

На правах рукописи



ВАСИЛЬЕВА Анастасия Дмитриевна

**ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ
УСТОЙЧИВОСТИ ВЫСОКИХ ОТВАЛОВ УГОЛЬНЫХ
МЕСТОРОЖДЕНИЙ КУЗБАССА**

*Специальность 25.00.16 – Горнопромышленная
и нефтегазопромысловая геология, геофизика,
маркшейдерское дело и геометрия недр*

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Санкт-Петербург – 2020

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет».

Научный руководитель:

доктор технических наук профессор **Кутепов Юрий Иванович**

Официальные оппоненты:

Бахаева Светлана Петровна,

доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева», кафедра маркшейдерского дела и геологии, профессор

Ческидов Василий Владимирович,

кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Горный институт, заместитель директора

Ведущая организация – открытое акционерное общество «Всероссийский научно-исследовательский институт по осушению месторождений полезных ископаемых, защите инженерных сооружений от обводнения, специальным горным работам, геомеханике, геофизике, гидротехнике, геологии и маркшейдерскому делу», г. Белгород.

Защита диссертации состоится 25 июня 2020 года в 11 часов 00 мин. на заседании диссертационного совета ГУ 212.224.08 Горного университета по адресу 199106, Санкт-Петербург, 21-я линия, д. 2, ауд. 1171а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Горного университета и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 24 апреля 2020 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



КУЗИН
Антон Александрович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Интенсификация открытого способа разработки угольных месторождений в РФ сопровождается возрастанием объемов перемещаемых в отвалы вскрышных пород. Только в Кузбассе в 2018 году для обеспечения открытой добычи 165,8 млн. тонн угля в отвальные горнотехнические сооружения было перемещено порядка 1,8 млрд. тонн пустой породы, для чего потребовалось дополнительно изъять из сферы сельского и лесного хозяйства 1500-2000 га земли. Ужесточение экологических требований по размещению отходов горных производств приводит к образованию дефицита площадей под отвалообразование. Особенно остро данная проблема проявляется в районах длительной и интенсивной разработки угольных месторождений, где ближайшие к горным выработкам площади уже заняты отвалами и другими инфраструктурными объектами. Одним из путей ее решения является увеличение емкости и высоты существующих отвальных массивов. Однако на действующих многие десятилетия угольных разрезах региона высоты внешних отвалов в настоящий момент времени достигли 100 м, поэтому дальнейшее их наращивание ведет к формированию сверхвысоких отвальных объектов. На передовых предприятиях бассейна уже приняты в работу проекты 300-метровых отвалов и рассматриваются перспективы дальнейшего увеличения их высот до 500 и более метров. Создание высоких и сверхвысоких горнотехнических сооружений предопределяет постановку различных инженерно-геологических и геомеханических научно-практических задач, без решения которых обеспечить безопасность и технико-экономическую эффективность отвалообразования не представляется невозможным.

Степень разработанности проблемы. Оценке устойчивости отвалов и инженерно-геологическому изучению техногенных массивов посвящены работы Г.Л. Фисенко, В.А. Бабелло, С.П. Бахаевой, А.М. Гальперина, Р.Э. Дашко, А.В. Жабко, В.Г. Зотеева, О.В. Зотеева, И.П. Иванова, Ю.Н. Кириченко, А.В. Киянца, Ю.И. Кутепова, Н.А. Кутеповой, В.В. Мосейкина, С.И. Протасова, Е.В. Сергиной, В. В. Ческидова, П.С. Шпакова и др. Среди зарубежных авторов, занимавшихся вопросами устойчивости откосов, можно выделить исследования N. Morgenstern, E. Spenser, S. Sarma, N. Janbu, H. Klapperih,

N. Tamashkovich. Следует отметить, что выполненные ранее исследования практически не рассматривали отвалы более 100 м. Однако участвовавшие в последнее годы аварии при формировании высоких отвальных сооружений, сопровождающиеся большими экологическими и экономическими ущербами, а иногда и человеческими жертвами, свидетельствуют о недостаточной изученности инженерно-геологических условий данных объектов и геомеханических процессов, протекающих в них.

Объектами исследования являются проектируемые и эксплуатируемые высокие и сверхвысокие отвальные сооружения открытой разработки угольных месторождений Кузнецкого бассейна.

Предметом исследования являются физико-механические и фильтрационные свойства техногенных и естественных пород природно-технических систем (ПТС) «отвал-основание», процессы, определяющие их формирование, а также факторы, влияющие на устойчивость высоких отвалов.

Целью работы является изучение инженерно-геологических условий формирования высоких отвалов на разрезах Кузбасса для обеспечения их устойчивости и промышленной безопасности.

Задачи исследования:

1. Анализ и систематизация данных о инженерно-геологических и гидрогеологических условиях внешних отвалов Кузбасса.
2. Разработка типизации внешних отвалов угольных месторождений Кузбасса для обоснования их устойчивости.
3. Изучение влияния природных и техногенных факторов на прочностные и фильтрационные свойства насыпных пород в отвальных массивах.
4. Изучение закономерностей изменения прочностных свойств и напряженного состояния неоген-четвертичных отложений в основаниях высоких отвалов.

Идея диссертационной работы заключается в использовании при обосновании параметров высоких отвалов предложенной инженерно-геологической типизации, выявленных закономерностей изменения прочностных и фильтрационных свойств техногенных и естественных пород при увеличении высоты отвалов, а также установленных гидродинамических и гидрогеомеханических процессов в природно-технической системе «отвал-основание».

Методология и методы исследований. В работе использован комплексный подход к решению задач, включающий системный анализ научной и нормативно-методической литературы, лабораторные и натурные методы исследований физико-механических и фильтрационных свойств, аналитические методы механики грунтов и математическое моделирование напряженно-деформированного состояния (далее – НДС) пород, опытно-промышленные испытания.

