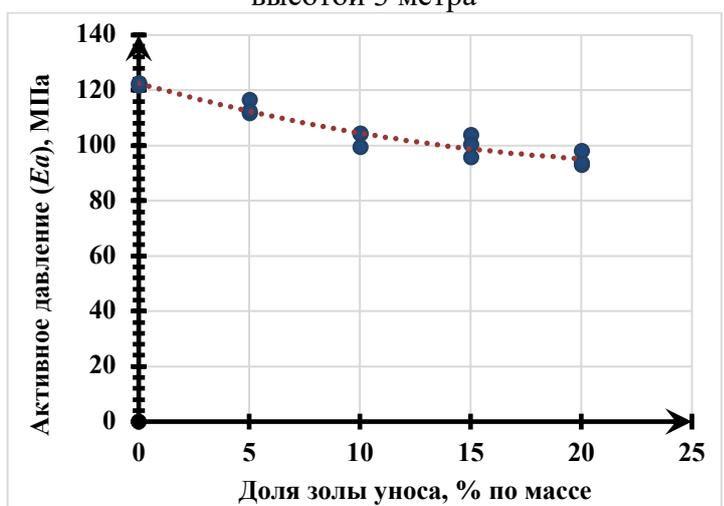


Рисунок 7. Изменение величины Ea на стену высотой 7 метров

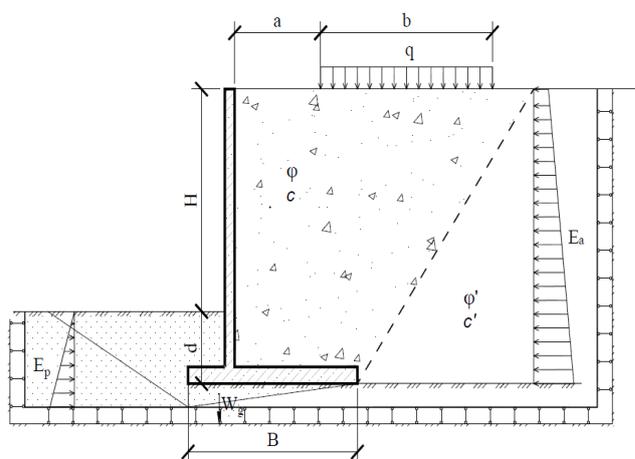
Исследование характеристик аналитическим методом при условии разной высоты подпорных стен и разного количества золы-уноса в грунте обратной засыпки позволяет определить параметры (в данном случае высоту) подпорной конструкции и рациональность увеличения процентного соотношения золы-уноса и песка. Таким образом, при небольших высотах (до 1 метра) эффективнее добавлять золу в количестве 15% по массе, также выявлено, что с увеличением высоты подпорных стен эффективность добавления зол-уноса в грунт, в части снижения значения активного давления грунта становится менее эффективно.

Дальнейшее численное моделирование основано на изучении работы уголкового подпорной стены с модифицированным грунтом, и тонкостенной подпорной стены с тем же самым грунтом.

Расчет велся в условиях плоской деформации, расчетная схема, занесенная в программный расчетный комплекс PLAXIS, приведена на рисунке 8.

Предварительные размеры конструкции были назначены на основании Руководства по проектированию подпорных стен, точка приложения нагрузки, а также временная подвижная нагрузка определены в соответствии с ГОСТ 32960-2014.

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



где H – принятая высота подпорной стены;
 W_g – равнодействующая веса грунта;
 E_p – пассивное давление грунта;
 E_a – активное давление грунта;
 $a = 1.75$ м – точка приложения нагрузки;
 $q = 75.6$ кН/м – временная подвижная нагрузка, приведена к равномерно распределенной нагрузке;
 $b = 3.5$ м – расстояние действия нагрузки;
 $B = 3.45$ м – ширина подошвы фундамента;
 $d = 1$ м – глубина заложения;
 $\phi' = 21^\circ$ – угол внутреннего трения грунта местности;
 $c' = 23$ кПа – удельное сцепление грунта местности;
 ϕ – угол внутреннего трения грунта засыпки;
 c – удельное сцепление грунта засыпки.

