

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Санкт-Петербургский горный университет»

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

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ
доктор технических наук,
профессор А.Г. Протосеня

Санкт-Петербург – 2019

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1 АНАЛИЗ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ТЕХНОГЕННЫХ И ЕСТЕСТВЕННЫХ МАССИВАХ ПРИ СОВМЕСТНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ГИДРООТВАЛОВ И ПОДЗЕМНОЙ ДОБЫЧИ УГЛЯ	9
1.1 Состояние вопроса исследования устойчивости гидроотвалов на подрабатываемых территориях.....	9
1.2 Сдвигение горных пород при разработке угольных месторождений	25
1.3 Оценка устойчивости откосов намывных сооружений	33
1.4 Выводы по первой главе.....	47
ГЛАВА 2 ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССА СДВИЖЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ ОТРАБОТКЕ УГОЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ЛЕНИНСК-КУЗНЕЦКОГО РАЙОНА.....	49
2.1 Горно-геологическая характеристика объектов исследования.....	49
2.2 Экспериментальное изучение процесса сдвижения на шахте «Имени А.Д. Рубана».....	54
2.3 Численное моделирование процесса сдвижения при отработке лавы №812 на шахте «Имени А.Д. Рубана»	61
2.4 Прогноз оседаний земной поверхности при отработке запасов угля на участке Магистральный шахты «Имени А.Д. Рубана»	69
2.5 Выводы по второй главе	79
ГЛАВА 3 ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПРОЦЕССА СДВИЖЕНИЯ НА НАМЫВНОЙ МАССИВ И ПРОГНОЗ УСТОЙЧИВОСТИ ГИДРООТВАЛОВ НА ПОДРАБАТЫВАЕМЫХ ТЕРРИТОРИЯХ.....	82
3.1 Горно-геологическая характеристика объектов исследования.....	82
3.2 Выявление факторов, влияющих на устойчивость гидроотвала при его подработке.....	87
3.3 Методика оценки устойчивости откосов гидроотвалов в зонах ведения подземных горных работ	95

3.4 Оценка и прогноз изменения напряженно-деформированного состояния пород намывных и естественных массивов при их подработке	109
3.5 Выводы по третьей главе	119
ГЛАВА 4 СИСТЕМА ГЕОМЕХАНИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ ГИДРООТВАЛОВ НА ПОДРАБАТЫВАЕМЫХ ТЕРРИТОРИЯХ.....	122
4.1 Общие положения	122
4.2 Изучение и оценка условий природно-технической системы	126
4.3 Расчетное обоснование.....	131
4.4 Влияние технологии подземных горных работ на устойчивость подрабатываемых гидроотвалов.....	136
4.5 Мероприятия по улучшению состояния устойчивости гидроотвала на этапах строительства и эксплуатации.....	138
4.6 Отсыпка «сухого» отвала на гидроотвале - технологическое мероприятие по предотвращению развития гидродинамической аварии.....	142
4.7 Разработка мероприятий по улучшению состояния устойчивости гидроотвала на реке Еловка при подработке шахтой Байкаимская.....	149
4.8 Разработка мероприятий по улучшению состояния устойчивости гидроотвала в выработке пласта Красногорский II при его подработке шахтой «Имени А.Д. Рубана».....	152
4.9 Мониторинг безопасности	154
4.10 Выводы по четвертой главе	161
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	164
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	166

ВВЕДЕНИЕ

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. Медянец, И.А. Петухов, М.А. Иофис, В.Н. Гусев и др.

Применение методов численного моделирования в геомеханике при разработке месторождений полезных ископаемых описано в работах О. Зенкевича, А.Г. Протосени, А.П. Господарикова, А.Б. Фадеева, М.А. Карасева, О.В. Зотеева, А.М. Линькова, В. Brady, W. Witke и др. В частности, использование численных методов для прогноза процесса сдвижения рассматривается в работах: W. Keilich, A. Vyazmensky, A.M. Suchowerska, M.A. Coulthard, В.В. Зубкова, В.П. Зубова, М.Г. Мустафина, Н.Н. Грищенкова 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 проработки посвящены исследования Н.А. Кутеповой, А.С. Ягунова, С.П. Бахатовой, И.М. Гадымбы, Б.Е. Бронштейма и др. Данные работы рассматривают отдельные факторы, влияющие на устойчивость прорабатываемых откосов. Отсутствие систематизированного методического подхода по учету влияния проработки на устойчивость гидроотвалов предопределило **актуальность** настоящего исследования.

Цель работы: обеспечение устойчивости гидроотвалов на прорабатываемых 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 прорабатываемых 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 проработки.
4. Разработать рекомендации по обеспечению устойчивости гидроотвалов на прорабатываемых территориях.

Предметом исследования являются напряженно-деформированное состояние проработанного массива и устойчивость гидроотвалов на проработанных территориях.

Объектами исследования являются гидроотвалы вскрышных пород и геомеханические процессы в прорабатываемых 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 подработанного 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 оседания сооружения при их подработке очистными выработками.

Полученные научные результаты соответствуют паспорту специальности 25.00.20 – Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика (пп. 1, 2, 4, 5, 13).

Практическая значимость исследования:

- разработана методика оценки устойчивости откосов гидроотвалов на подрабатываемых территориях, основанная на аналитических расчетах сдвига 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 натуральных наблюдений деформаций поверхности при подработке, аналитических расчетов и численного моделирования МКЭ процесса сдвига горных пород, применением современных методов механики сплошных сред для оценки устойчивости гидроотвалов и прогноза сдвига 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 сдвига; 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.

ГЛАВА 1 АНАЛИЗ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ТЕХНОГЕННЫХ И ЕСТЕСТВЕННЫХ МАССИВАХ ПРИ СОВМЕСТНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ГИДРООТВАЛОВ И ПОДЗЕМНОЙ ДОБЫЧИ УГЛЯ

1.1 Состояние вопроса исследования устойчивости гидроотвалов на подрабатываемых территориях

1.1.1 Общие положения по обеспечению безопасности эксплуатации гидроотвалов на угольных месторождениях

При открытой разработке угольных месторождений в Кузбассе, начиная с 1951 года, на вскрышных работах используется гидромеханизация для удаления неоген-четвертичных отложений, повсеместно сплошным чехлом перекрывающих продуктивную угленосную толщу мощностью от 15 до 80 м. За более чем шесть десятков лет гидромеханизационным способом были смыты неоген-четвертичные породы в объеме около 1 млрд. м³ с размещением в 60-ти гидроотвалах. Значительное количество сооружений сформировано в шестидесятые – восьмидесятые годы прошлого столетия и на настоящий момент времени выведено из эксплуатации и используется в качестве площадей под отвалы «сухой» вскрыши. В эксплуатации на 2019 год находятся 8 объектов, большая часть которых является сооружениями котлованного типа, так как складирование гидровскрыши ведется в основном в открытые горные выработки отработанных угольных пластов. Из наземных объектов в эксплуатации находятся 3 крупнейших многоярусных гидроотвала с дамбами высотой более 60 м, которые относятся к гидротехническим сооружениям I класса - чрезвычайно высокой опасности.

Гидроотвалы вскрышных пород на угледобывающих разрезах в Кузбассе представляют собой намывные сооружения, сформированные практически по единой конструктивно-компоновочной схеме. В таблице 1.1 представлена характеристика гидроотвалов по данным работы [116], актуализированная на 2019 год с учетом современного состояния объектов. Большинство гидроотвалов (48 объектов) относится к овражно-балочному типу. Гидроотвалы занимают площади от 30 га до 900 га. Их ёмкость (одно- или двухсекционная чаша накопителя) образована посредством строительства плотины, перегораживающей лог или русло водотока, ограждающими дамбами по бортам логов, а также склонами коренного рельефа.

Ограждающие дамбы гидроотвалов – многоярусные, состоящие, как правило, из нескольких дамб наращивания, возводимых постепенно в процессе эксплуатации сооружений по мере заполнения чаши накопителя. Самым высоким объектом является действующий до сих пор гидроотвал «Бековский» (Бачатский угольный разрез), ограждающая дамба которого достигает 76 м (в тальвеге лога) и состоит из 15 дамб.

В гидроотвалы поступают дезинтегрированные пылевато-глинистые грунты в состоянии пульпы при соотношении воды и твердого вещества примерно 1:10. Твердое вещество (порода) оседает в чаше накопителя, а вода скапливается в пруде-отстойнике, откуда откачивается насосами либо самотеком по шандорным колодцам удаляется из емкости и возвращается в систему гидромеханизации. При эксплуатации гидроотвалов используется технологическая схема, предусматривающая намыв пульпы в направлении от дамб к пруду-отстойнику, удаленному от основной дамбы. Данная схема позволяет исключить скопление воды вблизи ограждающих дамб, что способствует улучшению устойчивости последних и предотвращает возможность перелива воды через гребень дамб с последующим развитием гидродинамической аварии.

Гидроотвалы вскрышных пород являются объектами промышленной гидротехники, аварии на которых сопряжены за загрязнением больших территорий, экологическими ущербами, разрушением инфраструктуры прилегающих населенных пунктов, причинением вреда здоровью людей. Деятельность, связанная с проектированием, строительством, реконструкцией, рекультивацией таких объектов регламентируется требованиями нормативно-методических документов Ростехнадзора [83, 96], разработанных во исполнение Федерального закона №117 «О безопасности гидротехнических сооружений» [78]. Повышенная опасность промышленных гидротехнических сооружений предопределила необходимость выполнения на протяжении многих десятилетий серьезных научно-исследовательских работ, направленных на совершенствование технологии гидравлического складирования, изучение инженерно-геологических и гидрогеологических условий, обоснование методов оценки и прогноза устойчивости сооружений, учитывающих

специфику свойств и напряженно-деформированного состояния пород техногенных массивов объектов промышленной гидротехники.

Теоретические основы безопасного функционирования гидроотвалов на этапах их строительства и эксплуатации и обеспечения их устойчивого состояния описано в работах Аксенова С.Г. [5], Бахасовой С.П. [6, 8], Гальперина А.М. [12–15, 17], Демченко А.В. [22], Евдокимова П.Д. [23], Ермошкина В.В. [26], Жарикова В.П. [28], Саркисяна А.Х. [98], Зотеева В.Г. [33], Каминской В.И. [44], Кириченко Ю.В. [48, 49], Киянца А.В. [13, 50], Клейменова Р.Г. [51], Кутепова Ю.И. [13, 55, 59], Кутеповой Н.А. [57, 59, 64], Лутовинова А.Г. [76], Мироненко В.А. [69], Могилына А.Н. [71], Морозова М.Г. [72], Мосейкина В.В. [73], Нурока Г.А. [76, 77], Протасова С.И. [70, 111], Сергиной Е.В. [100, 101], Фисенко Г.Л. [112], Фролова А.Н. [115] и др.

Результаты научных и экспериментальных исследований ведущих специалистов использованы для решения инженерно-технических задач, имевших большую актуальность в различные годы, из которых к числу основных можно отнести следующие:

- разработка эффективных технологий гидравлического складирования вскрышных пород, отходов обогащения, энергетической отрасли и др.;
- определение оптимальных параметров гидроотвалов и хвостохранилищ, обеспечивающих максимальную отвалоёмкость отведенных земельных отводов при соблюдении долговременной устойчивости внешних откосов ограждающих дамб;
- разработка безопасных технологических схем и оптимальных параметров отвалообразования на территориях гидроотвалов;
- обоснование инженерных решений по частичному удалению намывных массивов гидроотвалов с целью освобождения территорий для отработки МПИ открытым способом;
- обоснование устойчивых параметров гидроотвалов при их расконсервации после длительного технологического перерыва.

Таблица 1.1 – Характеристика гидроотвалов вскрышных пород на угольных разрезах Кузбасса [116]

Наименование гидроотвала	Годы эксплуатации	Высота, м	Площадь, тыс.м ²	Емкость, тыс.м ³	Результирующий угол откоса, град	Способ намыва	Тип гидроотвала
1	2	3	4	5	6	7	8
Филиал АО «УК «Кузбассразрезуголь» «Моховский угольный разрез»							
Гидроотвал №1	1969-1977	35	3950	39700	12	Сосредоточенный	Овражно-балочный с 2-х сторонним обвалованием
Гидроотвал №18	1967-1977	12	1600	13000	19	Сосредоточенный	На косогоре с 3-сторонним обвалованием
Гидроотвал №22	1971-1977	11,7	360	4818	23	Сосредоточенный	В выработке с 4-сторонним обвалованием
Гидроотвал «На реке Еловка»	1970 по н/в	67	9300	196000	6,5-10	Сосредоточенный	Овражно-балочный с 2-х сторонним обвалованием
В выработке пластов 1 и 2 (Сартакинское поле)	2003 по н/в	67	820	32500	-	Сосредоточенный	Котловинный с обвалованием
В выработке пластов 4, 5 и 6 (Сартакинское поле)	2007 по н/в	21 (дамба)	800	24650	-	Сосредоточенный	Котловинный с обвалованием
В выработке пластов 4, 5 и 6 (проф.56-59) «Северная прирезка»	2011 по н/в	20 (дамба)	1060	17676	-	Сосредоточенный	Котловинный с обвалованием
В выработке пластов «Красногорский-II»	2007 по н/в	30	448	9000	-	Сосредоточенный	Котловинный
Филиал АО «УК «Кузбассразрезуголь» «Моховский угольный разрез» (ранее Колмогоровский разрез)							
Гидроотвал в пойме р. Иня	1961-1968	14	1520	16100	17	Распределенный безэстакадный	Равнинный с 4-сторонним обвалованием
Гидроотвал на р. Черновой Уроп	1971 -1990	18	4600	10000	15		Овражно-балочный с 2-сторонним обвалованием
Филиал АО «УК «Кузбассразрезуголь» «Краснобродский угольный разрез»							
Новобачатский	-	27	2600	-	14	Сосредоточенный	Овражно-балочный
Новоалександровский	-	23	412	4000	16		

Наименование гидроотвала	Годы эксплуатации	Высота, м	Площадь, тыс.м ²	Емкость, тыс.м ³	Результирующий угол откоса, град	Способ намыва	Тип гидроотвала
1	2	3	4	5	6	7	8
Филиал АО «УК «Кузбассразрезуголь» «Кедровский угольный разрез»							
Гидроотвал №1	1955-1962	15	731,3	7163	20	Сосредоточенный	Овражно-балочный
Гидроотвал №2	1957-1968	23	76,0	857,7	14		
Гидроотвал №3	1958-1990	53	2920	47800	9		
Гидроотвал №4	1959-1977	40	2520	26042	11		
Гидроотвал №5	1962-1966	25	544,8	5250	15		
«Басалаиха»	1974-1989	30,5	612	2372	14		
В выработанном пространстве	2002 по н/в	111	688	50900	-	Сосредоточенный	Котловинный
Филиал АО «УК «Кузбассразрезуголь» «Краснобродский угольный разрез» (ранее «Новосергеевский разрез»)							
Безымянный	1961-1962	6	280	700	25	Сосредоточенный	Овражно-балочный с односторонним обвалованием
«Бахтыхта»	1956-1967	25	1200	12000	14		
Змеинский	1960-1961	11	280	1100	26		
Шакровский	1962	4	70	-	35		
Прямой Ускат	1967 - 2017	21-58	1450	23531	9-14		Овражно-балочный с 3-сторонним обвалованием
Филиал АО «УК «Кузбассразрезуголь» «Краснобродский угольный разрез» (ранее Киселевский разрез)							
Гидроотвал №1	1959-1966	36	178	1517	16	Сосредоточенный	Овражно-балочный и равнинный с 4-сторонним обвалованием
Гидроотвал №4	1960-1980	32	620	4960	15	Сосредоточенный, рассредоточенный	Равнинный с 4-сторонним обвалованием

Наименование гидроотвала	Годы эксплуатации	Высота, м	Площадь, тыс.м ²	Емкость, тыс.м ³	Результирующий угол откоса, град	Способ намыва	Тип гидроотвала
1	2	3	4	5	6	7	8
Разрез №8							
Прокопьевский	1959-1964	16-30	155	3800	13-17	Сосредоточенный	Равнинный с 4-сторонним обвалованием
Филиал АО «УК «Кузбассразрезуголь» «Бачатский угольный разрез»							
Сагарлыкский	1957-1975	30-40	6000	10600	11-13	Сосредоточенный	Овражно-балочный
Свободный	1955-1961	27	430	6000	17		
Западный	1954-1962	4-6	2700	13600	30		На косогоре с 3-сторонним обвалованием
Бековский	с 1971 по н/в	76,5	2800	129900	8	Рассредоточенный	Овражно-балочный с 1 – сторонним обвалованием
Филиал АО «УК «Кузбассразрезуголь» «Разрез им. Вахрушева»							
Акташский	1963-1975	60	1600	25586	9	Сосредоточенный, рассредоточенный	Овражно-балочный
Абинский	1966-1968	35	350	3585	15	Сосредоточенный	Овражно-балочный
Филиал АО «УК «Кузбассразрезуголь» «Галдинский угольный разрез»							
На реке Еланный Нарык	1997- 2017	50	1275	57800	10-12	Сосредоточенный	Овражно-балочный с 2-х сторонним обвалованием
Филиал АО «УК «Кузбассразрезуголь» «Ерунаковский угольный разрез»							
Коровихинский	2008-по н/в	67	988	30700	10	Сосредоточенный	Овражно-балочный с односторонним обвалованием

* - эксплуатируемые гидроотвалы по состоянию на 2019 г.

1.1.2 Общие положения по подработке гидроотвалов

Интенсификация разработки месторождений полезных ископаемых на ограниченных площадях приводит к совмещению различных видов горных работ. В частности, возможны случаи совместного ведения гидроотвальных и подземных работ, к числу которых относятся:

- 1) подработка гидроотвалов и хвостохранилищ подземными горными выработками;
- 2) намыв гидроотвалов на подработанных ранее территориях;
- 3) гидравлическое складирование пустых пород в подземные горные выработки.

Рассмотрим взаимное влияние гидроотвальных и подземных горных работ. Данная проблема имеет два аспекта, требующих самостоятельного изучения:

- 1) Влияние гидроотвалообразования на подземные горные работы;
- 2) Влияние подземных горных работ на условия эксплуатации гидроотвалов и хвостохранилищ.

Важнейшим аспектом подработки гидроотвалов является безопасность ведения самих горных работ под гидроотвалом. Поскольку намывные сооружения сложены водонасыщенными текучими осадками, то при выемке угля под ними гидроотвалы относят к водным объектам. При разработке пластовых месторождений угля с полным обрушением кровли над выработкой формируется зона водопродящих трещин. В случае ее распространения до нижней границы водного объекта возникает риск затопления шахтного пространства. Нормативными документами [84, 102] регламентируются условия ведения очистных работ под водными объектами и предъявляются требования к безопасной глубине подработки. Изучению вопросов формирования зоны водопродящих трещин и определения безопасной глубины подработки посвящены работы [21, 35, 62, 82, 137, 147, 150, 153]. В настоящей работе данный аспект не рассматривается и все исследования проводятся с допущением, что

безопасность ведения горных работ под водным объектом гидрогеомеханически обоснована.

Другим аспектом, требующем не меньшего внимания, является обеспечение безопасного и устойчивого состояния самого гидроотвала на всех этапах его существования. На подрабатываемых подземными выработками территориях проектирование, строительство и эксплуатация гидротехнических сооружений регламентируются несколькими нормативно-методическими документами [83, 84, 102]. В основном их требования направлены на соблюдение безопасной глубины подработки. По устойчивости откосов гидроотвала предъявляются требования по предельным и допустимым деформациям основания сооружения. Допустимые деформации при подработке земляных плотин, установленные «Правилами охраны...», составляют **6 мм/м**, предельные – **9 мм/м** [84].

Возникновение горизонтальных деформаций (растяжений) в основании эксплуатируемых сооружений может вызвать нарушение сплошности тела дамб обвалования с последующим образованием оползневых деформаций и прорывом жидких намывных масс в образовавшиеся прораны, что может привести к значительному экологическому и экономическому ущербу. Установленные величины горизонтальных деформаций для земляных плотин распространяются и на намывные гидротехнические сооружения на период их эксплуатации (намыва).

Рассматривая гидроотвалы и хвостохранилища на различных этапах их существования, можно отметить, что они с течением времени теряют свое качество напорного гидротехнического сооружения и переходят в категорию водонасыщенных породных отвалов. Так, в период намыва, когда породы находятся в текучем состоянии, мы бесспорно имеем дело с гидротехническим сооружением. Его подработка ухудшит условия устойчивости дамб гидроотвалов.

После окончания намыва гидроотвала текучие осадки в результате процессов консолидации могут переходить в пластичную, туго-пластичную, а

иногда и полутвердую консистенцию. Подобное улучшение состояния и свойств пород приведет не только к возрастанию коэффициента запаса устойчивости сооружения, но и к потере "подвижности" намывных осадков, т.е. наблюдается их переход из состояния жидкообразных тел в твердообразные. Поэтому установление жестких требований к горизонтальным деформациям оснований гидроотвалов при этом нецелесообразно и гидроотвалы в таких условиях можно отнести к водонасыщенным породным отвалам, под которыми ведение очистных работ допускается без серьезных ограничений.

Следует отметить, что ускорение процессов уплотнения намывных отложений достигается дополнительным их нагружением отвалами пустых пород на стадии рекультивации сооружения. Следовательно, отвалообразование на площади намывного массива можно рассматривать как мероприятие по улучшению условий подработки гидроотвалов и хвостохранилищ.

Вертикальные деформации земной поверхности отражаются на геометрических параметрах сооружений, таких, например, как результирующий угол наклона, вызывая его увеличение или уменьшение в зависимости от расположения откоса относительно мульды сдвижения. В реальных условиях изменение угла откоса гидроотвала при подработке может составлять $2-3^\circ$, что существенным образом сказывается на устойчивости сооружения. Изменение наклона поверхности намывного массива на $2-3^\circ$ в некоторых случаях может привести в движение верхние слои жидких масс и последующему их переливу через гребень ограждающих дамб. Однако длительный характер сдвижения земной поверхности обеспечивает возможность регулировать этот процесс технологическими мерами.

Наиболее непредсказуемые последствия может иметь образование провалов на земной поверхности под дамбами и откосами намывного сооружения в период их эксплуатации и нагружения отвалами. Возможность образования провалов следует учитывать при разработке крутопадающих пластов, близко расположенных к поверхности ложа гидроотвала (менее $20 \cdot m$ [84]). Однако, как показывает практика, образование провалов возможно и при пологом

залегании пластов на глубинах превышающих $20 \cdot m$. Тому подтверждение ситуация на шахте А.Д. Рубана, описанная автором в работах [30, 63, 148]. Кроме того, причиной образования провалов может служить обрушение кровли старых горных выработок, например, вследствие дополнительного увлажнения пород подработанного массива водами, фильтрующимися из гидроотвала.

В результате деформирования (изгиба) в толще пород, залегающих в основании и слагающих тело гидроотвала, возникают зоны повышенных напряжений растяжения и сжатия. Увеличение сжимающих напряжений в полностью водонасыщенных глинистых грунтах является причиной возникновения избыточного порового давления. Появления дополнительного порового давления в породах основания и намывного массива неблагоприятно сказывается на устойчивости сооружения и условиях его консолидации. С другой стороны, в зонах растяжения за счет увеличения пористости пород создаются условия для снижения сформированного ранее (при намыве и нагружении) избыточного порового давления.

Развитие растягивающих и сжимающих деформаций в породном массиве при его подработке сопровождается изменением его физико-механических свойств. В работах [10, 11, 64, 65] сформулирована общая тенденция в изменении характеристик пород в пределах мульды сдвижения, которая выражается в разуплотнении, увеличении влажности и снижении прочности пород. При этом, изменения происходят как под действием растягивающих, так и сжимающих напряжений. Данный фактор очевидным образом оказывает негативное влияние на состояние устойчивости сооружения при подработке.

Влияние вышперечисленных факторов изучено на настоящий момент времени только на качественном уровне. Детальное рассмотрение данного вопроса позволяет сделать вывод о практическом отсутствии методики количественного их учета при обосновании устойчивости гидроотвалов на подработываемых территориях. Это обстоятельство предопределило необходимость разработки такой методики, которая в настоящей работе приведена в главе 3.

1.1.3 Примеры совместного ведения гидроотвальных и подземных горных работ

За всю историю развития угольной промышленности на территориях бывшего СССР и современной России накопился немногочисленный опыт совместного ведения гидроотвальных и подземных горных работ. В последнее время актуальность данного вопроса значительно возросла в связи со стремлением угледобывающих компаний к полному извлечению запасов и максимизации прибыли. Рассмотрим в данном подразделе примеры реального и планируемого ведения подземных горных работ под действующими и законсервированными гидроотвалами.

Одним из таких примеров является гидроотвал №4 разреза «Киселевский», попавший частично (северо-восточный участок) в конце 70-х годов прошлого столетия в зону подработки шахты "Краснокаменская". Данный гидроотвал представлял собой сооружение равнинного типа с четырехсторонним обвалованием высотой 30-32 м и площадью 62 га, намывался рассредоточенным способом с постоянным поддержанием пруда-отстойника в южной части сооружения, поэтому в строении намывного массива в направлении с юга на север сформировались две примерно равные по площади зоны, приуроченные к пляжной и прудковой частям, а именно: песчано-супесчаная и глинисто-суглинистая. В вертикальном разрезе гидроотвал представлял собой неоднородный грунтовый массив с выделением (сверху вниз) слоев текучей, мягко- и тугопластичной консистенции. Наличие текучих водонасыщенных пород и пруда-отстойника на поверхности гидроотвала являлось осложняющим фактором его подработки подземными горными выработками.

Для улучшения состояния и свойств пород намывного массива гидроотвала №4 институтом ВНИМИ [40] были разработаны рекомендации по отсыпке на его поверхности отвала сухих пород с целью частичного отдавливания намывных грунтов из подрабатываемой зоны в не подрабатываемую и уплотнения оставшихся намывных отложений в основании отвальной насыпи под действием ее веса. Реализация данного мероприятия позволила частично

выдавить намывные грунты из-под отвала, обеспечив их замещение более прочными породами "сухой" вскрыши на глубину до 10 м. После отсыпки отвалов в 1981 году в северо-восточной части на глубине 25 м от ложа гидроотвала пройден квершлаг 30 с разветвленной сетью штреков, а также очистные горные выработки по пласту "внутренний ЦІV". Продуктивные отложения в районе гидроотвала представляют собой слоистую толщу, содержат пласты песчаников, аргиллитов и угля. Вся толща сильно дислоцирована и залегает с углами падения от 60 до 90°.

В процессе подработки гидроотвала №4 осуществлялся постоянный визуальный и инструментальный контроль как за водопритоками в горные выработки, так и за состоянием устойчивости откосов сооружения. По результатам гидрогеомеханических наблюдений, сделаны следующие выводы: в процессе подработки гидроотвала было отмечено увеличение водопритоков менее чем в 2 раза; при подработке дамбы гидроотвала очистными горными выработками случаев нарушения ее устойчивости не выявлено.

Опыт подработки гидротехнических сооружений получен в середине 80-х также в Донбассе в г. Белицкое на одноименной шахте. Под хвостохранилищем углеобогащения ЦОФ "Октябрьская" на различной глубине были отработаны несколько пластов угля. Гидроотвал представлял собой сооружение равнинного типа с четырехсторонним обвалованием высотой 20-25 м и площадью 11 га [88]. Ближайший из отработанных угольных пластов залегал на глубине от поверхности 60 м. и характеризовался мощностью 1,6 м. Ниже по разрезу располагались пласты, мощностью 0,58, 0,73 и 0,65 м на глубинах соответственно 70, 251 и 300 м. В процессе отработки осложнений как со стороны подземных горных работ, так и эксплуатации хвостохранилища не зарегистрировано. На этапе намыва гидроотвала при подработке пласта 4 горизонтальные деформации составили $\xi = 5,5$ мм/м, что не превышает допустимые деформации, установленные для земляных плотин, 6 мм/м [84]. В последующем, при подработке гидроотвала замеров деформаций не производилось. Визуальный контроль за состоянием дамб гидроотвала выполняемый

технической службой фабрики, показал отсутствие видимых нарушений сплошности техногенных массивов хвостохранилища и его дамб.

В 2015 г. в Ленинском горно-промышленном районе Кузбасса на шахте Байкаимская АО «УК»Кузбассразрезуголь» выполнялась частичная подработала гидроотвал на реке Еловка разреза Моховский. В зону влияния лав №№ 12, 13, 14 и 5 попали водоотводной канал и дамба первичного обвалования юго-западной части гидроотвала [149]. На рисунке 1.1 изображен совмещенный план гидроотвала и очистных выработок с нанесением зон их влияния на земной поверхности. Согласно расчетному обоснованию, выполненному СФ ОАО ВНИМИ (Заключение № 168 от 15.07.2010 г.), деформации в теле дамбы от подработки лавами № 12, №13, №14, №5 не должны были превысить допустимые. В частности, при отработке лавы № 14, от которой зона влияния горных работ на сооружения дамбы и гидроотвала наибольшая по сравнению с зонами влияния смежных лав № 12 и № 13 (см. рисунок 1.1), согласно прогнозу ожидаемые оседания на верхней площадке откоса оградительной дамбы не должны превысить $\eta_0 = 22$ мм, $i_0 = 0,18 \times 10^{-3}$, а горизонтальные деформации $\varepsilon_0 \leq 0,1$ мм/м при допустимых $[\varepsilon_d] = 6,0$ мм/м - по нормам «Правил охраны...» [84]. Однако на нижних участках откоса дамбы расчетные горизонтальные деформации местами превышают допустимые нормируемые значения в зонах влияния всех трех рассматриваемых лав и это обстоятельство предопределяет необходимость разработки мероприятий по предварительному (до подработки) усилению плотины гидроотвала, состоящей из дамбы первичного обвалования и нескольких дамб наращивания. Обеспечение устойчивости гидроотвала на участке подработки достигается созданием пригруза в призме упора откоса. Данная ситуация подробно рассмотрена в 3-й главе настоящей работы.

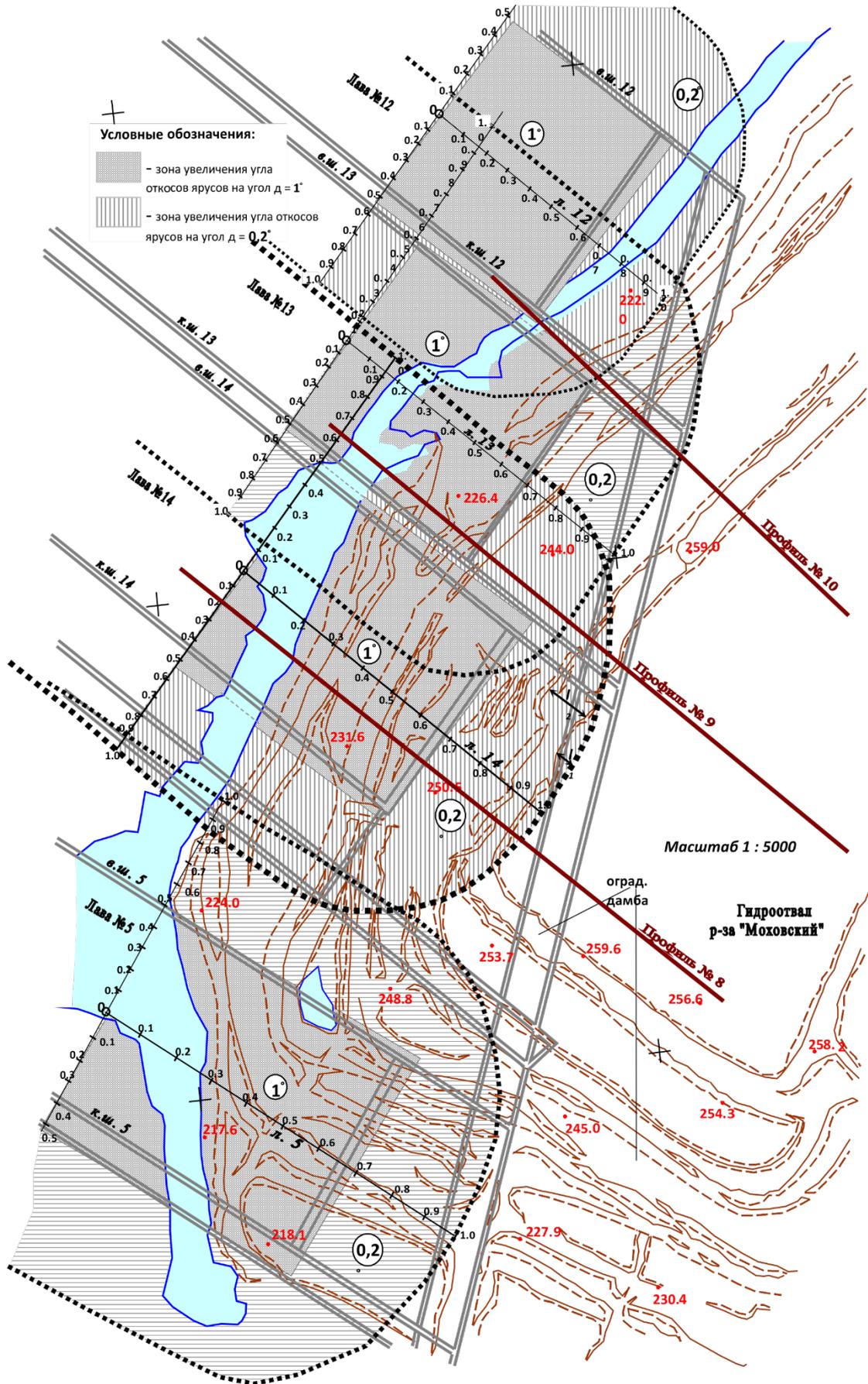


Рисунок 1.1 – Ситуационный план подработки гидроотвала на реке Еловка шахтой Байкаимская, с нанесением на него зон влияния очистных выработок

Выше нами рассмотрены условия подработки гидроотвалов подземными горными выработками как состоявшиеся горнотехнологические события. Однако в перспективе также планируется подработка намывных объектов открытой разработки угля. Наиболее крупным из перспективных событий такого рода является гидроотвал в выработке пласта Красногорский-II разреза «Моховский», расположенный на поверхности участка «Благодатный-Глубокий» шахты «Имени А.Д. Рубана» компании АО «СУЭК-Кузбасс» [62]. Ситуационный план сооружения и возможное расположение горных выработок под ним приведены на рисунке 1.2.



