

На правах рукописи

Кутепов Юрий Юрьевич



**ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ
ГИДРООТВАЛОВ НА ПОДРАБАТЫВАЕМЫХ
ТЕРРИТОРИЯХ УГОЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ**

*Специальность 25.00.20 – Геомеханика, разрушение
горных пород, рудничная
аэрогазодинамика и горная
теплофизика*

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

Санкт-Петербург – 2019

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

Научный руководитель –

доктор технических наук, профессор

Протосеня Анатолий Григорьевич

Официальные оппоненты:

Бахаева Светлана Петровна,

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

Макаров Александр Борисович,

доктор технических наук, профессор, SRK Consulting (Russia) Ltd филиал частной компании с ограниченной ответственностью «Эсаркей Консалтинг (Россия) Лимитед» (Великобритания), главный консультант по геомеханике

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

Защита диссертации состоится 25 сентября 2019 г. в 15 ч 00 мин на заседании диссертационного совета ГУ 212.224.06 при Санкт-Петербургском горном университете по адресу - 199106, Санкт-Петербург, 21-я линия, дом 2, ауд. 1171а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского горного университета и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 25 июля 2019 г.

**УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета**



**Деменков
Пётр Алексеевич**

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Интенсификация угольной промышленности в Кузбассе предполагает увеличение полноты извлечения угля из недр за счет отработки законсервированных запасов, в том числе на участках сопряжения открытых и подземных горных работ. Наиболее сложными случаями комплексного освоения недр является ведение очистных работ под объектами промышленной гидротехники, среди которых значительную группу представляют формируемые при открытой добыче угля гидроотвалы вскрышных пород. В бассейне за все время существования намыто 60 сооружений площадью от 50 до 900 га и высотой от 5 до 77 м. Они сложены в основном «слабыми» дисперсными, водонасыщенными, текучими и пластичными отложениями. Подработка гидроотвалов может привести к нарушению устойчивости подпорных конструкций – дамб и плотин за счет вовлечения их в процессы сдвижения горных пород с последующим развитием гидродинамической аварии. Отечественная и мировая практика свидетельствует, что аварии на накопителях жидких промышленных отходов практически всегда имеют серьезные материальные и экологические последствия, а иногда приобретают масштабы техногенных катастроф.

Степень разработанности исследуемого направления:

Изучению процесса сдвижения при отработке угольных месторождений подземным способом посвящены многочисленные работы таких авторов как: Г. Кратч, С.Г. Авершин, Д.А. Казаковский, В.Н. Земисев, А.Г. Акимов, А.Н. Медянцеv, И.А. Петухов, М.А. Иофис, В.Н. Гусев и др.

Применение геомеханических методов, в том числе численного моделирования, при разработке месторождений полезных ископаемых описано в работах А.П. Господарикова, О. Зенкевича, О.В. Зотеева, М.А. Карасева, А.Б. Макарова, А.Г. Протосени, А.Б. Фадеева, В. Brady, W. Witke и др. В частности, использование численных методов для прогноза процесса сдвижения рассматривается в работах: Н.Н. Грищенкова, В.В. Зубкова, В.П. Зубова, М.Г. Мустафина, М.А. Coulthard, W. Keilich, A.M. Suchowerska, A. Vyazmensky и др.

Проблемами обеспечения устойчивости горнотехнических сооружений, в том числе гидроотвалов на угольных и горнорудных

месторождениях, занимались Г.Л. Фисенко, А.М. Гальперин, Ю.И. Кутепов, Т.К. Пустовойтова, П.С. Шпаков, В.В. Ческидов, А.В. Жабко, Е.В. Сергина, А.В. Киянец и др. При этом вопросам их подработки посвящены исследования Н.А. Кутеповой, А.С. Ягунова, С.П. Бахасовой, И.М. Гадымбы, Б.Е. Бронштейна и др. Данные работы рассматривают отдельные факторы, влияющие на устойчивость подрабатываемых откосов. Отсутствие систематизированного методического подхода по учету влияния подработки на устойчивость гидроотвалов предопределило **актуальность** настоящего исследования.

Цель работы: обеспечение устойчивости гидроотвалов на подрабатываемых территориях при подземной разработке угольных месторождений.

Идея работы заключается в учете изменения напряженно-деформированного состояния (НДС) техногенных и естественных массивов при оценке устойчивости гидроотвалов на подрабатываемых территориях угольных месторождений.

Основные задачи исследования:

1. Выполнить анализ горногеологических условий ведения подземных горных работ на угольных месторождениях под гидроотвалами вскрышных пород.
2. Разработать методику прогноза параметров процесса сдвижения породных массивов на основании численного моделирования.
3. Разработать методику оценки устойчивости водонасыщенных откосов гидроотвалов с учетом их подработки.
4. Разработать рекомендации по обеспечению устойчивости гидроотвалов на подрабатываемых территориях.

Предметами исследования являются напряженно-деформированное состояние подработанного массива и устойчивость гидроотвалов на подработанных территориях.