Рисунок 8. Расчетная схема уголкового подпорной стены

Исследование напряженно-деформируемого состояния уголкового подпорной стены концентрировалось на выявлении горизонтальных перемещений точек, расположенных в верхней части облицовки подпорной стены и в ее основании на границе с грунтом засыпки, а также коэффициент устойчивости конструкции. Анализ результатов показал, что при высоте стены равной 1 метр деформация стены происходит в основном в ее верхней части, об этом свидетельствуют большие горизонтальные перемещения в верхней точке стены. При высоте 3 и 5 метров происходит выпор центральной части конструкции. Горизонтальные перемещения в точках верхней части облицовки подпорной стены и в ее основании также уменьшаются в зависимости от процентного содержания золы-уноса в грунте засыпки.

Наряду с горизонтальными перемещениями точек конструкции, определен коэффициент устойчивости конструкции, отражающий степень надежности подпорной стены в зависимости от характеристик конструкции и грунта (на рисунке 9).

Максимальный коэффициент устойчивости для подпорных стен наблюдается в случае приложения временной нагрузки при добавлении золы-уноса в песок в процентном соотношении 20% по массе.

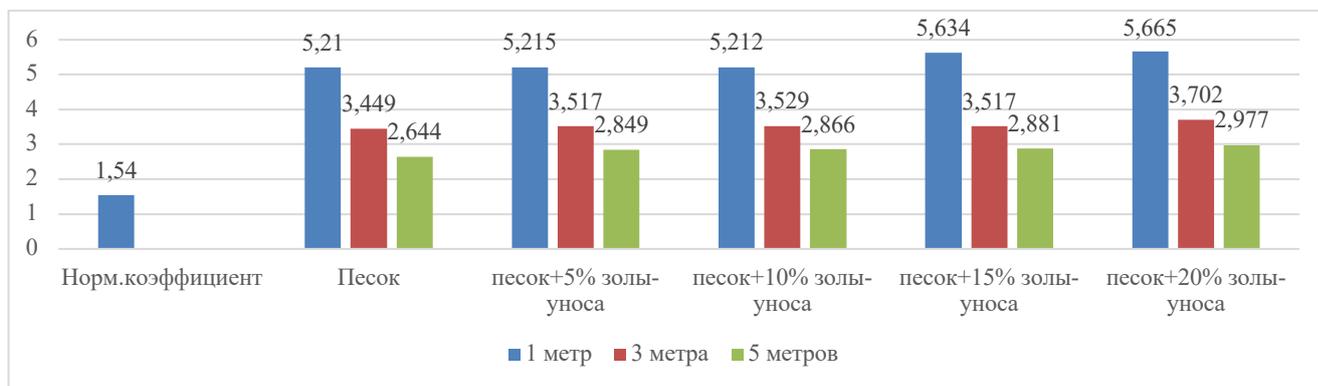


Рисунок 9. Значения коэффициентов устойчивости

Повышение значений коэффициентов устойчивости близки к линейным. Что касается исследований горизонтальных перемещений, то их значения уменьшаются пропорционально количеству добавляемой золы-уноса в грунт засыпки с приложением временной нагрузки и без.

Графики оценки горизонтальных перемещений подпорной стены представлены на рисунках 10-12.

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 стены). На рисунке 10 траектория перемещений подпорной стены высотой 1 метр отличается от более высоких стенок в связи с малой высотой и смещением основания подпорной стены.

Проведенное численное моделирование работы подпорной стены с грунтом свидетельствует о рациональности использования золы-уноса в грунте обратной засыпки с точки зрения повышения устойчивости конструкций.

Наряду с изучением напряженно-деформируемого состояния уголкового подпорной стены, в работе приведены исследования тонкостенной подпорной стены так же с грунтом обратной засыпки с добавлением золы-уноса. На рисунке 13 представлены значения коэффициентов устойчивости тонкостенной подпорной стены, перед этим был определен нормативный коэффициент устойчивости равный 1,54.