Рисунок 1.2 – Ситуационный план гидроотвала в выработке пласта Красногорский-II разреза Моховский и гипотетическая раскройка пласта Польшаевский II

Породный массив представлен четвертичными отложениями, техногенными породами отвалов и гидроотвала, углевмещающими породами пермского возраста. Четвертичные породы представлены в основном лессовидными макропористыми суглинками, мощностью 10 – 80 м. Угленосная толща имеет весьма характерный состав для данного типа месторождений и состоит из песчаников, аргиллитов и алевролитов. Зона выветривания коренных пород составляет в среднем 50 м в пределах участка. На участке шахтой Рубана

На рисунке 1.2 приведена ориентировочная раскройка по верхнему пласту Польшаевский II, по которому начало отработки запасов угля запланировано на 2020-е годы.

Решение проблемы отработки запасов угля по гидроотвалом складывается из выполнения исследований по двум направлениям: - определение безопасной глубины отработки угля под водным объектом, каковым является гидроотвал; - обеспечение устойчивости гидроотвала при извлечении из-под него запасов угля. Наличие водонасыщенного массива, сложенного слабыми породами и пруда осветленной воды, предопределяет отнесения данного сооружения к «водному объекту», опасному по прорыву в подземные горные выработки воды и водопородной смеси. Не следует забывать, что гидроотвал является гидротехническим сооружением, поэтому подработка его подпорных конструкций может спровоцировать развитие опасных гидродинамических аварий, сопровождающихся значительными технико-экономическими издержками, а, иногда, и человеческими жертвами.

1.2 Сдвигание горных пород при разработке угольных месторождений

1.2.1 Общие представления о механизме сдвижения

Сдвигание горных пород в соответствии с основным нормативно-методическим документом, действующим в угольной отрасли РФ, - «Правилами охраны зданий...» [84] - это деформирование и перемещение массива горных пород вследствие нарушения их естественного равновесия под влиянием подземных горных разработок. Геомеханический процесс сдвижения сопровождается одновременным и последовательным развитием в пределах массива, попадающего в зону влияния выработанного пространства, деформаций: изгиба, сдвига, растяжения, сжатия.

Проведение выработок в угольных пластах нарушает естественное равновесие вмещающих пород, вследствие чего возникают зоны концентрации напряжений, вызывающие деформации и сдвигание пород. По мере увеличения размеров очистных выработок область их влияния увеличивается, и

процесс сдвигения и деформирования массива достигает поверхности, проявляясь в виде оседаний и горизонтальных деформаций. Часть горного массива, попадающая в зону влияния очистных работ и подвергающаяся деформированию и разрушению называют **областью сдвигения** горных пород, а соответствующую часть земной поверхности – **мульдой сдвигения** [89].

Угольные месторождения обычно характеризуются слоистостью вмещающей толщи. При разработке месторождений такого строения, сдвигение пород начинается с прогиба кровли выработок. При увеличении размеров выработки прогиб слоев растет и процесс деформирования распространяется выше, происходит расслоение и сдвиговые деформации по плоскостям напластования, образуются секущие трещины, а в непосредственной кровле выработки формируется *зона обрушения*. Принято считать, что высота этой зоны составляет примерно $3\div 7\cdot m$, где m – это мощность вынимаемого пласта. Породы в этой зоне находятся в полностью разрушенном и дезинтегрированном состоянии. Выше нее располагается *зона трещин* (высота $20\div 40\cdot m$), строение пород и слоистость толщи в которой, сохраняются, однако по нормали к напластованиям формируются секущие трещины. Следом формируется *зона прогиба*. Деформации пород в этой зоне, характеризуются расслоением структуры и изгибом слоев без разрыва их сплошности [4, 171].

Отдельно следует обратить внимание на механизм сдвигения неоген-четвертичных отложений, покрывающих толщу коренных пород, так называемых, «наносов». Процесс их деформирования определяется резким различием прочностных и деформационных свойств неоген-четвертичных глинистых грунтов и углевмещающих скальных пород, а также различием их деформационного поведения. Принято считать, что при пологом залегании коренных пород (до 10°) сдвигение «наносов» полностью согласуется со сдвигением подстилающих пород [1]. Однако в действительности это не всегда так. Доказательством тому служат провалы, развивающиеся на шахтах Ленинского района [30, 43, 63, 147, 148] в результате протекания процесса сдвигения

массива при выемке угля и наличия в верхней части структурно-неустойчивых пород – лессовидных суглинков.

1.2.2 Факторы, оказывающие влияние на процесс сдвижения

В зависимости от интересующей нас степени детализации рассматриваемого процесса сдвижения, количество влияющих на него факторов увеличивается. Условно все возможные факторы, определяющие процесс сдвижения, можно разделить на две группы: *природные* и *технические*.

К **природным** факторам относятся: глубина залегания и угол падения пластов, их вынимаемая мощность; физико-механические свойства вмещающих пород, а также покровных четвертичных отложений; структурные особенности вмещающей толщи; геологические и гидрогеологические особенности месторождения; физико-географические условия территории (рельеф земной поверхности, наличие водотоков и т.д.); тектонические и сейсмические особенности региона; и многие другие.

К **техническим** факторам относятся: система разработки; размеры выработанного пространства; скорости подвигания горных работ; расположение и пространственная ориентация очистных лав друг относительно друга при отработке нескольких пластов; оставление неизвлекаемых технологических целиков, а также применение закладки выработанного пространства; направление подвигания очистного забоя; наличие в зоне влияния подземной разработки других инженерно-технических объектов, например, таких как открытые горные выработки, отвалы вскрышных пород, гидроотвалы, образующие в совокупности с подземной отработкой сложные природно-технические системы; и другие факторы.

Мощность пласта, **глубина** залегания, а также **угол его падения** являются одними из главных факторов, влияющих на процесс сдвижения. Вынимаемая мощность пласта во многом определяет интенсивность развития процесса деформирования породного массива и размеры формирующихся зон сдвижения. Величины деформаций в мульде сдвижения находится в прямой

зависимости от вынимаемой мощности пласта. При этом было отмечено [4, 113], что на угловые параметры процесса сдвижения вынимаемая мощность пласта большого влияния не оказывает, в отличие от глубины и угла падения пласта. Угол падения пласта также определяет и величину максимального оседания земной поверхности. С его увеличением уменьшается величина максимального оседания, увеличиваются горизонтальная составляющая вектора сдвижения, горизонтальные деформации и размер полумульды со стороны падения пласта. С увеличением глубины разработки, конфигурация мульды сдвижения становится более плавной, ее длина растет, а величины оседаний уменьшаются, при этом увеличивается продолжительность процесса. Так же считается, что при больших размерах выработанного пространства пропорционально глубине разработки увеличиваются размеры зон сдвижения и зоны опорного давления [4].

Физико-механические свойства пород также существенно влияют на проявления процесса сдвижения. Установлены зависимости величин углов сдвижения и максимального оседания земной поверхности от крепости горных пород по М.М. Протоdjяконову (f) [42]. При первичной подработке массива величины граничных углов с коэффициентом крепости находятся в прямо пропорциональной зависимости: $\delta_0 = 50^\circ + 2 \cdot f$ [4]. Также существуют предположения о зависимости граничных углов и углов сдвижения от коэффициента Пуассона (μ) [38].

Следует отметить, что исследований, посвященных влиянию физико-механических свойств на параметры сдвижения, проводилось не так уж и много. Это объясняется укоренившимся в бывшем СССР эмпирическим подходом в изучении процесса сдвижения, базирующимся на выполнении инструментальных наблюдений во всех основных угольных бассейнов. В результате выполненных измерений деформаций поверхности при ее подработке были получены зависимости параметров сдвижения от конкретных горно-геологических условий. Данное обстоятельство предопределило отсутствие серьезного внимания к изучению механических свойств пород подработанного массива [4].

Только с появлением геомеханических расчетов и численного моделирования надобность в таких исследованиях появилась. Также при отработке свиты пластов было установлено, что величины параметров сдвижения при последовательной отработке разных пластов оказались не одинаковы, что естественно обусловлено изменением механических свойств пород подработанного массива. Наиболее существенно при этом свойства пород изменяются в зоне обрушения и в зоне трещин. При повторных подработках горный массив в этих зонах будет претерпевать большие деформации.

1.2.3 Обобщение опыта по изучению сдвижения горных пород

В мировой практике разработки месторождений полезных ископаемых накоплен огромный опыт наблюдений за процессами сдвижения и оседания земной поверхности, разработано множество различных методов прогноза. Принципиально все многообразие методов можно подразделить на три основные группы: **эмпирические, полуэмпирические и теоретические методы**. Также в отдельную категорию можно выделить набирающие все большую популярность **методы численного моделирования**. Очевидно, что каждый из перечисленных методов имеет свои достоинства и недостатки.

В отечественной практике изучением вопросов сдвижения в основном занимались специалисты в области маркшейдерского дела, в связи с этим наибольшее распространение получили эмпирические методы прогноза оседаний земной поверхности, основанные на многолетних инструментальных наблюдениях. К преимуществам таких методов можно отнести относительную простоту в использовании и высокую степень надежности для тех месторождений, для которых они были разработаны. Однако при условиях отработки отличных от тех, при которых проводились наблюдения, эмпирические методы могут давать некорректные результаты прогноза.

Основополагающие отечественные работы по изучению вопросов сдвижения и оседания земной поверхности принадлежат таким ученым, как С.Г. Авершин, И.М. Бахурин, А.А. Борисов, В.Д. Слесарев, Г.Л. Фисенко, В.И.

Борщ-Компониц, И.А. Турчанинов, М.А. Иофис, А.Н. Медянцев, и И.А. Петухов [1–3, 9, 31, 42, 67, 68, 85, 86, 108, 113].

Прогноз сдвижения породных массивов и оседаний земной поверхности при разработке пластовых и рудных месторождений в настоящее время осуществляются методами, разработанными усилиями специалистов и ученых в области геомеханики и маркшейдерского дела, в том числе, сотрудниками ВНИМИ [4, 31, 52, 75, 122]. Многолетние теоретические и экспериментальные исследования позволили установить основные параметры сдвижения на различных месторождениях на территории бывшего СССР, определить предельные и допустимые значения деформаций при подработке зданий и сооружений гражданского и промышленного назначения, транспортных коммуникаций и т.д. Многолетний опыт исследований в результате был обобщен в отраслевом нормативном документе «Правила охраны...» [84], в котором предложены различные методики позволяющие выполнять прогноз сдвижения и деформаций земной поверхности для различных горно-геологических и технологических условий разработки.

Методы прогноза, предложенные «Правилами охраны...», разработаны до 1998 г. и по сей день применяются повсеместно, при этом дают вполне удовлетворительные результаты. Однако за последние 30 лет произошли существенные изменения в части технологии подземной добычи угля. Появились новые проходческие комплексы, которые позволяют отрабатывать пласты мощностью до 5-7 м. Значительно изменились размеры очистных выработок и темпы их отработки. Так, в настоящее время ширины лав в среднем варьируются от 150 до 300 м, а в отдельных случаях - достигают 400 м и более. В связи с указанным можно отметить, что действующий нормативный документ не охватывает подобные ситуации. Как известно, эмпирические методы прогноза обладают высокой надежностью для условий, в которых они получены. В случае несоответствия горногеологических условий нормативная методика может давать некорректный результат. Помимо всего вышеперечисленного существенным недостатком действующих «Правил охраны...» является отсутствие

привязки методики к инженерно-геологической схематизации угольных месторождений по показателям физико-механических свойств пород. Типизация месторождений производится лишь по угольным бассейнам, в то время как прочность вмещающих пород для одного и того же бассейна может отличаться в несколько раз.

За рубежом прогноз сдвижения земной поверхности осуществляется, как правило, с использованием полуэмпирических методов, основанных на различных функциональных зависимостях («Influence functions»). Данные зависимости описывают форму распределения деформаций на поверхности и получаются исходя из теоретических предпосылок, а числовые значения параметров функции подбираются для конкретного месторождения на основании экспериментальных исследований по установлению фактического характера сдвижения [124, 127, 171]. Наибольшее распространение получили тригонометрические, экспоненциальные и логарифмические зависимости распределения деформаций на поверхности, описанные в работах [123, 125, 134].

В настоящее время наиболее перспективными подходами к решению геомеханических являются методы численного моделирования, такие как метод конечных элементов (МКЭ), метод конечных разностей, метод дискретных элементов (МДЭ) и др. Численные методы появились еще в середине 40-х годов, а свое применение в горном деле нашли в середине 50-х. Применение методов численного моделирования в геомеханике при разработке месторождений полезных ископаемых описано в работах О. Зенкевича, А.Г. Протосени, А.П. Господарикова, А.Б. Фадеева, М.А. Карасева, О.В. Зотеева, А.А. Баряха, А.М. Линькова, В.Н.G. Brady, W. Witke и многих других авторов [18, 32, 34, 36, 91, 97, 109, 127, 138, 155, 162, 172]. Однако методы численного моделирования применялись весьма редко из-за низкой распространённости компьютерной техники и слабой ее производительности. Развитие вычислительной техники и ее общедоступность, наряду с современными специализированными программами существенно расширили область применения численного моделирования. Сегодня МКЭ используется повсеместно для решения

различного рода инженерных задач, в том числе задач геомеханики. Применение методов численного моделирования для прогноза сдвижения горных пород описано в работах [45, 46, 53, 63, 74, 90, 92, 109, 120, 144, 152, 169].

Преимуществом численного моделирования по сравнению с эмпирическими и полуэмпирическими методами прогноза является универсальность. МКЭ позволяет моделировать процесс сдвижения, учитывая фактическую геометрию выработок и массива, слоистость, свойства горных пород, рельеф земной поверхности и многое другое. В случае нескольких очистных выработок, моделирование МКЭ позволяет определить параметры сдвижения на всех этапах разработки месторождения.

Несмотря на все преимущества численного моделирования, его применение на практике для прогноза сдвижения не получило широкого распространения. Основная тому причина заключается в отсутствии специализированного программного комплекса, в котором в рамках базового функционала решалась бы задача по определению параметров процесса сдвижения. Провести моделирование данного процесса можно только с использованием программных пакетов САЕ («Computer-aided engineering») общего инженерного назначения, таких как ABAQUS, ANSYS, COMSOL Multiphysics и др. Использование таких программ требует специальной профессиональной подготовки, а также наличие мощной вычислительной техники. Вторая проблема заключается в отсутствии четкого методического подхода по проведению моделирования сдвижения. Все это делает применение метода непривлекательным для практического использования, так как в целом и эмпирический подход дает удовлетворительный результат. Однако решать более сложные задачи, такие, например, как прогноз изменения формы и НДС отвалов, гидроотвалов, бортов карьеров и других откосных сооружений при их подработке, возможно только при помощи численного моделирования.

1.3 Оценка устойчивости откосов намывных сооружений

1.3.1 Общие положения по устойчивости откосов

В геомеханике понятие «устойчивость откосов» определяется как способность техногенных сооружений под действием гравитационных сил сохранять геометрическую форму и обеспечивать функциональное назначение в течение необходимого промежутка времени [16]. Нарушение устойчивого состояния откоса приводит к переходу потенциальной энергии части сооружения в кинетическую и влечет за собой развитие динамического процесса, именуемого «оползнем». Оползни зачастую несут в себе большой экологический вред окружающей среде и колоссальные убытки для предприятия, а в некоторых случаях и вовсе приводят к техногенной катастрофе с человеческими жертвами. Поэтому крайне важным является на стадии проектирования сооружения и в процессе его эксплуатации проводить оценку его устойчивого состояния и правильно учитывать все возможные факторы влияния.

В целом устойчивость откосов зависит от следующих факторов. Ключевую роль играют свойства и вид пород самого сооружения и естественного основания. При этом при проведении лабораторных испытаний необходимо учитывать фактическое (или прогнозируемое) напряженное состояние пород в сооружении при выборе типа испытания. Также устойчивость сооружения зависит от его геометрических параметров, основными из которых являются высота откоса и генеральный угол заложения, а также угол наклона естественного основания. Немаловажное влияние оказывают гидрогеологические условия: положение фильтрационной кривой, градиент скорости фильтрации, наличие избыточного порового давления и т.д.

Количественно устойчивость откосов оценивается при помощи коэффициента запаса устойчивости. В геомеханике открытых горных работ коэффициент запаса устойчивости определяется как отношение суммы сил, удерживающих откос, к сумме сил, его сдвигающих [16]. Данное определение базируется на концепции сопоставления моделей грунтового массива в естественном напряженном состоянии и в состоянии предельного равновесия.

Существуют различные методы определения коэффициента запаса, их краткий анализ рассмотрен в следующем разделе.

1.3.2 Методы оценки устойчивости

Первые исследования грунтовых сооружений под действием гравитационных сил проводились еще в 1773 г. французским ученым-физиком Ш. Кулоном, который впервые ввел понятие линии скольжения, а также предложил гипотезу о существовании внутреннего трения в твердом теле, которая легла в основу теории прочности Мора-Кулона [129]. Первый инженерный расчетный метод оценки устойчивости откосов был предложен Фаллениусом в 1936 г. для кругло-цилиндрической поверхности скольжения. Он получил название Шведский или простой метод («Ordinary method») [135]. Дальнейшее развитие метод получил в работах Г. Крея, А. Бишопа (1955 г.), Н. Янбу (1954 г.), Моргенштерна и Прайса (1965 г.), Е. Спенсера (1967 г.), С. К. Сарма (1973 г.) [126, 140, 151, 163, 166], а также в работах Г.Л. Фисенко и последователей его научной школы (методы ВНИМИ) [113], Р.Р. Чугаева [119].

В основу всех вышеперечисленных методов заложен метод предельного равновесия, сущность которого заключается в разделении призмы возможного оползания на конечное число блоков и решении уравнений равновесия для каждого из блоков. Основные различия между методами заключаются в том, какое условие равновесия используется (уравнение равенства моментов, уравнение равенства сил или оба сразу), какие силы взаимодействия между блоками учитываются (нормальные, контактные или никакие), в форме поверхности скольжения (кругло-цилиндрической, полигональной или сложной криволинейной формы). Подробное сравнение методов приведено в работе [121]. Наиболее предпочтительными с точки зрения наиболее полного учета сил, действующих на один блок, являются методы Е. Спенсера [166], С. К. Сарма [126] и Моргенштерна-Прайса [151]. В работе для выполнения расчетов устойчивости методом предельного равновесия будет использоваться метод Е. Спенсера [166]. Он удовлетворяет требованиям СП 58.13330.2012 [106] к

выбору приближенных расчетных методов для оценки устойчивости дамб и плотин из грунтовых материалов.

В современной инженерной практике для оценки устойчивости откосов широко применяется компьютерное моделирование. Существуют различные программы, позволяющие выполнять расчеты устойчивости методами предельного равновесия: Slide, GeoStudio, SlopeStability, Galena, GenID32, SlopeStability, GeoStab и многие другие.

Общий принцип работы перечисленных программ примерно одинаков, создание модели производится в следующем порядке: создание геометрической модели сооружения; разделение модели на инженерно-геологические элементы; выбор геомеханической модели и назначение физико-механических свойств для каждого элемента; задание гидрогеологических условий; выбор расчетного метода, типа поверхности скольжения и метода ее нахождения. Для установления местоположения наиболее напряженной поверхности скольжения, программа выполняет перебор всех возможных поверхностей с вычислением коэффициента запаса и путем последовательного приближения находит минимальный.

Альтернативой методам предельного равновесия является метод конечных элементов (МКЭ). МКЭ для решения задач по устойчивости откосов получил развитие в работах А. Б. Фадеева, В. Н. Зверинского, В. К. Исомова, Е. В. Федоренко и др. [29, 39, 109, 110]. Расчет устойчивости здесь выполняется итерационным методом снижения прочности. Вначале рассчитывается фактическое напряженно-деформированное состояние (НДС) системы, соответствующее коэффициенту снижения прочности $K_{пр} = 1$. На следующем расчетном шаге прочностные свойства снижаются на величину $K_{пр}$, и расчет НДС выполняется снова, и так до тех пор, пока система не перейдет в неустойчивое состояние. Коэффициент запаса устойчивости в данном случае определяется как отношение критической прочности на сдвиг (τ_{cr}) к фактической (τ).

$$K_3 = \frac{\tau_{cr}}{\tau} = \frac{c_{cr}}{c} = \frac{tg\varphi_{cr}}{tg\varphi} \quad (1.1)$$

Метод итерационного снижения прочности реализован в специализированных геотехнических программах, работающих на основе МКЭ, таких как Plaxis, GEO5, Phase2, FLAC. Применение МКЭ для выполнения расчетов устойчивости регламентируется нормативными документами СП 16.13330.2012 [106], ОДМ 218.2.006-2010 [80], ОДМ 218.001-2009 [79]. Проверка результатов расчетов, полученных с использованием программных комплексов RocScience Phase2 и Plaxis выполнялась с использованием методики ВНИМИ, рекомендованной Ростехнадзором РФ [87].

Основным преимуществом метода снижения прочности перед МПР является возможность его совместного использования с другими возможностями МКЭ, а именно: решение фильтрационной задачи, использование моделей упрочняющегося грунта, моделирование процесса консолидации и выполнение расчетов устойчивости с учетом избыточного порового давления, влияние внешних факторов и многое другое, что невозможно сделать при использовании МПР. При расчетах устойчивости гидроотвалов, например, не учет фактора формирования избыточного порового давления в основании приведет к завышенным значениям коэффициента запаса, что очевидно снижает достоверность полученных результатов.

Таким образом, использование МПР и МКЭ в простых случаях дают примерно одинаковый результат, и для решения производственных задач, в которых необходимо выполнять большое количество расчетов, удобнее использовать МПР, так как он требует значительно меньших вычислительных мощностей. Однако в более сложных ситуациях, требующих одновременного учета многих факторов, предпочтительным является метод конечных элементов.

1.3.3 Геомеханические факторы, определяющие устойчивость гидроотвалов вскрышных пород

Анализ работ в области научно-методического обеспечения безопасных параметров и управления устойчивостью гидроотвалов вскрышных пород [6, 7, 26–28, 47, 51, 55, 57, 59, 64, 70, 8, 94, 100, 101, 117, 118, 13–17, 22, 24]

позволяет установить основные факторы, определяющие состояние их устойчивости, связанные в первую очередь со специфическими особенностями формирования гидроотвалов. К ним относятся инженерно-геологические особенности отведенных под сооружения территорий, неоднородность и изменчивость состава, состояния и свойств пород техногенных массивов, нестабильность напряженно-деформированного состояния (НДС) намывных пород, обусловленная изменением геофильтрационных полей напряжений. Рассмотрим эти факторы более подробно с привлечением опубликованных сведений.

На территории угольных месторождений Кузбасса повсеместно распространены неоген-четвертичные покровные отложения, разделяемые на несколько свит: моховскую ($dpN_2^1 - N_2^3 mh$), еловскую ($dzQ_{111}^4 - Q_{1V}^1$), сагарлыкскую ($laN_2 sg$), бачатскую ($dzQ_{11}^3 - Q_{111}^3 bc^v$), кедровскую ($laQ_{1-11} kd$), краснобродскую ($aQ_{111}^3 kr$), сергеевскую ($dpN_2 - Q_1^1 kr$), и меретскую ($dpNi - N_2 mr$). Общая характеристика физико-механических свойств пород указанных свит приводится в таблице 1.2.

Под гидроотвалы выделялись земельные участки, бесперспективные с позиций сельскохозяйственного и промышленного использования - крупные балки, овраги, долины небольших рек и ручьев. Поэтому непосредственно в основании всех гидроотвалов залегают наименее уплотненные и «слабые» отложения верхних свит: еловской и краснобродской, реже бачатской. Эти отложения представлены лессовидными суглинками и глинами эолового (еловская свита), делювиального и аллювиального генезиса, в русловой части водотоков встречаются маломощные слои песчано-гравийных грунтов.

Специфическими особенностями лессовидных суглинков и глин являются макропористость, преобладание в составе частиц пылеватой фракции и наличие цементационных структурных связей. Эти особенности обуславливают существенное снижение прочности пород при механическом разрушении цементационной структуры и дополнительном увлажнении, т.е. в основании гидротехнических объектов.

Таблица 1.2 – Физико-механические характеристики неоген-четвертичных отложений Кузбасса [55]

Свиты	Плотность, г/см ³	Плотность мин.части г/см ³	Влажн ость, %	Коэфф. пористости	Порист ость, %	Полная влагоемко сть, %	Степень водонасы щения	Показатель консистенц ии	Пределы пластичности			Показатели сопротивления сдвигу	
									W _L	W _p	I _p	φ, °	c, кПа
Сагарлыкская sg	1,81÷1,88	2,73÷2,75	15÷24	0,747÷ 0,815	43÷45	27-30	0,55 ÷0,80	-0.39÷+0,07	33-41	20-23	13-17	21-25	26-42
Еловская el	1,62÷1,65	2,72	14÷16	0,943	48	34	0,42÷0,46	-0,37	28-32	19	9-13	26	40
Меретская mr	2,04÷2,20	2,72÷2,77	12÷13	0,377÷ 0,524	27÷34	14-19	0,72÷0,82	-0,34	35	19	16	21	125
Бачатская bc	1,62÷1,93	2,71÷2,73	15÷25	0,743÷ 0,932	43÷48	25-35	0,46÷0,89	-0,25÷+0,27	27-38	18-23	9-16	15-31	31-55
Сергеевская sg	1,83÷1,96	2,71	22÷24	0,682÷ 0,842	42÷48	25-31	0,75÷0,92	+0,02÷+0,37	32-37	19-23	13-16	22-23	50-94
Кедровская kd	1,71÷1,93	2,70÷2,74	17÷22	0,737÷ 0,882	41÷46	26-33	0,53÷0,79	0÷+0,59	30-40	18-25	12-13	21-31	45-84
Краснобродская kr	1,81÷1,86	2,72	23	0,621÷ 0,645	43÷46	29-31	0,72÷0,79	-0,015÷ +0,19	35-42	21-15	14-17	28	28-45

Непосредственным опробованием четвертичных отложений на ряде гидроотвалов с длительным сроком эксплуатации установлено, что под влиянием намыва в естественных отложениях в основании гидроотвалов происходят изменения: влажность пород возрастает, пористое пространство заполняется водой, а прочность пород снижается [116]. Подобные изменения характерны только для приоткосных зон гидроотвалов и прилегающих к ним непригруженных участков нижнего бьефа ограждающих дамб.

Разупрочнение четвертичных отложений прослеживается не по всей мощности четвертичной толщи, а по отдельным слоям, к которым приурочена наиболее напряженная поверхность скольжения в пределах призмы возможного оползания откоса сооружения.

Факты снижения прочности четвертичных пород в основаниях гидроотвалов подтверждаются сопоставлением материалов инженерных изысканий разных лет, приведенных в ряде открытых публикаций. Например, при обосновании устойчивости откосов гидроотвалов на реке Еловка (разрез Моховский), на реке Прямой Ускат (р. Краснобродский), на реке Еланный Нарык (р. Талдинский), «Бековский» (р. Бачатский) в начальные годы эксплуатации сооружений, в качестве расчетных характеристик четвертичных грунтов принимались значения сцепления $C=31 \div 55$ кПа, угла внутреннего трения $\varphi=15 \div 31^\circ$ (таблица 1.2).

После нескольких десятков лет эксплуатации на всех этих объектах в четвертичной толще под подошвой ограждающих дамб выявлены слои измененных грунтов со сниженными характеристиками сопротивления сдвигу: $c=15 \div 25$ кПа, $\varphi=15^\circ$ [116]. Изменение физико-механических свойств неоген-четвертичных пород в основании откосов гидроотвалов явление закономерное, объясняющееся с позиций природы прочности глинистых грунтов. Сопротивление сдвигу глинистых пород $\tau_{\text{мгн}}$ (мгновенная прочность) обусловлено жестким структурным сцеплением $C_{\text{стр}}$, трением $\sigma \text{tg}\varphi$ (σ – нормальное давление) и сцеплением связности C_w , что выражается в виде [66]:

$$\tau_{\text{мгн}} = \sigma \cdot \text{tg}\varphi + C_{\text{стр}} + C_w \quad (1.2)$$

В основании откоса гидроотвала действуют касательные напряжения, возрастающие по величине по мере повышения высоты откоса. Под воздействием касательных напряжений в глинистых грунтах активизируются процессы ползучести, вызывающие со временем разрушение жестких цементационных связей и соответствующее снижение структурного сцепления. Величина $C_{стр}$ в суглинках и глинах зависит от консистенции и в твердых и полутвердых породах может достигать 60÷90% от общего сцепления (рисунок 1.4). На соответствующую величину может уменьшаться сцепление неоген-четвертичных грунтов в основании гидроотвалов только за счет механического разрушения первоначальной структуры. Кроме того, падение прочности грунтов происходит вследствие дополнительного увлажнения грунтов водой, фильтрующейся из гидроотвала, что ведет к снижению коагуляционной составляющей сцепления и внутреннего трения. Зависимость параметров сопротивления сдвигу от влажности иллюстрируется результатами изучения неоген-четвертичных грунтов Кемеровской области (рисунки 1.5, 1.6) [64].

При обосновании устойчивости откосов гидроотвалов следует учитывать специфические особенности инженерно-геологического строения намывного массива – плановую и профильную неоднородность. Изучение гидротехнических объектов различного назначения позволило выявить закономерную изменчивость намывных массивов в плане, связанную с фракционированием пульпы и возрастанием дисперсности осадков по мере удаления от мест выпуска пульпы [13, 23, 26, 28, 44, 48, 55, 76, 77, 116]. В типовом строении намывных массивов принято выделять супесчаную (пляжную), суглинистую (переходную) и глинистую (прудковую) зоны. В гидроотвалы Кузбасса поступают четвертичные грунты довольно однородные по грансоставу с доминирующей пылеватой фракцией (70-90%). Ввиду однородности поступающего в гидроотвал материала фракционирование при намыве проявляется не контрастно, распространение супесчаных пород ограничено, и уже в приоткосной части формируются отложения пылевато-глинистого состава. Намывной массив в

пределах призмы упора внешних откосов практически на всю мощность сложен суглинками и глинами в виде часто чередующихся маломощных слоев [116].