Объектами исследования являются гидроотвалы вскрышных пород и геомеханические процессы в подрабатываемых массивах.

Методы исследования:

В работе используется комплексный подход, включающий в себя анализ работ отечественных и зарубежных авторов в области сдвижения горных пород и устойчивости горнотехнических сооружений, натурные методы изучения деформаций

подроботанного массива; численное моделирование процесса сдвижения горных пород при подземной отработке угольных месторождений и устойчивости гидроотвалов.

Защищаемые научные положения:

1. Прогноз деформаций подработанного массива при разработке угольных месторождений необходимо выполнять с использованием упругопластической модели среды, разделением массива на зоны с различным механическим поведением и обоснованием их параметров с учетом результатов натурных исследований в формирующейся мульде сдвижения.

2. Оценку устойчивости гидроотвалов на подрабатываемых территориях следует производить на основе разработанной методики, учитывающей относительное расположение ограждающих дамб и очистных выработок, направление ведения горных работ, параметры сдвижения, величины и характер изменения прочностных свойств пород и гидродинамического режима техногенного массива гидроотвала и его основания в зоне развития деформаций.

3. Управление устойчивостью гидроотвалов при подработке очистными горными выработками достигается посредством организационно-технических мероприятий, оптимальный состав которых следует определять на базе разработанной системы геомеханического обеспечения устойчивости, включающей комплекс работ по прогнозу и мониторингу геомеханических процессов в системе «очистная выработка - породный массив - гидроотвал».

Научная новизна диссертационного исследования заключается в следующем:

- получены закономерности изменения коэффициента запаса устойчивости откоса подрабатываемого гидроотвала в зависимости от его расстояния до очистного забоя и направления ведения горных работ относительно сооружения;
- выявлены условия возможного образования избыточного порового давления в глинистых водонасыщенных породах намывного массива и естественного основания сооружения при их подработке очистными выработками.

Полученные научные результаты соответствуют паспорту специальности 25.00.20 – Геомеханика, разрушение горных пород,

рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика (п.п. 1, 2, 4, 5, 13).

Практическая значимость исследования:

- разработана методика оценки устойчивости откосов гидроотвалов на подрабатываемых территориях, основанная на аналитических расчетах сдвижения и устойчивости, а также численном моделировании МКЭ НДС пород подрабатываемых массивов;

- разработаны рекомендации по управлению устойчивостью и безопасностью гидроотвалов на подрабатываемых территориях, включающие требования к ведению подземных горных работ, мероприятия по улучшению устойчивости дамб и мониторинг состояния.

Реализация результатов работы. Результаты использованы на шахте «Имени А.Д. Рубана» АО «СУЭК-Кузбасс», при обосновании безопасных условий подработки гидроотвала в выработке пласта «Красногорский II» на участке «Благодатный-Глубокий», где в 2019 г. были расконсервированы запасы угля, ориентировочным объемом 60 млн т.

Достоверность и обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается удовлетворительной сходимостью результатов натурных наблюдений деформаций поверхности при подработке, аналитических расчетов и численного моделирования МКЭ процесса сдвижения горных пород, применением современных методов механики сплошных сред для оценки устойчивости гидроотвалов и прогноза сдвижения горных пород, методов численного анализа для выполнения геомеханических расчетов.

Личный вклад автора заключается в постановке и формулировании цели и задач исследования; обосновании возможности и необходимости применения численных методов для моделирования процесса сдвижения; обосновании факторов, влияющих на устойчивость откосов оградительных конструкций гидроотвала при его подработке; разработке методики оценки устойчивости гидроотвала с учетом выделенных факторов; разработке численной модели прогноза изменения напряженно-деформированного состояния гидроотвала при подработке; получении закономерностей изменения коэффициента запаса

устойчивости откоса сооружения для различных сочетаний факторов влияния; разработке системы геомеханического обоснования устойчивости гидроотвалов на подрабатываемых территориях.

Апробация выполненного исследования. Основные положения и результаты исследований были представлены в виде 11 докладов на научных конференциях и других научных мероприятиях в 2016-2019 гг.: *на базе Санкт-Петербургского горного университета*: Международный форум-конкурс «Проблемы недропользования» (Диплом II степени, 2017 г.); VIII Международная научно-практическая конференция «Инновационные направления в проектировании горнодобывающих предприятий: Геомеханическое обеспечение проектирования и сопровождения горных работ» (2017 г.); Международная научно-практическая конференция «Современные проблемы геомеханики при освоении месторождений полезных ископаемых и подземного пространства мегаполисов» (2017 г.); Международный европейский научный симпозиум EUROCK-2018 (2018 г.); *на базе других университетов*: Международная конференция 11 Freiberg – St. Petersburger Kolloquium junger Wissenschaftler (Фрайбергская горная академия, Германия, 2016 г.); Международный научный симпозиум «Неделя горняка» (НИТУ «МИСиС», г. Москва) в 2016, 17 и 19 гг.