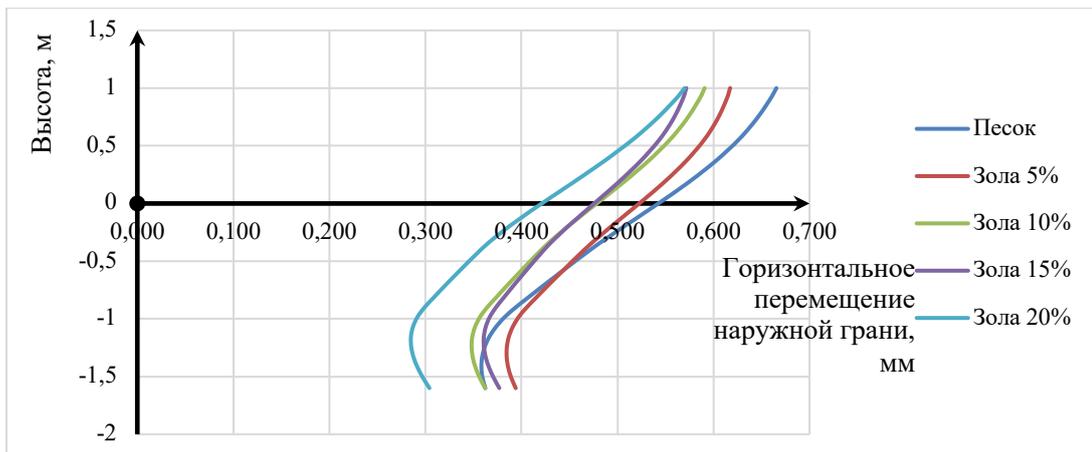


Рисунок 10. Значения горизонтальных перемещений наружной поверхности подпорной стены высотой 1 метр при действии временной нагрузки на призме обрушения

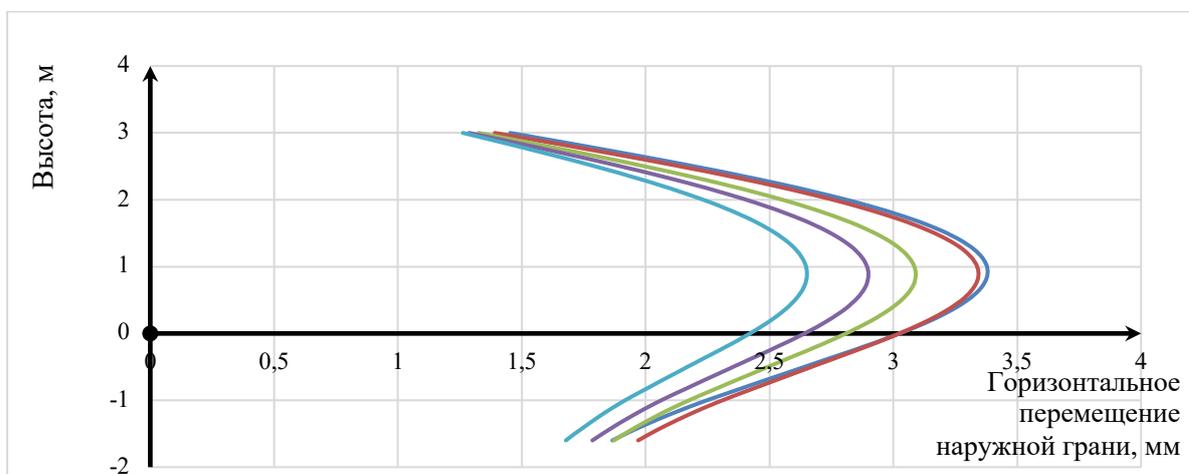


Рисунок 11. Значения горизонтальных перемещений наружной поверхности подпорной стены высотой 3 метра при действии временной нагрузки на призме обрушения

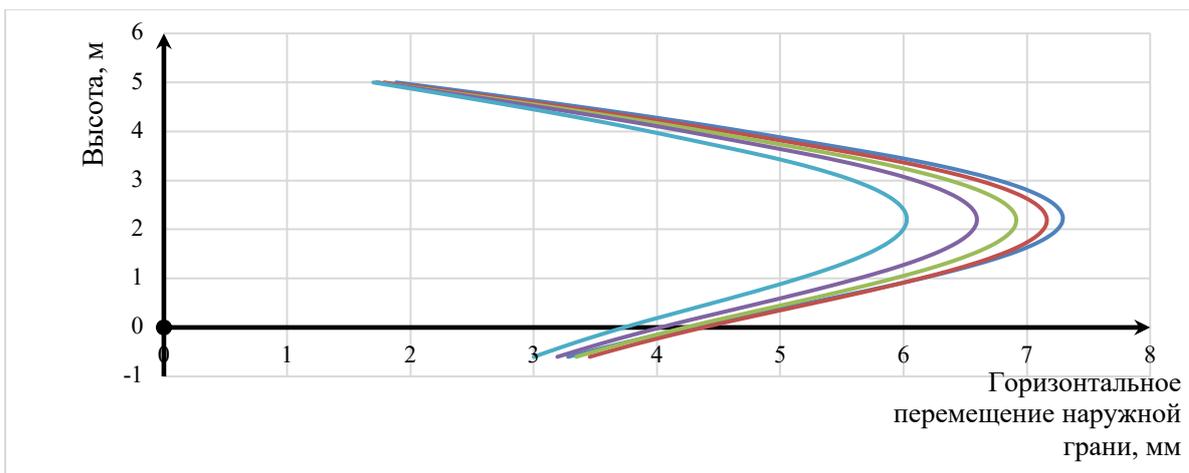


Рисунок 12. Значения горизонтальных перемещений наружной поверхности подпорной стены высотой 5 метров при действии временной нагрузки на призме обрушения