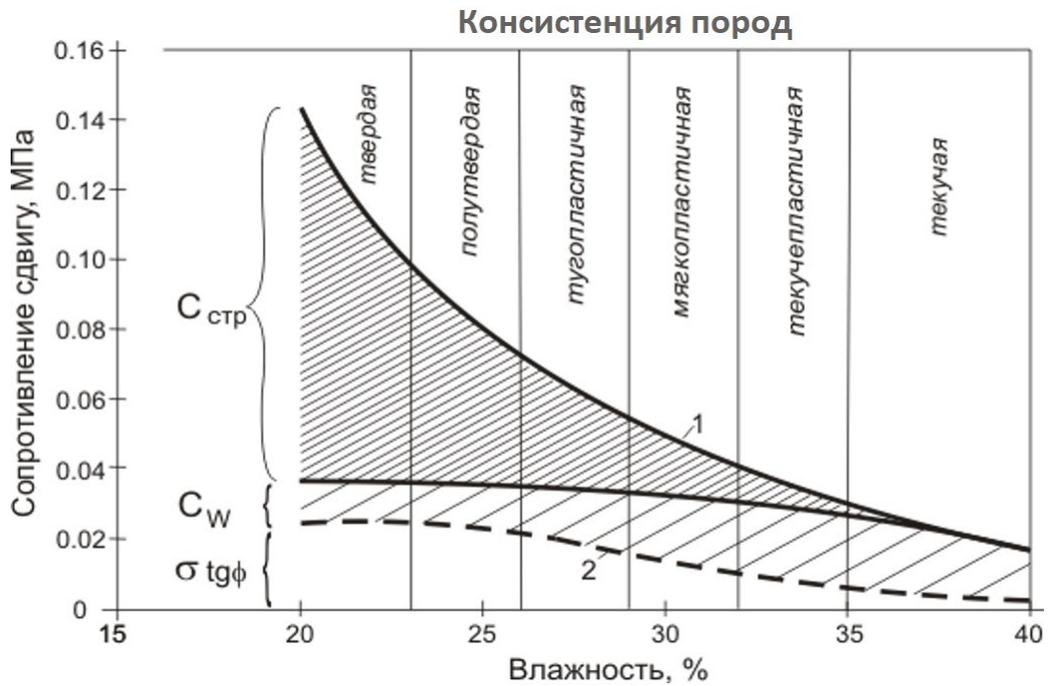


Рисунок 1.4 – Изменение сопротивления сдвигу и его составляющих в зависимости от физического состояния пород при $\sigma = 0,05$ МПа: 1 – график зависимости тмгн от влажности; 2 – граница, разделяющая области сцепления ($C_{стр} + C_w$) и трения $\sigma tg\phi$ [64]

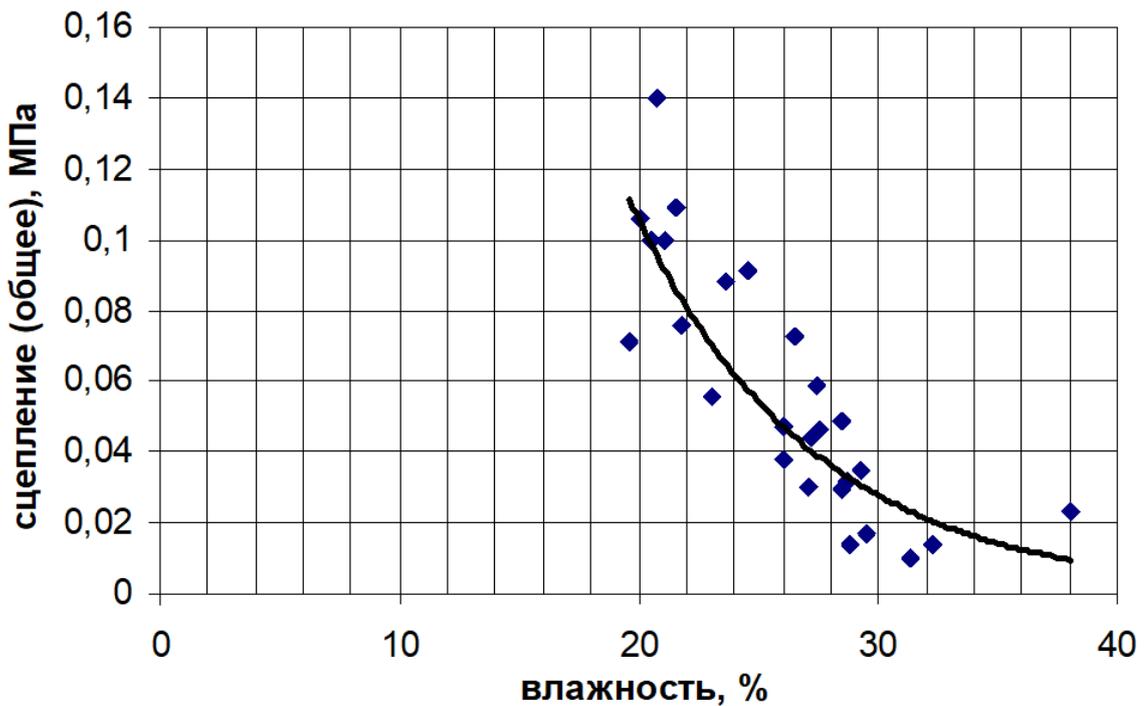


Рисунок 1.5 – Зависимость сцепления от влажности четвертичных пород г. Осинники Кемеровской области [64]

Профильная неоднородность техногенных массивов гидроотвалов обусловлена гравитационным уплотнением намывных пород и выражается в закономерном изменении по глубине их консистенции (от текучей до полутвердой) и физико-механических свойств (таблица 1.3). Консистенция является основным критерием при разделении намывной толщи на инженерно-геологические элементы (слои). Верхний слой намывного массива в течение всего срока эксплуатации и после находится в текуче-пластичном состоянии. Его мощность в приоткосной зоне составляет примерно 15 м при высоте гидроотвала менее 40 м и увеличивается до 25 м при высоте 70 м [116].

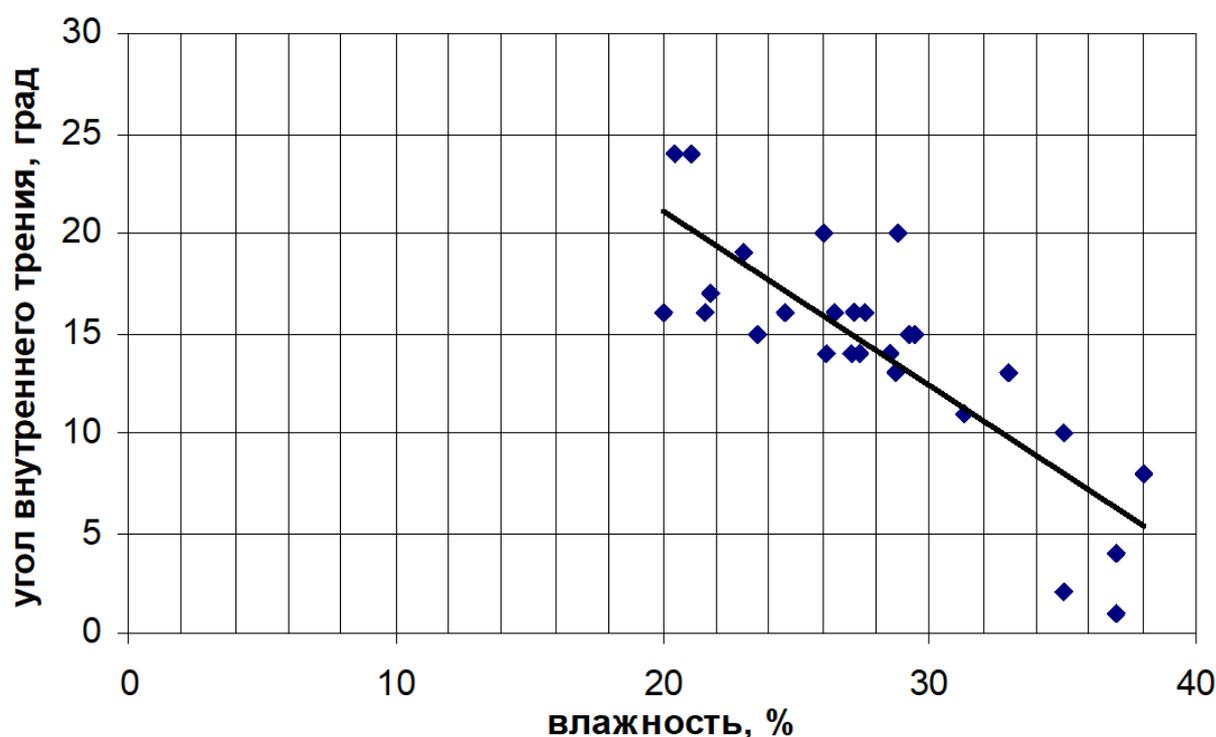


Рисунок 1.6 – Зависимость угла внутреннего трения от влажности четвертичных пород г. Осинники Кемеровской области [64]

Важнейшим фактором, определяющим устойчивость откосов гидроотвалов, является избыточное поровое давление, которое формируется в водонасыщенных намывных грунтах под воздействием различных технологических нагрузок, создаваемых горными работами. Механизм влияния порового давления на состояние устойчивости откосов намывных массивов объясняется прямой зависимостью прочностных параметров от эффективных напряжений в породе. Напряженное состояние водонасыщенных пород в упрощенном виде можно представить выражением: $\sigma_{эф} = \sigma_{пол} - \sigma_U$, где $\sigma_{эф}$ - эффективные

напряжения, действующие в скелете породы и определяющие их прочностные свойства; $\sigma_{\text{пол}}$ - полные напряжения, создаваемые весом вышележащих пород; σ_U - напряжения в поровой воде (нейтральные напряжения). Специфика намывных пород состоит в том, что в отличие от материнских (неоген-четвертичных), они не обладают жёсткой цементационной структурой. Поэтому любая внешняя нагрузка на массив воспринимается прежде всего поровой водой, вызывая повышение нейтральных напряжений, снижение эффективных напряжений в скелете и зависящих от него параметров сопротивления сдвигу.

Строительство ограждающих дамб и пригрузов на откосе сооружения, отсыпка отвалов на поверхности намывного пляжа отражается на изменении НДС намывных пород из-за резкого колебания (возрастания и рассеивания) порового давления. Причем реакция в изменении геофильтрационных полей напряжений распространяется далеко за пределы непосредственного места ведения работ. Игнорирование этого фактора привело к неоднократным аварийным случаям при строительстве дамб наращивания в эксплуатационный период и при ведении отвальных работ на гидроотвалах вблизи ограждающих дамб уже после вывода сооружений из эксплуатации. Наиболее информативные сведения по данному вопросу изложены в ряде работ, посвященных анализу причин аварий на гидроотвале «Бековский» [57, 58, 116].

Таблица 1.3 – Физико-механические свойства намывных пород Центрального Кузбасса [55]

Характеристики пород	Супесчаная зона	Глинистая зона			Суглинистая зона		
		Подзоны пород по консистенции			Подзоны пород по консистенции		
		тугопластич.	мягкопластич.	текучих	тугопластич.	мягкопластич.	текучих
Плотность, т/м ³	1,73-2,12	1,92-2,03	1,89-1,95	1,62-1,85	2,01-2,04	1,93-2,02	1,81-1,94
Пористость, %	34-43	41-44	43-50	50-71	40-41	38,5-46	44-52
Влажность, %	14-30	28-31	31-38	35-100	22,1-26,3	24,5-31,4	27-40
Сцепление, кПа	13-55	40-60	15-35	5-15	40-63	23-43	15-27
Угол внут. трения, град	25-32	7-17	7-17	0-7	21	18-24	15-25
Кoeff. сжимаемости, МПа ⁻¹	0,60 - 0,08	0,30 - 0,10	1,00-0,30	-	0,20-0,09	0,80-0,20	1,40-0,40
Кoeff. фильтрации, м/сек	10 ⁻⁴ -10 ⁻⁸	10 ⁻¹⁰ -10 ⁻¹¹			10 ⁻⁸ -10 ⁻⁹		

За время эксплуатации гидроотвала «Бековский» произошло две аварии, обе - в ходе отсыпки дамб наращивания и практически по одному сценарию. Формирование дамб высотой 5 м осуществлялось двумя слоями по 2,5 м с развитием фронта отсыпки от краев к центру плотины. При отсыпке второго слоя происходило смещение верхней части откоса в центре плотины на участке протяженностью 250-300 м. Оползень захватывал помимо отсыпаемой дамбы еще две-три нижние дамбы. Высота гидроотвала на тот период составляла 40-45 м [57].

Во время второй аварии велись непрерывные наблюдения за изменением порового давления в намывных породах по датчикам, внедренным в массив в пределах призмы возможного оползания (рисунок 1.7). В момент прохождения насыпью профиля наблюдательной станции почти по всем датчикам зафиксирован резкий подъем порового давления, после чего показания датчиков, попавших в оползневую зону, обрываются (рисунок 1.8). По уцелевшим после аварии датчикам в течение последующих 3-х месяцев наблюдался весьма интенсивный спад порового давления до величин, предшествующих сдвиговой деформации [57].

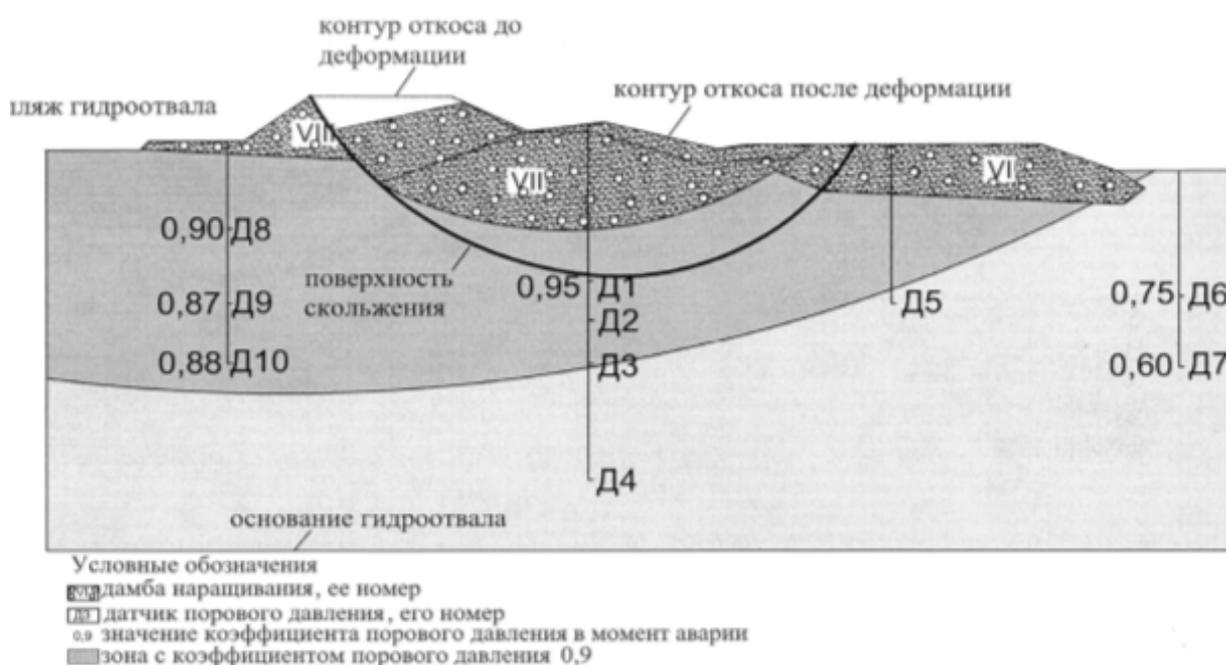


Рисунок 1.7 – Схема нарушения устойчивости верхней части откоса гидроотвала «Бековский» при отсыпке УШ дамбы наращивания (1989 г.) [116]

Интерпретация результатов наблюдений показала, что в момент нарушения устойчивости поровое давление в верхней части намывного массива мощностью около 20 м практически сравнялось с давлением, обусловленным весом вышележащих пород. Данное напряженное состояние характеризовалось коэффициентом порового давления β_u (отношение нейтральных напряжений σ_u к полным $\sigma_{пол}$), составляющим порядка 0,87-0,95. Обратными расчетами устойчивости по оползневой поверхности получено, что в момент деформации угол внутреннего трения был близок к нулю при сцеплении 15 кПа. После стабилизации оползня и частичного рассеивания порового давления φ составлял 13° при той же величине сцепления [116].

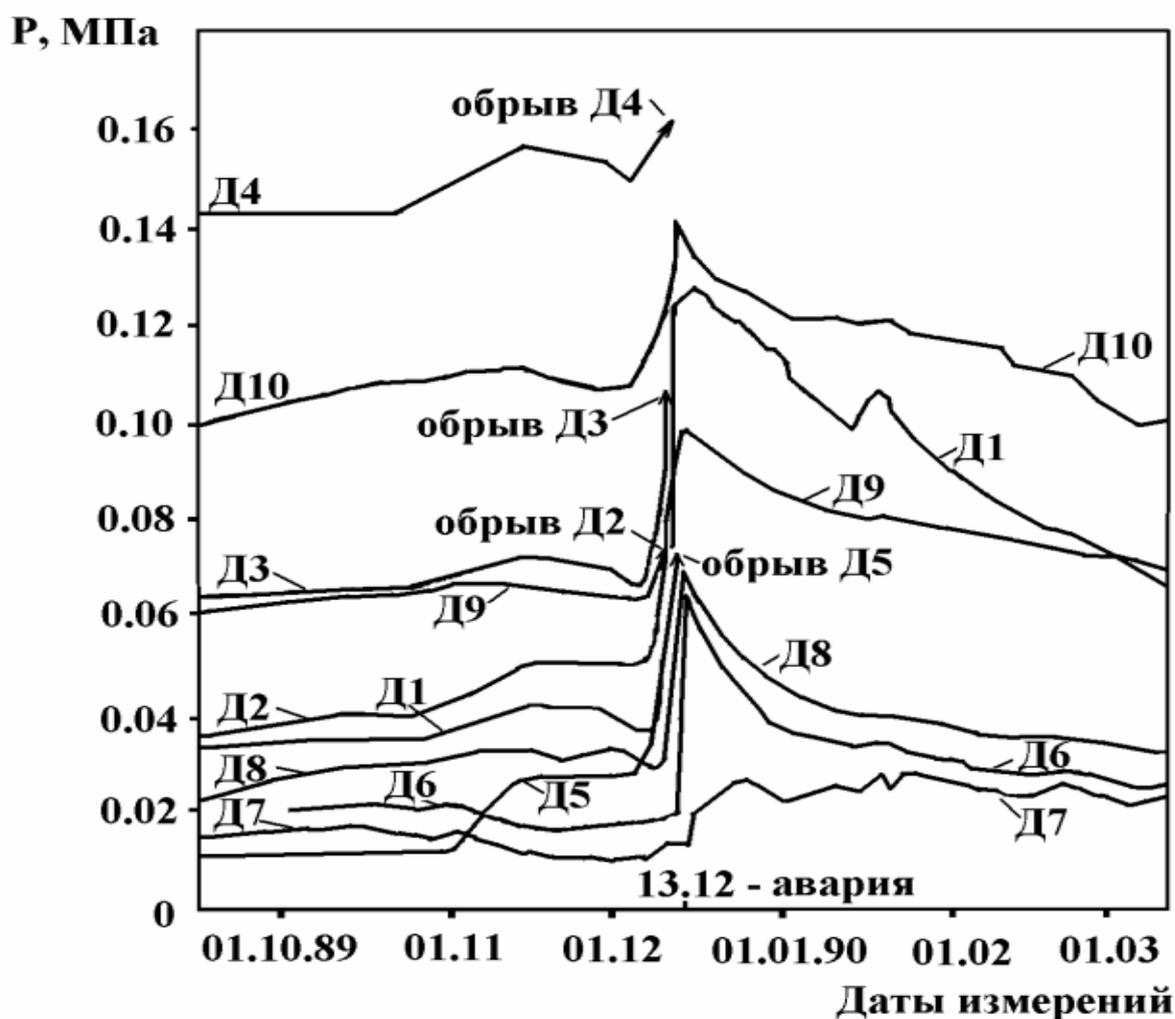


Рисунок 1.8 – Результаты наблюдений за изменением избыточного порового давления (ΔP_u) в намывном массиве гидроотвала «Бековский» до и после оползневой деформации [57, 116]

Пример крупной аварии, произошедшей по причине не учета специфики НДС намывных массивов в пост эксплуатационный период, приводится в работе [54]. В 2005 году при ведении отвальных работ на гидроотвале «Бахтытинский», расположенном на борту разреза «Краснобродский», произошла внезапная оползневая деформация с захватом отсыпаемого яруса и намывного массива общим объемом порядка 500 тыс. м³ (рисунок 1.9).



Рисунок 1.9 – Вид на оползень со стороны борта разреза [54]

Протяженность оползня по фронту составила 200 м. Часть сползшей массы переместилась по борту разреза на дно горной выработки. Допущена ошибка в технологических параметрах нагружения намывного массива, а именно: отсыпка отвального яруса высотой 30 м осуществлялась в направлении от центра гидроотвала к ограждающей дамбе. В намывных породах перед фронтом отвала происходило нагнетание порового давления, которое постоянно нарастало, пока не достигло значений полных напряжений. Сопротивление сдвигу намывных пород снизилось настолько, что они, как основание отсыпаемого отвального яруса, больше не обеспечивали устойчивость всей системы «отвал + гидроотвал» и были выдавлены вместе с отвалом и

ограждающей дамбой в свободное пространство, т.е. в открытую горную выработку. Обратными расчетами получено, что деформация произошла при прочностных параметрах намывных пород: $C=30$ кПа, $\varphi=6^{\circ}$. Хотя по данным инженерных изысканий на стадии проектирования отвалов прочность распространенных здесь намывных суглинков тугопластичной консистенции оценивалась параметрами: $C=30\div 50$ кПа, $\varphi=12^{\circ}$.

1.4 Выводы по первой главе

В первой главе проведен анализ методов прогноза процессов сдвижения и оседания земной поверхности при разработке угольных месторождений подземным способом длинными очистными столбами. Наиболее надежным является метод типовых кривых, описанный в «Правилах охраны...» [84]. Однако он имеет свои недостатки. В частности, как и любой эмпирический метод, он хорошо работает только в тех условиях, для которых он разрабатывался. Альтернативой ему выступают методы численного моделирования. Их преимуществом по сравнению с эмпирическими и полуэмпирическими методами прогноза является универсальность. С их помощью возможно моделировать процесс сдвижения, учитывая фактическую геометрию выработок и массива, слоистость, свойства горных пород, рельеф земной поверхности и многое другое. Использование численного моделирования позволит выполнить прогноз изменения формы и НДС отвалов, гидроотвалов, бортов карьеров и других откосных сооружений при их подработке.

Рассмотрены методы оценки устойчивости откосов в целом, а также описана специфика при оценке устойчивости откосов намывных сооружений. Надежный прогноз устойчивости откосов гидроотвалов при ведении под ними подземных горных работ может быть выполнен при соблюдении следующих условий: а) построении расчетных моделей с учетом плановой и профильной неоднородности намывного массива; б) обеспечении модели достоверными характеристиками физико-механических свойств пород с учетом возможного их изменения под воздействием деформаций земной поверхности в пределах

мульды сдвижения; в) применении соответствующих расчетных методов и программного обеспечения, позволяющих учесть специфику напряженно-деформированного состояния водонасыщенных породных массивов, включая оценку развития избыточного порового давления.

Приведенные примеры реальной подработки гидроотвалов на угольных месторождениях свидетельствуют об актуальности данного исследования и о его практической значимости. Подработка оградительных конструкций и дамб гидроотвала негативно сказывается на их устойчивости и может привести к их разрушению и гидродинамической аварии. При этом существует лишь качественное описание геомеханических процессов, протекающих при подработке. В настоящий момент отсутствуют какие-либо методики, позволяющие выполнить количественный анализ степени влияния подработки сооружения на его устойчивость.

Выполненный в главе анализ геомеханических процессов в техногенных и естественных массивах при совместной эксплуатации гидроотвалов и подземной добычи угля позволил сформулировать **цель работы** - обеспечение устойчивости гидроотвалов на подрабатываемых территориях при подземной разработке угольных месторождений.

Поставленная цель достигается решением следующих **основных задач исследований**:

1. Выполнить анализ горногеологических условий ведения подземных горных работ на угольных месторождениях под объектами промышленной гидротехники.
2. Разработать методику прогноза параметров процесса сдвижения 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.

ГЛАВА 2 ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССА СДВИЖЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ ОТРАБОТКЕ УГОЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ЛЕНИНСК-КУЗНЕЦКОГО РАЙОНА

2.1 Горно-геологическая характеристика объектов исследования

2.1.1 Геологические, гидрогеологические и инженерно-геологические условия Егозово-Красногорского каменноугольного месторождения

Егозово-Красноярское месторождение сложено осадками Кольчугинской и Тарбаганской серий Кузбасса, перекрытыми повсеместно четвертичными осадками.

Кольчугинская серия верхнепермского возраста мощностью 1690 м подразделяется на две подсерии: Ильинскую и Ерунаковскую. Ильинская подсерия представлена Ускатской свитой, сложенной чередованием мелких слоев различной крупности алевролитов и мелкозернистых песчаников, реже аргиллитов и пластов угля, которые на месторождении не отрабатываются. Ерунаковская подсерия повсеместно распространена на месторождении и представлена осадками трех свит: Ленинской, Грамотеинской и Тайлуганской.

Ленинская свита мощность 480 м вскрыта по всему месторождению. В разрезе свиты содержится 8-10 рабочих пластов угля мощностью от 0,74 до 2,77 м, которые отрабатываются за пределами месторождения. Грамотеинская свита мощностью 360 м является наиболее угленасыщенной свитой разреза. Мощные слои песчаников в кровле пластов Байкаимского и Полысаевского II одновременно в сочетании с мощными пластами угля являются маркирующими горизонтами свиты. Свита содержит до 9 рабочих пластов угля, из которых почти все отрабатываются на месторождении преимущественно подземным способом. Тайлуганская свита вскрыта частично и отличается наличием мощных слоев песчаников, алевролитов и пластов угля. Пласты угля достигают мощности 4-6 м и, как правило, разрабатываются открытым способом в пределах Моховского и других углеразрезов района. Маркирующим горизонтом является пласт Красногорский.

Четвертичные отложения сплошным чехлом перекрывают коренные углевмещающие породы и представлены глинами, суглинками, реже

аллювиальными глинистыми песками. Их мощность меняется от 1-10 м на левом крутом склоне реки Мерети до 50-80 м в правобережной части долины реки.

2.1.2 Горно-геологические условия шахты «Имени А.Д. Рубана»

Общие сведения

Шахта "им. А.Д. Рубана" (до 2013 г. – шахта "Красноярская") АО "СУЭК-Кузбасс" административно относится к Ленинск-Кузнецкому району Кемеровской области. Шахта "им. А.Д. Рубана" включает в себя лицензионные участки "Красноярский" и "Магистральный".

На Красноярском участке по состоянию на январь 2019 г. полностью отработаны запасы угля по пластам Байкаимский и Полысаевский и горные работы ведутся по пл. Надбайкаимскому во второй панели. В 2018 году завершены работы по лаве №1208 и начата отработка лавы №1206 со сроком завершения 2019 год. В настоящее время идет подготовка лавы №1204. На участке Магистральный в декабре 2017 г началась отработка первоочередной лавы № 812 по пласту Полысаевскому II, ведение горных работ на которой завершилось в конце 2018 года. В настоящее время ведется отработка лавы № 814.

Смежным горнодобывающим предприятием, имеющим общую границу с шахтой "Имени А.Д. Рубана" с северо-западной стороны, является ликвидированное в настоящее время Шахтоуправление "Кольчугинское". С юго-восточной стороны расположен лицензионный участок "Благодатный", относящийся к полю шахты "Алексиевская" УК "Заречная".

В 2012-2013 гг. согласно лицензионному соглашению недропользователем были проведены геологоразведочные работы на участке Магистральный. Объемы бурения, опробования, изучения условий эксплуатации выполнены полностью в соответствии с утвержденным проектом. Участок был подготовлен для промышленного освоения. На участке Магистральном в декабре 2017 г. началась, а в 2018 г. завершилась отработка первоочередной лавы № 812 по пласту Полысаевскому II. В настоящее время ведется отработка

лавы № 814. В перспективе планируется отработка еще трех двух по этому же пасту, а также отработка нижележащих пластов (Надбайкаимский и Байкаимский) в нисходящей последовательности.

Литологический состав и физико-механические свойства пород и углей

По особенностям литологического состава, физико-механическим свойствам и инженерно-геологическим особенностям в пределах участков Красноярского и Магистрального выделяются три группы пород:

- рыхлые неоген-четвертичные породы;
- выветрелые коренные породы пермского возраста;
- не затронутые выветриванием коренные породы.

Неоген-четвертичные рыхлые отложения

Неоген-четвертичные отложения сплошным чехлом покрывают поверхность пермских отложений. Их мощность изменяется от 18 до 88 м. Минимальная мощность приурочена к долине р. Мереть в юго-восточной части шахтного поля, а максимальная - прослеживается на западе.

Неоген-четвертичные отложения представлены суглинистыми разностями от легких лессовидных до тяжелых иловатых и глинами. В долине р. Мереть скважинами вскрыты отдельные участки заиленных песчано-галечниковых русловых отложений мощностью от 0,5 м до 2-3 м.

Суглинки от светло-палевого до темно-бурого цвета твердые и полутвердые, редко тугопластичные, непросадочные, ненабухающие и слабонабухающие, редко средне- и сильнонабухающие. Плотность грунта ρ – от 1,74 до 2,08 г/см³; сцепление C – от 20 до 100 кПа; угол внутреннего трения φ – от 15° до 31°; модуль деформации E – от 3,4 до 14,8 МПа.

Глины элювиально-делювиальные темно-серые твердые, редко полутвердые, непросадочные, низкой и средней прочности, ненабухающие, среднеуплотненные, среднесжимаемые, редко слабосжимаемые, неразмокаемые. Степень усадки составляет 6,7÷21,3%. Плотность грунта ρ – от 1,97 до

2,08 г/см³; сцепление C – от 25 до 67 КПа; угол внутреннего трения φ – от 19° до 29°, модуль деформации E – от 6,4 до 19,3 МПа.

Пермские угленосные отложения

Угленосные отложения шахтного поля представлены чередованием слоев песчаников, алевролитов, реже аргиллитов, различных типов переслаиваний, взаимно переходных разностей и углистых алевролитов. Мощность слоев колеблется от нескольких сантиметров до нескольких десятков метров.

Песчаники, в основном мелкозернистые, характеризуются хорошей и средней степенью отсортированности и слабой окатанностью обломочного материала: преобладают полуугловатые и слабоокатанные формы, нередко пертерпевшие изменения коррозией и регенерацией. По физико-механическим характеристикам песчаники являются наиболее прочными из пород, слагающих толщу шахтного поля. Временное сопротивление сжатию, в зоне, не затронутой выветриванием, колеблется в основном в пределах от 45 до 80 МПа. Существенно снижает прочность песчаников включения линз угля, а также трещиноватость. В зависимости от количества включений прочность песчаников может снижаться до 13 МПа. В то же время сидеритизация песчаника увеличивает его прочность до величины более 100-190 МПа. Модуль упругости песчаников варьируется в пределах 11,7-51,9 ГПа, коэффициент Пуассона – 0,12-0,28.

Алевролиты представлены всеми структурными, нередко смешанными и переходными типами. Отсортированность обломочного материала хорошая и средняя, окатанность слабая. По физико-механическим свойствам алевролиты занимают промежуточное положение между песчаниками и аргиллитами. алевролиты вне зоны выветривания имеют временное сопротивление сжатию 30-70 МПа. Модуль упругости алевролитов варьируется в пределах 15-48 ГПа, коэффициент Пуассона – 0,14-0,3.

По своим физико-механическим Аргиллиты приурочены преимущественно к почвам угольных пластов. Это алевролитовые или алевролитистые породы с пелитовой, алевропелитовой, фитогенно-пелитовой и фитогенно-

алевролитовой структурой. Среднее временное сопротивление сжатию аргиллитов составляет 15-25 МПа. Модуль упругости – 10-48,2 ГПа; коэффициент Пуассона – 0,10-0,28.

Угли

Угли обладают однородным петрографическим составом. Они сложены, в основном, блестящими и полублестящими разностями с редкими линзами фюзена. Временное сопротивление сжатию составляет 22,3 МПа, крепость по шкале М.М. Протоdjяконова 0,48-1,5.

Для углей, затронутых выветриванием, характерно уменьшение прочности, увеличение влажности. На выходе под наносы (1-2 м от поверхности коренных пород) уголь часто переходит в сажу. Наиболее часто сажа встречается, если в основании наносов залегают галечники.

Выветрелые породы

Выветрелые породы фиксируются в разрезах скважин до глубины 30-50 м от поверхности коренных пород. Для этих пород характерно резкое увеличение микротрещин, существенное снижение прочностных показателей, увеличение влажности, пористости. По данным лабораторных исследований породы зоны выветривания характеризуются большим разбросом значений физико-механических свойств. Это связано с неравномерным изменением пород при выветривании. Пределы прочности на одноосное сжатие выветрелых песчаников изменяется от 1,2 до 30 МПа, алевролитов от 4 до 18 МПа, аргиллитов - 6-25 МПа. Такие физические свойства, как пористость и естественная влажность у выветрелых алевролитов выше, чем у пород, не затронутых выветриванием.

Гидрогеологические условия

Комплексное изучение гидрогеологических условий производилось на этапе геологической разведки месторождения. В процессе бурения разведочных скважин велись элементарные гидрогеологические наблюдения, которые заключались в замерах уровней воды в период проходки, учёте потерь промысловой жидкости и замере уровней во времени. По степени водоносности,

режиму питания, условиям залегания и распространению в пределах участков развиты водоносный комплекс четвертичных отложений и водоносный комплекс верхнепермских угленосно-терригенных пород Кольчугинской серии.

2.2 Экспериментальное изучение процесса сдвижения на шахте «Имени А.Д. Рубана»

2.2.1 Описание научно-производственного эксперимента

В начале 2018 года проводились полномасштабные экспериментальные исследования процесса сдвижения от отработки лавы №812 на новом участке Магистральный шахты «им. А.Д. Рубана». Исследования проводились в рамках нескольких научно-исследовательских работ, посвященных изучению механизма провалообразования на земной поверхности [30], определению размеров зоны водопроводящих трещин, характерных для данного месторождения, и обосновании безопасных условий отработки свиты угольных пластов под гидроотвалом [62, 147].

Экспериментальные исследования включали в себя: наблюдения за деформациями земной поверхности по оседаниям грунтовых реперов по профильной линии наблюдательной станции; частотные наблюдения за оседанием глубинных реперов, установленных в скважину №2; измерения показателей датчиков порового давления, установленных в скважину №1 [38]. Местоположения гидрогеологической скважины № 1, линии заложения грунтовых реперов на земной поверхности и скважины №2 с глубинными реперами показаны на рисунке 2.1.