Публикации. По теме диссертационного исследования опубликовано 9 работ, в том числе 6 работ в изданиях, входящих в перечень, рекомендованный ВАК Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, в том числе 3 – в изданиях, индексируемых в международной базе Scopus.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, включающего 172 наименования, изложена на 184 страницах машинописного текста и содержит 48 рисунков и 12 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** сформулирована актуальность, основная цель и идея, научная новизна и практическая значимость работы.

В **первой главе** проведен анализ методов прогноза процессов сдвижения и оценки устойчивости откосов гидроотвалов, рассмотрен опыт изучения гидроотвалов Кузбасса, в том числе

примеры их подработки; сформулированы цели и задачи исследований.

Во **второй главе** представлен анализ опыта разработки численных моделей сдвижения породных массивов, на основании которого разработана собственная методика моделирования сдвижения. Приведено описание и результаты научно-производственного эксперимента по определению фактических параметров процесса сдвижения на шахте «Имени А.Д. Рубана». В конце главы приведены результаты применения разработанной методики для прогноза оседаний земной поверхности на участке «Магистральный».

В **третьей главе** выполнен анализ факторов, определяющих устойчивость откосов ограждающих конструкций гидроотвалов в процессе их подработки. Разработана методика прогноза изменения напряженно-деформированного состояния пород гидроотвала при подработке и методика оценки его устойчивости с учетом выделенных факторов влияния. Рассмотрены различные сценарии подработки гидроотвала на реке Еловка АО «УК «Кузбассразрезуголь».

В **четвертой главе** представлена система геомеханического обеспечения устойчивости гидроотвалов на подрабатываемых территориях, описаны ее компоненты и предложен комплекс мероприятий по управлению устойчивостью подрабатываемых откосов сооружения.

В **заключении** сформулированы основные научные и практические выводы по работе.

Основные результаты исследования отражены в следующих защищаемых положениях:

1. Прогноз деформаций подработанного массива при разработке угольных месторождений необходимо выполнять с использованием упругопластической модели среды, разделением массива на зоны с различным механическим поведением и обоснованием их параметров с учетом результатов натурных исследований в формирующейся мульде сдвижения.

В работе рассмотрены горно-геологические условия участков Красноярский и Магистральный шахты «Имени А.Д. Рубана», разрабатывающей Егозово-Красноярское месторождение угля Ленинского геолого-экономического района Кузбасса. Шахта

отрабатывает пласты пологого залегания (2-15°) Полысаевский II, Надбайкаимский и Байкаимский средней мощностью соответственно 4,5, 2,4 и 2,8 м. В геологическом разрезе породный массив представлен толщей из переслаивающихся песчаников, алевролитов и углей, перекрытых в верхней части разреза неоген-четвертичными суглинками мощностью до 50 м.

Натурное изучение процесса сдвижения производилось на участке Магистральный при отработке пласта Полысаевский II пионерной лавой № 812 в 2018 г. Лава имела длину 300 м при вынимаемой мощности пласта 4,2 м и средней глубине 191 м. Опытнo-промышленный эксперимент включал в себя наблюдения за деформациями земной поверхности и массива по грунтовым и глубинным реперам. По результатам эксперимента установлены деформации на земной поверхности и в массиве при формировании мульды сдвижения, позволившие рассчитать параметры данного процесса. Их сопоставление с расчетными значениями, полученными по нормативному документу, позволило установить хорошее совпадение максимального оседания 3,18 м при прогнозном 3,01 м, а также 40-метровое смещение центра мульды относительно расчетного. Фактическая ширина образовавшейся мульды сдвижения вкрест простиранию выработки составила 533 м при расчетной величине 496 м. Фактические значения граничных углов, полученные путем обратного построения границ зоны влияния очистной выработки, составили: $\beta_0 = 63,5^\circ$; $\gamma_0 = 66,2^\circ$, а угол максимального оседания – $\theta = 77,2^\circ$. Сопоставительный анализ расчетной и фактической мульды сдвижения по простиранию показывает, что качественно результаты эксперимента повторяют типовое распределение, однако в активной стадии деформационного процесса наблюдается отставание фактического оседания от расчетного со сдвигом в сторону примерно на 40 м. Поэтому динамическая мульда получается шире при неизменном угле сдвижения (δ_0), а угол максимального оседания ψ_3 становится равным 44° , что на 6° меньше нормативного значения 50° для Кузбасса.

Прогноз сдвижения горных пород при проходке лавы № 812 выполнялся с применением разработанной методики численного моделирования МКЭ. Ее разработке предшествовал анализ существующих методов и программ. Сущность данной методики

заключается в следующем: очистная выработка моделируется в виде полости путем удаления соответствующих элементов на расчетном шаге, после чего происходит перераспределение напряжений в массиве и контур выработки под действием гравитации деформируется, сближаясь с собой до момента входа в контакт.