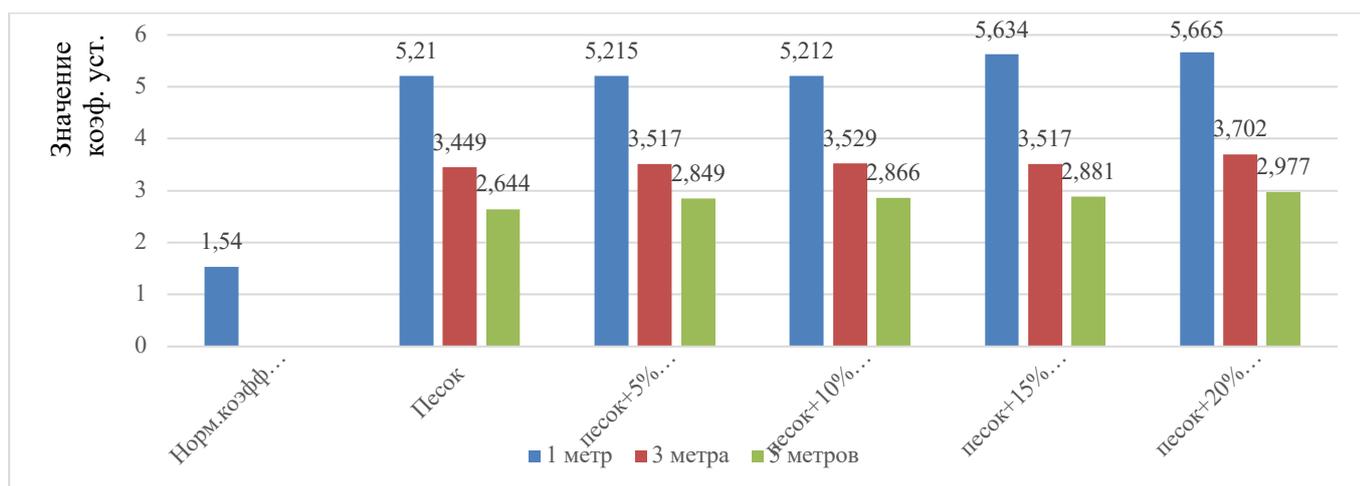


Рисунок 13. Значения коэффициентов устойчивости при изменении физико-механических свойств грунтов обратной засыпки

Определения коэффициентов устойчивости подпорных стен разной высоты и с разным процентным соотношением золы-уноса и песка позволяют сделать выводы об эффективности применения «улучшенного» грунта: при высоте тонкостенной подпорной конструкции от 6 метров и более коэффициент устойчивости не превышает нормативного и устойчивость склона не обеспечивается, это свидетельствует об оптимальности применения золы-уноса для подпорных стенок небольшой высоты (5 метров).

Повышение значений коэффициентов устойчивости нелинейны в связи с одновременным уменьшением угла внутреннего трения пропорционально количеству добавляемой золы, и увеличением удельного сцепления.

Для наглядного восприятия работы подпорной стены различных высот с грунтом обратной засыпки с различным содержанием золы-уноса целесообразно вывести эпюры изгибающих моментов для исследуемой конструкции, которые отражают направление и значение изгибающихся волокон подпорной стены от приложенной нагрузки.

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.

Предварительные размеры конструкции облицовки 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.

В таблице 3 представлены значения максимальных изгибающих моментов в сечении тонкостенной подпорной стены (толщиной 0,155 м). Значения получены с

помощью программного комплекса PLAXIS, расчеты выполнены на основе использования модели Мора-Кулона.

Таблица 3. Величины изгибающих моментов в сечении тонкостенной подпорной стены

| Высота стены, м / Содержание зола, % | 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 зола в грунте обратной засыпки при заданной высоте подпорной стены, определено, что зависимость не линейна, хотя тенденция к этому имеется.