Положения, выносимые на защиту:

1. Обоснование параметров отвалов следует производить с учетом предложенной инженерно-геологической типизации, учитывающей высоту сооружений, возраст, литологический состав и прочностные свойства вскрышных пород, геоморфологические и инженерно-геологические условия основания, гидрогеологическую структуру ПТС «отвал + основание».

2. Увеличение высоты отвалов сопровождается интенсификацией процессов уплотнения с изменением дисперсности, прочности и проницаемости насыпных отложений, что приводит к ухудшению условий устойчивости откосов техногенных массивов за счет уменьшения углов внутреннего трения пород и действия гидродинамических сил от сформировавшегося водоносного горизонта.

3. Дисперсные глинистые отложения различной консистенции в основаниях формируемых высоких отвалов подвергаются процессам консолидации с закономерным изменением прочностных свойств в диапазоне возрастающих нормальных нагрузок до 1,2-1,5 МПа, после чего изменения параметров сопротивления сдвигу не происходит.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Установлены закономерности изменения гранулометрического состава, прочностных и фильтрационных свойств техногенных отложений отвальных массивов, сформированных из вскрышных углевмещающих пород различного возраста, степени литификации, исходной прочности, с различным составом межчастичного цемента и соотношением в смесях литологических разностей.

2. Выявлены закономерности изменения прочностных свойств глинистых отложений неоген-четвертичного возраста в основаниях высоких отвалов.

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Выполнено определение расчетных показателей физико-механических и фильтрационных свойств техногенных и естественных пород высоких отвалов Кузбасса.

2. Обоснованы рекомендации по параметрам, технологии и гидрогеомеханическому мониторингу безопасности формирования высоких отвалов Кузбасса.

3. Разработана типизация условий устойчивости внешних отвалов Кузбасса.

Степень достоверности научных положений, выводов и рекомендаций обусловлена сходимостью результатов определения прочностных и фильтрационных свойств пород, отобранных из ПТС «отвал+основание» и полученных при лабораторном моделировании, а также применением современных методов компьютерного моделирования напряженно-деформированного состояния массива, опытно-промышленным внедрением результатов исследований.

Апробация работы. Основные результаты диссертационного исследования докладывались на Международных научных симпозиумах «Неделя Горняка» (МГГУ, Москва, 2016, 2017, 2018, 2019 гг.), XVII Международной молодежной научной конференции «СЕВЕР-ГЕОЭКОТЕХ-2016» (УГТУ, Ухта, 2016 г.), Международном форуме горняков и металлургов (ТУ Фрайберг, Фрайберг, Германия, 2016, 2017 гг.), Международных молодежных научных форумах «Ломоносов» (МГУ, Москва, 2016, 2017 гг.), VIII Международной научно-практической конференции «Инновационные направления в проектировании горнодобывающих предприятий: Геомеханическое обеспечение проектирования и сопровождения горных работ» (СПГУ, Санкт-Петербург, 2017 г.), Международном европейском симпозиуме Eurock-2018 (СПГУ, Санкт-Петербург, 2018 г.), X Международной конференции «Комбинированная геотехнология: переход к новому технологическому укладу» (МГТУ, Магнитогорск, 2019 г.), заседаниях Научного центра геомеханики и проблем горного производства Санкт-Петербургского горного университета.

Личный вклад автора заключается в постановке и формулировании цели и задач исследования; разработке типизации инженерно-геологических условий внешних отвалов Кузбасса; выполнении инженерно-геологического изучения техногенных отвальных пород и

естественных пород основания высоких отвалов; установлении закономерностей изменения прочностных и фильтрационных свойств техногенных пород с ростом нагрузок уплотнения; выполнении расчетов устойчивости отвалов и моделировании НДС природно-технической системы (ПТС) «отвал + основание».

Реализация выводов и рекомендаций работы. Результаты диссертационного исследования использовались при разработке проектов по обоснованию параметров высоких отвалов угольных месторождений ОАО «Кузбассразрезуголь» (акт внедрения от 11.07.2019 получен от АО «УК «Кузбассразрезуголь») и могут быть использованы АО «СУЭК-Кузбасс», ПАО «КТК».

Публикации. Результаты диссертационной работы в достаточной степени освещены в 9 печатных работах, в том числе 2 статьи в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее – Перечень ВАК), 1 статья в издании, входящем в международную базу данных и систему цитирования Scopus.

Объем и структура работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 130 наименований, изложенных на 186 страницах машинописного текста, содержит 10 таблиц, 52 рисунка, 2 приложения.

Автор выражает глубокую благодарность научному руководителю, д.т.н., профессору Ю.И. Кутепову, а также искреннюю признательность д.т.н. Н.А. Кутеповой, коллективу Научного центра геомеханики и проблем горного производства, а также специалистам АО «УК «Кузбассразрезуголь» за помощь в проведении исследований и ценные советы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, ее цель, идея, задачи и научная новизна, а также защищаемые положения, практическая значимость проводимых исследований, личный вклад автора.

В **первой главе** дана характеристика современных условий формирования отвалов на угольных месторождениях Кузбасса, проведен анализ изученности вопроса инженерно-геологического обеспечения

устойчивости высоких отвалов открытой разработки угольных месторождений, поставлены цели работы.

Вторая глава посвящена обоснованию типизации условий устойчивости отвалов угольных месторождений Кузбасса. Рассмотрены основные факторы, определяющие современное состояние откосов высоких техногенных массивов, представлен анализ фактических и проектных параметров отвальных сооружений.

В **третьей главе** описаны установленные закономерности изменения физико-механических и фильтрационных свойств техногенных пород различных генетических типов и вещественного состава в процессе возведения высоких отвалов.

В **четвертой главе** представлены выявленные закономерности изменения естественных глинистых пород в основании высоких отвалов, а также рассмотрены гидрогеомеханические процессы в породах основания отвалов.

В **заключении** работы приводятся выводы и рекомендации.