Подработанный массив разбивается на три зоны: «обрушения», «трещин» и «ненарушенная», положение которых зависит от размеров выработки (рисунок 1). Механические свойства пород зон трещин и обрушения характеризовались пониженными показателями сцепления и модуля деформаций. Для описания деформационного поведения массива рассматривались две модели среды: упругая и идеально упругопластичная. Моделирование проводилось в плоскодеформационной постановке в рамках механики сплошных сред.

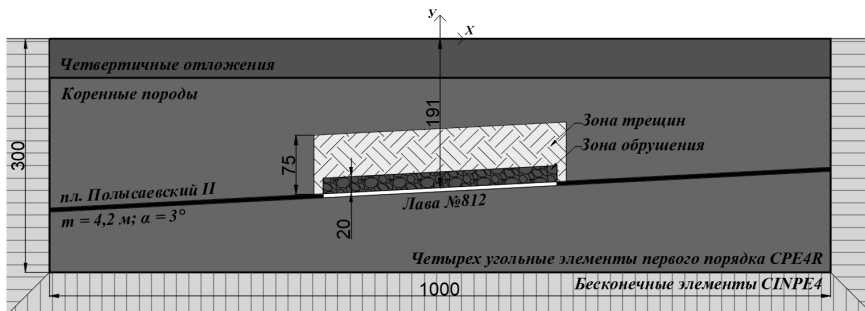


Рисунок 1 – Расчетная схема для моделирования процесса сдвижения от отработки лавы №812

Сравнение полученных при моделировании мульд сдвижения с натурными данными и нормативной кривой (рисунок 2) позволило установить, что сходимость между результатами численного моделирования и фактическими замерами достигается при применении упругопластической модели, основанной на условии пластичности Кулона-Мора, с разделением массива на зоны с различным механическим поведением. Полученные мульды сдвижения показали удовлетворительную сходимость между результатами моделирования и натурными данными, что позволяет рекомендовать применение данной методики для прогноза сдвижения горных пород наряду с нормативной методикой.

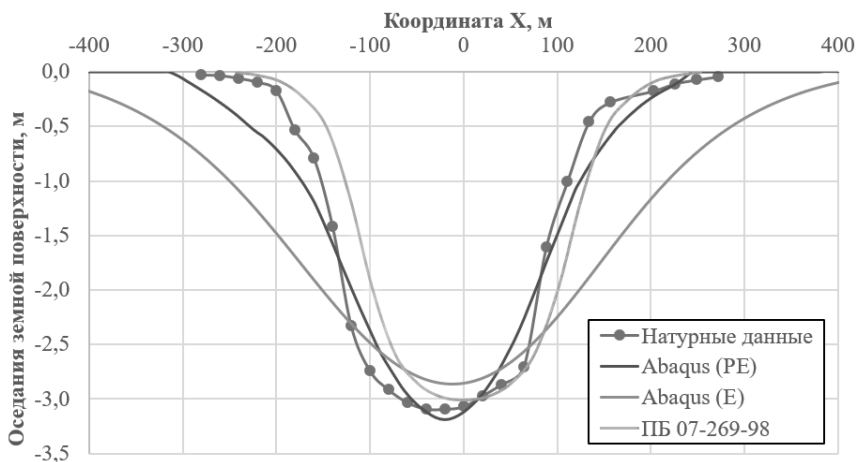


Рисунок 2 – Сравнение мультисдвигания, полученных при моделировании и по ПБ 07-269-98, с натурными данными:
У – упругая модель; УП – упругопластическая

2. Оценку устойчивости гидроотвалов на подрабатываемых территориях следует производить на основе разработанной методики, учитывающей относительное расположение ограждающих дамб и очистных выработок, направление ведения горных работ, параметры сдвижения, величины и характер изменения прочностных свойств пород и гидродинамического режима техногенного массива гидроотвала и его основания в зоне развития деформаций.

Исследования влияния подработки на устойчивость ограждающих дамб выполнялось для условий гидроотвала на реке Еловка разреза «Моховский», характеризующегося площадью 900 га, высотой 55 м и протяженностью дамб (плотин) более 6000 м. В юго-западной его части на участке сопряжения основной плотины и ограждающих дамб тремя лавами №№ 5, 13 и 14 по пласту Полысаевский II шахтой «Байкаимская» осуществлялась подработка водоотводного канала и низового откоса плотины гидроотвала. Проходка лавы №14 сопровождалась маркшейдерскими наблюдениями за поверхностью при формировании мультисдвигания. Средняя вынимаемая мощность пласта составила 4,9 м; размеры лавы вкрест и по простиранию - соответственно 220 и 910 м, глубины отработки изменялись от 220 до 310 м.

По результатам маркшейдерских наблюдений в пределах мульды сдвижения установлены различные величины оседаний 0,2 и 1 м на откосе гидроотвала и в районе водоотводного канала. При этом максимальная величина оседания достигла 2,39 м при длине полумульды по простиранию 337 м.