Лава № 812 длиной 300 м и с вынимаемой мощностью пласта 4 м начала эксплуатироваться с января 2018 года. В начале марта 2018 года лава приблизилась к опытному участку и были зафиксированы первые оседания грунтовых реперов. Глубина залегания пласта Польшаевский-II в районе опытного участка составляет 191 м. Мощность четвертичных отложений составляет примерно 50 м. Глубины заложения реперов в скв. № 2 следующие: R5 – 32 м; R4 – 52м; R3 – 72 м; R2 – 92 м; R1 – 112 м.

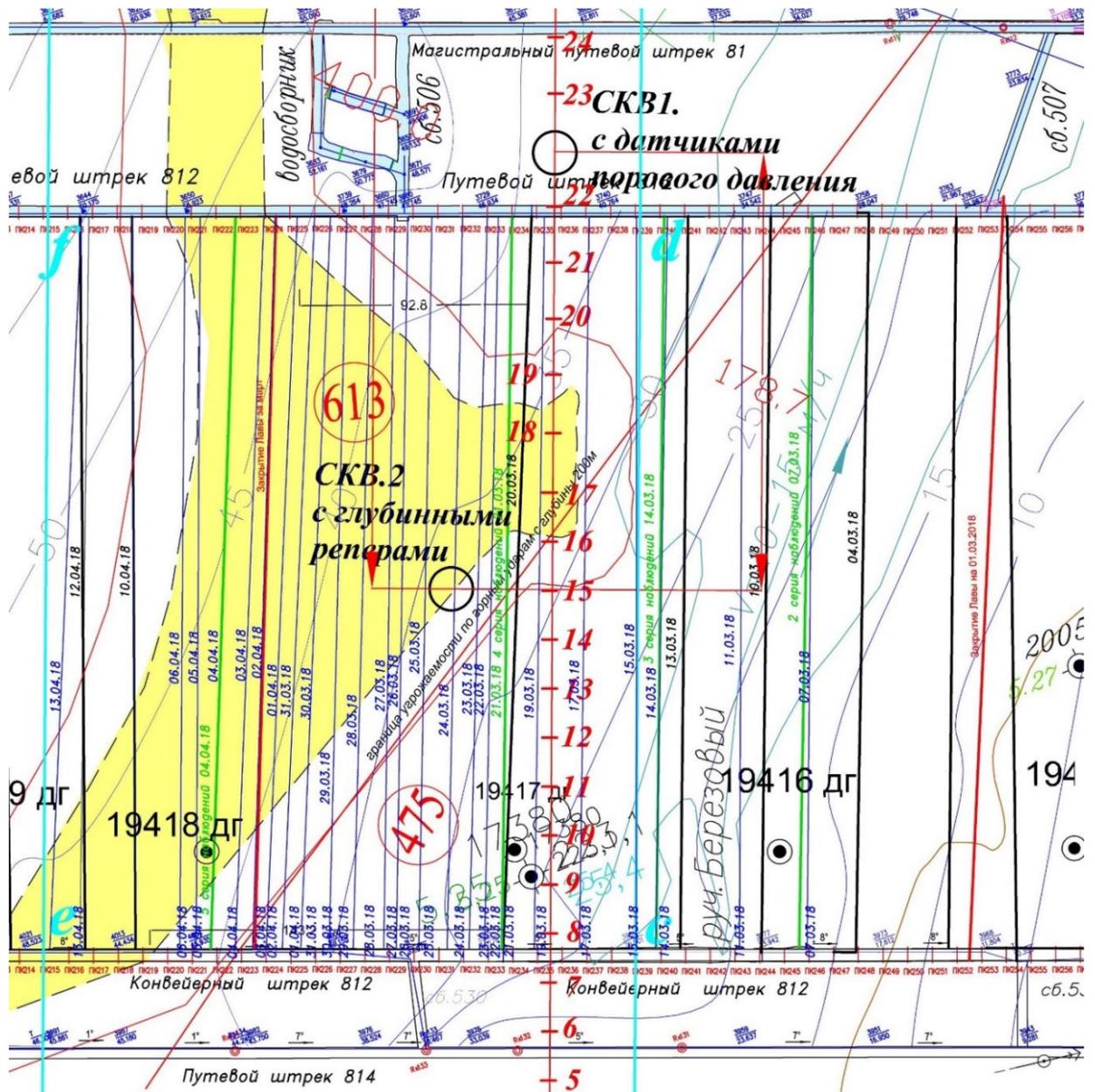


Рисунок 2.1 – Выкопировка с плана горных работ по пласту Польшаевский-II (Лавы 812), с нанесением на него местоположений наблюдательной станции, скважин № 1 и 2, а также положений очистного забоя по датам

2.2.2 Результаты наблюдения за сдвижением грунтовых реперов

Грунтовые репера №1-26 были установлены в профильной линии в среднем через каждые 20 м. Было выполнено 9 серий наблюдений, две из которых до начала процесса сдвижения. [56]

По результатам проведения научно-производственного эксперимента была получена муфта сдвижения земной поверхности от отработки лавы №812 (рисунки 2.2 и 2.3). При сопоставлении ее с прогнозной по ПБ 07-269-98 [84] были отмечены небольшие расхождения, а именно:

- величина максимального оседания по результатам наблюдений составила 3,18 м, что всего на 5% больше прогнозного значения (3,01 м);

- максимальное оседание земной поверхности реализуется в районе репера №13, а не около репера №15, как прогнозировалось до проведения эксперимента. Расстояние между реперами 13 и 15 – 40 м.

- ширина мульды сдвижения вкrest простирания выработки (зоны влияния) получилась 533 м, что на 7% больше прогнозной величины 496 м.

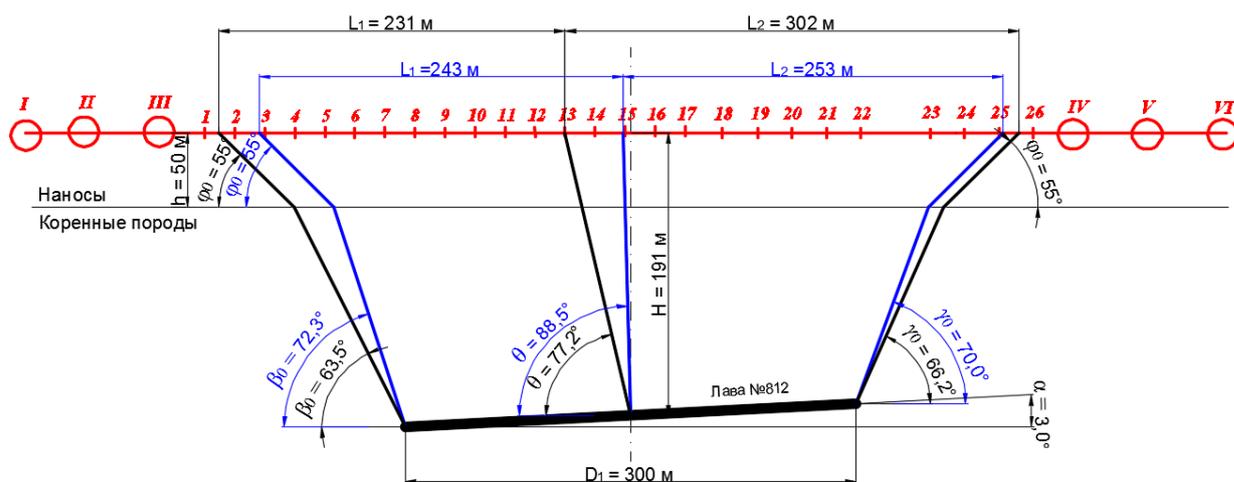


Рисунок 2.2 – Разрез по линии наблюдательной станции.

1-26 – грунтовые реперы; I-VI – опорные реперы; Синий – угловые параметры по ПБ 07-269-98; Черный – фактические угловые параметры

На рисунке 2.2 изображен разрез в районе участка проведения эксперимента, с нанесением на него взаимного расположения лавы №812 и наблюдательной станции на земной поверхности, а также угловых параметров процесса сдвижения, предложенных нормативным документом для условий Кузнецкого угольного бассейна [84] и полученных по результатам эксперимента.

Согласно ПБ 07-269-98 [84] граничные углы для месторождений Кузбасса, применительно к условиям шахты им. А.Д. Рубана составляют: $\delta_0 = 70^\circ$; $\beta_0 = 72,3^\circ$; $\gamma_0 = 70^\circ$; $\varphi_0 = 55^\circ$. Угол максимального оседания – $\theta = 88,5^\circ$.

Фактические значения граничных углов получаются путем обратного построения границ зоны влияния очистной выработки. Границы зоны влияния (мульды) определяются по данным натурных наблюдений по величине наклонов (i). За границу мульды принимается точка в которой достигается условие

$|i| \leq 0,5 \cdot 10^{-3}$ [38]. При этом принято, что граничный угол в наносах остается неизменным: $\varphi_0 = 55^\circ$.

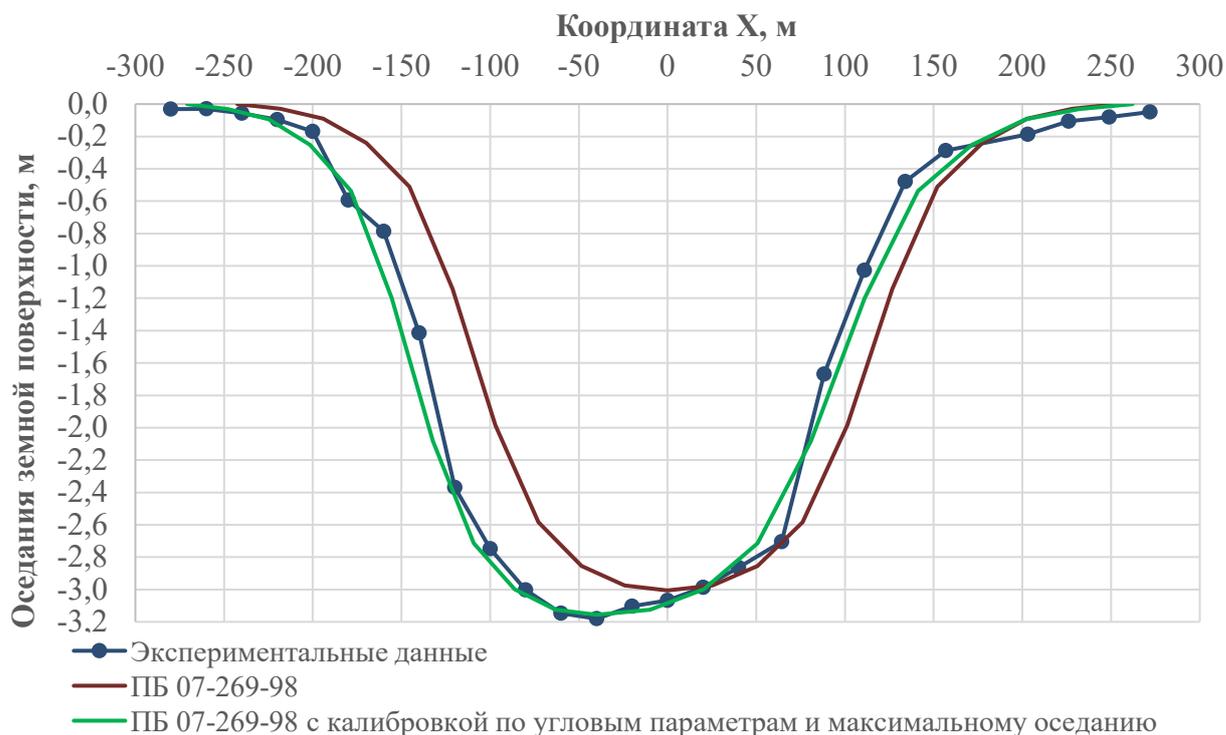


Рисунок 2.3 – Мульды сдвижения земной поверхности:

Синяя – по натурным данным; красная – прогнозная по ПБ 07-269-98; зеленая – по ПБ 07-269-98 с учетом калибровки по угловым параметрам

Таким образом значения граничных углов в коренных породах по результатам натуральных наблюдений составили: $\beta_0 = 63,5^\circ$; $\gamma_0 = 66,2^\circ$ (рисунок 2.2).

По результатам эксперимента точка с максимальным оседанием попала на репер №13, расположенный на расстоянии 40 м в сторону падения от своего прогнозного положения. Таким образом фактический угол максимального оседания составил $\theta = 77,2^\circ$ (рисунок 2.2).

Используя уточненные угловые параметры можно скорректировать нормативную прогнозную методику под фактический механизм сдвижения, характерный для данного месторождения, что позволит более точно спрогнозировать сдвиги и деформации земной поверхности от отработки последующих очистных выработок участка Магистральный.

Величина максимального оседания, полученная по результатам эксперимента – 3,18 м, что на 5% превышает нормативную величину. Таким образом,

для более корректного прогноза необходимо ввести поправочный коэффициент $K_{осед} = 1,05$ в формулу расчета величины η_{max} :

$$\eta_{max} = K_{осед} \cdot q_0 \cdot m \cdot \cos\alpha \cdot N_1 \cdot N_2 \quad (2.1)$$

Скорректированная по полученным углам мульда сдвижения приведена зеленым на рисунке 2.3. Следует отметить практически точное совпадение ее с натурными данными. Использование уточненных угловых параметров процесса и поправочного коэффициента по оседаниям позволит прогнозировать сдвигения и деформации земной поверхности с более высокой точностью.

2.2.3 Результаты наблюдения за сдвижением глубинных реперов

Наблюдения за сдвижением глубинных реперов в активной стадии осуществлялись раз в сутки, после нее один раз в месяц. При этом фиксировались как оседания реперов, так и оседания земной поверхности, путем определения высотной отметки планки над скважиной. Для каждого измерения фиксировалось также положение очистного забоя. На рисунке 2.1 синими линиями обозначены положения забоя с обозначением соответствующей даты измерения. Используя данную информацию, можно определить на каком расстоянии находился забой лавы в момент измерения и построить график оседаний в зависимости от расстояния от забоя выработки до скважины (рисунок 2.4). Взяв за основу принцип суперпозиции можно утверждать, что каждая точка в массиве горных пород проходит все стадии формирования мульды сдвижения. Таким образом на графике (рисунок 2.4) представлены мульды сдвижения массива горных пород на различных глубинах.

Из графика видно, что деформации на земной поверхности проявлялись раньше, чем в подрабатываемом массиве. Связанно это в первую очередь с тем, что мульда сдвижения формируется под некоторым граничным углом и при движении лавы сначала в нее попадают точки на земной поверхности, а затем уже все нижние точки. Также это подтверждается и наблюдениями за репером №5, заложенным в наносах, на глубине 32 м, оседания которого на

начальной стадии превышали оседания реперов, заложенных в коренных породах. Коренной массив при этом деформировался синхронно.

После прохождения очистного забоя непосредственно под скважиной ситуация изменилась на противоположную. Репера в коренных породах начали опускаться более интенсивно и явно стало проследиваться расслоение в толще коренных пород, а также на контакте с четвертичными отложениями. В процессе также наблюдалось рассогласование между репером №5 и земной поверхностью, однако в конечном итоге разница между оседаниями в этих точках практически отсутствовала. Это говорит о том, что в процессе деформирования в четвертичных породах происходило разуплотнение, которое и привело к неравномерности оседаний по глубине. К моменту реализации полных оседаний массив уплотнился повторно, и разница в оседаниях полностью нивелировалась.

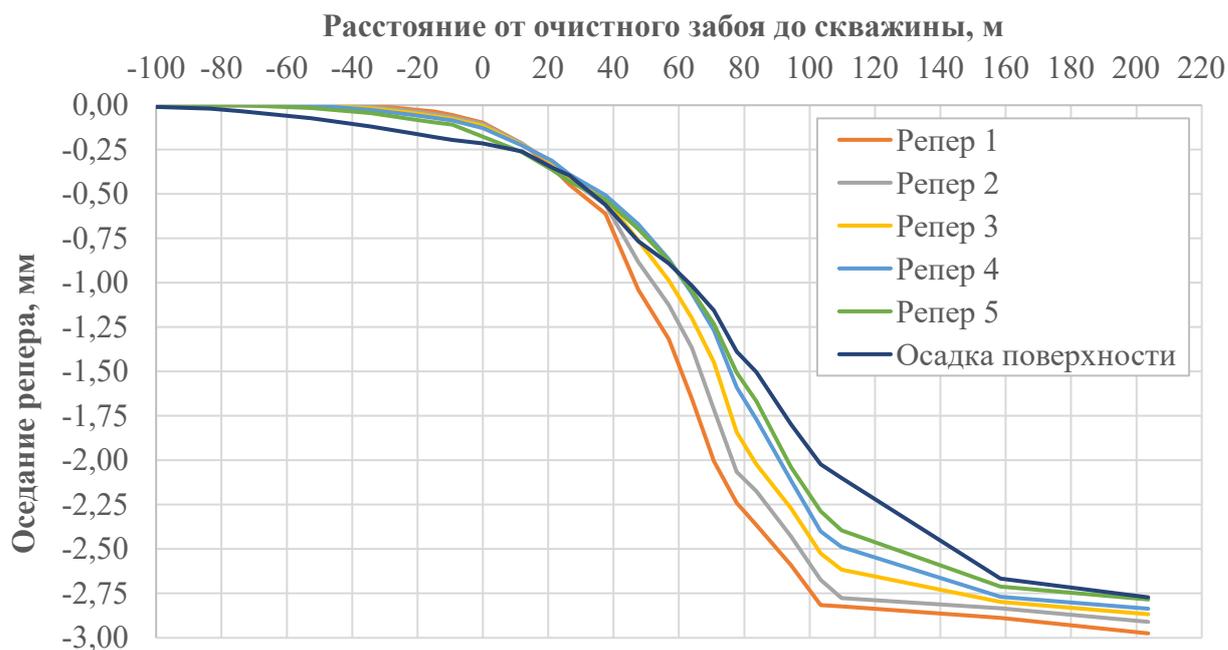


Рисунок 2.4 – Оседания реперов 1-5 и земной поверхности, приведенные к расстоянию от очистного забоя до скважины в момент наблюдения

2.2.4 Динамика развития деформаций на земной поверхности

Рассмотрим деформации земной поверхности во времени. На рисунке 2.5 приведен график оседаний земной поверхности в зависимости от расстояния от очистного забоя до точки наблюдения. В качестве точек

наблюдения выступает планка на скважине №2, оседания которой фиксировались раз в сутки, а также грунтовый репер №15 профильной линии, по которому в активной стадии было выполнено четыре серии наблюдений. Для корректного сравнения графики приведены к единой оси, с учетом поправки на расстояние между репером №15 и скважиной №2 в плане (40,5 м).

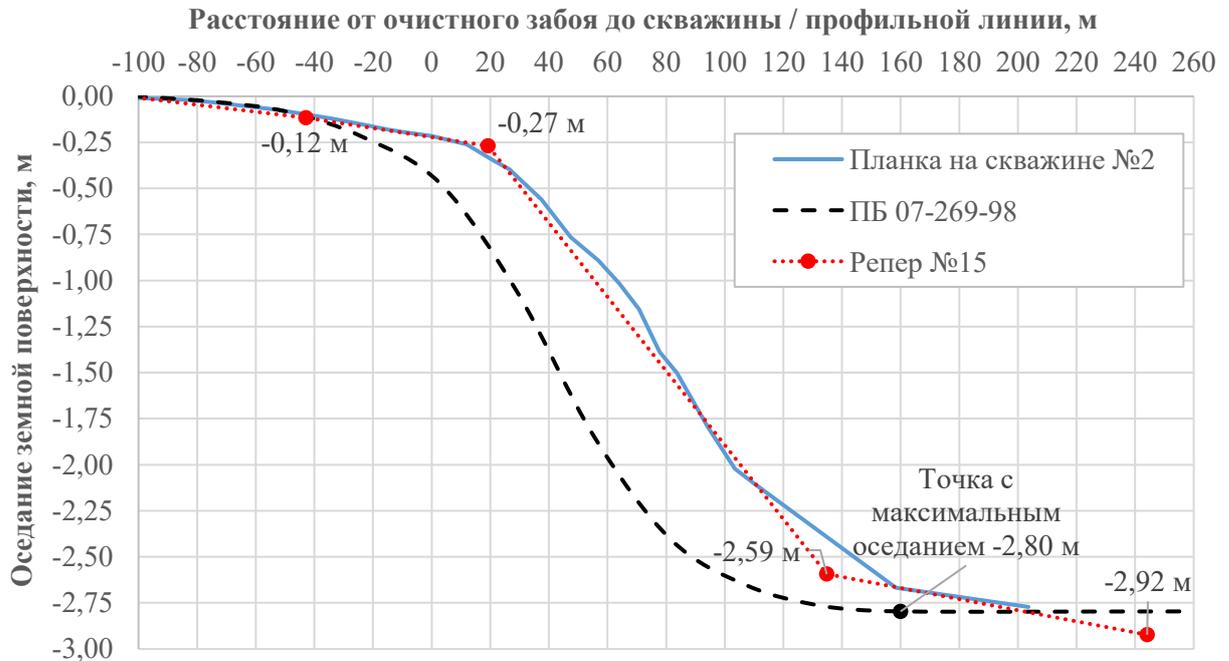


Рисунок 2.5 – Динамика оседаний земной поверхности по грунтовому реперу №15 и планке на скважине №2

Поскольку, основываясь на принципе суперпозиции деформаций, данный график можно трактовать как полумульду сдвижения по простиранию, корректным будет сравнить ее с типовой кривой по «Правилам охраны...» [84]. Справедливость данного сравнения подтверждает и то, что точки оседания репера №15 практически в точности попадают на график оседаний планки скважины. Это говорит о том, что в рамках рассматриваемого участка динамика развития мульды одинакова.

Можно отметить, что качественно результаты эксперимента повторяют типовое распределение, однако в активной стадии наблюдается отставание фактического оседания от нормативного со сдвигом примерно в 40 м. Это говорит о том, что в динамике мульда формируется иначе, чем на краях выработки после отработки. На параметрах процесса количественно это отражается

следующим образом. Динамическая мульда получается шире, то есть $L_3 < L_3^{\text{дин}}$. При этом угол сдвижения (δ_0) не изменяется, угол максимального оседания ψ_3 становится равным 44° , что на 6° меньше нормативного значения (50° , для Кузнецкого угольного бассейна [84]).

2.3 Численное моделирование процесса сдвижения при отработке лавы №812 на шахте «Имени А.Д. Рубана»

2.3.1 Общие положения по численному моделированию процесса сдвижения

Применение методов численного моделирования для прогноза сдвижения массивов горных пород отмечено еще в конце 20-го века в работах [32, 53, 109, 152]. Однако широкое применение методы нашли лишь последние два десятилетия. За это время накопился достаточно большой опыт по части моделирования процесса сдвижения. Рассмотрим некоторые примеры применения методов численного моделирования для прогноза сдвижения горных пород.

Все исследования можно условно разделить на три группы: в основе одних лежит механика сплошных сред (метод конечных элементов, метод конечных разностей, метод граничных элементов и тд.); других – механика дискретных сред (метод дискретных элементов, дискретные модели сети трещин) [136, 142, 144]; третьих – комбинированные методы (FEM-DEM) [169].

Дискуссионным вопросом во всех исследованиях является, то, как моделировать непосредственно отработку пласта. В некоторых исследованиях предпринята попытка выполнить моделирования процесса обрушения в явном виде. Массив над выработкой при этом задается в виде блочной структуры. Многие исследователей использовали для этой цели UDEC [136, 142, 144]. Такой подход в целом описывает процесс сдвижения наиболее близко к реальности, однако точность прогноза напрямую зависит от степени дискретизации, что в свою очередь требует колоссальных вычислительных мощностей.

При использовании методов механики сплошных сред процессы разрушения моделировать в явном виде невозможно. Тем не менее сделать это

можно косвенным образом. Применение МКЭ для прогноза параметров процесса сдвижения описано в работах [25, 37, 99, 128, 139, 154, 161, 164, 167].

Крупное исследование, посвященное изучению геомеханических процессов при отработке свиты угольных пластов с полным обрушением кровли было проведено в университете Ньюкасла Анастасией М. Сучоверска Иванец [167, 168]. Целью работы являлась разработка методики прогноза НДС породного массива и оседаний поверхности при разработке пластов угля с применением метода конечных элементов. В своих исследованиях автор использовала программный комплекс Abaqus/CAE.

В работе были рассмотрены две принципиально различные техники моделирования очистной выработки. В одном случае на определенном расчетном шаге создавалась полость, имитирующая горную выработку. Под действием гравитационных сил кровля выработки опускалась и входила в контакт с почвой. При этом использовались различные геомеханические модели для описания деформационного поведения породного массива, а именно: упругая изотропная, и идеальная упругопластическая. В другом выработка напрямую не моделировалась, вместо этого задавалась зона обрушения, свойства в которой охарактеризованы моделью упрочняющейся среды. В результате исследования были сделаны следующие выводы. При задании выработки в виде полости, можно корректно смоделировать деформации земной поверхности, однако напряженное состояние вокруг самой выработки не будет соответствовать действительности. В виду того, что кровля будет входить в контакт с почвой не на всю ширину выработки, а в реальных условиях происходит обрушение кровли, с последующей дезинтеграцией слагающих ее пород и пустот там не остается. Напряженное состояние в зоне обрушения перераспределяется и вес вышележащих пород полностью передается на почву выработки.

При описании среды как упругой изотропной мульда сдвижения всегда получается шире, чем в реальных условиях. При этом качественное распределение деформаций на земной поверхности соответствует натурным исследованиям. Однако если ширина выработки превышает ее глубину более чем в 1,6

раз и в реальных условиях наблюдается образование плоского дна, то при моделировании массива в упругой постановке добиться формирования плоского дна невозможно. Другие исследователи [130, 164] также отмечали данный факт и некоторые из них предлагали использовать трансверсально-изотропную модель [141, 170], что позволяет получить более узкую мульду, но не избавляет от других описанных недостатков.

При использовании идеальной упругопластической геомеханической модели результаты получались более корректными. Мульда сдвижения имеет меньшую ширину чем при упругой модели и больше соответствует реальной. При этом в случае широких выработок при моделировании можно получить плоское дно. Однако напряженное состояние вокруг выработки после ее отработки все также не отражает реальную картину.

При моделировании выработки в виде зоны обрушения, охарактеризованной свойствами упрочняющейся среды, возможно корректно смоделировать напряженное состояние массива в почве выработки, что позволяет в дальнейшем более корректно моделировать отработку выработок в нескольких пластах [167]. Однако такой подход является технически более сложным и требует большого количества исходных данных, таких, например, как параметры модели упрочняющейся среды, определение которых требует сложных лабораторных исследований.

Таким образом, для прогноза сдвижения массива и оседаний поверхности от одной очистной выработки оптимальным будет использовать технику моделирования, при которой выработка задается в виде полости и для описания деформационного поведения массива используется модель идеально упругопластического среды.

2.3.2 Описание численной модели

Характеристики лавы №812, а также результаты наблюдений за деформациями земной поверхности и массива горных пород при ее отработке подробно рассмотрены в параграфе 2.1. В данном разделе выполним

моделирование процесса сдвижения для условий лавы №812, используя различные подходы к моделированию и сопоставим полученные результаты с экспериментальными данными.

Программный комплекс Abaqus/CAE был выбран для выполнения численного моделирования сдвижения горных пород. Программа позволяет использовать явный метод решения «Abaqus Dynamic Explicit». Моделирование производилось с использованием уравнений механики сплошных сред в постановке плоская деформация «Plain Strain».

Техника моделирования выработки была принята наиболее простая – выработка в модели задается в виде полости, путем удаления соответствующих элементов на нужном расчетном шаге. При этом верхняя граница отверстия начинает опускаться под действием сил гравитации и входит в контакт с нижней. Для описания контактного взаимодействия поверхностей использовался инструмент «Self-contact» со свойствами контакта «frictionless».

Для описания деформационного поведения среды принята упругопластическая геомеханическая модель, реализованная в Abaqus как “Mohr-Coulomb plasticity”. Условие пластичности по поверхности сдвига имеет вид:

$$f = \tau - c - \sigma_n \tan \varphi \quad (2.2)$$

Где c – сцепление, кПа; φ – угол внутреннего трения, град.; σ_n и τ – нормальные и касательные напряжения на площадке сдвига. Упругая область деформирования описывается двумя упругими константами (E – модуль деформации, МПа и ν – коэффициент Пуассона).

Расчетная область представляет собой массив коренных пород, а также слой четвертичных отложений (наносов) в верхней части. В коренных породах при моделировании отработки выработок формируются три различные по прочностным и деформационным свойствам зоны. Непосредственно над выработкой формируется зона обрушения. Согласно общим представлениям о механизме процесса сдвижения размер этой зоны примерно равен $(3 \div 7) \cdot m$. В этой зоне модуль деформации снижается в 150 раз, а сцепление снижается до 10 кПа. Выше нее формируется зона трещин, размером $(15 \div 20) \cdot m$. В этой зоне

модуль деформации снижается в 15 раз, а сцепление равно 100 кПа. При моделировании свойства коренных пород в этих зонах изменяются непосредственно в момент формирования выработки, то есть до формирования полости среда описывается свойствами коренных пород, а в момент образования полости, свойства среды моментально изменяются в соответствующих зонах. Так происходит для каждой из выработок, при этом на последующих шагах свойства массива в этих зонах сохраняются пониженными. Такой подход позволяет более точно описать деформационный процесс при повторной обработке, учитывая нарушенность массива от ранее отработанных выработок, в случае моделирования сдвижения при обработке нескольких лав.

Численная модель состоит из двух расчетных шагов. На начальном формируется поле геостатических напряжений в породном массиве, при этом все смещения после данного шага обнуляются. На следующем шаге формируется полость (выработка), при чем конечные элементы из этой области удаляются не мгновенно, а изменяя жесткость до нуля линейно в течении всего шага. Время каждого шага в модели принималось таким, чтобы к его концу система находилась в равновесии, а все смещения и деформации полностью реализовались. В реальных условиях это соответствует периоду полных сдвижений

Численная модель состоит из основной расчетной области, в которой реализуются все деформационные процессы. Данная область имеет прямоугольную форму и разделена в свою очередь на зоны с различным механическим поведением: зона обрушения; зона трещин; коренные породы и четвертичные отложения. Данная зона разбита сеткой из четырехугольных элементов первого порядка (CPE4R). Размер элемента принят таким образом, чтобы его дальнейшее уменьшение не приводило к изменению конечного результата. Расчетная область со всех сторон окружена бесконечными элементами (CINPE4), выполняющими роль граничных условий. Использование бесконечных элементов позволяет уменьшить размер расчетной области, исключив при этом влияние граничных условий на результаты моделирования, что в свою очередь позволяет оптимизировать расчетное время [63]. Помимо этого,

использование бесконечных элементов при использовании динамического решателя позволяет избежать возникновения нежелательных упругих колебаний в модели, которые накапливают ошибку и в конечном итоге приводят к искажению результатов моделирования.

За начало координат в модели принята точка на земной поверхности, расположенная ровно посередине между двумя лавами.

Расчетная схема приведена на рисунке 2.6, физико-механические свойства модели сведены в таблицу 2.1.

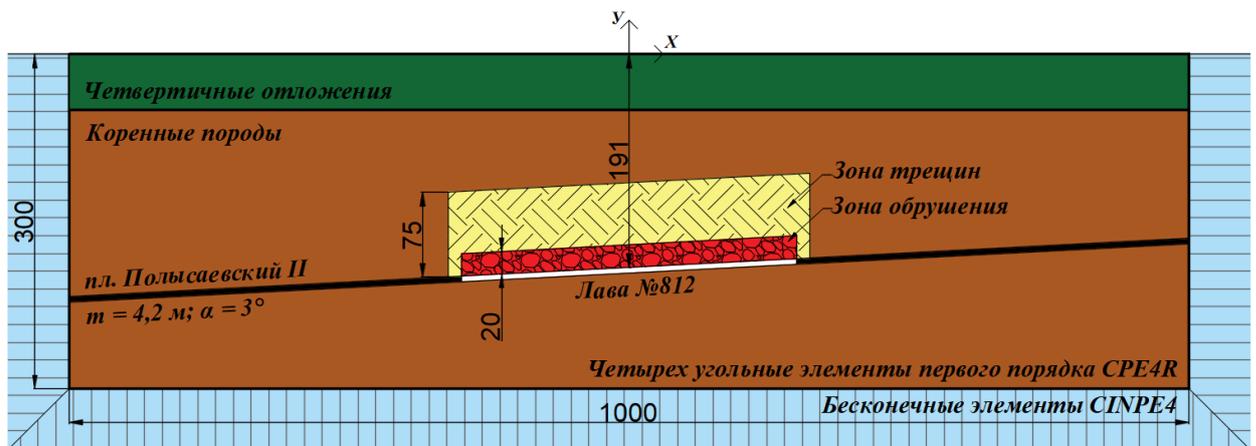


Рисунок 2.6 – Расчетная схема для моделирования процесса сдвижения от отработки лавы №812

Таблица 2.1 – Расчетные характеристики выделенных элементов в модели

Материал	Плотность, кг/м ³	Модуль упругости, МПа	Коеф. поперечной деформации	Сцепление, кПа	Угол внутреннего трения, град	Угол дилатансии, град	Tension cutoff, кПа
Коренные породы:							
- нетронутые	2200	15 000	0,20	800	33	0	-
- в зоне трещин	2000	1 000	0,25	100	33	0	-
- в зоне обрушения	1900	100	0,30	10	33	5	-
Уголь	1300	3 000	0,17	200	32	0	-
Наносы	1900	40	0,30	30	20	1	5
Бесконечные элементы	2000	1 000 000	0,25	-	-	-	-

2.3.3 Результаты моделирования

На рисунке 2.7 приведено распределение вертикальных смещений в массиве горных пород, полученное при моделировании для упругопластической модели поведения коренных пород. На рисунке 2.8 приведены муьды сдвижения: коричневая – полученная по результатам эксперимента; зеленая – построенная методом типовых кривых [84]; синяя – полученная при моделировании с использованием упругопластической модели; оранжевая – полученная при моделировании с использованием упругой модели.