Основные результаты исследований отражены в защищаемых положениях.

Первое защищаемое научное положение: *Обоснование параметров отвалов следует производить с учетом предложенной инженерно-геологической типизации, учитывающей высоту сооружений, возраст, литологический состав и прочностные свойства вскрышных пород, геоморфологические и инженерно-геологические условия основания, гидрогеологическую структуру природно-технической системы «отвал + основание».*

Отвальные работы на разрезах Кузбасса осуществляются с 1948 года применением автомобильного и железнодорожного транспорта, бестранспортной и гидравлической технологий. В настоящее время преобладающим транспортом доставки пород до отвала является автомобильный с долей 97,3 % в общем объеме вывозимых пород, а основной тип отвальных горнотехнических сооружений - внешние отвалы. Их площади изменяются от первых десятков до нескольких сотен гектар, а высоты от 15 до 160 м при углах откосов от 40° до 12°. Последними проектами наращивания отвалов на разрезах «Бачатский» и «Талдинский» предусматривается формирование сооружений высотой 300 м на площадях более 1000 га при емкостях до 2,5 млрд. м³.

Предлагаемая типизация разрабатывалась для условий Кузнецкого угольного бассейна и учитывает литолого-геологические особенности региона. В отвальные горнотехнические сооружения перемещаются вскрышные породы балахонской ($C_{2-3} - P_1$) и кольчугинской серий (P_2), а также неоген-четвертичные покровные отложения. Литологически углевмещающая толща представлена переслаиванием песчаников, алевролитов, аргиллитов и углей различных марок от Д до К. Для балахонской серии характерен карбонатный и карбонатно-сидеритовый типы цементов, который на стадии вторичных преобразований углевмещающей толщи активно замещал полевые шпаты, что привело к дополнительным спайкам между первичным цементом и минеральными обломками и, соответственно, значительному повышению прочности пород. Породы кольчугинской серии находятся на более низкой стадии катагенеза, что выражается наличии глинистого цемента, соответствующего стадии метаморфизма углей Д и Г.

Физико-механические свойства пород углевмещающей толщи, поступающие после разрушения, погрузки и транспортировки в отвал в виде обломочных дезинтегрированных разностей, определяются во многом возрастом отложений, составом и типом цемента исходных вскрышных пород, а также их прочностью. Для сравнительного анализа пород различного возраста были выбраны типовые месторождения, разрабатывающие отложения балахонской и кольчугинской серий. Анализ технических проектов, научно-исследовательских работ и специальной геологической литературы позволил актуализовать геологическую схему бассейна, учитывающую распространение пород двух основных угленосных серий, разрабатываемых открытым способом (рисунок 1¹).

Углевмещающие отложения балахонской и кольчугинской серий согласно инженерно-геологической классификации в соответствии с ГОСТ 25100-2011 относятся к скальным породам II и III типа по прочности на одноосное сжатие.

Верхняя часть разреза Кузбасса представлена неоген-четвертичными отложениями, покрывающими чехлом практически повсеместно равнину и предгорье. Они перемещаются в отвалы и служат их основанием, во многом определяя устойчивость откосов.

¹ Рисунки и таблицы приведены на вклейке

Территория бассейна по углу наклона рельефа и мощности покровных отложений условно делится на три района:

- северный, характеризующийся углами наклона склонов 0° - 8° и мощностями неоген-четвертичных отложений от 10 до 40 м;

- центральный, имеющий практически горизонтальную поверхность (0° - 3°) и наибольшую мощность покровных отложений от 30 до 80 м (местами до 100 м);

- южный, характеризующийся крутизной склонов до 12° и минимальной для условий региона мощностью пород от 5 до 20 м.

В разработанной типизации предложено в качестве одного из критериев оценки инженерно-геологических условий устойчивости, использовать крутизну основания, выделяя пологое (до 3°), наклонное (3° - 6°) и крутонаклонное (6° - 9°) основание.

Гидрогеологические условия в типизации предлагается разделять на простые, средние и сложные, характеризующиеся соответственно отсутствием, наличием одного или нескольких водоносных горизонтов с безнапорным и напорным режимом фильтрации как в теле техногенного массива, так и в его основании.

По высоте отвалы Кузбасса наиболее целесообразно разделять на: низкие (до 50 м), средней высоты (50-100 м) и высокие (более 100 м).

Основной целью предлагаемой типизации (таблица 1) является идентификация инженерно-геологических условий формирования ПТС «отвал+основание» для последующего прогнозирования характерных для подобного типа сооружений гидрогеомеханических процессов, а также разработки на стадии проектирования сооружений рекомендаций по технологии отвалообразования и предложений по составу и методике ведения мониторинга для конкретных типов отвальных массивов.

Поскольку предметом научного исследования являются высокие внешние отвалы Кузбасса, то наиболее распространенными типами в регионе являются, например, I-B-2-б-ii (Вахрушевский угольный разрез (УР)), I-B-2-б-iii (Бачатский УР, Кедровский УР), I-B-3-б-ii (Калтанский УР), I-B-3-б-iii (Бачатский УР) и II-B-2-б-ii (Моховский УР), II-B-2-б-iii (Талдинский УР), II-B-3-б-ii (Виноградовский УР), II-B-3-б-iii (Заречный УР, Виноградовский УР). Данные объекты в той или иной степени рассматривались в представленной диссертационной

работе как с позиции оценки их инженерно-геологических условий, так и для обоснования устойчивых параметров.

Второе защищаемое научное положение: *Увеличение высоты отвалов сопровождается интенсификацией процессов уплотнения с изменением дисперсности, прочности и проницаемости насыпных отложений, что приводит к ухудшению условий устойчивости откосов отвальных массивов за счет уменьшения углов внутреннего трения пород и действия гидродинамических сил от сформировавшегося техногенного водоносного горизонта.*

Изучение влияния величины нормальной нагрузки на гранулометрический состав и получаемые показатели прочностных свойств отвальных пород было основной задачей выполненных исследований. Исходным материалом для проведения лабораторных экспериментов послужили образцы пород из вскрышной толщи трех угольных разрезов Кузбасса: «Заречный», «Талдинский» и «Бачатский», представленные песчаниками, алевролитами и аргиллитами углевмещающей толщи, а также покровными неоген-четвертичными суглинками.