Для условий данного участка выполнен комплекс расчетных исследований устойчивости откоса гидроотвала, подработанного очистной выработкой, с применением методов предельного равновесия и численного моделирования МКЭ. Расчеты выполнялись для различных ситуаций подработки откоса гидроотвала в зависимости от места расположения ограждающих дамб относительно очистных выработок, направления ведения горных работ, параметров сдвижения, величины и характера изменения прочностных свойств пород и гидродинамического режима техногенного массива гидроотвала и его основания в зоне развития деформаций. В частности, рассматривались три сценария подработки: в направлении «на откос» (фактический), «из-под откоса» и параллельно откосу. На рисунке 3 приведена расчетная схема подработки в районе профиля гидроотвала №8.

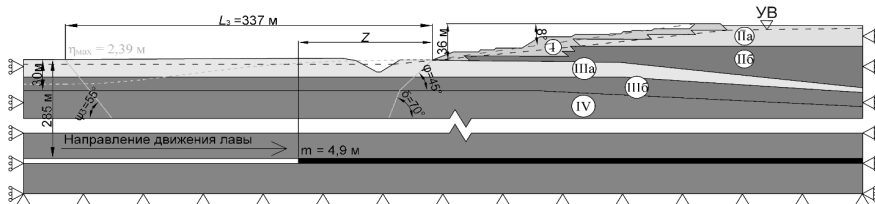


Рисунок 3 – Расчетная схема по профилю гидроотвала №8:

I – насыпное тело дамбы; II – намывные породы; III – естественное основание; IV – коренные породы; УВ – уровень воды в гидроотвале

Вычислительные исследования влияния подработки на устойчивость гидроотвала проводились с применением метода предельного равновесия Spencer'a с шагом 50 - 100 м продвижения очистного забоя относительно откоса. Для позиционирования забоя относительно гидроотвала использовалась координата "Z", равная расстоянию от забоя до нижней бровки откоса. Для каждого из них выполнялось построение отдельной модели с измененной геометрией откоса в соответствии с положением откоса в мульде сдвижения. Выделенные инженерно-геологические элементы в

откосе характеризовались физико-механическими свойствами пород; в определенных областях массива, вовлеченных в процесс сдвижения, производилось снижение показателей сцепления на величину структурной прочности. Для каждого из положений вычислялся коэффициент запаса устойчивости КЗУ (рисунок 4).

В результате вычислительных исследований получены закономерности изменения КЗУ сооружения на всех этапах его подработки при различном сочетании факторов влияния, а также возможных направлениях ведения горных работ. В случае подработки гидроотвала в направлении «на откос» на начальных этапах подработки наблюдается тенденция снижения КЗУ ниже нормативного значения, а затем происходит его возрастание до определенного значения. Это означает, что эксплуатация гидроотвала в таких условиях может не соответствовать установленным требованиям устойчивости и предопределяет необходимость проведения мероприятий по ее улучшению. В случае подработки гидроотвала в направлении «из-под откоса» наблюдается обратная тенденция.

Для оценки влияния процесса сдвижения на НДС подрабатываемых водонасыщенных массивов гидроотвалов производилось численное моделирование МКЭ. При определенных условиях отработки пласта под гидроотвалом в его откосе и основании установлен факт формирования избыточного порового давления. Зона его локализации имеет длину около 100 м (рисунок 5), полученное максимальное значение избыточного порового давления составляет 33 кПа.

Зона избыточного давления постоянно продвигается вперед вместе с очистным забоем, а позади происходит его постепенное рассеивание. Скорость рассеивания в рамках данной задачи зависит от темпов ведения горных работ и от коэффициента фильтрации грунтов.

Поводя итог анализу результатов вычислений, следует отметить, что наибольшее влияние на устойчивость гидроотвалов оказывает фактор изменения геометрии подрабатываемого откоса, связанный с параметрами сдвижения. Остальные факторы примерно в одинаковой степени ухудшают КЗУ. Наиболее неблагоприятные условия устойчивости в обоих случаях наблюдаются при подработке призмы упора. Подработка призмы активного давления, напротив,

приводит к положительному результату. Однако при совокупном влиянии всех факторов в большинстве случаев при подработке гидроотвала наблюдается ухудшение условий его устойчивости.