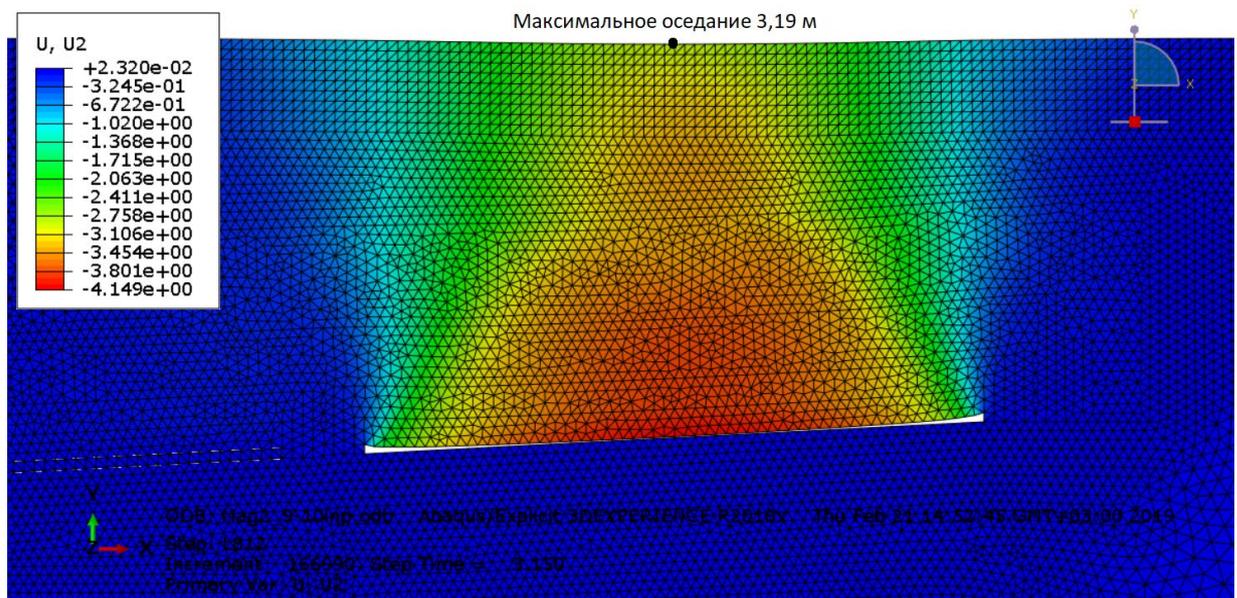


Рисунок 2.7 – Распределение вертикальных смещений после отработки лавы №812, полученное при моделировании в Abaqus

Величина максимального оседания по результатам моделирования процесса сдвижения при описании коренного массива как упруго-пластической среды составила 3,19 м (рисунок 2.8), что достаточно точно совпадает с фактическим значением 3,12 м. Ширина муьды сдвижения получилась близкой к натурной, однако качественное распределение деформаций в ней немного отличается, но при этом отклонения величин оседаний, полученных при моделировании, от фактических значений не превышает 10%, что позволяет сделать вывод о справедливости использования метода численного моделирования для прогноза сдвижения, наряду с общепринятым методом типовых кривых.

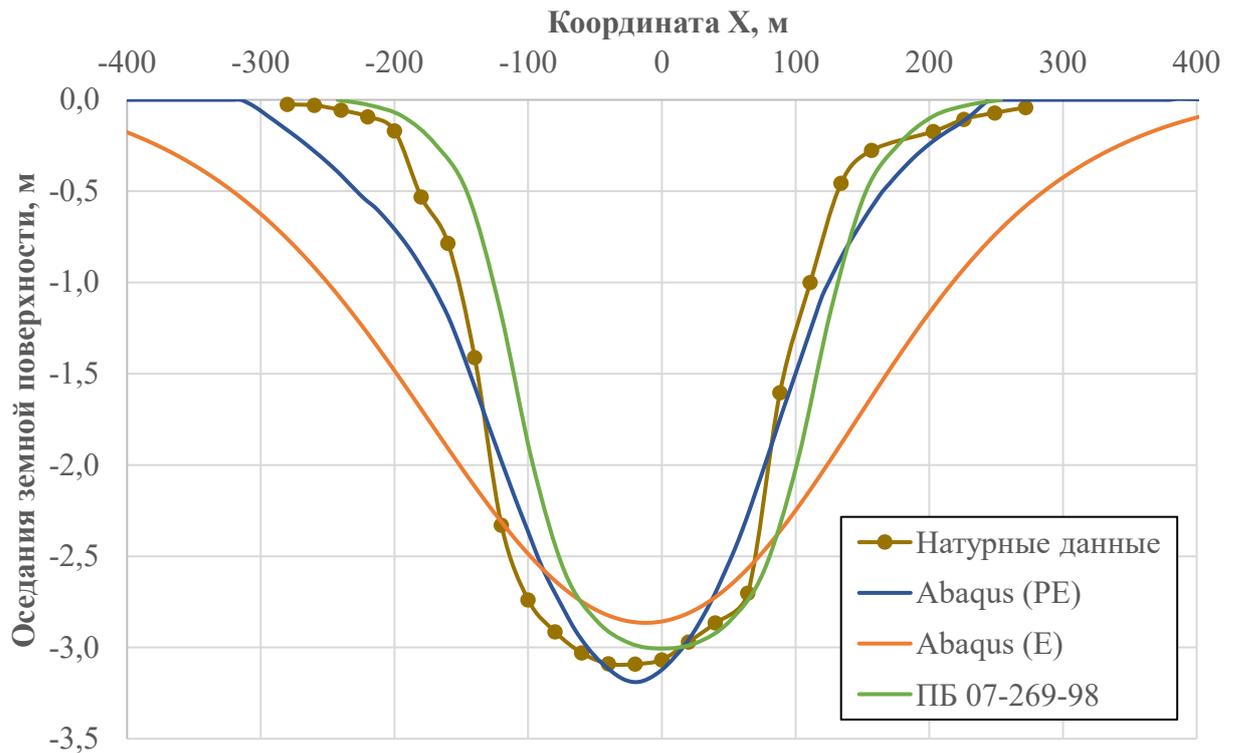


Рисунок 2.8 – Сравнение мульты сдвига, полученных при моделировании, с натурными данными

При моделировании мульты в краевых частях имеет меньшую кривизну, чем в натуре. Это связано с тем, что при использовании метода конечных элементов невозможно моделировать в явном виде процессы разрушения и образования трещин в массиве. Над выработкой формируется зона пластических деформаций, которая по мере опускания кровли распространяется вверх по модели и достигает земной поверхности. В реальности же деформационный механизм носит гораздо более сложный характер. Непосредственно над выработкой происходит обрушение и дезинтеграция пород кровли с последующим их уплотнением под весом вышележащих слоев. Породный массив над зоной обрушения деформируется с образованием секущих трещин и разделением его на блоки. В рамках механики сплошных сред деформации носят непрерывный характер, поэтому область деформирования получается шире.

При моделировании коренного массива как упругой среды величина максимального оседания получилась меньше, чем при упругопластичной, однако ширина мульты получилась практически в два раза больше, что не соответствует ни натурным данным, ни общим представлениям о механизме

сдвижения. Таким образом, можно отметить что упругая модель не подходит для данной задачи, что подтверждается и опытом других исследователей [130, 141, 164, 167, 170].

2.4 Прогноз оседаний земной поверхности при отработке запасов угля на участке Магистральный шахты «Имени А.Д. Рубана»

На участке Магистральный на момент декабря 2018 г. заканчиваются очистные работы по лаве №812. В перспективе планируется полная отработка запасов угля на участке по трем пластам. В настоящем разделе выполнен прогноз оседаний земной поверхности при разработке всех трех угольных пластов на участке на различных стадиях с использованием разработанного метода моделирования. С целью сравнения полученных результатов выполним также прогноз оседаний земной поверхности по нормативной методике с использованием уточненных угловых параметров по натурным данным и поправочного коэффициента по величине максимального оседания.

Для прогноза сдвижений и деформаций земной поверхности было принято расчетное сечение в зоне ожидаемых максимальных деформаций земной поверхности, по разведочной линии XVII (рисунок 2.9) Оно включает в себя лавы №812, №814, №816 и №818 по пласту Польшаевский-II, лавы №1216, №1218, №1220 и №1222 по пласту Надбайкаимский и лавы №1316, №1318, №1320 и №1322 по пласту Байкаимский (рисунок 2.10).

2.4.1 Прогноз сдвижений и деформаций методом типовых кривых по ПБ 07-269-98

Исходными данными для расчета сдвижений и деформаций земной поверхности по нормативной методике служат [84]:

1. Глубины заложения очистных выработок (H – расстояние от центра лавы до земной поверхности);
2. Вынимаемые мощности пластов на всех рассматриваемых участках (m).
3. Углы падения пластов в пределах рассматриваемых очистных выработок (α);

4. Размеры очистных выработок вкрест и по простиранию пластов (D_1 - вкрест подвигания и D_2 - в направлении подвигания очистного забоя);
5. Взаимное положение очистных выработок в пространстве (X - координаты центров очистных выработок в единой (условной) системе координат);
6. Мощность наносов (h) главных сечениях мульды сдвижения над каждой очистной выработкой;
7. Глубина первичной подработки горного массива (H_n);
8. Угловые параметры процесса сдвижения (см. параграф 2.2.)

Вынимаемая мощность пласта для каждой лавы принималась исходя из геологических данных по скважинам, путем усреднения значений мощности по ближайшим к рассматриваемой выработке скважинам.

В таблице 2.2 приведены параметры очистных выработок в рассматриваемом расчетном сечении, необходимые для прогноза сдвижений по нормативной методике.

Последовательность выполнения расчетов следующая. Вначале для каждой из выработок рассчитываются величины максимальных оседаний. Затем по граничным углам определяется зона влияния очистной выработки (ширина мульды). По углу θ определяется положение точки максимального оседания. Затем рассчитываются длины полумульд по падению (L_1) и по восстанию (L_2). Используя табличные значения функций типовых кривых рассчитываются промежуточные значения оседаний и горизонтальных сдвижений внутри полумульды. По полученным данным строятся графики распределения вертикальных и горизонтальных сдвижений в мульде в геометрической привязке к единой (условной) системе координат. Данная процедура повторяется для всех рассматриваемых очистных выработок. В результате получается набор независимых графиков оседаний и горизонтальных сдвижений от каждой из выработок в единой системе координат. Для получения общей мульды необходимо выполнить геометрическое сложение полученных графиков путем приведения их к единому интервалу по оси X с использованием метода линейной интерполяции.

На рисунке 2.11 графики распределения оседаний земной поверхности на трех этапах разработки месторождения: после отработки лав №812-818 по пласту Полысаевский II (схематично обозначим как этап 1); после отработки лав №1216-1222 по пласту Надбайкаимский (этап 2); после отработки лав №1316-1322 по пласту Байкаимский, на конечный этап разработки (этап 3).

Таблица 2.2 – Исходные данные для расчета сдвижений и деформаций по р.л. XVII по нормативной методике

Лава	X, м	H, м	D ₁ , м	D ₂ , м	α , °	m, м	H _п , м	h, м
Лава №812	711	98	300	2700	4	5,2	0	54
Лава №814	379	125	300	2950	3	5,4	0	61
Лава №816	43	163	300	2050	8	5,1	0	70
Лава №818	-288	217	300	1950	8	4,9	0	73
Лава №1216	485	222	300	2650	2	2,6	110	62
Лава №1218	140	254	300	3200	6	2,25	130	69
Лава №1220	-188	303	300	1800	8	2	200	71
Лава №1222	-455	347	140	1200	11	2,05	240	76
Лава №1316	315	311	300	3100	4	3	240	60
Лава №1318	-32	354	300	3500	8	2,65	280	69
Лава №1320	-324	403	210	1700	9	2,7	320	76
Лава №1322	-570	445	200	800	9	2,8	360	79

2.4.2 Прогноз оседаний земной поверхности методом численного моделирования

Моделирование сдвижения земной поверхности выполнялось по ранее описанной методике. Формирование каждой полости происходило на отдельном расчетном шаге в порядке, установленном проектом, а именно последовательно лавами 812, 814, 816, 818, 1216, 1218, 1220, 1222, 1316, 1318, 1320, 1322. Время каждого шага в модели принималось таким, чтобы к его концу система находилась в равновесии, а все смещения и деформации полностью

реализовались. В реальных условиях это соответствует периоду полных сдвижений. При этом свойства в зонах «обрушения» и «трещиноватости» уменьшаются на соответствующем расчетном шаге и в последствии остаются неизменными на всех последующих.

По результатам моделирования, на момент отработки всех лав получилась следующая деформационная картина (рисунок 2.12). На рисунке 2.13 приведены оседания земной поверхности для трех этапов отработки свиты пластов.

На рисунке 2.14 приведено сравнение мульд оседаний земной поверхности на участке Магистральный по XVII р.л., полученных методами типовых кривых по ПБ 07-269-98 и методом численного моделирования в Abaqus. Можно отметить, что в целом установлена удовлетворительная сходимость кривых оседаний. Пики максимальных оседаний расположены примерно в одинаковых положениях. Основное различие заключается в том, что при моделировании ширина мульды получается больше, и мульда в краевых частях имеет меньшую кривизну. Это связано с тем, что при использовании метода конечных элементов невозможно моделировать в явном виде процессы разрушения и образования трещин в массиве. Над выработкой формируется зона пластических деформаций, которая по мере опускания кровли распространяется вверх по модели и достигает земной поверхности. В реальности же деформационный механизм носит гораздо более сложный характер. Непосредственно над выработкой происходит обрушение и дезинтеграция пород кровли с последующим их уплотнением под весом вышележащих слоев. Породный массив над зоной обрушения деформируется с образованием секущих трещин и разделением его на блоки. В рамках механики сплошных сред деформации носят непрерывный характер, поэтому область деформирования получается шире. Однако в целом, достоверность такого прогноза в рамках рассматриваемой задачи является удовлетворительной и не уступает нормативному методу, что подтверждается и результатами эксперимента.

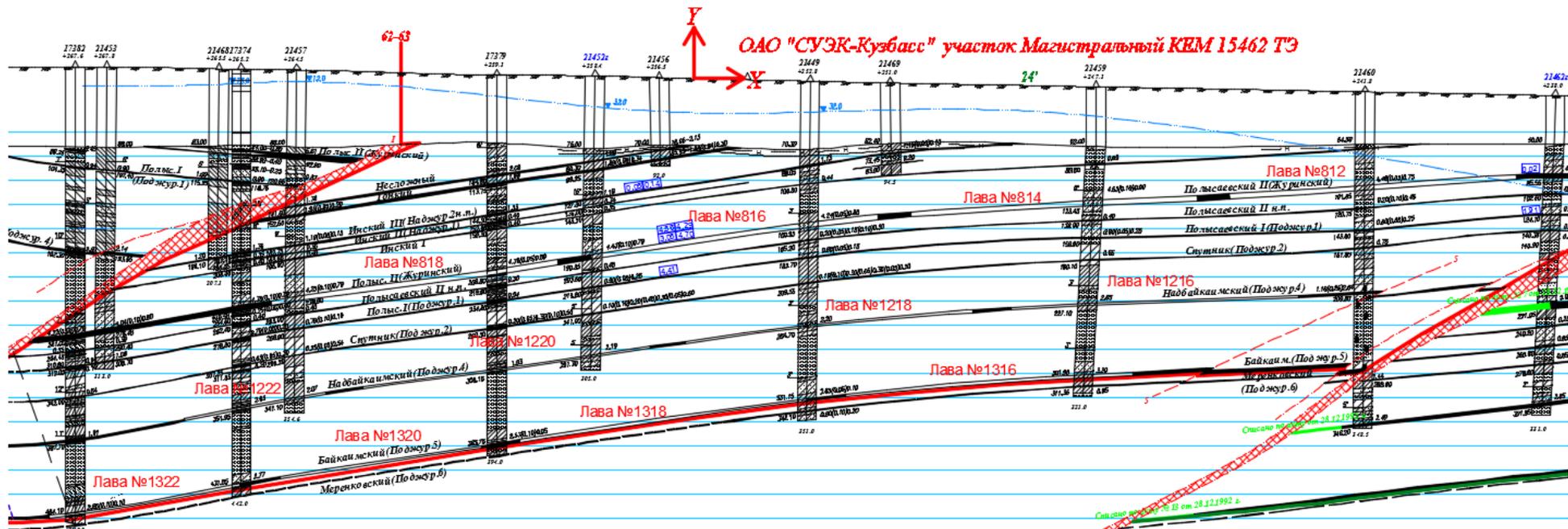


Рисунок 2.10 – Геологический разрез по разведочной линии XVII, с нанесением на него положений очистных выработок

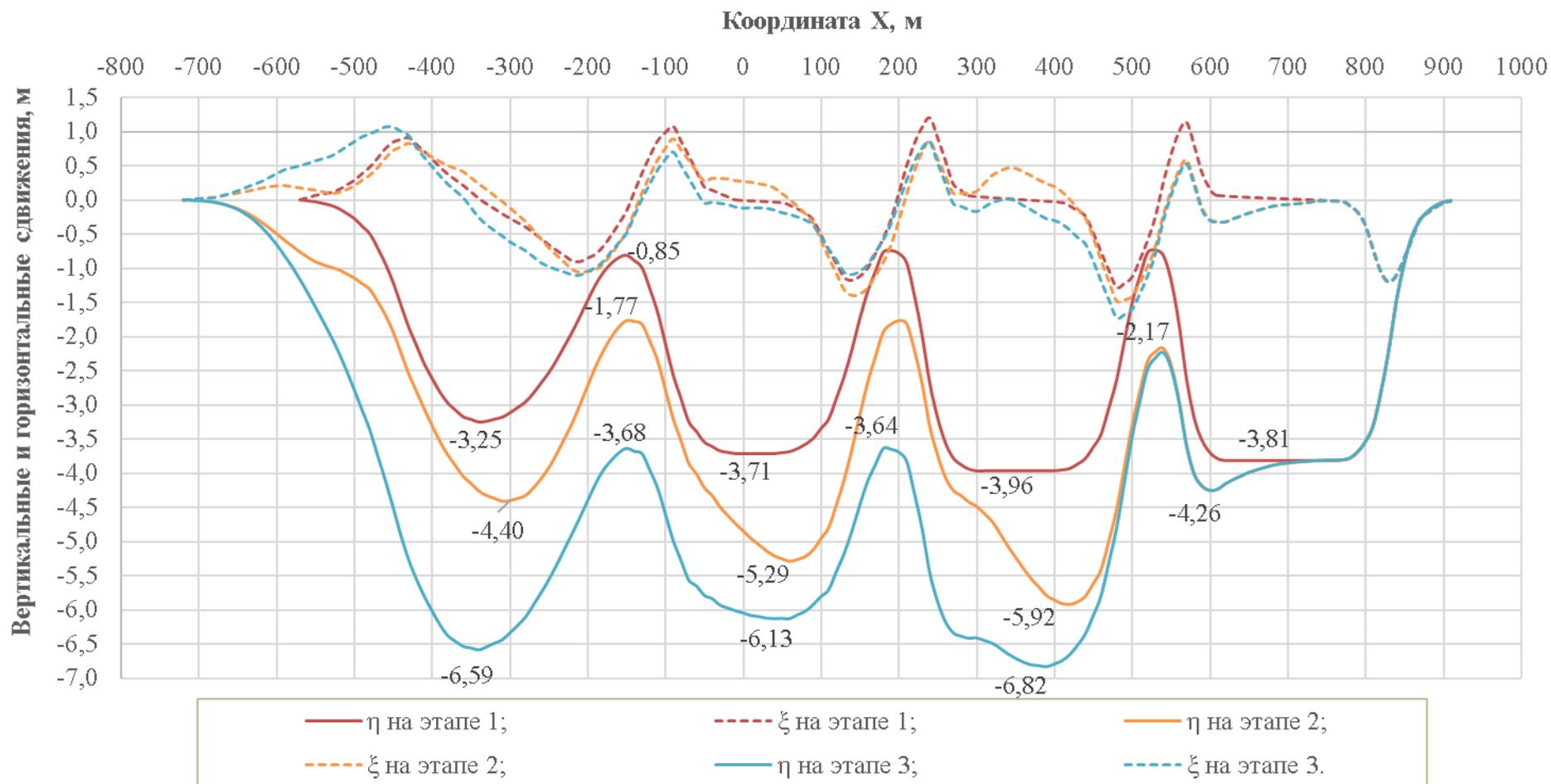


Рисунок 2.11 – Прогноз вертикальных (η) и горизонтальных (ξ) сдвижений земной поверхности по сечению 2 для трех этапов разработки участка Магистральный. Этап 1 – отработка пласта Полысаевский II; этап 2 – отработка пласта Надбайкаимский; этап 3 – отработка пласта Байкаимский

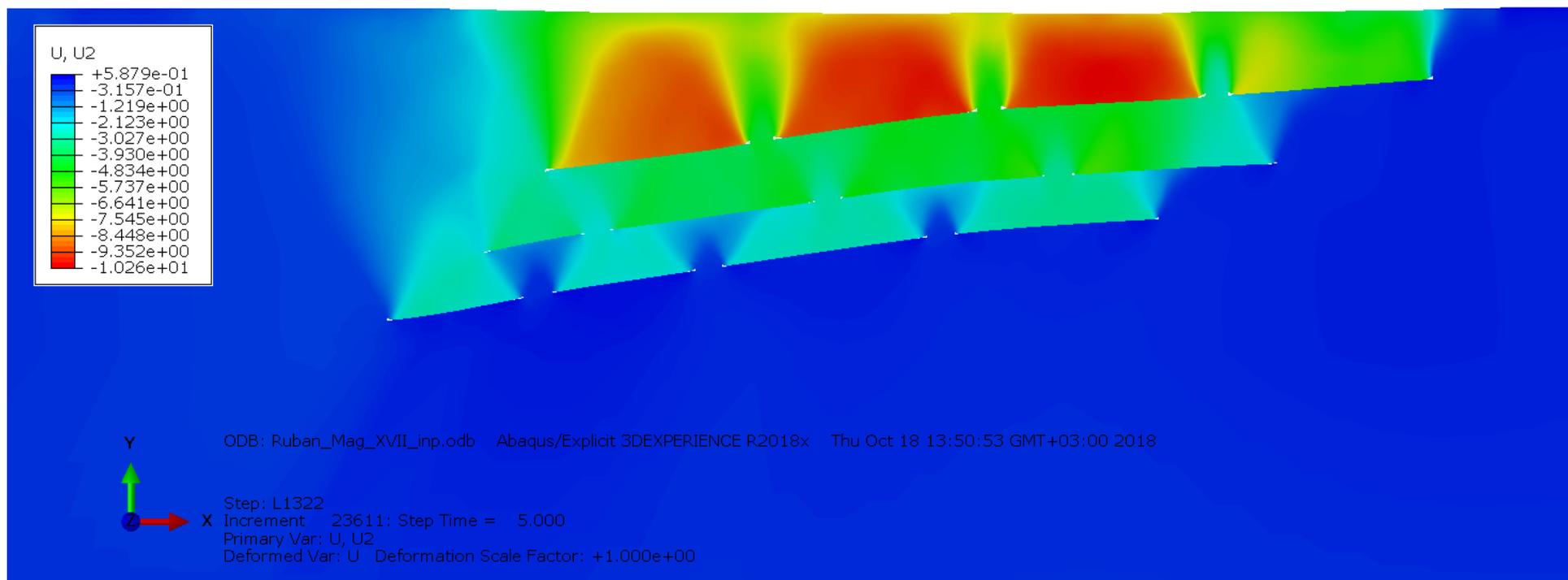


Рисунок 2.12 – Распределение вертикальных деформаций в массиве на конечной стадии отработки свиты пластов

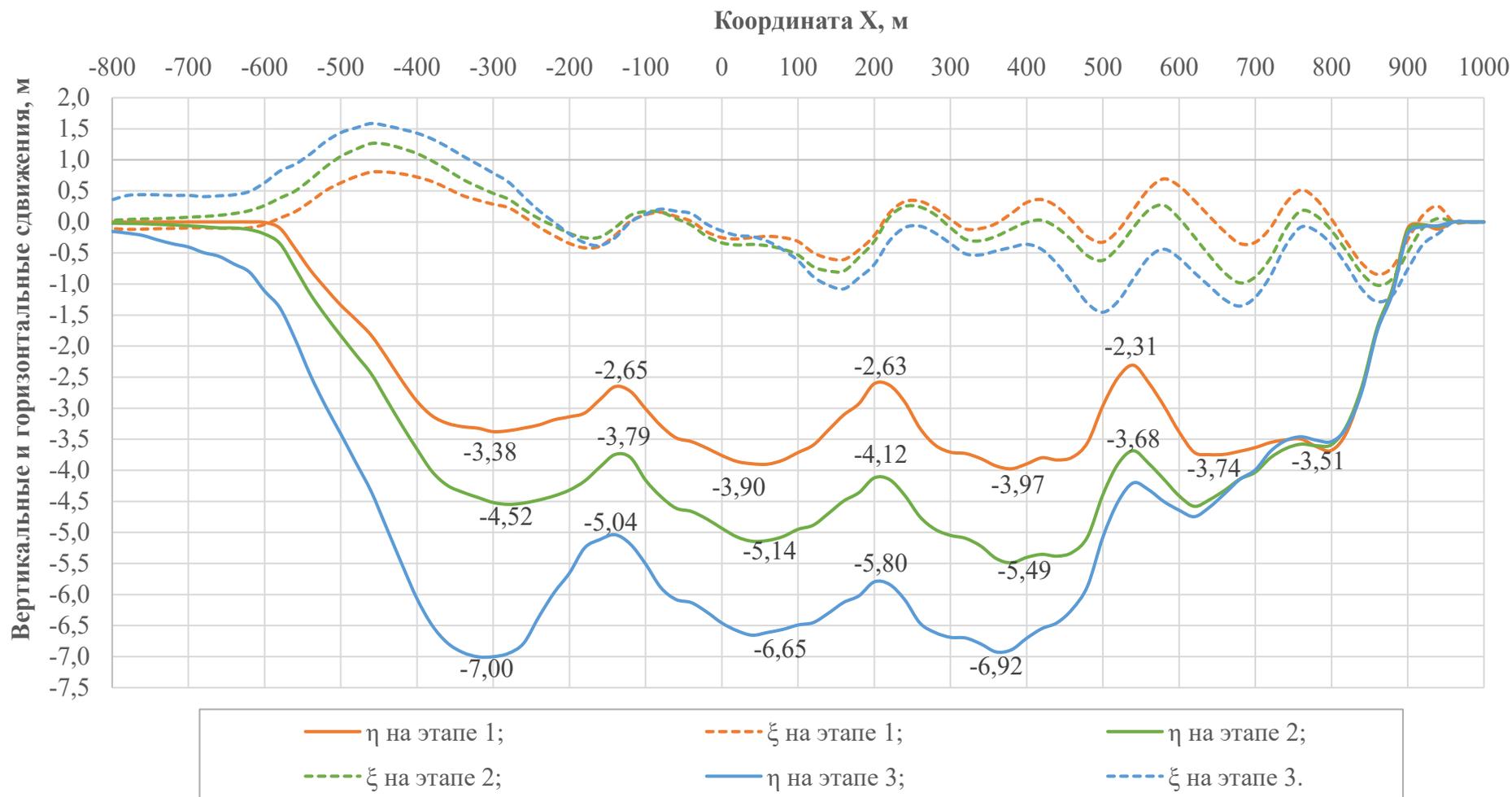


Рисунок 2.13 – Полученные при моделировании оседания земной поверхности на разработки участка Магистральный. Этап 1 – отработка пласта Польшаевский II; этап 2 – отработка пласта Надбайкаимский; этап 3 – отработка пласта Байкаимский

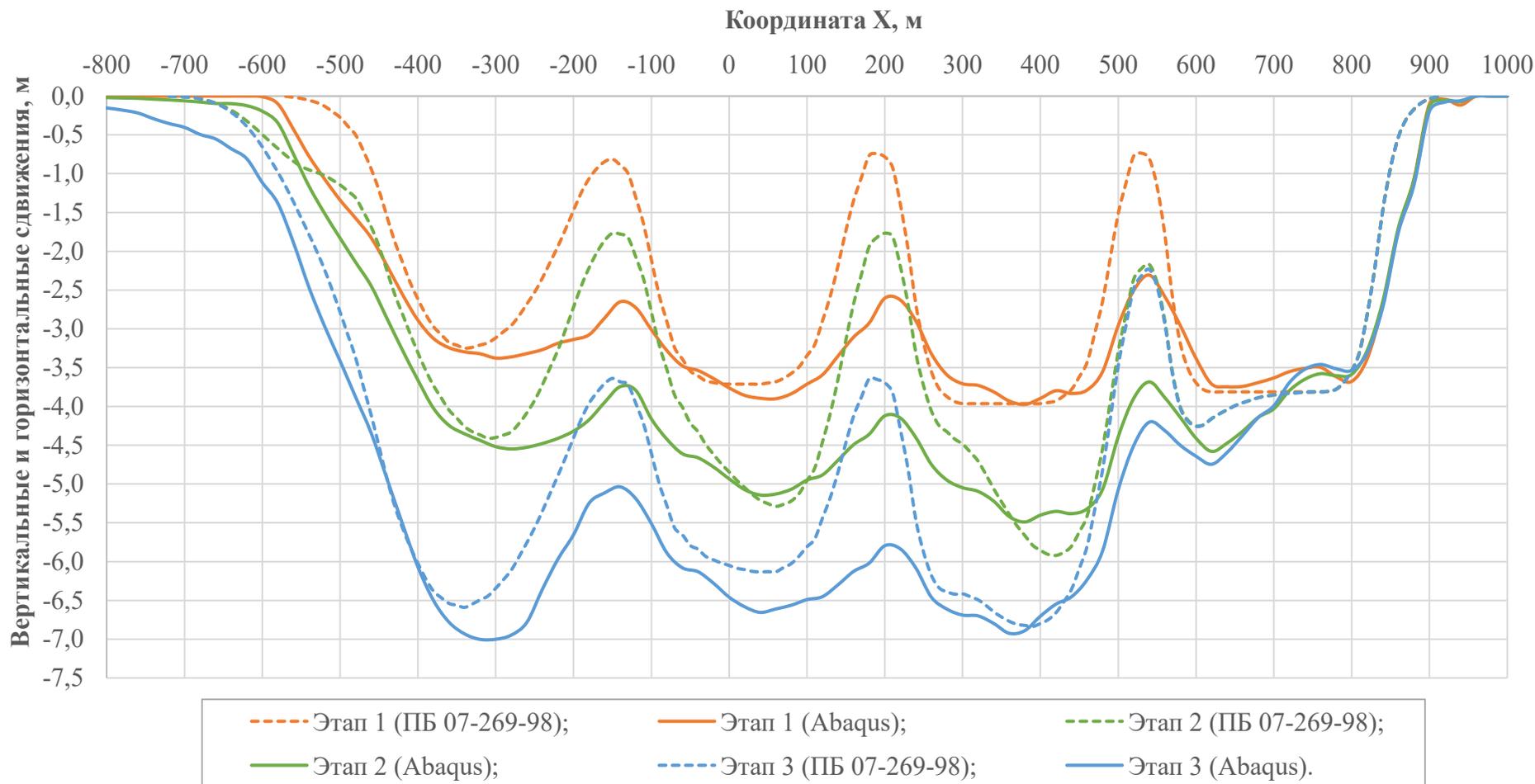


Рисунок 2.14 – Сопоставление прогнозных мульд сдвижения от отработки свиты пластов на участке Магистральный по XVII р.л. на трех этапах разработки участка, полученных методом типовых кривых по ПБ 07-269-98, а также методом численного моделирования в Abaqus. Этап 1 – отработка пласта Полысаевский II; этап 2 – отработка пласта Надбайкаимский; этап 3 – отработка пласта Байкаимский

2.5 Выводы по второй главе

Во второй главе представлены горно-геологические условия шахты «Имени А.Д. Рубана», методика и результаты численного моделирования с использованием МКЭ, адаптированная к условиям шахты посредством организации и выполнения научно-практического эксперимента при проходке лавы № 812. Анализ полученных результатов и материалов по объекту, проведенные численные и натурные эксперименты позволяют сделать следующие выводы:

1. Горно-геологические условия шахты «Имени А.Д. Рубана» характеризуются приуроченностью двух отрабатываемых участков - Красноярского и Магистрального - к Егозово-Красноярскому месторождению каменного угля в Кузбассе. На данных участках в работе находятся запасы угля по пластам Польшаевский II, Надбайкаимский и Байкаимский мощностью 4.5, 2.4 и 2.8 м соответственно. Очистные горные работы на участке Красноярский практически завершены за исключением двух лав по пласту Надбайкаимский, где в работе находится лава №1206 и подготавливается лава №1204. На участке Магистральном работы производились в 2018 г. по пласту Польшаевский пионерной лавой № 812, а в 2019 г. ведутся лавой № 814. В перспективе планируется отработка еще трех лав по данному пласту, а также переход на нижележащие пласты (Надбайкаимский и Байкаимский) в нисходящей последовательности.