Разрезы «Заречный» и «Талдинский» разрабатывают Талдинское каменноугольное месторождение, сложенное угольными пластами кольчугинской серии, а разрез «Бачатский» относится к группе месторождений Присалаирской зоны интенсивной складчатости, где отработываемые продуктивные пласты приурочены к отложениям балахонской серии. Верхние части разрезов данных месторождений сложены неоген-четвертичными отложениями - преимущественно суглинками и глинами эолового, делювиально-пролювиального и аллювиального генезиса. Во внешних отвалах разрезов «Талдинский» и «Бачатский» содержание неоген-четвертичных пород минимально и не превышает 10%, что связано с применением гидромеханизации, обеспечивающей селективное складирование покровных отложений в гидроотвалы. В отвалы разреза «Заречный» поступает около 40 % неоген-четвертичных суглинков и глин, так как гидравлическая схема складирования на данном предприятии не применялась.

Изучение прочностных свойств отвальных смесей производилось на одноплоскостных приборах с использованием схем неконсолидированно-недренированного и консолидированно-недренированного сдвига. Перед проведением испытаний образцы скальных пород дро-

бились до фракции по крупности $d=1-2$ мм и $d=2-5$ мм, которые в последующем смешивались в различном соотношении и подвергались испытаниям на сдвиг в приборах с площадями испытательных камер 40 см^2 (BCB-25M) и 177 см^2 (GCTS RDS-200), соответственно. Вертикальные нагрузки изменялись в диапазоне от 0 до 2,5 МПа. Для изучения влияния размера фракций на получаемые прочностные характеристики до и после проведения сдвиговых испытаний выполнялось определение грансостава смеси ситовым способом. Кроме того, в лабораторных условиях выполнялись сдвиговые испытания, а также изучение гранулометрического состава и физических свойств пород на образцах, отобранных при бурении на отвалах инженерно-геологических скважин.

В результате выполненных сдвиговых опытов получены следующие закономерности изменения прочностных свойств пород: - величины сцепления незначительно возрастают, а угол внутреннего трения пород уменьшается с увеличением нормальной нагрузки, имитирующей давление возрастающего по высоте отвала (таблицы 2, 3). Наиболее интенсивное изменение изучаемых параметров происходит на начальном этапе нагружения от 0 до 1 МПа, что связано с уплотнением пород. Уменьшение углов внутреннего трения техногенных пород при нагрузках более 1 МПа обусловлено разрушением обломков испытываемого материала при преодолении предела их прочности на сжатие и изменением его гранулометрического состава (увеличением дисперсности).

Эксперименты позволили зафиксировать факт увеличения содержания пылеватой фракции на 20% и изменение максимального размера зерен с 5 до 2 мм. Изменение фракционного состава материала из вскрышных пород балахонской и кольчугинской серий с ростом нагрузки уплотнения приведены на рисунках 2, 3. Анализируя полученные графики, следует отметить наличие двух значимых резких изменений грансостава при различных нагрузках. Так, для смесей песчаников и алевролитов кольчугинской серии изменения фракционного состава происходят при нагрузках 0,5 и 1,2 МПа, что соответствует примерно высотам отвалов 30 и 65 м, а для пород балахонской серии – нагрузкам 1,5 и 2,7 МПа, соответствующим высотам отвалов 85 и 150 м. Следует также отметить, что песчаники обеих серий более

подвержены процессам дезинтеграции под воздействием вертикальных давлений, чем аргиллиты и алевролиты. Это обстоятельство позволяет сделать вывод о том, что отвалы, сложенные преимущественно песчаниками, будут более подвержены изменению фракционного состава при увеличении высоты.

Формирование специфических техногенных образований в отвалах Кузбасса происходит при совместном складировании обломочного материала скальных углевмещающих пород и покровных дисперсных отложений. В зависимости от соотношения данных материалов происходит формирование пород различного состава, который определяет их прочностные свойства. Выполненные исследования позволили получить закономерности изменения сцепления и угла внутреннего трения отвальных пород в зависимости от количества глинистого наполнителя и нагрузки уплотнения.

Уменьшение среднего диаметра частиц скального материала и увеличение в пропорции содержания глинистого наполнителя приводят к уменьшению проницаемости пород отвального массива, а при наличии определенного инфильтрационного питания – ведет, на фоне затрудненного режима водоотведения из отвального массива, к формированию безнапорного водоносного горизонта, гидродинамика которого во многом определяет состояние устойчивости откосов.

На основании экспериментальных данных и математического моделирования было установлено пороговое значение коэффициента фильтрации 2,5 м/сут (рисунок 4), при котором уровень обводнения в отвале превышает 20%, что существенно снижает коэффициент запаса устойчивости горнотехнического сооружения, иногда, ниже нормативного значения, а в определенных случаях - до единицы, когда происходит развитие оползней. Моделированием геофильтрации в откосах отвалов высотой более 150 метров установлено образование техногенного водоносного горизонта, обводняющего массив на 60-80 % при коэффициенте фильтрации 0,02 м/сут.

Выполнены многочисленные исследования состава, прочностных и фильтрационных свойств техногенных отвальных пород в зависимости от литологических особенностей складированного в отвалы исходного материала, соотношения различных литологических разновидностей и нагрузки уплотнения (высоты отвала). Существенное снижение угла внутреннего трения техногенных пород и, соответственно,

ухудшение условий устойчивости отвалов, отмечается при возрастании высоты отвалов свыше 100 м. Уплотнение пород при увеличении высоты отвала приводит к уменьшению их проницаемости и формированию водоносного горизонта, взвешивающие силы которого снижают устойчивость откоса отвала.