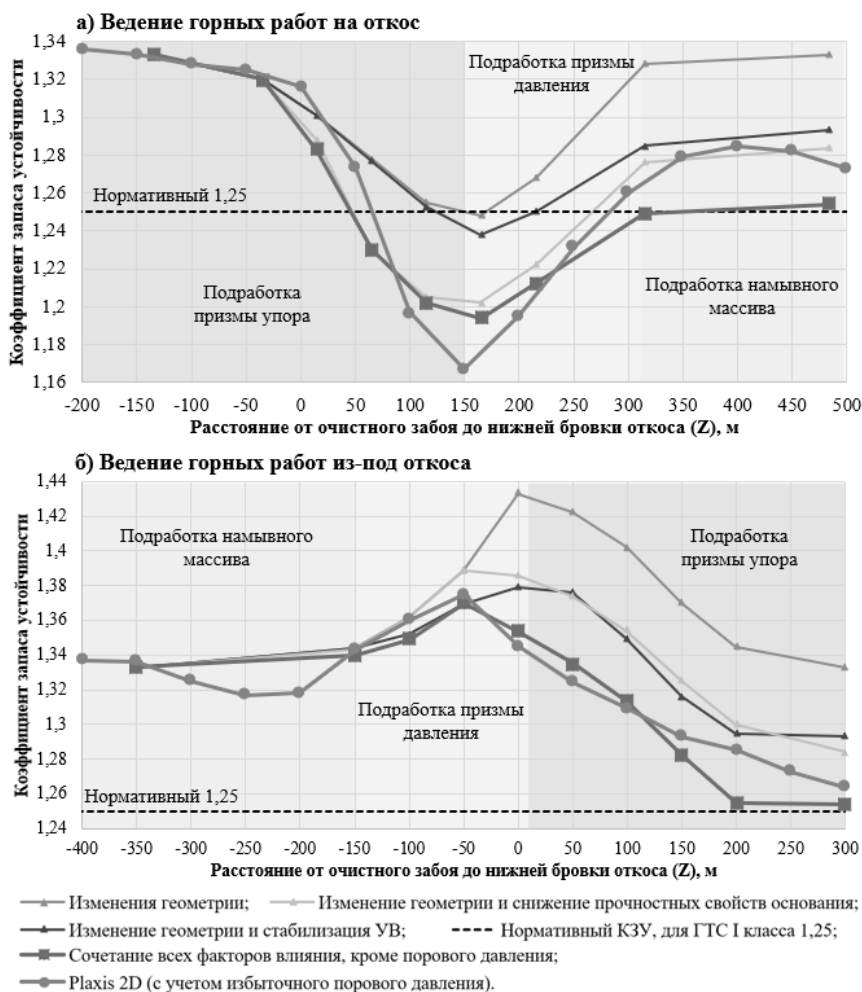


Рисунок 4 – График изменения коэффициента запаса в зависимости от расстояния между очистным забоем и нижней бровкой откоса при ведении горных работ в направлении: а) на откос; б) из-под откоса

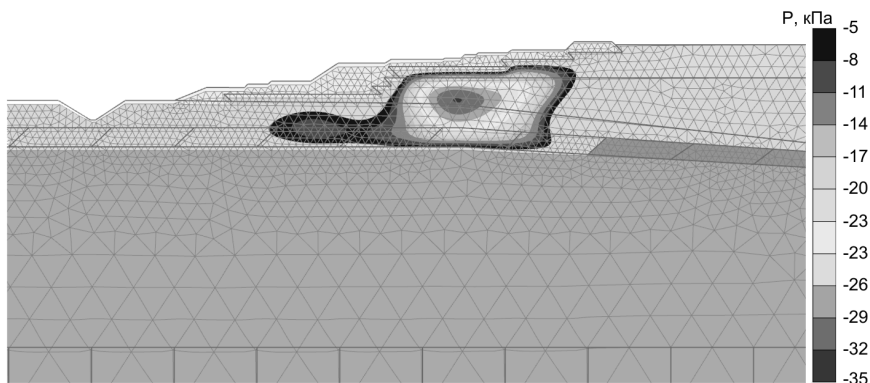


Рисунок 5 – Распределение избыточного порового давления,
 $Z = 250$ м

3. Управление устойчивостью гидроотвалов при подработке очистными горными выработками достигается посредством организационно-технических мероприятий, оптимальный состав которых следует определять на базе разработанной системы геомеханического обеспечения устойчивости, включающей комплекс работ по прогнозу и мониторингу геомеханических процессов в системе «очистная выработка - породный массив - гидроотвал».

Система геомеханического обеспечения устойчивости – это комплекс работ и исследований по изучению, обоснованию, управлению и контролю состояния пород техногенных массивов, выполняемых в течение всего периода подработки гидроотвала. Она включает в себя: изучение горно-геологических условий природно-технической системы (ПТС) «очистная выработка - породный массив - гидроотвал»; разработку гидрогеомеханической схемы (численной модели); расчетное обоснование; разработку мероприятий по управлению устойчивостью; мониторинг безопасности.

На рисунке 6 схематично изображены компоненты системы и взаимосвязи между ними. Центральным элементом системы является расчетное обоснование, которое принципиально можно разделить на две последовательно выполняемые задачи: прогноз сдвижения земной поверхности и сооружения; оценка устойчивости подрабатываемого сооружения. По результатам расчетов делается

вывод об устойчивости сооружения на период подработки и о необходимости проведения специальных мероприятий.