2. Для изучения процесса сдвижения на участке Магистральный был выполнен опытно-промышленный эксперимент при отработке лавы № 812, включавший в себя наблюдения за деформациями земной поверхности по оседаниям грунтовых реперов и оседаниями глубинных реперов. Глубина залегания отрабатываемого пласта Польшаевский-II в районе опытного участка составляла 191 м, мощность четвертичных отложений 50 м. Лава № 812 имела длину 300 м при вынимаемой мощности пласта 4 м. Получена мульда сдвижения земной поверхности, сопоставление которой с прогнозной по нормативной методике, позволило выявить следующее:

- величина максимального оседания по результатам наблюдений составила 3,18 м при прогнозном значении 3,01 м;

- центр прогнозируемой мульды сдвижения оказался смещен на 40 м относительно зарегистрированного экспериментом;

- ширина мульды сдвижения вкрест простирания выработки составила 533 м относительно прогнозной величины 496 м;

- фактические значения граничных углов составили: $\beta_0 = 63,5^\circ$; $\gamma_0 = 66,2^\circ$, а угол максимального оседания – $\theta = 77,2^\circ$; рассчитанные по нормативу: $\beta_0 = 72,3^\circ$; $\gamma_0 = 70^\circ$; $\theta = 88,5^\circ$.

3. Выполненный анализ методов численного моделирования позволил отметить, что на современном этапе развития вычислительной техники возможно использовать методы механики сплошных, в частности МКЭ, для прогнозирования сдвижения горных пород, контролируя конечные результаты с данными, полученными с применением широко апробированных нормативных методик и натурных опытов. В работе использовались упругая изотропная и идеальная упругопластическая геомеханические модели. Численными исследованиями установлено, что для прогноза деформаций земной поверхности от отдельной очистной выработки наиболее оптимальным будет использовать технику моделирования, при которой выработка задается в виде полости и для описания деформационного поведения массива используется модель идеально упругопластического среды с разделением массива на зоны с различным деформационным поведением.

4. Проверка разработанной методики осуществлялась для условий отработки лавы №812 путем сравнения результатов натурных наблюдений с полученными с помощью нормативной методики и численного моделирования по разработанным методическим приемам. Моделирование проводилось в программном комплексе Abaqus/CAE в плоско-деформационной постановке в рамках механики сплошной среды с использованием явного метода решения дифференциальных уравнений, реализованного в программе «Abaqus Dynamic Explicit». Численная модель состоит из нескольких расчетных шагов. На

начальном задается поле геостатических напряжений в породном массиве, при этом все смещения после данного шага обнуляются. На следующем формируется полость (выработка), при чем конечные элементы удаляются не мгновенно, а постепенно изменяя свою жесткость до нуля в течении шага. Время шага в модели принималось таким, чтобы к его концу система находилась в равновесии, а все смещения и деформации полностью реализовались. В реальных условиях это соответствует периоду полных сдвижений.

5. Выполнено сравнение мульд оседаний земной поверхности, полученные различными методами, и установлена удовлетворительная сходимость кривых оседаний, при этом пики максимальных оседаний расположены примерно в одинаковых положениях, а основное различие заключается в большей ширине мульды сдвижения, полученной моделированием. Данное обстоятельство не сказывается на достоверности такого прогноза в рамках рассматриваемой задачи, является удовлетворительным и не уступает нормативному методу, что подтверждается результатами эксперимента.

ГЛАВА 3 ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПРОЦЕССА СДВИЖЕНИЯ НА НАМЫВНОЙ МАССИВ И ПРОГНОЗ УСТОЙЧИВОСТИ ГИДРООТВАЛОВ НА ПОДРАБАТЫВАЕМЫХ ТЕРРИТОРИЯХ

3.1 Горно-геологическая характеристика объектов исследования

3.1.1 Характеристика гидроотвала на реке Еловка разреза «Моховский»

Гидроотвал расположен в долине реки Еловка и представляет собой двухсекционный накопитель «жидких» промышленных отходов, овражно-равнинного типа с трехсторонним обвалованием, по способу наполнения - намывной. Назначение – складирование вскрышных пород, разрабатываемых гидромеханизационным способом, осветление технологической воды.

В состав комплекса ГТС входят: ёмкость накопителя; ограждающая (основная) дамба; разделительная дамба (Ульяновская); водозаборные, водосбросные и водопропускные устройства; сооружения системы гидротранспорта; сооружения системы оборотного водоснабжения [116].

Ёмкость гидроотвала разделена дамбой (Ульяновской) на две секции, одна из которых – накопительная (южная часть гидроотвала) служит для складирования вскрышных пород, другая – прудковая (северо-западная) служит для аккумуляции и осветления технической воды. Общая площадь, занимаемая гидротехническими сооружениями, составляет примерно 920 га, в том числе: накопительная часть гидроотвала с ограждающей дамбой ≈ 490 га, пруд-отстойник с разделительной дамбой (дамба №1) ≈ 430 га. Полный проектный (общий) объем гидроотвала составляет 305,3 млн. м³, полезный объем – 288,7 млн. м³. Проектная отметка заполнения емкости накопителя +269,0 м. Проектом предусмотрено осуществлять увеличение емкости гидроотвала в четыре этапа до отметок заполнения: 1 этап – 257,5 м; 2 этап – 261,0 м; 3 этап – 265,0 м; 4 этап – 268,5 м. Проектный объем гидроотвала рассчитан на ежегодное складирование порядка 5 млн. м³ вскрышных пород. В указанном режиме гидроотвал эксплуатировался в первые годы, в последнее время объемы поступающих пород снижаются; за сезон 2015 г. в гидроотвал намыто порядка 600-800 тыс. м³ песчано-глинистых грунтов вскрыши. Емкость гидроотвала

образована путем возведения многоярусной дамбы, перегораживающей русло реки Еловка с южной стороны гидроотвала (поперечная плотина), а также ограждающей емкость накопителя с северной, западной, юго-западной и, по мере наращивания, с северо-восточной сторон [81, 116].

Дамбы гидроотвала имеют максимальную высоту более 50 м. Согласно СП 58.13330.2012 [106] при указанной высоте дамб и при типе грунтов основания - Б, сооружение относится ко I классу гидротехнических сооружений. Общая длина (протяженность по гребню) напорного фронта гидроотвала в настоящий момент составляет 6300 м, в том числе основная дамба – 5500 м, разделительная дамба – 800 м. С учетом реализации проектных решений по поэтапному наращиванию гидроотвала до отметки +270,0 м (4 этап) длина напорного фронта дамбы гидроотвала составит 11235 м, в том числе основная дамба – 10135 м; разделительная дамба №1 – 1100 м [81, 116].

Конструктивно основная ограждающая дамба состоит из первичной дамбы и нескольких дамб наращивания, отсыпаемых из полускальных вскрышных пород (алевролит, аргиллит, песчаник) с суглинистым заполнителем. Противофильтрационные и дренажные устройства в теле дамбы проектом не предусмотрены. Дамбы наращивания являются дренажными призмами для намывного грунта. Первичная дамба для пропуска воды не предназначена. Со стороны низового откоса первичной дамбы из горелой породы выполнена дренажная призма шириной 10 м и высотой 4 м [81, 116].

Откосные части сооружения имеют неоднородное строение: в призме возможного оползания выделено три основных инженерно-геологических элемента (ИГЭ): I – насыпные пород дамб; II – намывные отложения; III – породы естественного основания. Дамбы обвалования сложены породами, состоящими из обломков песчаников и алевролитов с суглинистым заполнителем. Намывные породы представлены обводненными бурыми суглинками различной консистенции с прослоями песков и супесей. Естественное основание гидроотвала представлено аллювиальными серо-голубыми пылеватыми суглинками и глинами [81, 116].

С юго-западной стороны гидроотвал имеет форму узкого вытянутого от-
ростка, упирающегося в поперечную плотину, которая перекрывает бывшее
русло реки Еловка. Длина этого участка по дневной поверхности намывного
пляжа от профиля №8 до профиля №11 составляет примерно 620 м, а ширина
285 м.

К юго-западу от гидроотвала работает шахта Байкаимская (см. раздел
3.1.2), горными выработками которой в 2014 и 2015 годах осуществлялась под-
работка водоотводного канала и первичной дамбы гидроотвала лава. При этом
проводился мониторинг устойчивости и маркшейдерские наблюдения за де-
формациями земной поверхности в районе канала и нижней части откоса со-
оружения [81].

3.1.2. Горно-геологические условия шахты «Байкаимская»

Шахта «Байкаимская» разрабатывает пласт Польшаевский II. Раскройка
шахтного поля предполагала подработку нижней части откоса боковой пло-
тины гидроотвала лавами №№ 13 и 14, а также нижнюю часть откоса основной
плотины, пруда осветлителя и водоотводного канала лавой № 5 [81]. По-
скольку детальное изучения влияние подработки на подпорные конструкции
данного гидроотвала производилось только при отработке лавы № 14, то на
описании данного события остановимся подробно.

Лавы №14 отработывались с ноября 2013 г. по декабрь 2014 г. со средней
вынимаемой мощностью 5,0 м. Длина лавы вкрест простирания составляла 220
м, по простиранию – 910 м, глубина отработки изменялась от 220 до 310 м.
Угол падения пласта составляет 5-7°. В непосредственной кровле пласта По-
лысаевский II залегают алевролиты мощностью 10-12 м, а основная кровля
представлена песчаниками мощностью до 35 м.

При планировании отработки лавы №14 у технических служб разреза и
шахты было понимание большой ответственности данного горнотехнического
действия для гидротехнических сооружений гидроотвала на реке Еловка – во-
доотводного канала и боковой плотины. Подработка откоса намывного

сооружения при этом планировалась в самом неблагоприятном направлении – на откос, когда в первую очередь ухудшаются условия в призме упора. В таком случае при формировании мульды сдвижения направление деформаций от развития данного процесса будет в сторону движущегося фронта отработки лавы или вниз по откосу, провоцируя нарушение устойчивости откоса гидроотвала в зоне его подработки. Для контроля развивающихся при подработке деформаций была заложена маркшейдерская наблюдательная станция с грунтовыми реперами в главных сечениях мульды сдвижения на подходе лавы № 14 к участку расположения канала. Взаимное расположение очистных выработок шахты Байкаимская, гидроотвала на реке Еловка и наблюдательной станции приведены на рисунке 3.1.

Маркшейдерская профильная линия располагалась в полумульде по падению, поэтому ее реперы не попадали в зону сдвижения лавы № 324 пласта Несложного и лавы № 222 пласта Красноорловского работающей на данном участке шахты Алексиевская (рисунок 3.1). Данное обстоятельство позволяет считать, что фактические оседания по профильной линии А-1-2-3-4-5-6 относятся к сдвигам горных пород, развивающимся в условиях первичной подработки. Кроме того, разрыв во времени между отработками лав № 222 (отработана в 2003 г.) и № 324 (отработана в 2009 г.) составляет более 5 лет, что также говорит в пользу того, что процессы сдвижений и деформаций протекают в условиях первичной подработки. Результаты наблюдений за оседаниями земной поверхности приведены в таблице 3.1.

Следует отметить после анализа результатов выполненных измерений тот факт, что рассматриваемая профильная линия реперов А-1-2-3-4-5-6 оказалась расположена не в плоском дне мульды сдвижения по простиранию, а в краевой ее части. Поэтому максимальные сдвиги на данном участке не зарегистрированы. Используя метод типовых кривых [84] и зная примерное положение репера №2 в полумульде по простиранию (L_3) – $z_x = 0.4$, возможно рассчитать величину максимального оседания от отработки лавы №14, которая составляет $\eta_{\max} = 2,39$ м. Данная величина впоследствии будет использована для

прогноза устойчивости гидроотвала при его подработке этой лавой (см. параграф 3.3).

В 2015 году осуществлялась отработка пласта Польшаевский II лавой №5. Длина лавы вкрест простирания составляет 220 м, по простиранию – 2550 м, глубина отработки по длине выемочного столба изменяется от 325 до 360 м. Угол падения пласта составляет 5-7°. Падение пласта по длине выемочного столба в направлении подвигания забоя составляет 2-3°. Отработка пласта производилась с полным обрушением кровли. К сожалению, маркшейдерских наблюдений по поверхности земли на участке отработки лавы не выполнялось. Справедливости ради хочется отметить, что визуальный контроль подработанной поверхности не выявил существенных нарушений сплошности.

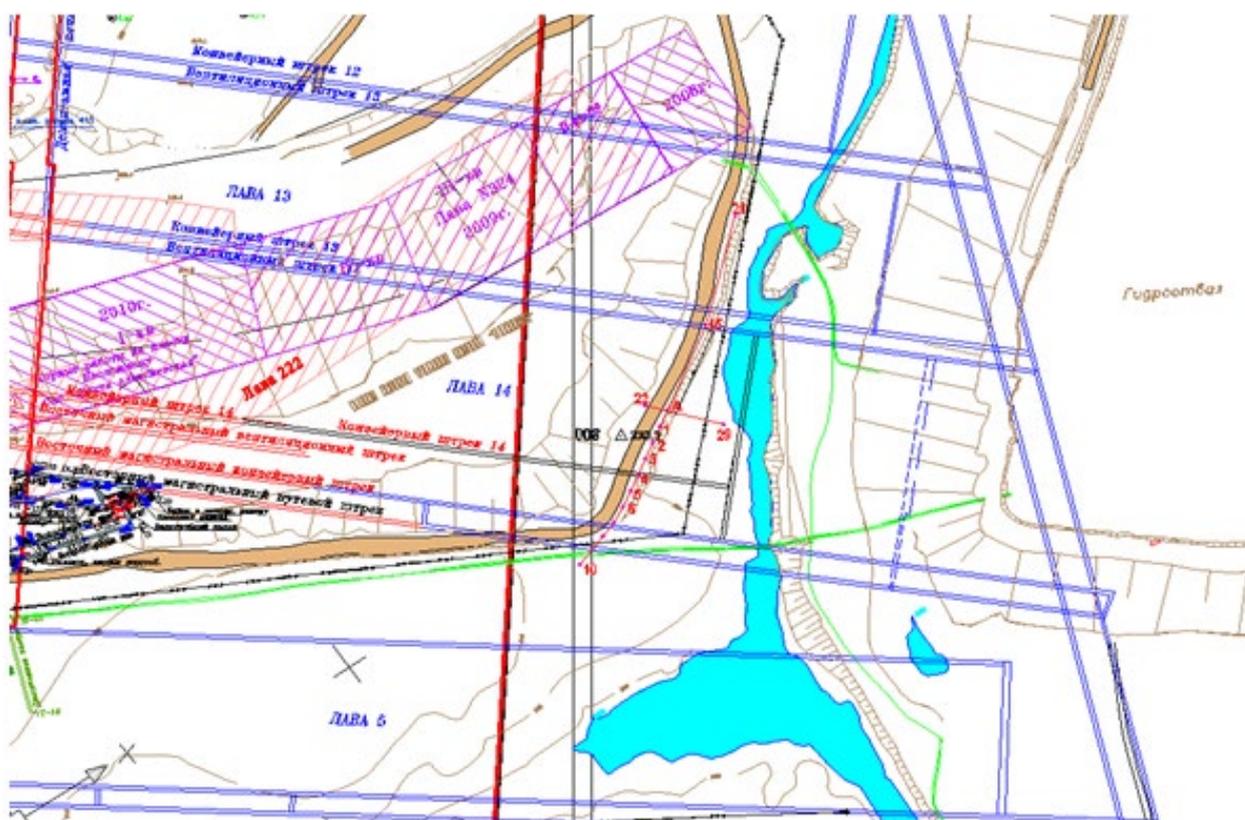


Рисунок 3.1 – Взаимное положение наблюдательной станции над лавой № 14 по пласту Польшаевский II, лав № 13, 14, 5

Таблица 3.1 – Результаты маркшейдерских наблюдений за оседаниями земной поверхности от отработки лавы №14 шахты Байкаимская

№ репера	A	2	3	4	5	6
Оседания η , м	0,742	0,823	0,626	0,375	0,265	0,164

3.2 Выявление факторов, влияющих на устойчивость гидротвала при его подработке

3.2.1 Изменение геометрических параметров откоса

Наиболее значительным фактором, определяющим устойчивость гидротвалов на подрабатываемых территориях, является изменения в пространстве геометрических параметров сооружений. Известно, что на земной поверхности и в подрабатываемом породном массиве наблюдаются сдвигения и деформации, величины которых зависят от вынимаемой мощности пласта, глубины горных работ, угла падения пласта и площади отработки. Конструктивные элементы гидротехнического сооружения, попадая в зоны подработки, также испытывает деформации сдвигения, при этом изменяются их геометрические параметры, а также положение в пространстве границ техногенных массивов и выделенных инженерно-геологических элементов (рисунок 3.2).

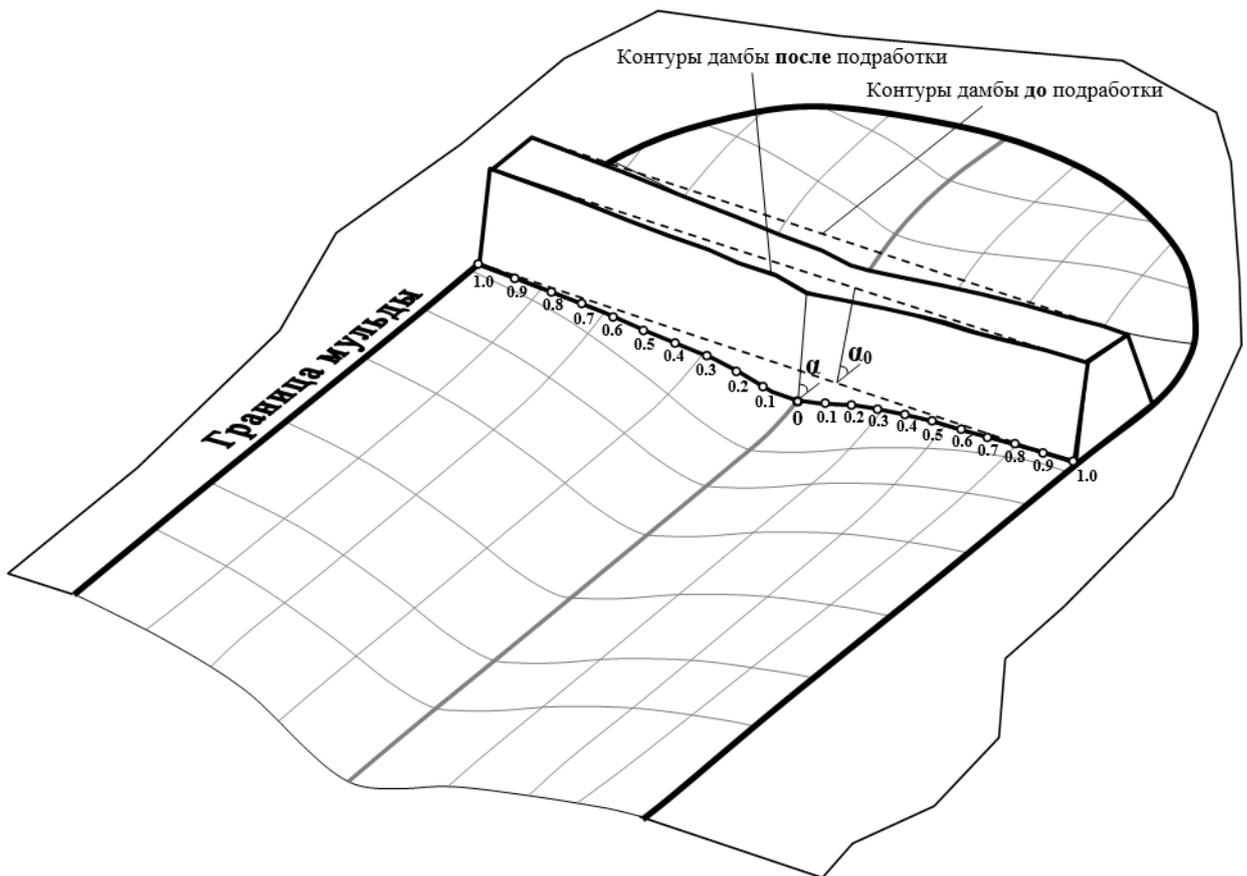


Рисунок 3.2 – Изменение угла наклона откоса участка дамбы, расположенного в пределах муьды сдвигения горных пород:
 α_0 – угол откоса дамбы до подработки; α – угол откоса дамбы после подработки

В частности, при частичном попадании дамб и плотин гидроотвалов в формирующуюся мульду сдвижения следует ожидать возрастание результирующего угла откоса или наклона «слабого» основания, что естественно должно сказаться на устойчивости сооружения. В связи с чем, обоснованию геомеханической схемы оценки устойчивости гидроотвала должен предшествовать прогноз сдвижения поверхности и техногенного массива с использованием различных методов, рассмотренных выше. Вопросу определения и прогноза деформаций и оседаний земной поверхности при отработке угольных пластов посвящена вторая глава настоящей диссертации. Однако в настоящее время остается практически неизученным вопрос о характере деформирования техногенных массивов гидроотвалов, попадающих в мульду сдвижения. Априори считается, что деформации поверхности сооружения и его основания синхронно согласованны по глубине, т.е. не будут изменяться в пределах техногенного массива. В действительности процесс деформирования грунтового сооружения является более сложным по деформационному поведению пород и их напряженно-деформированному состоянию и протекает, по всей видимости, неравномерно. Более точно спрогнозировать деформации в сооружении можно с использованием численного моделирования НДС природно-технической системы «очистная выработка – породный массив – гидроотвал», чему посвящен параграф 3.4 настоящей главы.

3.2.2 Изменение гидрогеологического режима

Гидроотвал в силу специфических условий формирования представляет собой комбинацию водонасыщенных техногенных и естественных массивов, взаимодействующих между собой в рамках единой гидрогеологической природно-технической системы, в которой сформировался техногенный водоносный комплекс с безнапорно-напорным режимом фильтрации. Поэтому оценку устойчивости его откосов следует осуществлять с учетом сил гидростатического взвешивания и гидродинамического давления. В наиболее простых условиях в дамбах гидроотвалов функционирует безнапорный водоносный

горизонт, характеризующийся пьезометрической поверхностью. Прогноз ее положения в откосе осуществляется обычно с использованием аналитических методов или математического моделирования. Кроме того, пьезометрическую поверхность достаточно просто определить в пространстве на основании измеренных в пьезометрах уровнях воды или порового давления по установленным в откосную часть тензометрическими датчиками. В случае отсутствия натуральных измерений на гидротехническом объекте пьезометрическую поверхность в откосе можно с достаточной точностью построить на основании геофильтрационных расчетов с учетом установленных отметок уровня воды в пруде-отстойнике и ее выхода на откосе.

Подработка гидроотвалов приводит не только к изменению геометрии подработанных массивов, но и сказывается на их гидродинамическом режиме, который является результатом изменившихся граничных условий и напряженно-деформированного состояния пород.

Уровненный режим подземных вод подработанной толщи на периферии определяется границей (границами) с постоянным уровнем (напором), например, рекой, озером или прудом с неограниченным питанием. При подработке этой территории и ее оседании абсолютная отметка уровня воды на ней изменяться не будет, если гидравлическая связь приповерхностных слоёв с зоной водопроницающих трещин (ЗВТ) над подземными выработками обоснованно исключается. Тогда вместе с оседанием откоса отвала территория перед ним будет подтапливаться или затопляться, в соответствии с глубиной мульды в зоне полных сдвижений. Если такую связь исключить нельзя, то уровень воды перед откосом будет зависеть от водопроницаемости подрабатываемого массива вплоть до полного его осушения. В таком случае необходимо строить комплексную гидродинамическую модель, включающую в себя очистную выработку, весь массив горных пород до поверхности, а также комплекс гидротехнических сооружений.

Уровень воды в не подработанной части отвала определяется режимом накопления отвальной массы и изменяется достаточно закономерно. Уровень

подземных вод в откосе отвала определяется, с одной стороны, уровнем воды на его нижней бровке (одна граница с постоянным напором) и уровнем воды в не подработанной части отвала – с другой стороны (вторая граница, но с задаваемым напором). При известных или заданных уровнях (напорах) воды на границах откоса и коэффициентах фильтрации слагающих его пород можно определить (моделировать) положение уровня воды во всём откосе. Очевидно, что величина подъёма уровня воды у нижней бровки откоса будет равна величине её оседания без учёта временного подъёма порового давления воды в слоях в зоне опорного давления. С удалением от нижней бровки величина подъёма уровня в откосе будет сокращаться в соответствии с проницаемостью каждого отдельного слоя откоса.

Таким образом, при самом простом рассмотрении в процессе подработки гидроотвала происходит оседание его поверхности с сохранением абсолютных отметок уровня воды в массиве, т.е. степень обводнения массива будет при этом увеличиваться, также будут возрастать силы гидростатического взвешивание, уменьшаться прочность пород и снижаться коэффициент запаса устойчивости подработанного откоса.

3.2.3 Изменение физико-механических свойств естественных отложений при их подработке подземными горными выработками

Сдвигение горных пород представляет собой сложный деформационный процесс, при котором в пределах формирующейся мульды сдвигения образуются зоны с различными по направлениям деформациями сжатия и растяжения. В структурированных породах, к которым, в частности, относятся естественные неоген-четвертичных отложения Кузбасса, попавших в зоны разнонаправленных деформаций, будут наблюдаться разрушение жестких структурных связей и изменение физико-механических свойств.

Специальные инженерно-геологические исследования, посвященные изучению изменения физико-механических свойств горных пород подработанного массива в Кузбассе, не проводились. Подобные работы выполнялись применительно к Донецкому и Карагандинскому угольным бассейнам. Анализ

данного вопроса выполнен в работах Н.А. Кутеповой [64, 65] с использованием материалов инженерно-геологических исследований различных авторов, которым удалось проследить изменение структуры, физического состояния и основных механических свойств песчано-глинистых покровных отложений в зонах ведения подземных работ [10, 11, 41, 52]. Сравнение характеристик дисперсных грунтов различной консистенции до и после подработки позволило выявить снижение их прочности, связанное с частичным нарушением присутствующих им цементационных структурных связей, разрыхлением, повышением влагосодержания. Указанные трансформации проявляются по площади распространения мульды сдвижения, включая зону сжатия и зону растяжения (таблица 3.2).

Таблица 3.2 – Изменение сопротивления сдвигу глинистых пород при подработке склонов подземными выработками [64, 65]

Объект изучения	Породы	Уменьшение (-) или увеличение (+) параметров в процентах относительно первоначальных значений		
		Общее сопротивление сдвигу	Угол внутреннего трения	Сцепление
Донбасс	Элювиально-делювиальные суглинки	-	+10	-20
Караганда, ш.им.50-летия Октябрьской революции	Твердые и полутвердые неогеновые глины	$\frac{-7}{-13}$	$\frac{+16}{-18}$	$\frac{-28}{0}$
	Твердые элювиальные суглинки и глины	$\frac{0}{-10}$	-	$\frac{0}{-60}$
Донецк, ш. Октябрьская	Делювиальные лессовидные суглинки	$\frac{-25}{-}$	$\frac{+7}{+12}$	$\frac{-32^*}{-30}$
		-	-	-
Енакшево, ш. Хацпетовская-Западная	Делювиальные лессовидные суглинки	-	$\frac{+13}{-}$	$\frac{-46}{0}$
Тктварчельское месторождение	Глина	-	-15	-35
	Суглинок	-	-	-45
Копейск, ш. Южно-Камышинская	Трепеловидные глины	$\frac{-22}{-12}$	$\frac{+17}{+33}$	$\frac{-46}{-39}$
		-	-	-
Криворожское месторождение	Суглинки лессовидные тугопластичные	-	-	-100
	Глины тугопластичные	-	-	-50

* Примечание. В числителе даны значения изменения параметров для зон растяжения, в знаменателе – для зон сжатия, в остальных случаях зона не указана.

В таблице 3.2 приводятся сведения, иллюстрирующие характер изменения прочностных показателей суглинков и глин на территориях шахтных полей различных месторождений, обрабатываемых подземным способом.

Испытания грунтов проводились в лаборатории методом одноплоскостного сдвига. Установлено, что в результате подработки существенно снижается сцепление глинистых пород. Для угла внутреннего трения однозначной тенденции не просматривается, ни в зависимости от состава и консистенции пород, ни в зависимости от характера испытываемых ими горизонтальных деформаций (сжатие-растяжение) в пределах мульды сдвижения. Фиксируемые увеличения этого показателя связаны, вероятно, с разрыхлением пород, а уменьшения – с повышением влажности. Важно отметить, что изменение обоих параметров сопротивления сдвигу (сцепления и угла внутреннего трения) суммарно приводят к падению прочности пород в целом. Максимально зафиксированное снижение сопротивления сдвигу нарушенных пород составляет 25 % относительно первоначальной величины .

Известно, что сцепление песчано-глинистых грунтов определяется двумя видами структурных связей – водно-коллоидными и жесткими цементационными. Соответственно, сцепление пород разделяют на две составляющие – коагуляционное сцепление, определяемое содержанием влаги в поровом пространстве, и структурное сцепление, величина которого зависит от прочности (выраженности) жестких цементационных связей. Последние являются результатом диагенетических преобразований пород, связанных с выпадением солей из поровых растворов, их кристаллизацией и созданием цементационных «мостиков» между частицами. Породы с хорошо развитыми цементационными связями принято называть «жесткими глинами», хотя, строго говоря, такими структурами обладают не только глины, но и отложения суглинистого состава. В целом в эту группу можно отнести все покровные глины и суглинки тугопластичной, полутвердой и твердой консистенции, отложения специфического генезиса – типичные лёссы эолового происхождения, загипсованные, засоленные и карбонатные глины, а также широко распространенные на территории угольных месторождений Кузбасса лессовидные суглинки и глины [65].

Жесткие структурные связи не устойчивы при скашивании, потому горизонтальные деформации, возникающие в пределах мульды сдвижения, могут стать причиной их разрушения. Небольшие по величине деформации сопровождаются развитием локальной микротрещиноватости, разрыхлением пород, обеспечивающим приток влаги к зонам нарушения, что в совокупности ведет к потере сцепления и прочности пород в целом. В зависимости от физического состояния пород и интенсивности деформаций в зонах сжатия и растяжения жесткая структура глинистых пород может быть разрушена частично или полностью.

Наибольшее падение сцепления характерно для «жестких» глин полутвердой и твердой консистенции, в которых структурная составляющая является определяющей в сравнении с коагуляционной, составляя от 50 до 90% от общей величины сцепления. Прочность пород при этом уменьшается, но может оставаться довольно высокой за счет внутреннего трения, которое в породах твердой консистенции имеет большое значение [65]. В отложениях пластичной консистенции с повышенным содержанием влаги дополнительные горизонтальные напряжения при подработке инициируют развитие процессов ползучести, которые со временем приводят к разрушению цементационных связей, уничтожению структурного сцепления, величина которого в этих породах составляет от 10 до 50 % от общего сцепления [112].

Характер изменения угла внутреннего трения песчано-глинистых грунтов при подработке также объясняется их структурными трансформациями. Небольшие по мощности толщи в силу отсутствия сдерживающего давления вышележащих пород подвержены разрыхлению при горизонтальных деформациях, что сопровождается уменьшением числа контактных взаимодействий между структурными элементами (частицами и агрегатами), подтоком влаги в образовавшееся дополнительное поровое пространство, что всё вместе ведет к снижению внутреннего трения в породах. В подрабатываемых толщах большой мощности разрушение структуры, наоборот, обеспечивает возможность

дополнительного уплотнения пород и возрастания внутреннего трения за счет увеличения контактных взаимодействий между структурными элементами.

При прогнозе изменения прочности водонасыщенных глинистых отложений с сугубо коагуляционной структурой (глины и суглинки текучей и текучепластичной консистенции естественного происхождения, техногенные намывные отложения), следует учитывать, что отсутствие в них жестких цементационных связей не предполагает падения параметров сопротивления сдвигу при подработке за счет фактора структурных трансформаций. Основной причиной снижения прочности в данном случае является изменение НДС пород вследствие формирования избыточного гидростатического давления, возникающего как реакция на дополнительную нагрузку на поровую воду в процессе развития деформаций в мульде сдвижения. Поровое давление снижает эффективные напряжения в грунтах, обуславливающие величину внутреннего трения, что при весьма низком коагуляционном сцеплении, характерном для полностью водонасыщенных грунтов, может стать причиной резкого падения их прочности, при определенных условиях - практически до нуля.