Третье защищаемое научное положение: Дисперсные глинистые отложения различной консистенции в основаниях формируемых высоких отвалов подвергаются процессам консолидации с закономерным изменением прочностных свойств в диапазоне возрастающих нормальных нагрузок до 1,2-1,5 МПа, после чего изменения параметров сопротивления сдвигу не происходит.

В рамках диссертационного исследования проводилось изучение глинистых пород, залегающих в основаниях внешних отвалов, включая естественные отложения аллювиального, делювиально-пролювиального и эолового генезисов, а также техногенные намывные образования. Проведены лабораторные определения прочности пород на монолитах и образцах нарушенного сложения, отобранных в различных условиях конкретных отвалов: на непригруженных и нагруженных отвалами основаниях, а также на оползневых участках. Исследования включали также изучение гранулометрического состава и физических свойств пород стандартными методами.

В результате выполненных сдвиговых опытов установлено, что под действием нагрузки от отвала породы основания, имея первоначально различные консистенции – от текучей до полутвердой, при определенной нормальной нагрузке уплотнялись до твердого состояния, проходя все стадии консолидации. Изменение консистенции пород сопровождалось увеличением показателей сцепления как для пород нарушенного сложения (техногенно-образованных и техногенно-преобразованных), так и естественных пород. Установлено, что в диапазоне нормальных нагрузок до 1,2-1,5 МПа отмечается различие в показателях сцепления неоген-четвертичных и техногенных пород на величину 10-20 кПа, что связано с наличием структурной прочности у естественных пород. При достижении нормальных нагрузок 1,2-1,5 МПа данных различий в значениях сцепления естественных и техногенных пород практически не наблюдается, а величина сцепления характеризуется постоянным значением $c=70-80$ кПа (рисунок 5). Это

объясняется тем, что при таких нагрузках механические и физико-химические процессы, обуславливающие возможность уплотнения и упрочнения пород (разрушение жестких структурных связей, тектурная перестройка, сокращение пористости, удаление свободной и рыхлосвязанной воды) реализуются; различия между техногенными и естественными породами стираются, их можно отнести к одному типу техногенно-нарушенных отложений. Дальнейшего уплотнения пород в основании отвала при возрастающих нагрузках не происходит, так как при действующих напряжениях нет возможности удалить связанную воду, оставшуюся в них. Можно считать, что нагрузка 0,9 МПа для исследуемых пород Кузбасса соответствует физико-химическому резерву уплотнения. С точки зрения решаемой задачи это означает, что после ее достижения прочностные параметры пород можно принять постоянными на дальнейшие периоды формирования и эксплуатации горнотехнического сооружения.

Выполненные исследования прочности пород в основании высоких отвалов позволили также установить зависимости изменения углов внутреннего трения с ростом нагрузки уплотнения. На рисунке 5 приведена обобщенная зависимость, характеризующая четырем характерными участками. Первый участок - диапазон нагрузок 0-0,25 МПа - показывает нарастание угла внутреннего трения в связи с уменьшением влажности и возрастанием плотности пород, следующий диапазон нагрузок – 0,25-0,5 МПа – характеризуется максимальными и практически постоянными углами внутреннего трения пород, далее при достижении нагрузки 1,2-1,5 МПа отмечена тенденция уменьшения, а при её преодолении – достижение постоянного значения параметра 10-12 градусов.

Объяснить данные тенденции уплотнения-упрочнения глинистых пород с ростом нормальной нагрузки можно с позиции влияния микроструктуры на показатели прочности пород. Известно, что при сдвиге глинистых пород происходит переориентация частиц в направлении приложения касательной нагрузки – проявляется переориентация частиц по типу «базис-базис». При приложении нормальной нагрузки также наблюдается переориентация частиц в направлении, перпендикулярном вертикальной нагрузке. Поэтому при сдвиге пород с более ориентированным микростроением затрачивается

больше энергии, чем для менее ориентированных. Данное обстоятельство объясняет установленную закономерность изменения угла внутреннего трения пород с ростом уплотняющей нагрузки: в диапазоне нагрузок от 0,3 до 1,5 МПа происходит постепенное формирование ориентированной структуры, что приводит к изменению угла внутреннего трения до 12 градусов, после чего данный параметр не изменяется и остается постоянным.

Выполненные расчеты устойчивости высоких отвалов свидетельствуют о том, что наибольшее значение в балансе сил при формировании удерживающей их составляющей оказывает угол внутреннего трения.

Весьма важным при оценке устойчивости откосов отвалов на слабом основании является прогнозирование в них гидрогеомеханических процессов – процессов изменения напряженно-деформированного состояния пород при развитии избыточного порового давления, снижающего эффективные напряжения в скелете и, соответственно, прочностные свойства пород.

Особенно важным для случаев отвалообразования на водонасыщенном основании является изучение формирования избыточного порового давления в нагружаемых естественных и техногенных породах различной влажности и консистенции. В нагружаемых отвалами намывных техногенных породах текучей и мягкопластичной консистенции наблюдается формирование порового давления, величина которого близка к нагрузке от веса отвальной насыпи. После прекращения отсыпки происходит изменение сформировавшегося в массиве основания поля нейтральных напряжений, сопровождающееся рассеиванием порового давления, ростом эффективных напряжений в нагружаемых породах и увеличением их прочности.

Величина избыточного порового давления в основании формирующегося отвала зависит также от режима отсыпки отвальных насыпей. При фронтальной отсыпке отвала наблюдается образование значительного по величине избыточного порового давления в породах основания не только под контуром нагружения, но и в непригруженной его части впереди отвального фронта. Данное обстоятельство существенно осложняет устойчивость откосов отсыпаемого яруса. При вертикальном развитии отвалов отсыпкой отдельных ярусов избыточное поровое давление в основании может накапливаться за счет

суммирования оставшейся его части от отсыпки предыдущего яруса, которое не рассеялось к началу отсыпки следующего яруса, и вновь образованного давления при нагружении нового яруса. Таким образом, при интенсивном формировании отвалов по площади и высоте необходимо учитывать образующееся в основании избыточное поровое давление, которое существенно влияет на их устойчивость и параметры.