При трехметровой подпорной стенке прослеживается явное уменьшение момента с добавлением зола в грунт обратной засыпки с дальнейшим уменьшением значения момента, зависимость близка к линейной. При увеличении высоты подпорной стены происходит общее увеличение значение 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 стены, 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 стены 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 зола 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.

Для определения эффективности также были проведены расчеты подбора арматуры исследуемых подпорных стен, в том числе проверка конструкций на

образование трещин и ширину их раскрытия. Методики расчета были приняты на основании СП 63.13330.2012, исходя из полученных в программном комплексе значений максимальных изгибающих моментов.

Результаты расчетов показали, что при высоте подпорных стен 3 и 4 метра расчетная арматура не изменяется от значений добавления зол уноса, при высоте подпорной стены 5 метров с применением в обратной засыпке грунтом с содержанием 20% зол приводит к уменьшению площади армирования на 5,6%.

В четвертой главе проведен анализ применения золы-уноса с экономической точки зрения путем определения сметной стоимости работ.

Экономическая обоснованность применения того или иного продукта играет не маловажную роль в решении о внедрении новых технологий в производство, именно поэтому с целью всесторонней оценки способа укрепления песка золой-уноса выполнены сметные расчеты, включающие в себя работы по внесению золы-уноса в грунт, работы по устройству и возведению подпорной стены.

Сметная стоимость работ по устройству одного погонного метра подпорной стены с различными вариантами засыпок представлена на рисунке 14. Локальные сметные расчеты выполнены в уровне цен по состоянию на 1 января 2000 г с переводом стоимости строительно-монтажных работ в текущие цены при помощи индексов пересчета сметной стоимости строительно-монтажных работ за II квартал 2022 г. В расчетах была принята стоимость золы-уноса, равная 110 рублей/ м³, что соответствует уровню средних цен зол-уноса Рефтинской ГРЭС в Пермском крае и данное значение может варьироваться в зависимости от объема и региона.

Наиболее экономически эффективным вариантом является использование грунта с добавлением золы-уноса 20% по массе в сравнении с другими вариантами засыпок с содержанием золы-уноса. 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 стоимостью 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 повышается на 32,36 %, но не изменяется при использовании другого количества по массе и связана лишь с необходимостью смешивания грунта обратной засыпки 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.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих печатных работах:

работы в рецензируемых научных изданиях:

1. Кашапова, К.Р. (Истомина, К.Р.) Результаты модельных испытаний по определению горизонтальных деформаций армогрунтовых подпорных стен / К.Р. Кашапова (К.Р. Истомина), В.И. Клевеко // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика. – 2016. – № 4 (24). – С 128-140. (К2)

2. Истомина, К.Р. Исследование работы подпорных конструкций с обратной засыпкой из армированного грунта, а также с использованием обратной засыпки из

фиброармированной золой уноса / К.Р. Истомина, А.М. Бургонутдинов, В.И. Клевеко // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. – 2019. – № 3. – С. 15-22. (К2)

3. Истомина, К.Р., Бургонутдинов А. М., Хусаинова К. А. Возможные технологии использования золы уноса / К.Р. Истомина, А.М. Бургонутдинов, К.А. Хусаинова // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. – 2022. – № 1. – С.36-44. (К2)

печатные работы в других изданиях:

4. Кашапова, К.Р. (Истомина, К.Р.) Результаты модельных испытаний подпорной стены с засыпкой из песчаного грунта // Современные технологии в строительстве. Теория и практика. – 2016. –Т.1 – С. 174-180.

5. Кашапова, К.Р. (Истомина, К.Р.) Планирование модельных экспериментов по исследованию работы подпорных стен, армированных горизонтальными геосинтетическими прослойками // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. – 2016. – Т.7. – № 1. – С.30-38.

6. Истомина, К.Р., Исследование работы армогрунтовых подпорных конструкций с использованием геосинтетических материалов на автомобильных дорогах / К.Р. Истомина, А.М. Бургонутдинов // Техника и технология транспорта. – 2019. – № 5. – С.8-12.

7. Istomina, K.R. Thin-wall retaining structure operation with reinforced soil backfill using Fly ash / K.R. Istomina, A.M. Burgonutdinov. // Smart Composite in Construction. – 2022. – Т. 3. – № 4. – С.7-17.

8. Istomina, K.R. Experimental studies of physical and mechanical processes in seasonally frozen soils of constructions of automobile roads []/ K. R. Istomina, A. M. Burgonutdinov. V. I. Kleveko // Construction and Geotechnics. – 2022. –Т.13. – № 3. – С.98-106.