3.2.4 Формирование избыточного порового давления в намывном массиве

На окраинах мульды сдвижения за границей зоны оседаний породный массив и расположенный на нем гидроотвал сжимаются, попадая в зону опорного давления. В данной зоне в водонасыщенных породах следует ожидать появления сжимающих напряжений, сопровождающихся формированием избыточного порового давления, которое, в свою очередь, снижает эффективные напряжения в скелете породы, уменьшая ее прочность. Величина, скорость образования и рассеивания порового давления в водонасыщенных породах зависят от дополнительных напряжений в зоне опорного сжатия, их пористости, проницаемости и консистенции. Кроме того, величина порового давления определяется глубиной, при этом, чем глубже расположен слой на краю мульды сдвижения, тем больше в нём опорное сжатие и, соответственно, начальное избыточное поровое давление. В породах откосных частей

гидроотвалов скорость рассеивание порового давления определяется компрессионно-фильтрационными свойствами. Обычно откосная часть сооружения сложена относительно проницаемыми породами, поэтому в ней следует ожидать достаточно быстрое рассеивание образовавшегося избыточного порового давления воды. Весьма важным моментом при этом является последовательность формирования мульды относительно гидроотвала. В случаях, когда мульда и волна опорного давления приближается к гидроотвалу из периферии, то избыточное поровое давление накапливается в откосе до величин, провоцирующих нарушение его устойчивости.

Прогнозирование избыточного порового давления в подрабатываемых намывных массивах является весьма сложной гидрогеомеханической задачей, требующей использования решений двух- и трехмерной задач теории фильтрационной консолидации. Количественный прогноз формирования избыточного порового давления в гидроотвале при подработке возможен при использовании численного моделирования напряженно-деформированного состояния МКЭ или гидродинамического режима МКР в природно-технической системе «очистная выработка – породный массив – гидроотвал» (ПТС). Оценка устойчивости откоса на основании прогноза напряженно-деформированного состояния пород намывных и естественных массивов при их подработке представлена в параграфе 3.4.

3.3 Методика оценки устойчивости откосов гидроотвалов в зонах ведения подземных горных работ

Оценка устойчивости откосов гидроотвала в целом является стандартной инженерной задачей. Ее целью является определение коэффициента запаса устойчивости. Методы его определения и общий принцип оценки устойчивости описан в параграфе 1.3.

Учет влияния подработки откоса достигается путем учета влияния каждого из выделенных факторов при определении коэффициента запаса устойчивости КЗУ. При этом метод его определения может быть любым. В настоящей работе использовался метод предельного равновесия Спенсера [166],

реализованный в качестве базового функционала в программе Slide (Rocscience Inc.) [165].

3.3.1 Описание методики

Исходными данными для выполнения расчетов являются: геометрические характеристики откоса с разделением его на инженерно-геологические элементы; физико-механические свойства пород, слагающих гидроотвал и пород основания; ориентация очистной выработки относительно гидроотвала; параметры процесса сдвижения (мульды сдвижения).

Подработка откоса является динамическим процессом, однако выполнение оценки устойчивости возможно только в условиях статического равновесия. Поэтому расчеты устойчивости необходимо проводить на всех этапах подработки, задаваясь различными положениями очистного забоя лавы относительно откоса сооружения.

При расположении очистной выработки вкrest простиранию откоса и направлении движения очистного забоя на откос либо из-под него, за исходное принимается положение очистного забоя, при котором граница мульда сдвижения совпадает с точкой входа/выхода потенциальной поверхности скольжения в/из откос(а). При таком положении забоя, КЗУ соответствует коэффициенту запаса устойчивости «до подработки». За конечное принимается положение очистного забоя, при котором вся поверхность скольжения попадает в плоское дно мульды сдвижения. При этом считается, что все деформации в массиве реализовались и откос полностью перешел в равновесное состояние. Дальнейшее продвижение забоя не оказывает влияния на устойчивость откоса и при этом КЗУ не изменяется.

Промежуточные положения очистного забоя устанавливаются через равный интервал от своего начального положения. Длину интервала допускается увеличивать в положениях, близких к начальному и конечному, ввиду не сильного влияния на КЗУ, и уменьшать в положениях наиболее резкого

изменения КЗУ (при подработке призмы упора и призмы активного давления). Рекомендованная длина интервала – 50 м.

При расположении очистной выработки параллельно простиранию откоса следует рассматривать только начальное и конечное положение откоса, а именно «до подработки» и при полной подработке. КЗУ в этих положениях будет принимать свои максимальные и минимальные значения.

Изменение геометрических параметров откоса

Для каждого из положений очистного забоя необходимо определить параметры мульды сдвижения (вертикальные и горизонтальные смещения) в пространственной привязке к откосу сооружения. Их можно спрогнозировать на основании натуральных наблюдений, если такие проводились на рассматриваемом объекте, либо на основании метода типовых кривых по «Правилам охраны...» [84], либо при помощи моделирования.

Изменение геометрии гидроотвала производится на основании допущения о согласованности деформаций сооружения и его основания. При этом не учитываются возможные процессы расслоения и разуплотнения в теле сооружения. Каждая характерная точка профиля гидроотвала перемещается по вектору смещения, соответствующему своему положению в мульде сдвижения. Таким образом, получается геометрия деформированного откоса на соответствующем этапе подработки.

Гидрогеологический фактор

Уровень воды (УВ) в теле гидроотвала при расчетах принимается в двух вариантах: 1) соответствующий моменту времени непосредственной реализации деформаций. УВ опускается вместе с телом сооружения, за исключением отметки уровня свободной воды (рекой, пруд или другой водоем с неограниченным питанием); 2) соответствующий моменту времени стабилизации исходного положения УВ за счет фильтрации.

Фактическое положение УВ на каждом этапе можно спрогнозировать путем решения геофильтрационной задачи. Он будет занимать промежуточное положение между вариантами 1 и 2, но на конечном этапе подработки

стабилизируется в положении 2. Поэтому для расчетов устойчивости откоса следует рассматривать этот вариант как самый неблагоприятный.

Изменение свойств пород основания

Изменение прочностных свойств пород естественного основания учитывается следующим образом:

1. Определяется область изменения свойств

При расположении очистной выработки вкрест простиранию откоса за область изменения свойств принимается часть массива четвертичных отложений, попадающих в плоское дно мульды сдвижения и три четверти полу-мульды по простиранию. Граница области изменения свойств строится под углом сдвижения, который может быть определен для конкретного месторождения по результатам натурных наблюдений, либо принят исходя из «Правил охраны...» [84].

При расположении очистной выработки параллельно простиранию откоса за область изменения свойств принимается часть массива четвертичных отложений, попадающих во всю мульду сдвижения. Граница области также отстраиваются по углам сдвижения.

2. В выделенной области величина сцепления уменьшается в зависимости от типа пород основания:

- для лессовидных суглинков – уменьшается на 30%;
- для глин – уменьшается на 50%;
- для уже нарушенных пород слабых оснований величина сцепления не изменяется.

Приведенные значения служат ориентировочными и рекомендуются для предварительных расчетов. В конкретных условиях реального объекта следует выполнить инженерно-геологические исследования пород подработанной толщи до и после подработки.

Избыточное поровое давление

Избыточное поровое давление задается в виде пьезометрической поверхности, которая воздействует только на намывной массив либо задается по

точкам, после чего программа интерполирует значения порового давления и выстраивает линии равных напоров.

Исходную информацию об избыточном поровом давлении можно получить на основании гидрогеологического мониторинга по наблюдательным скважинам с датчиками порового давления. Однако сделать это можно только непосредственно в момент подработки гидроотвала. С целью прогноза формирования избыточного порового давления можно воспользоваться программами, использующие метод конечных элементов, позволяющий спрогнозировать изменение НДС массива и решить консолидационную задачу. Прогноз изменения НДС и формирование зон избыточного порового давления в теле гидроотвала приведен в параграфе 3.4.

Обработка результатов

Для каждого из положений мульды сдвижения рассчитывается КЗУ подрабатываемого откоса и сводится в таблицу. По полученным результатам строится график изменения КЗУ в зависимости от положения очистного забоя, на основании которого можно определить наиболее опасные этапы подработки.

3.3.2 Прогноз устойчивости гидроотвала «на реке Еловка» при его подработке шахтой «Байкаимская».

ООО шахтой «Байкаимская» в период с ноября 2013 г. по декабрь 2014 г. лавой №14 был отработан угольный пласт Польшаевский II, характеризующийся средней вынимаемой мощностью 4,9 м. Длина лавы вкрест простирания составляла 220 м, по простиранию – 910 м, глубина отработки изменялась от 220 до 310 м. На земной поверхности в непосредственной близости от шахты располагается гидроотвал на реке Еловка. Отработка лавы осуществлялась в направлении гидротехнического объекта, при этом в зону подработку попали оградительная дамба и водоотводной канал (рисунок 3.1). В 2015 г. также осуществлена отработка соседней лавы №5, в зону которой попала частично нижняя часть откоса. Подробные характеристики объектов приведены в параграфе 3.1.

Фактически гидроотвал лавой № 14 подрабатывался лишь частично, а граница выработки при этом в плане располагалась на расстоянии 85 м от нижней бровки откоса. Замеренные при ведении маркшейдерского мониторинга оседания на откосе не превысили 0,2 м, а в районе водоотводного канала - 1 м. Такие деформации не оказали существенного влияния на устойчивости гидроотвала и естественно не могли привести к разрушению его откоса. Однако в случае дальнейшего подвигания очистного забоя под гидроотвал его состояние устойчивости могло значительно ухудшиться. Ниже с целью изучения влияния подработки на устойчивость гидроотвала смоделируем геомеханическую ситуацию, в которой откос гидроотвала был подработан полностью [93].

Обоснование расчетных схем

Оценку устойчивости гидроотвала проводилась по профилю №8, который расположен приблизительно по оси лавы №14. Высота оградительной конструкции – откоса в этой части гидроотвала составляет 36 м, а угол откоса – 8° . Массив приоткосной части сложен техногенными отложениями дамб и намывного массива. В основании гидроотвала залегают естественные суглинки. В откосе развит безнапорный техногенный горизонт.

Расчетная схема приведена на рисунке 3.3. Физико-механические свойства намывных и естественных пород участка гидроотвала на участке подработки приведены в таблице 3.3.

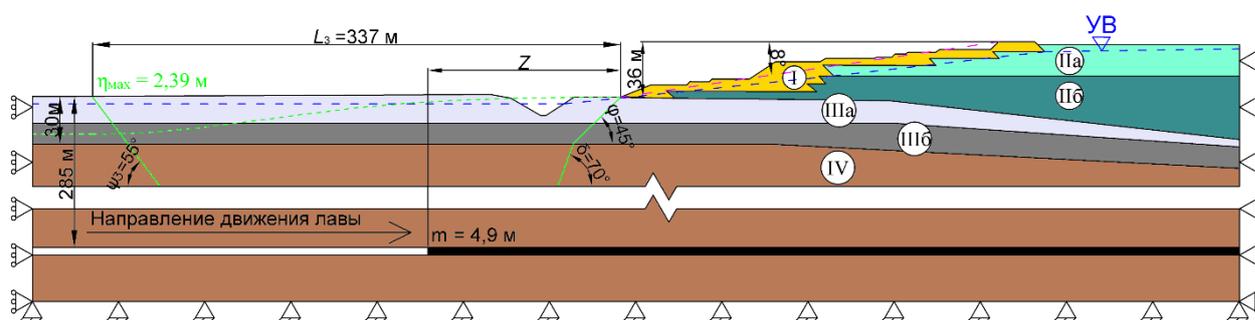


Рисунок 3.3 – Расчетная схема по профилю гидроотвала №8:

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

По результатам натурных исследований, величина максимального оседания земной поверхности при отработке лавы №14 составила 2,39 м, при этом

длина полумульды по простиранию выработки – 337 м. Распределение вертикальных и горизонтальных сдвижений примем по типовым кривым [84]. Расстояние от забоя лавы до нижней бровки откоса обозначим буквой Z . За исходное положение примем $Z_0 = -135$ м. Рассчитаем коэффициенты запаса устойчивости для промежуточных положений $Z = -35; 15; 65; 115; 165; 215; 315$ м и на конечное положение $Z_8 = 485$ м. Знак «-» соответствует приближению забоя к нижней бровке; «+» – удалению от нее.

Для каждого из выбранных положений необходимо вручную перестроить геометрию откоса, сместив каждую характерную точку на свой вектор сдвижения. Величины проекций вектора определяются в зависимости от горизонтальной координаты точки в мульде сдвижения. При этом считается, что деформации поверхности и дамбы гидроотвала согласованы и не изменяются по вертикали.

Для расчетов в каждом случае зададимся двумя положениями уровня воды в деформированном откосе: УВ1, соответствующий своему положению до подработки, на момент стабилизации за счет фильтрационных процессов; УВ2, пониженный в соответствии с деформациями грунта. Определяется аналогичным образом деформированной геометрии откоса, по векторам сдвижения.

Зададимся областью изменения прочностных свойств. Для этого необходимо от крайней точки полумульды отложить расстояние, равное четверти полумульды сдвижения: $0,25 \cdot 337 \approx 85$ м. От этой точки проводим линию под углом 70° , разделяющую четвертичные отложения. Областью изменения прочностных свойств расположена со стороны движения очистного забоя.

Четвертичные отложения в данном разрезе представлены лессовидными пылеватыми глинами и суглинками тугопластичной и полутвердой консистенции (Шб) и мягкопластичной консистенции (Ша). Для пород нижней части разреза (Шб) снизим величину сцепления на 50%, а для слабых и нарушенных пород в верхней части (Ша), свойства изменять не будем.

Таблица 3.3 – Расчетные параметры физико-механических характеристик пород, слагающих гидроотвал на реке Еловка [81]

№ ИГЭ	Описание пород	Плотность ρ , т/м ³	Сцепление C , кПа	Угол внутреннего трения φ , °
I	Насыпное тело дамб - обломочный материал (песчаники, алевролиты) с суглинистым заполнителем	1,95	15	26
II а	Намывные породы - суглинки бурые водонасыщенные с прослоями песков, супесей, - текучепластичные	1,90	15	16
II б	- мягкопластичные	1,95	30	15
III а	Естественное основание дамб – глины и суглинки пылеватые, серо-голубые, - мягкопластичные	1,95	20	13
III б	- тугопластичные и полутвердые	2,00	40	19

С целью изучения влияния каждого из выделенных факторов в отдельности оценку устойчивости на каждом из этапов подработки будем проводить для различных сочетаний этих факторов:

- с учетом изменения только геометрических параметров откоса, при этом УВ снижается в соответствии с деформациями в откосе;
- с учетом изменения геометрических параметров откоса, а также стабилизации исходного УВ в откосе;
- с учетом изменения геометрических параметров откоса, а также снижения прочностных свойств пород основания. УВ как в первом случае;
- с учетом всех перечисленных факторов.

Результаты расчетов

Расчеты устойчивости выполнялись с использованием метода Спенсера на программном комплексе Slide. Поиск поверхности скольжения с наименьшим коэффициентом запаса устойчивости КЗУ выполняется автоматически методом последовательного итерационного приближения. Форма искомой поверхности скольжения – некруглоцилиндрическая, плавная криволинейная.

Результаты вычисления КЗУ сведены в таблицу 3.4, а также приведены в виде графика изменения КЗУ в зависимости от расстояния между очистным забоем и нижней бровкой откоса (рисунок 3.5).

Устойчивость откоса до начала ведения горных работ обеспечивается с КЗУ – 1,33, что выше нормативного значения 1,25 для ГТС I класса и, следовательно, удовлетворяет установленным требованиям промышленной безопасности [83, 106]. Призма возможного оползания (рисунок 3.4) охватывает нижнюю половину склона, а также часть слабых четвертичных отложений, расположенных под ней. Поверхность скольжения имеет сложную полигональную форму и проходит по контакту слабых и прочных четвертичных отложений.

Фактическое положение очистного забоя лавы №14 на момент окончания отработки соответствует расстоянию $Z = -85$ м. Исходя из графика (рисунок 3.5) КЗУ в этот момент составляет примерно 1,32, что также удовлетворяет установленным требованиям. Таким образом, можно утверждать, что отработка пласта Польшаевский-II лавой №14 вблизи гидроотвала на реке Еловка в 2016 г. не оказала существенного влияния на устойчивое состояние дамбы в районе её подработки.

Выполненный анализ расчетов устойчивости свидетельствует, что в процессе подработки на первых этапах наблюдается тенденция снижения КЗУ, а затем происходит его возрастания до своего максимального конечного значения. При этом практически на всех этапах подработки устойчивость откоса обеспечивается с коэффициентом запаса ниже нормативного значения. Это означает, что эксплуатация гидроотвала в таких условиях не соответствует установленным требованиям устойчивости и требует проведения специальных мероприятий по улучшению состояния устойчивости, таких, например, отсыпки пригруза в нижней части откоса или снижение УВ до начала подработки.

Наихудшее состояние устойчивости достигается при расположении очистного забоя на расстоянии 165 м от нижней бровки после ее прохождения. В этом положении водоотводной канал попадает в плоское дно мульды, а нижняя часть дамбы садится на 2,1 м. В средней части дамбы локализуются максимальные горизонтальные сдвигения. При этом верхняя часть откоса

попадает в самый край мульды сдвижения, где деформации не столь значительны. Генеральный угол откоса при таком положении увеличивается примерно на $0,5^\circ$.

Кроме того отмечается, что на условия устойчивости в процессе подработки в большей степени сказывается изменение геометрии откоса, это подтверждается тем, что все графики имеют общую тенденцию. Снижение КЗУ до минимального значения обуславливается тем, что происходит осадка нижней части дамбы, в то время как верхняя часть еще не подвержена деформациям. Объясняется это тем, что при оседании дамбы уменьшается высота призмы упора, а призма активного давления остается в прежнем положении. Дальнейшее увеличение КЗУ связано с тем, что в мульду оседания начинает попадать верхняя часть откоса и происходит уменьшение высоты призмы давления. В конечном итоге, весь откос попадает в плоское дно мульды и геометрически приобретает исходную форму. При этом все высотные отметки понижаются на величину максимально оседания.

На момент полной подработки гидроотвала значение КЗУ снижается до 1,254, что все еще удовлетворяет установленным требованиям, но является предельным для данного сооружения. Значение КЗУ после подработки обусловлено возвращением УВ в исходное положение, а также снижением прочностных свойств пород основания. При этом гидрогеологический фактор начинает оказывать влияния только тогда, когда деформации достигают верхней части откоса. Объясняется это тем, что УВ в канале является постоянным в любой момент времени, в то время как в массиве УВ в момент реализации деформаций опускается вместе с ним и восстанавливается спустя некоторое время за счет фильтрации. Поэтому в первых положениях, когда деформации в верхней и средней частях откоса не столь велики, разница между УВ1 и УВ2 также не значительна.

Таблица 3.4 – Результаты расчетов устойчивости подрабатываемого откоса гидроотвала при учете различных факторов влияния

Факторы влияния		Изменения геометрии	Изменение геометрии и стабилизация УВ	Изменение геометрии и снижение свойств	Сочетание всех факторов влияния
Коэффициенты запаса устойчивости для положений мульд:	$Z_0 = -135$ м	1,333			
	$Z_1 = -35$ м	1,320	1,320	1,275	1,275
	$Z_2 = 15$ м	1,301	1,301	1,254	1,251
	$Z_3 = 65$ м	1,278	1,277	1,224	1,222
	$Z_4 = 115$ м	1,255	1,253	1,208	1,205
	$Z_5 = 165$ м	1,248	1,238	1,204	1,196
	$Z_6 = 215$ м	1,268	1,250	1,222	1,212
	$Z_7 = 315$ м	1,328	1,285	1,276	1,249
	$Z_8 = 485$ м	1,360	1,293	1,284	1,254

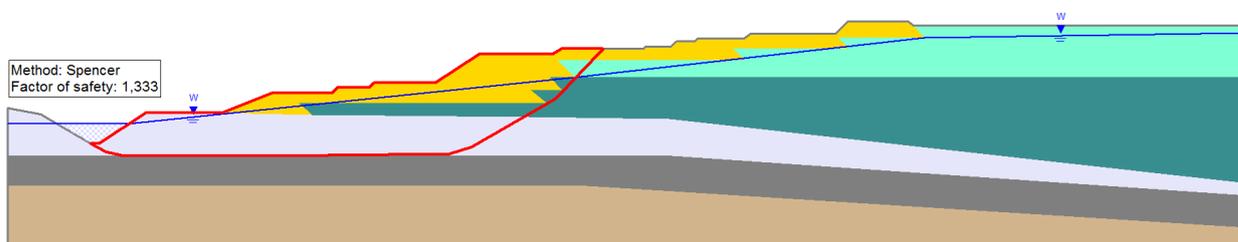


Рисунок 3.4 – Призма возможного оползания в профиле №8 гидроотвала на реке Еловка до его подработки. КЗУ = 1,333

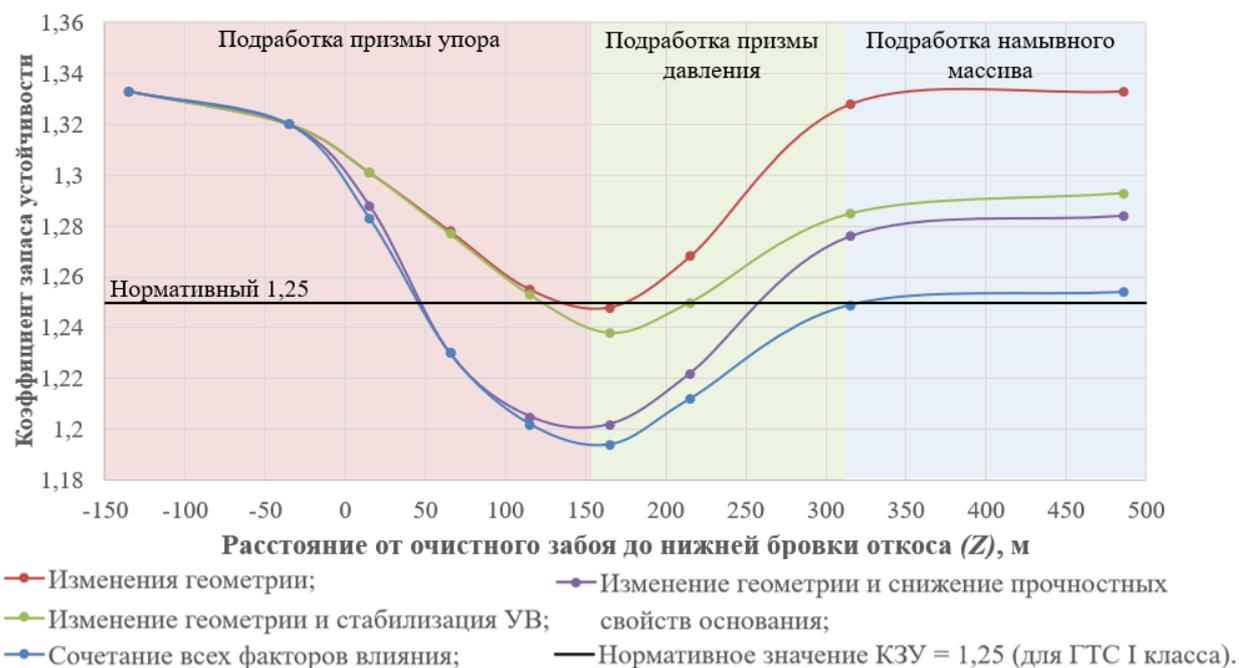


Рисунок 3.5 – График изменения КЗУ в зависимости от расстояния между очистным забоем и нижней бровкой откоса. Отрицательные значения по оси Z соответствуют приближению очистного забоя к дамбе гидроотвала, положительные – удалению от нее

Влияние снижения прочности основания начинает сказываться с момента прохождения забоя непосредственно под нижней бровкой откоса. В этот момент в область изменения свойств попадают четвертичные отложения под водоотводным каналом и под нижней частью дамбы. Поверхность скольжения начинает опускаться ниже, приобретая более выраженную круглоцилиндрическую форму и КЗУ снижается.

3.3.3 Прогноз устойчивости гидроотвала при его подработке в направлении из-под откоса

В предыдущем разделе рассматривалась подработка гидроотвала при направлении ведения горных работ на откос. Рассмотрим ситуацию подработки этого же откоса, но поменяем направление подвигания очистного забоя на противоположное. При этом все факторы влияния учитываются аналогичным образом. Зададимся следующими положениями забоя: $Z = -350, -150, -100, -50, 0, 50, 100, 150, 200, 300$ м. В данном случае отрицательные значения также соответствуют положениям забоя при его приближении к нижней точки откоса, а положительные – при удалении от нее.

Полученные результаты расчетов устойчивости приведены в табличной форме (таблица 3.5), а также в виде графика изменения КЗУ в зависимости от расстояния между очистным забоем и нижней бровкой откоса (рисунок 3.6).

Таблица 3.5 – Результаты расчетов устойчивости подрабатываемого откоса гидроотвала при направлении движения очистного забоя из-под откоса

Факторы влияния	Изменения геометрии	Изменение геометрии и стабилизация УВ	Изменение геометрии и снижение свойств	Сочетание всех факторов влияния	
Коэффициенты запаса устойчивости для положений мульд:	$Z_0 = -350$ м	1,333			
	$Z_1 = -150$ м	1,344	1,344	1,343	1,340
	$Z_2 = -100$ м	1,362	1,352	1,362	1,349
	$Z_3 = -50$ м	1,389	1,369	1,389	1,370
	$Z_4 = 0$ м	1,433	1,379	1,386	1,353
	$Z_5 = 50$ м	1,422	1,376	1,374	1,335
	$Z_6 = 100$ м	1,402	1,349	1,354	1,313
	$Z_7 = 150$ м	1,370	1,316	1,325	1,282
	$Z_8 = 200$ м	1,345	1,295	1,300	1,255
	$Z_9 = 300$ м	1,333	1,293	1,284	1,254

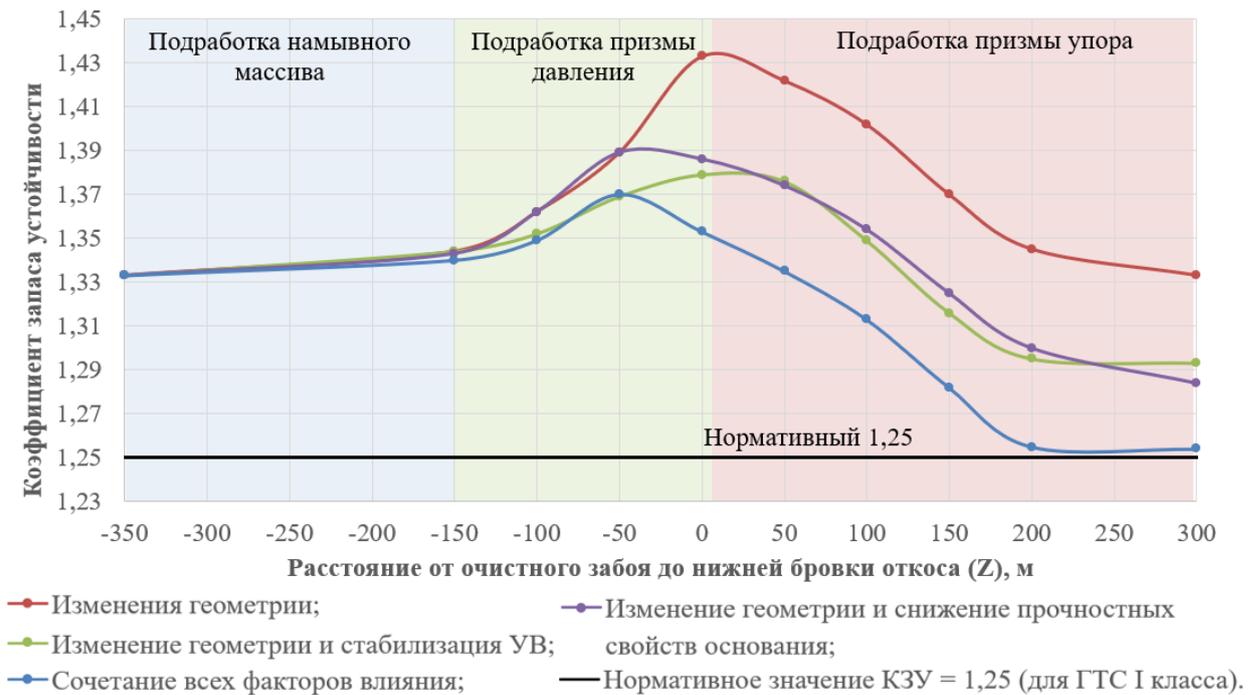


Рисунок 3.6 – График изменения КЗУ в зависимости от расстояния между очистным забоем и нижней бровкой откоса. Направление движения лавы – из-под откоса

В данном случае начальные и конечные значения КЗУ такие же, как и в случае подработки на откос, однако в процессе наблюдается обратная тенденция. Вначале условия устойчивости откоса улучшаются, затем ухудшаются и КЗУ плавно снижается до своего минимального значения. Связано это, в первую очередь, с изменением геометрии откоса. При продвижении очистного забоя в мульду сдвигения вначале попадает верхняя часть откоса и в тот момент, когда она уже находится в плоском дне, граница мульды только достигает призмы упора. При этом оседания низового откоса в этот момент незначительны. При дальнейшем продвижении очистного забоя деформации реализуются уже в призме упора, тем самым ухудшая условия устойчивости.

Снижение прочности основания и изменение гидрогеологического режима, в целом, на условия устойчивости влияют также как и в случае подработки на откос.

3.3.4 Прогноз устойчивости гидроотвала при его подработке в направлении, параллельном простиранию откоса

Данный подраздел посвящен моделированию ситуации, в которой откос гидроотвала подрабатывается очистной выработкой, пройденной параллельно простиранию откоса. С этой целью зададимся тем же самым профилем и той же лавой, что и в предыдущих разделах. Значение максимального оседания земной поверхности будет равно 2,39 м. Длина полумульды по падению составляет 223 м, по восстанию – 243 м. Качественное распределение смещений в мульде примем на основании «Правил охраны...» [84].

Расчеты устойчивости в этом случае будут выполняться до и после его подработки. Динамика процесса изменения значения КЗУ особого интереса не представляет, так как все промежуточные значения будут находиться между ними. Интерес в данном случае представляет влияние положения самой выработки относительно откоса. С целью его изучения определим условия устойчивости для различных положений очистной выработки под гидроотвалом. Обозначим расстояние от центра лавы до нижней бровки откоса буквой « L » и рассчитаем значения КЗУ для положений $L = -200, -100, -50, 0, 50, 100, 150, 200, 250, 350$. Полученные результаты расчетов устойчивости сведены в таблицу 3.6 и представлены в виде графика зависимости КЗУ от расстояния L (рисунок 3.7).

Таблица 3.6 – Результаты расчетов устойчивости подрабатываемого откоса гидроотвала при расположении лавы параллельно простиранию откоса

Факторы влияния	Изменения геометрии	Изменение геометрии и стабилизация УВ	Изменение геометрии и снижение свойств	Сочетание всех факторов влияния	
Коэффициенты запаса устойчивости для полуженей мульды:	$L_1 = -200$ м	1,319	1,319	1,303	1,303
	$L_2 = -100$ м	1,265	1,263	1,217	1,214
	$L_3 = -50$ м	1,242	1,24	1,195	1,194
	$L_4 = 0$ м	1,260	1,244	1,211	1,205
	$L_5 = 50$ м	1,360	1,292	1,274	1,253
	$L_6 = 100$ м	1,408	1,365	1,361	1,322
	$L_7 = 150$ м	1,440	1,393	1,388	1,348
	$L_8 = 200$ м	1,432	1,400	1,379	1,353
	$L_9 = 250$ м	1,373	1,357	1,372	1,357
	$L_{10} = 350$ м	1,333	1,333	1,333	1,333

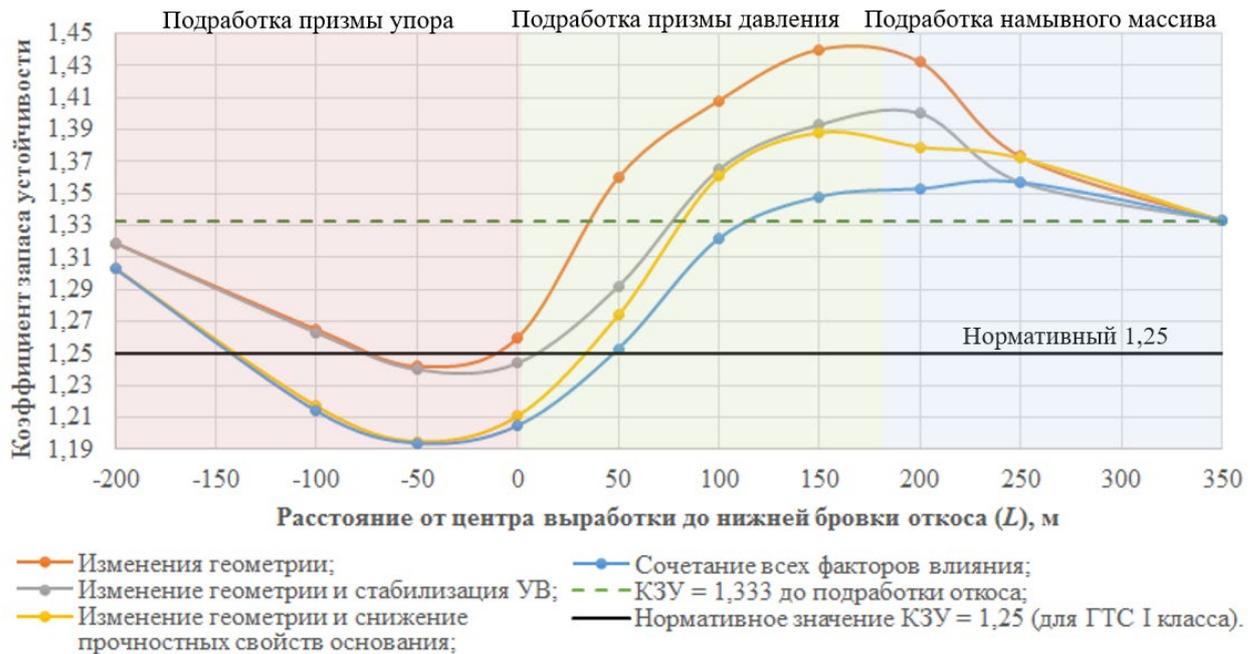


Рисунок 3.7 – График зависимости КЗУ от расстояния между центром очистной выработки и нижней бровкой откоса при расположении лавы параллельно простиранию откоса

Условия устойчивости откоса при его подработке ухудшаются при расположениях лавы $L = -200 \div 100$ м. При $L = -150 \div 50$ м КЗУ снижается ниже нормативного значения. Подработка откоса в таких условиях не может осуществляться без проведения специальных мероприятий.