Разнообразие инженерно-геологических условий оснований отвалов предопределяет постановку самостоятельных сложнейших проблем изучения и прогноза избыточного порового давления в нагружаемых глинистых породах. При выполнении конкретных работ по обоснованию оптимальных параметров отвалов на водонасыщенном основании предлагается использовать гидрогеомеханический мониторинг безопасности, который позволяет с помощью специальной аппаратуры контролировать развитие в породах откосных частей отвальных сооружений избыточное поровое давление. В работе сформулированы основные принципы организации мониторинга порового давления и приведены некоторые результаты его выполнения на отвалах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследований представляют собой законченную научно-квалификационную работу, в которой дано решение актуальной проблемы - инженерно-геологическое обоснование устойчивости высоких отвалов угольных месторождений Кузбасса

Основные научные и практические результаты работы:

1. Выполненный анализ условий отвалообразования на разрезах Кузбасса позволяет отметить следующее:

- основной объем вскрышных пород (до 97,3 %) размещается во внешние отвалы с применением автосамосвалов и бульдозеров;

- отвалы характеризуются площадями от десятков до нескольких сотен га при высотах - от 15 до 160 м и углах откосов от 40° до 12°;

- при формировании отвальных насыпей наиболее значительные деформации (объемом до 27 млн. м³) происходят по типу подпошвенных оползней. Рассмотрена изученность вопроса инженерно-геологического обоснования устойчивости отвальных насыпей, позволившая установить недостаточность исследований высоких отвалов.

2. Открытая угледобыча в бассейне ведется на месторождениях, сложенных переслаиванием пластов песчаника, алевролита, аргиллита и угля балахонской и кольчугинской серий, отличающихся по возрасту, степени литификации, составу межчастичного цемента, исходной прочности пород. Верхняя часть геологического разреза сложена суглинками и глинами неоген-четвертичного возраста, различного генезиса, состояния и свойств. В геоморфологическом отношении рельеф районов размещения отвалов пологий и наклонный. Произведенный анализ природных условий позволил разработать типизацию внешних отвалов, основной целью которой является идентификация типа техногенных массивов для последующей оценки устойчивых параметров отвалов.

3. Рассмотрен процесс техногенеза пород отвалов под воздействием определяющих факторов природного и техногенного характера. Экспериментальные исследования прочностных и фильтрационных свойств техногенных отложений для различных типов отвальных сооружений позволили получить закономерности изменения дисперсности и водопроницаемости насыпных пород с ростом нагрузок уплотнения. Установлена тенденция ухудшения условий устойчивости высоких отвалов за счет снижения углов внутреннего трения насыпных пород и появления гидродинамических сил при формировании в теле отвала безнапорного водоносного горизонта.

4. Рассмотрены особенности строения, состава, состояния и свойств неоген-четвертичных отложений, выполнен анализ условий их преобразования в основании высоких отвалов. Лабораторные исследования прочности суглинков и глин в основаниях высоких отвалов, показали, что под действием нормальной нагрузки они, несмотря на различие начальной консистенции (от текучей до полутвердой) при давлении 1,2-1,5 МПа достигают резерва уплотнения, при котором породы приобретают твердую консистенцию и характеризуются постоянными значениями углов внутреннего трения и сцепления, соответственно $10-12^\circ$ и 70-80 кПа.

5. Изучение формирования отвалов на водонасыщенном основании позволили выявить, наряду с развитием литогенетических преобразований естественных пород в техногенные, развитие гидрогеомеханических процессов фильтрационной консолидации, выражаю-

щихся в формировании и рассеивании избыточного порового давления. Сложный, недостаточно изученный механизм данного процесса для условий отвалообразования в Кузбассе, затрудняет выполнение прогнозов порового давления в основании высоких отвалов. Учет его в расчетах устойчивости рекомендуется выполнять, используя прямые определения в рамках гидрогеомеханического мониторинга безопасности.

6. Основные результаты исследований могут быть использованы научными, проектными и производственными организациями при проектировании высоких отвалов и организации мониторинга безопасности.

Основные результаты диссертации изложены в 9 работах, из них:

Публикации в изданиях из Перечня ВАК:

1. Кутепов, Ю. И. Инженерно-геологические условия внешнего отвалообразования на разрезах Кузбасса / Ю. И. Кутепов, **А. Д. Васильева** // Горный информационно-аналитический бюллетень. Mining informational and analytical bulletin. – 2017. – №10. – С. 122-131. DOI: 10.25018/0236-1493-2017-10-0-122-131.

2. Кутепов, Ю. И. Обоснование устойчивости внешних отвалов Кузбасса и мониторинг их состояния / Ю. И. Кутепов, Н. А. Кутепова, **А. Д. Васильева** // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2019. – № 4. – С. 109–120. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-04-0-109-120.

В изданиях, индексируемых в международной базе Scopus:

3. Kutepov, Yu. I. Hydrogeomechanical processes in development of spoil dumps and hydraulic fills / Yu. I. Kutepov, N. A. Kutepova, M. A. Karasev, **A. D. Vasilieva**, Yu. Yu. Kutepov // Geomechanics and Geodynamics of Rock Masses: Proc. of the 2018 European Rock Mechanics Symposium. – 2018. – Vol. 2. – PP. 1645-1652.

В прочих изданиях:

4. **Васильева, А. Д.** Изучение физико-механических свойств техногенных пород отвалов Кузбасса // Материалы Международного молодежного научного форума «ЛОМОНОСОВ-2016» / Отв. ред. И.А. Алешковский А. В. Андриянов Е. А. Антипов. [Электронный ресурс]. – М.: МАКС Пресс, 2016.