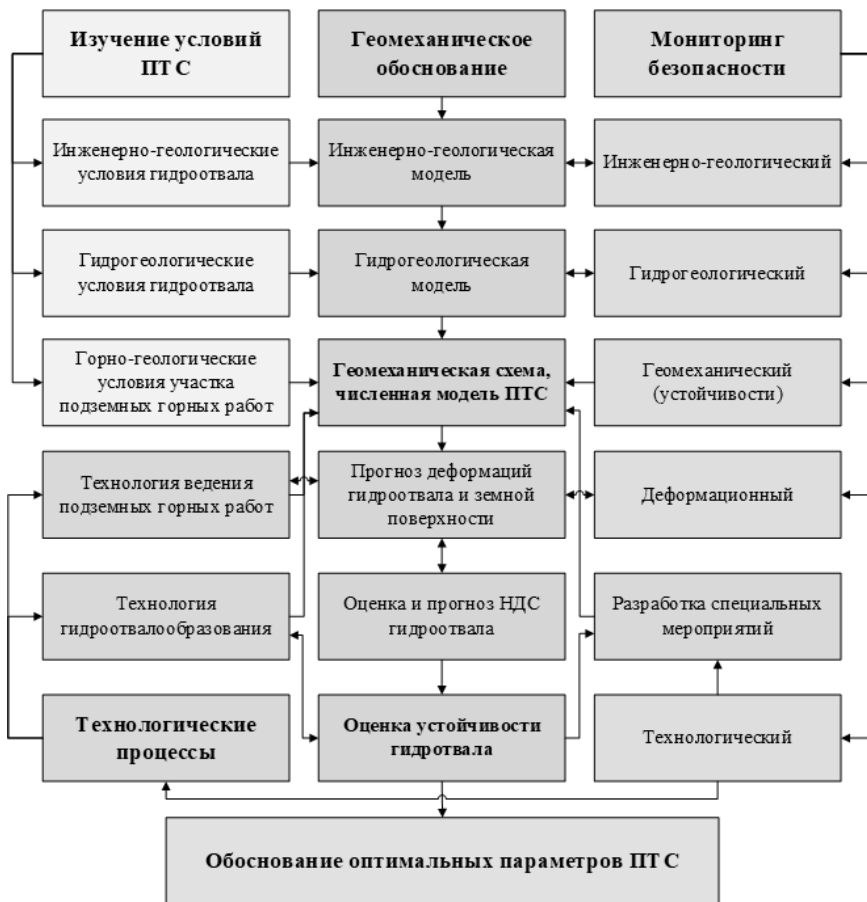


Рисунок 6 – Система геомеханического обеспечения устойчивости гидроотвалов на подрабатываемых территориях

Управление устойчивостью гидроотвала при подработке осуществляется за счет изменения технологических параметров подземных и открытых горных работ. При подземной разработке угольных месторождений снижение негативного влияния горных работ на устойчивость гидроотвала может осуществляться за счет уменьшения вынимаемой мощности пласта, скорости и направления

отработки лавы, изменения раскройки шахтного поля, оставления защитных целиков под дамбами и пр. К числу управляемых факторов, влияющих на устойчивость гидроотвала, относятся технологические параметры гидроотвалообразования, а именно: направление, способ и интенсивность намыва, а также цикличность поступления в гидроотвал материала различного гранулометрического состава. В частности, намыв гидроотвала рекомендуется производить в направлении от дамб обвалования, которые планируются подрабатывать.

Для обеспечения устойчивости гидроотвалов на этапах их строительства можно предусмотреть организацию дренажей, обеспечивающих предотвращение фильтрационных деформаций откосов или улучшение условий консолидации намывных пород. Повышение устойчивости дамб гидроотвалов также достигается созданием контрфорсов у основания сооружения или другом месте.

Одним из возможных способов улучшения условий устойчивости гидроотвала на этапе его ликвидации, консервации и рекультивации является отсыпка «сухих» отвалов на поверхность намывного массива. В результате данного мероприятия можно добиться отжатия слабых водонасыщенных пород от дамб обвалования и замещения их более прочными отвальными массами, а также ускорить консолидацию намывных пород. Прогнозирование процесса «выдавливания-замещения» рекомендовано производить по разработанной методике численного моделирования МКЭ.

Обеспечение устойчивости гидроотвала на всех этапах его подработки достигается посредством организации и выполнении мониторинга безопасности с использованием инструментальных методов наблюдений за деформациями и гидродинамическим режимом в откосных частях сооружения, контролированием соблюдения принятой проектом технологии гидроотвалообразования и изменений инженерно-геологических условий. Геомеханическая составляющая мониторинга имеет целью контролирование текущего коэффициента запаса устойчивости откосов гидроотвала на предмет его соответствия нормативным значениям, регламентированных проектом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследований представляют собой законченную научно-квалификационную работу, в которой дано решение актуальной задачи – разработано геомеханическое обоснование устойчивости гидроотвалов на подрабатываемых территориях.

Основные научные и практические результаты:

1. Выполнен анализ геомеханических процессов в техногенных и естественных массивах при совместной эксплуатации гидроотвалов и подземной добыче угля. Обобщен опыт изучения сдвижения горных пород и устойчивости откосов намывных сооружений. Рассмотрено состояние вопроса исследования устойчивости гидроотвалов на подрабатываемых территориях. Установлено, что на современном этапе отсутствуют обоснованная методика, позволяющая выполнить анализ влияния подработки на устойчивость гидроотвалов.

2. Проанализированы методы прогноза сдвижения горных пород и предложена методика, базирующаяся на численном моделировании МКЭ с учетом результатов натурных наблюдений за деформациями в формирующейся мульде сдвижения. Наилучшая сходимость результатов моделирования с натурными данными достигается при использовании упругопластичной геомеханической модели пород и разделении массива на зоны с различным механическим поведением.

3. Выявлены факторы, определяющие устойчивость гидроотвалов на подрабатываемых территориях, выполнены вычислительные эксперименты по оценке влияния каждого из них на коэффициент запаса устойчивости откоса для конкретных условий подработки гидроотвала. Установлено, что устойчивость при этом зависит от: положения откоса относительно лавы и направления ее отработки; изменения геометрических параметров откоса при сдвижении массива; снижения прочности пород естественного основания; изменения гидродинамического режима в подработанном массиве.

4. Вычислительными экспериментами установлены наихудшие условия устойчивости откоса при подработке нижней его части - призмы упора. При ориентации очистных выработок вкрест простиранию откосу, предпочтительным является развитие горных работ «из-под откоса», так как на первом этапе деформации

реализуются в призме активного давления, а затем уже в призме упора.

5. Разработана методика численного моделирования МКЭ напряженного состояния водонасыщенного массива, попадающего в зону сдвижения с объемным сжатием. В этом случае в породах создаются условия формирования значительного по величине избыточного порового давления, снижающего их прочность и, соответственно, устойчивость откосов гидроотвалов.

6. Разработана система управления устойчивостью гидроотвалов на подрабатываемых территориях, состоящая из работ и исследований геомеханической, инженерно-геологической и технологической направленности. Главными ее элементами являются модели напряженно-деформированного состояния подработанных массивов, позволяющие прогнозировать сдвижение горных пород и устойчивость откосов гидроотвалов. Управление устойчивостью гидроотвала при его подработке осуществляется посредством технологии подземных работ, технологии эксплуатации гидроотвала, а также применения специальных мероприятий по улучшению состояния устойчивости и организации мониторинга безопасности.

7. Разработанное геомеханическое обеспечение может использоваться научными, проектными и производственными организациями при изучении, проектировании и производстве подземных горных работ под гидротехническими сооружениями.

По теме диссертационного исследования опубликовано 9 работ, в том числе 6 работ в изданиях, входящих в перечень, рекомендованный ВАК Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, в том числе 3 – в изданиях, индексируемых в международной базе Scopus:

1. Kutepov, Y.Y. Geomechanical problems during the hydraulic fills operation in the areas of influence of open pit and underground mining / Y.Y. Kutepov, A.G. Protosenya // Scientific Reports on Resource Issues 2016: Proc. of Freiberg – St. Petersburg Colloquium of young scientists. – 2016. – №11. – pp. 99-103.

2. Кутепов, Ю.И. Прогноз формоизменения намывных массивов гидроотвалов при складировании на них отвальных насыпей / Ю.И. Кутепов, Н.А. Кутепова, М.А. Карасев, Ю.Ю. Кутепов // Горный журнал. – 2016. – № 12. – С. 23–27.

3. Кутепов, Ю.Ю. Численное моделирование процесса сдвижения породных массивов применительно к горно-геологическим условиям шахты имени Рубана в Кузбассе / Ю.Ю. Кутепов, Е.Б. Боргер // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2017. – № 5. – С. 66-75.

4. Зеленцов, С.Н. Изучение провалов и механизма их образования на подрабатываемой земной поверхности шахты им. А.Д. Рубана / С.Н. Зеленцов, Ю.Ю. Кутепов, Е.Б. Боргер // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2017. – № 5. – С. 271-280.

5. Kutepov, Y.Y. The study of formation mechanism of earth surface failures due to longwall coal mining / Y.Y. Kutepov // Geomechanics and Geodynamics of Rock Masses: Proc. of the 2018 European Rock Mechanics Symposium. – 2018. – Vol. 2. – pp. 1615-1619.

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

7. Кутепов, Ю.И. Обоснование безопасных условий подземной отработки свиты угольных пластов под гидроотвалом / Ю.И. Кутепов, А.С. Миронов, Ю.Ю. Кутепов, М.В. Саблин, Е.Б. Боргер // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2018. – № 8. – С. 217-226.

8. Кутепов, Ю.И. Изучение сдвижения горных пород на шахте им. А.Д. Рубана в Кузбассе / Ю.И. Кутепов, В.Н. Гусев, Ю.Ю. Кутепов, Е.Б. Боргер // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2018. – № S48. – С. 132-141.

9. Протосеня, А.Г. Прогноз устойчивости гидроотвалов на подрабатываемых подземными горными работами территориях / А.Г. Протосеня, Ю.Ю. Кутепов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2019. – № 3. – С. 97-112.