5. **Васильева, А. Д.** Изучение физико-механических свойств техногенных пород высоких отвалов Кузбасса // SXVII Международная молодежная научная конференция «Севергеоэкотех-2016» [Текст]: материалы конференции (23-25 марта 2016 г.). В 6 ч. Ч. 2. – Ухта: УГТУ, 2016.

6. **Васильева, А. Д.** Об устойчивости высоких отвалов Кузбасса // Материалы Международного молодежного научного форума «ЛЮМОНОСОВ-2017» / Отв. ред. И.А. Алешковский, А.В. Андриянов, Е.А. Антипов. [Электронный ресурс]. – М.: МАКС Пресс, 2017.

7. Кутепов, Ю.И. Гидрогеомеханические задачи, возникающие при функционировании отвальных природно-технических систем / Ю. И. Кутепов, Н. А. Кутепова, М. А. Карасев, Ю. Ю. Кутепов, **А. Д. Васильева** // Инновационные направления в проектировании горнодобывающих предприятий: геомеханическое обеспечение проектирования и сопровождения горных работ, Сборник научных трудов. – СПб. : СПбГУ, 2017.

8. Koutepov, Ju. I. Die Untersuchungen von der technogenen verkippten Gesteine Scherparametern im Kohlenbergbauhalden / Ju. I. Koutepov, **A. D. Vasileva** // Scientific Reports on Resource Issues 2016. Volume 1: Efficiency and Sustainability in the Mineral Industry - Innovations in Geology, Mining, Processing, Economics, Safety and Environmental Management (issue 1). – Freiberg, Germany: TU Freiberg, 2016. – PP. 112-116.

9. Koutepov, Ju. I. Voraussetzungen der Beständigkeit der hohen Kohlenhalden / Ju. I. Koutepov, **A. D. Vasileva** // Scientific Reports on Resource Issues 2017. Volume 1: Efficiency and Sustainability in the Mineral Industry - Innovations in Geology, Mining, Processing, Economics, Safety and Environmental Management (issue 1). – Freiberg, Germany: TU Freiberg, 2017. – PP. 101-104.

Таблица 1 – Типизация условий устойчивости отвалов угольных месторождений Кузбасса

Тип вскрышных пород	I. Балахонская серия, цемент преимущественно карбонатный, Rc=50-120 МПа	II. Кольчугинская серия, цемент преимущественно глинистый, Rc=15-50 МПа	III. Неоген-четвертичные отложения, Rc≤1 МПа
Тип основания отвала	А. прочное (скальные, полускальные породы)	слабое	
		Б. дисперсные песчаные, твердые до полутвердых глинистые породы	В. глинистые пластичные и текучие породы
Геоморфологические условия основания	пологое		наклонное
	1. слаборасчлененный рельеф основания до 3 град.	2. наклон основания менее 6 град., наличие логов и водоразделов	3. наклон основания более 6 град., наличие логов и водоразделов
Гидрогеологические условия ПТС «отвал+основание»	а. отсутствие водоносных горизонтов	б. наличие одного безнапорного водоносного горизонта	в. наличие безнапорного и напорных водоносных горизонтов
Высота отвала	i. до 50 м	ii. 50-100 м	iii. более 100 м

Таблица 2 - Прочностные параметры отвальных пород балахонской серии в различных диапазонах вертикальных напряжений

Нагрузки, МПа	< 0,1		0,1-1,0		1,0-2,5		
	С, кПа	φ, град.	С, кПа	φ, град.	С, кПа	φ, град.	
Песчаники	10	34	11	32	13	28	
Алевролиты	14	32	16	29	17	27	
Смесь песчаник/алевролит	70/30	14	33	15	31	17	28
	50/50	14	33	16,5	31	18	28
	30/70	15	32	16	30	19	27
Смесь углевмещающие породы/суглинок	70/30	15	33	15	31	17	26
	60/40	22	28	22	25	25	18
	50/50	24	25	27	21	28	13
	40/60	25	22	33	17	38	9
	20/80	29	17	38	12	-	-
	0/100	30	16	40	11	-	-

Таблица 3 – Прочностные параметры отвальных пород кольчугинской серии в различных диапазонах вертикальных напряжений

Нагрузки, МПа	< 0,1		0,1-1,0		1,0-2,5		
	С, кПа	φ, град.	С, кПа	φ, град.	С, кПа	φ, град.	
Песчаники	11	34	11	28	13	25	
Алевролиты	14	32	16	29	17	26	
Смесь песчаник/алевролит	70/30	14	33	15	29	17	25
	50/50	15	33	15	29	18	25
	30/70	15	32	16	28	19	26
Смесь углевмещающие породы/суглинок	70/30	15	33	15	28	17	25
	60/40	18	28	22	25	25	18
	50/50	22	25	27	21	28	16
	40/60	25	22	33	17	38	13
	20/80	29	17	38	12	42	11
	0/100	30	16	40	11	47	9

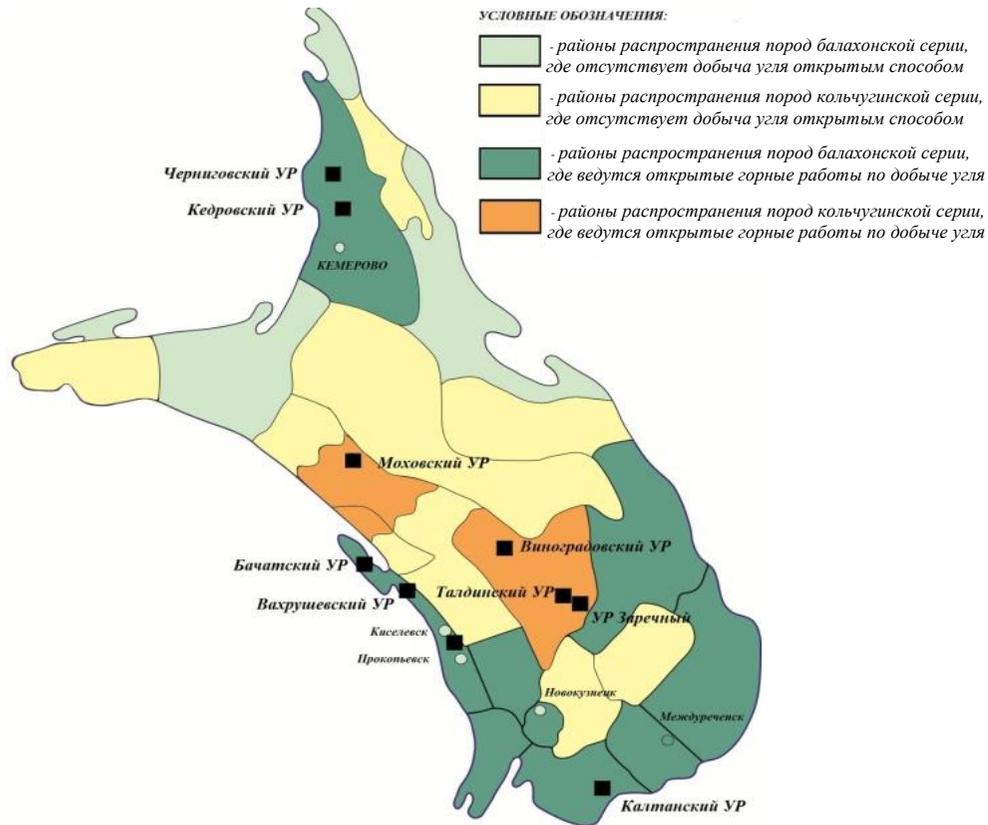


Рисунок 1 – Актуализированная схема открытой разработки угля в Кузбассе

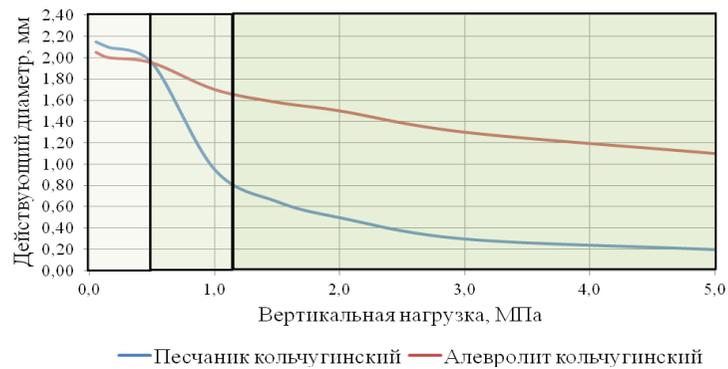


Рисунок 2 – Изменение гранулометрического состава отвальных пород кольчугинской серии под влиянием вертикальной нагрузки

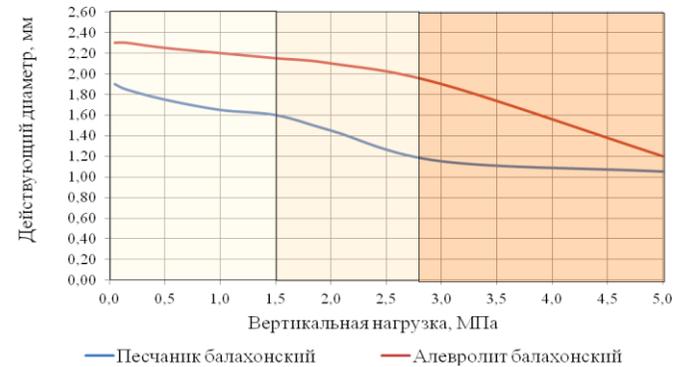


Рисунок 3 – Изменение гранулометрического состава отвальных пород балахонской серии под влиянием вертикальной нагрузки

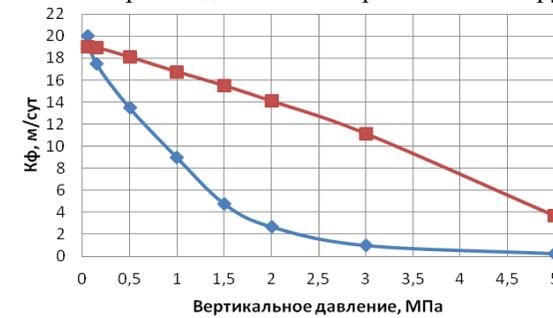


Рисунок 4 – Влияние вертикальной нагрузки на фильтрационные параметры отвальной массы пород балахонской и кольчугинской серий

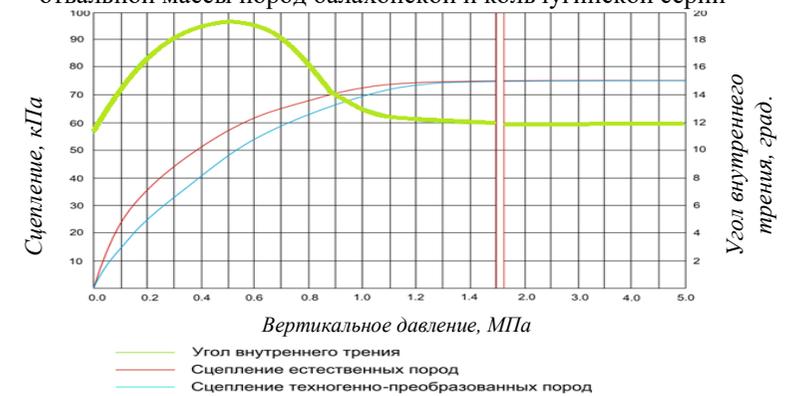


Рисунок 5 – Обобщенная зависимость изменения неоген-четвертичных глинистых пород Кузбасса под нагрузкой