Минимальное значение $KЗУ = 1,194$ достигается при $L = -50$ м. При таком расположении выработки в точку максимального оседания попадает водоотводной канал, а оседания нижней части откоса составляют около двух метров. В средней части реализуются максимальные горизонтальные сдвигения, а верхняя часть откоса находится за пределами мульды сдвижения.

3.4 Оценка и прогноз изменения напряженно-деформированного состояния пород намывных и естественных массивов при их подработке

Как отмечалось выше, подработка гидроотвала приводит к формированию избыточного порового давления в намывных породах и отложениях естественного основания. Это обстоятельство является важнейшим гидродинамическим фактором, определяющим устойчивость откосов намывного сооружения. Его учет с использованием описанной выше (раздел 3.3) методики возможен лишь, если имеются натурным данным по наблюдениям за изменением

порового давления на этапе подработке гидроотвала. Прогноз формирования избыточного порового давления возможен с использованием численного моделирования напряженно-деформированного состояния в системе «очистная выработка + породный массив + гидроотвал». В данном разделе рассмотрим методику моделирования изменения НДС на примере подработки гидроотвала на реке Еловка с использованием программного комплекса Plaxis 2D.

3.4.1 Описание численной модели

Для обеспечения сравнения полученных результатов численного моделирования подработанного откоса с расчетами, полученными в предыдущем разделе, принято одинаковое расчетное сечение, приведенное на рисунке 3.3.

Выполнить моделирование процесса сдвижения в программном комплексе Plaxis по описанной выше методике (см. главу 2) не представляется возможным по причине отсутствия инструментария для задания контактных взаимодействий. Поэтому в нашем случае моделировать оседания земной поверхности следует производить по упрощенной схеме путем последовательного задания принудительных вертикальных деформаций в кластерах, находящихся на глубине, равной глубине очистной выработки. Величина вертикальных деформаций подбирается таким образом, чтобы максимальные оседания на земной поверхности соответствовали натурным данным. В случае отсутствия таковых при калибровке модели можно использовать прогнозные величины оседаний, полученные либо по нормативной методике, либо с использованием численного моделирования. Следует отметить, что оседания земной поверхности при таком подходе формируются с определенным сдвигом в сторону направления развития горных работ. При этом качественное распределение деформаций и ширина мульды сдвижения получается близкой к полученной в природе. Данное обстоятельство необходимо учитывать на этапе анализ полученных результатов при позиционировании сооружения относительно очистного забоя выработки.

Моделирование процесса подработки гидроотвала выполнялось в следующей последовательности: создавалась геометрическая модель сооружения с разделением ее на кластеры – задавались различные породные материалы и назначались для каждого из них соответствующие модели и физико-механические свойства - присваивались соответствующие материалы для каждого кластера – создавалась конечно-элементная сетка - задавались граничные условия – задавались гидрогеологические условия - создавалось древо расчетных шагов – назначались действия для каждого шага - выполнялись расчеты.

Разработанная модель подработки гидроотвала состояла из более пятидесяти расчетных шагов. На начальном шаге создавалось поле начальных напряжений и задавалась гравитация, после чего происходило перераспределение напряженного состояния, а реализованные деформации в модели обнулялись. Затем реализовался шаг, моделирующий подработку сооружения для первого положения очистного забоя. На нем происходили принудительные вертикальные деформации в кластере, соответствующем зоне обрушения непосредственной кровли очистной выработки. За ним следовал шаг консолидации («Consolidation»), на котором происходило рассеивание порового давления в течение заданного интервала времени. Далее процедура повторялась для последующих кластеров. Параллельно после каждого шага консолидации на отдельном расчетном шаге происходило вычисление коэффициента запаса устойчивости методом итерационного снижения прочности.

Таким образом, подработка гидроотвала моделировалась в динамике с шагом продвижения очистного забоя соответствующим ширине кластера, в котором происходят деформации. Для наиболее реального описания процесса ширину кластера необходимо принимать равной шагу посадки кровли, однако в таком случае количество расчетных шагов значительно увеличится (более чем в 5 раз). В связи с этим, оптимальным был выбран шаг в 50 м. Интервал времени для шага консолидации определялся, исходя из скорости продвижения очистного забоя. При скорости в 300 м/мес. и шаге в 50 м время шага консолидации составляет 5 суток.

На всех этапах расчета использовался корректирующий расчет Лагранжа, который в программе Plaxis называется «Updated Mesh analysis» (расчет по изменяемой сетке). При использовании данной опции сетка конечных элементов постоянно корректировалась в процессе расчета. Помимо этого использовалась дополнительная опция «Updated water level», при которой выполнялась постоянная корректировка величин порового давления в узлах сетки в процессе ее деформирования. Использование данных инструментов необходимо в условиях больших деформаций массива и с целью правильного учета гидрогеологического фактора для изучения подработки гидроотвала.

На рисунке 3.8 приведена расчетная схема, на которой изображена природно-техническая система «гидроотвал + породный массив + очистная выработка». Различными цветами обозначены материалы с различными свойствами пород. В таблицу 3.7 сведены физико-механические и фильтрационные свойства пород ПТС.

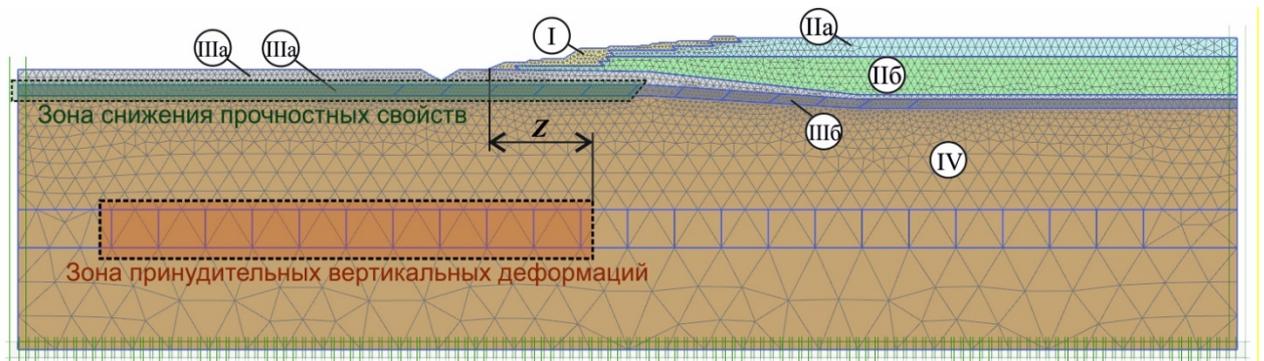


Рисунок 3.8 – Расчетная схема природно-технической системы «гидроотвал + породный массив + очистная выработка». Для направления ведения горных работ из-под гидроотвала

Для описания механического поведения техногенных пород и пород естественного основания была принята упругопластическая модель с критерием пластичности Кулона-Мора.

Учет фактора изменения физико-механических свойств в подрабатываемом естественном основании сооружения производился путем их изменения перед расчетным шагом, имитирующим подработку. Прочностные свойства при подработке изменяются в естественном основании, при чем только в

ИГЭ Шб, так как ИГЭ Ша уже является нарушенным. При подработке ИГЭ Шб приобретает такие же свойства, как и ИГЭ Ша.

Насыпные породы дамбы (ИГЭ I) состоят из обломочного материала скальных пород, преимущественно песчаника и алевролита, обладают высокой водопроницаемостью, поэтому при моделировании они описываются дренированной моделью поведения (*Drainage type: Drained*). Избыточное поровое давление в них при попадании в зону объемного сжатия генерироваться не будет.

Таблица 3.7 – Расчетные параметры физико-механических и фильтрационных свойств

№ ИГЭ	Описание пород	γ_{sat} , кН/м ³	γ_{unsat} , кН/м ³	E , МПа	ν	c , кПа	φ , ^o	k , м/сут
I	Насыпное тело дамб - обломочный материал (песчаники, алевролиты) с суглинистым заполнителем	18,5	18,0	18	0,20	15	26	1.0
II а	Намывные породы - суглинки бурые водонасыщенные с прослоями песков, супесей, - текучепластичные	19,0	18,5	5	0,35	15	16	0,01
II б		19,5	19,0	10	0,30	30	15	0,001
III а	Естественное основание дамб - суглинки пылеватые, серо-голубые, - мягкопластичные (нарушенные)	19,5	19,0	15	0,30	20	13	0,005
III б		20,0	19,5	20	0,28	40	19	0,001
IV	Коренные породы: песчаники, алевролиты, реже аргиллиты	22,0	22,0	1000	0,18	800	30	10 ⁻⁴

Примечание: γ_{sat} (γ_{unsat}) – удельный вес пород в водонасыщенном (ненасыщенном) состоянии, кН/м³; E – модуль деформации, МПа; ν – коэффициент Пуассона; c – сцепление, кПа; φ – угол внутреннего трения, град.; k – коэффициент фильтрации, м/сут.

Намывные породы гидроотвала, а также породы естественного основания (ИГЭ II и ИГЭ III), представлены преимущественно суглинком и супесью различной консистенции. Такие породы, находясь в водонасыщенном состоянии, обладают низкой проницаемостью, поэтому их поведение описывалось как недренированное (*Drainage type: Undrained A*). Расчет при этом осуществлялся в эффективных напряжениях с использованием параметров эффективной жесткости и эффективной прочности. Этот метод позволил предсказать

появление избыточного порового давления и провести расчет консолидации грунта. [156–158]

Для вычисления коэффициента запаса устойчивости рассматривались следующие положения очистного забоя. В направлении на откос: $Z = -350 \dots 300$, через каждые 50 м. В направлении из-под откоса: $Z = 300, 150, -100, -50, 0, 50, 100, 150, 200, 300$. При расположении лавы вдоль откоса: $L = -200, -100, -50, 0, 50, 100, 150, 200, 250, 350$.

В программе Plaxis использовались треугольные элементы, состоящие из 15 узлов. Для оценки влияния размера конечного элемента на результаты моделирования были проведены численные эксперименты, в которых производилось варьирование размерами конечных элементов и вычислялись коэффициенты запаса устойчивости при фактических положениях откосов.

Калибровка модели осуществлялась путем подбора ее параметров таким образом, чтобы оседания земной поверхности при моделировании совпадали с фактической мульдой сдвижения. Параметры фактической мульды были получены по результатам натурных наблюдений (см. раздел 3.1.2.). На рисунке 3.10 представлена полученная по результатам калибровки мульда сдвижения (зеленая). Следует отметить ее хорошую сходимость с фактической.

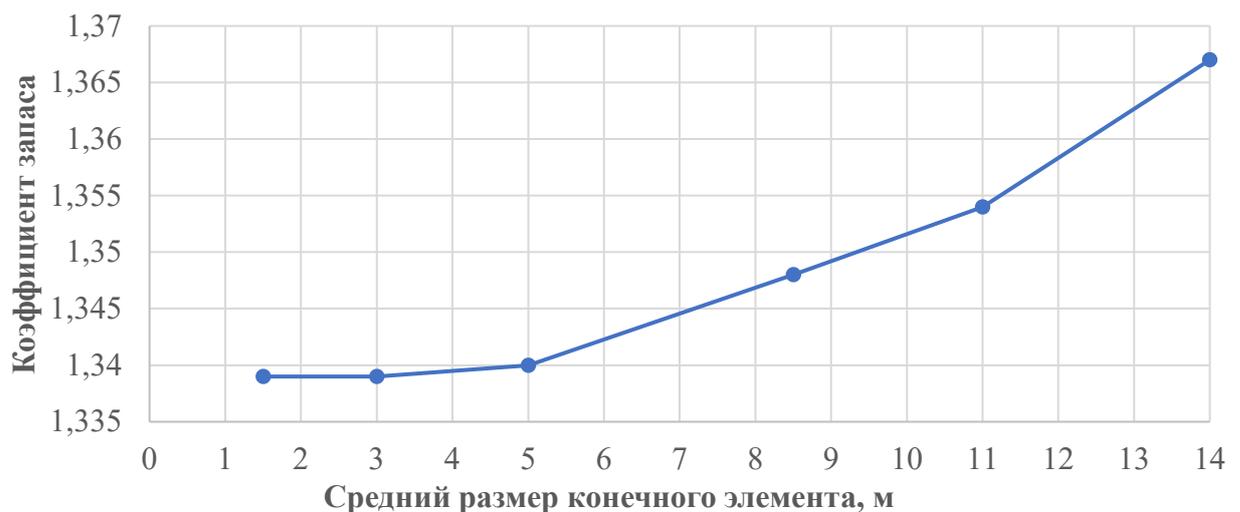


Рисунок 3.9 – Влияние размера сетки на величину коэффициента запаса устойчивости для фактического положения откоса гидроотвала

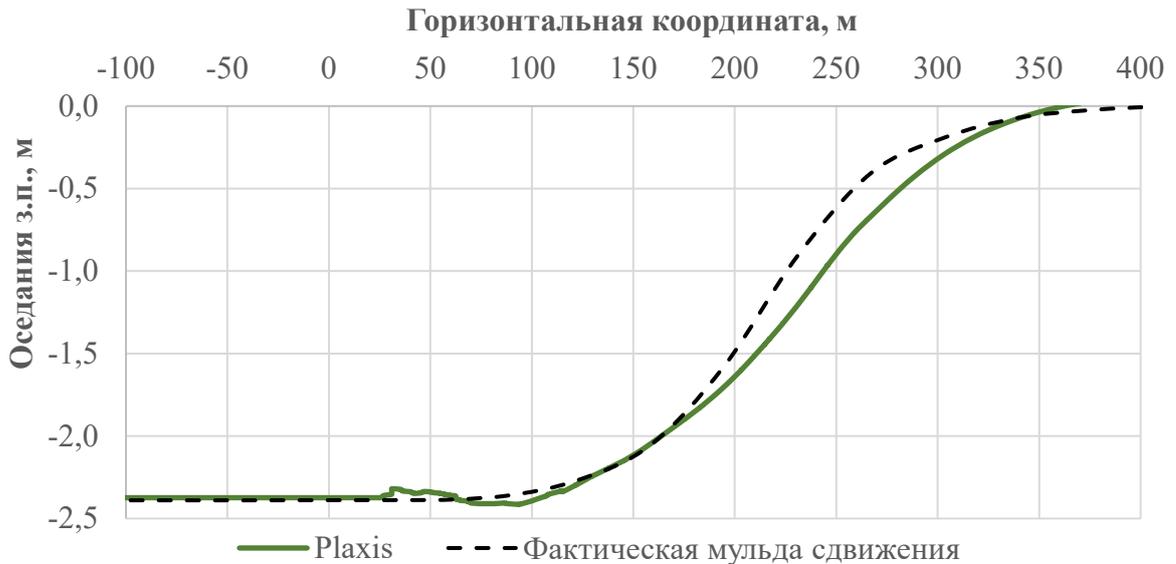


Рисунок 3.10 – Результаты калибровки модели по оседаниям земной поверхности. $Z = 250$ м

3.4.2. Результаты моделирования

На рисунке 3.11 приведено распределение вертикальных смещений в модели в момент подработки $Z = 250$ м. По результатам моделирования можно отметить, что деформации сооружения не согласуются с деформациями его основания, как предполагалось ранее. В техногенных породах они будут распределяться под некоторым граничным углом, так же, как и в четвертичных отложениях. При этом мульда сдвижения распространится дальше внутрь сооружения, тем самым увеличив область влияния. Данное обстоятельство необходимо учитывать при прогнозировании изменения геометрических характеристик сооружения при его подработке. Особенно важным данный фактор является при оценке устойчивости подрабатываемых откосов при попадании их в краевые части мульды.

На рисунке 3.12 приведены результаты моделирования избыточного порового давления. Для наглядности представлен диапазон значений от 5 до 36 кПа. Возникает оно в недренированных породах за счет формирования в них сжимающих напряжений. Причем зона сжатия продвигается вперед вместе с очистным забоем, тем самым перемещая волну порового давления. Впоследствии, оно рассеивается в процессе фильтрационной консолидации. Однако в процессе подработки оно оказывает свое влияние на условия устойчивости

откоса. Время рассеивания зависит от многих факторов, в том числе, коэффициентов фильтрации пород и достигнутых значений избыточного порового давления.

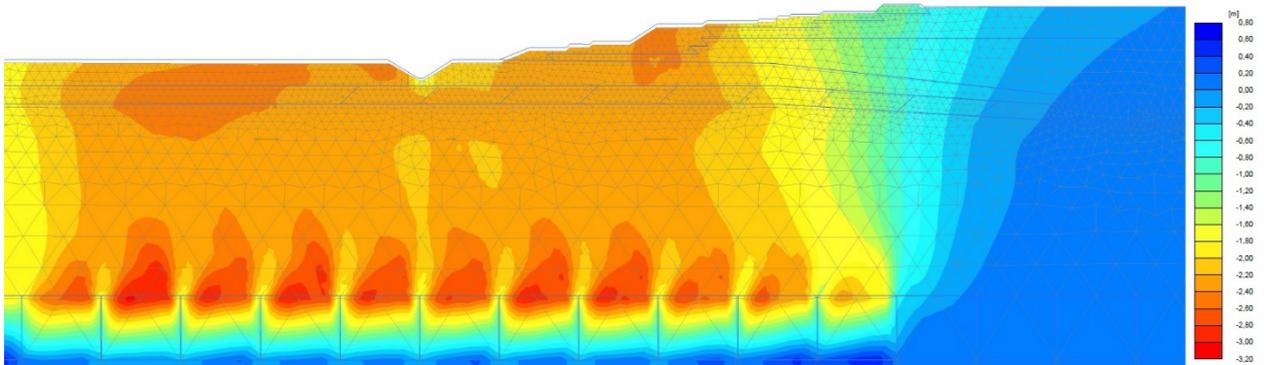


Рисунок 3.11 – Распределение вертикальных смещений. $Z = 250$ м

На рисунке 3.12 приведено распределение избыточного порового давления в момент подработки $Z = 250$ м. При этом полученное максимальное значение составляет 33 кПа, что соответствует 3,3 м. вод. ст.

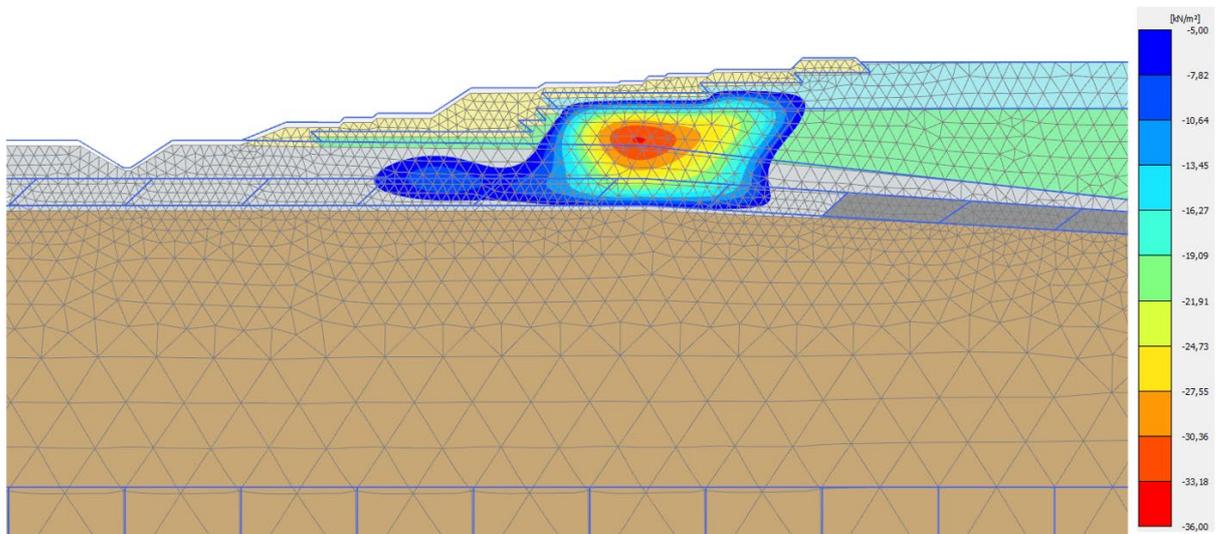


Рисунок 3.12 – Распределение избыточного порового давления. $Z = 250$ м

После выполнения моделирования различных условий подработки оценим ее влияние на устойчивость откоса. Для этого рассмотрим изменение коэффициента запаса устойчивости в зависимости от положения очистного забоя. С целью оценки степени влияния порового давления на устойчивость, КЗУ необходимо рассчитать также и без учета порового давления. Для этого нужно задать дренированное поведение для всех типов грунтов и повторить

расчет. В этом случае избыточное поровое давление в модели возникать не будет. На рисунке 3.13 приведены графики изменения коэффициента запаса, рассчитанные в Plaxis с учетом и без учета порового давления. Также для сравнения приведены результаты, полученные в программе Slide из раздела 3.3.2.

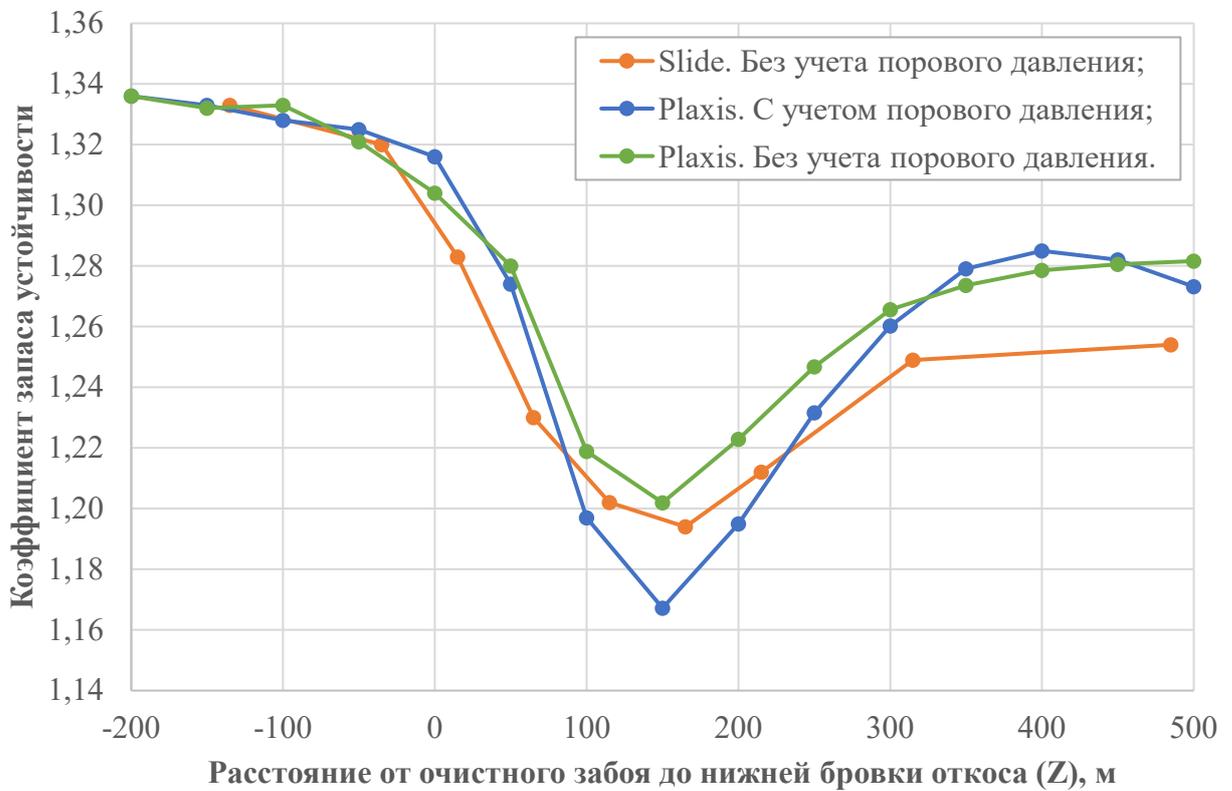


Рисунок 3.13 – График изменения КЗУ в зависимости от расстояния между очистным забоем и нижней бровкой откоса. Отрицательные значения по оси Z соответствуют приближению очистного забоя к дамбе гидроотвала, положительные – удалению от нее

Начальное значение коэффициента запаса устойчивости получилось 1,34, что близко к значению, рассчитанному методом предельного равновесия в Slide (1,333). В процессе подработки КЗУ вначале убывает до своего минимального значения, а затем возрастает, после чего остается неизменным. Из графиков видно, что оба метода дают примерно одинаковый результат и полученные закономерности имеют одинаковый вид. Наихудшие условия устойчивости достигаются при $Z = 150$ м. При таком положении оседания в нижней части откоса реализуются на величину полных сдвижений, в то время как в верхней части деформации откоса еще близки к нулю. При этом КЗУ составляет 1,167 с учетом влияния избыточного порового давления и 1,2 без учета

его влияния. При дальнейшей проработке эта разница сокращается, так как зона сжатия продвигается дальше за пределы призмы возможного обрушения, а сформировавшееся в откосе поровое давление постепенно рассеивается и перестает оказывать влияние на устойчивость.

Таким образом, поровое давление оказывает дополнительное негативное влияние на устойчивость откоса. Длительность данного воздействия определяется проницаемостью грунтов: чем она ниже, тем дольше будет рассеиваться поровое давление и тем самым дольше оказывать влияние на устойчивость. Степень его воздействия зависит от достигнутых значений порового давления, которые в свою очередь зависят от величин объемных деформаций при формировании мульды сдвижения.

Аналогичным образом рассмотрим результаты расчетов КЗУ при проработке сооружения в направлении из-под откоса (рисунок 3.14).

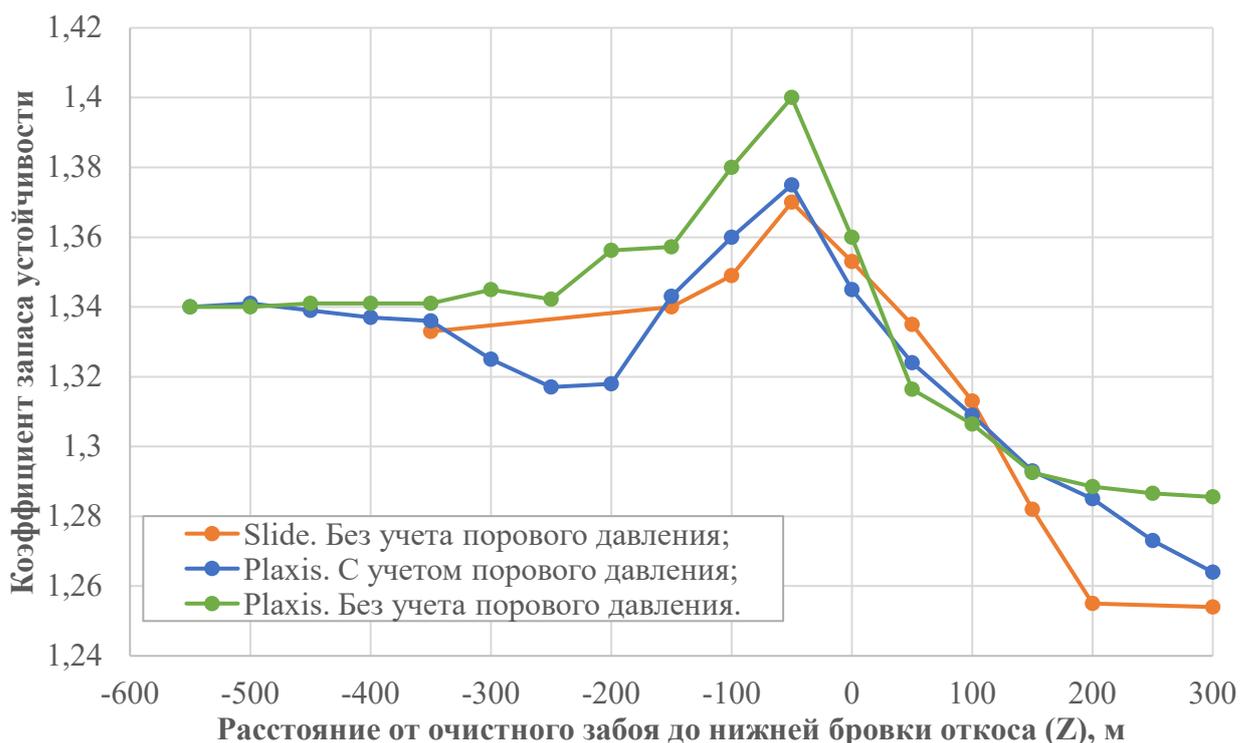


Рисунок 3.14 – График изменения КЗУ в зависимости от расстояния между очистным забоем и нижней бровкой откоса. Отрицательные значения по оси Z соответствуют приближению очистного забоя к дамбе гидроотвала, положительные – удалению от нее

В данном случае оба способа также дают приблизительно одинаковый результат. Общая тенденция в графиках сохраняется. Из сравнения графиков

видно, что в этом случае избыточное поровое давление проявляется практически сразу и степень его влияния выше относительно ситуации развития горных работ в направлении на откос.

Необходимо подчеркнуть, что при моделировании подработки в плоской постановки избыточное поровое давление возникает только за счет объемных деформаций в мульде сдвижения по простиранию, деформации массива, развивающиеся вкрест простирания, не учитываются. Поэтому для повышения достоверности прогноза НДС системы в рамках дальнейших исследований рекомендуется выполнить моделирование подработки откосов гидроотвала в объемной постановке.

В целом следует заметить, что предпочтительным с точки зрения устойчивости является направление ведения горных работ из-под откоса. В таком случае в мульду сдвижения вначале попадает призма активного давления, а затем уже призма упора, тем самым минимизируется негативное влияние подработки.

3.5 Выводы по третьей главе

1. Выполнено изучение влияния процесса сдвижения на состояние пород намывного массива и естественного основания применительно к условиям гидроотвала на реке Еловка разреза "Моховский". Гидроотвал характеризуется общей площадью около 900 га, представляет собой накопитель «жидких» промышленных отходов овражно-равнинного типа с трехсторонним обвалованием, по способу наполнения - намывной. Назначение – складирование вскрышных пород, разрабатываемых гидромеханизационным способом, осветление технологической воды. Дамбы гидроотвала имеют максимальную высоту более 50 м при общей длине (протяженность по гребню) напорного фронта 6300 м.

Откосные части сооружения имеют неоднородное строение: в призме возможного оползания выделено три основных инженерно-геологических элемента (ИГЭ): I – насыпные пород дамб; II – намывные отложения; III – породы

естественного основания. Дамбы обвалования сложены породами, состоящими из обломков песчаников и алевролитов с суглинистым заполнителем. Намывные породы представлены обводненными бурыми суглинками различной консистенции с прослоями песков и супесей. Естественное основание гидроотвала представлено аллювиальными серо-голубыми пылеватыми суглинками и глинами.

2. К юго-западу от гидроотвала работает шахта Байкаимская, горными выработками которой в 2014 и 2015 годах осуществлялась подработка водоотводного канала и первичной дамбы гидроотвала лава. При этом проводился мониторинг устойчивости и маркшейдерские наблюдения за деформациями земной поверхности в районе канала и нижней части откоса сооружения. Лава №14 отрабатывала угольный пласт мощностью 5,0 м на глубинах от 220 до 310 м при длине вкрест простирания 220 м, а по простиранию – 910 м. Угол падения пласта составляет 5-7°. Лава №5 имела длину - вкрест простирания 220 м, по простиранию – 2550 м, глубина отработки по длине выемочного столба изменяется от 325 до 360 м. Падение пласта по длине выемочного столба в направлении подвигания забоя составляет 2-3°. Выполненные маркшейдерские наблюдения за оседаниями поверхности при отработке лавы №14 позволили определить их максимальную величину $\eta_{\max} = 2,39$ м.

3. Выявлены факторы, влияющие на устойчивость гидроотвала при его подработке, а именно: изменение геометрических параметров сооружения; изменение гидрогеологического режима; снижение прочностных свойств пород в основании сооружения; формирование избыточного порового давления в намывных породах и породах естественного основания.

4. Предложена методика оценки устойчивости откосов гидроотвалов в зонах ведения подземных горных работ, основанная на использовании метода предельного равновесия, позволяющего учесть при расчетах устойчивости, рассмотренные выше факторы. Выполненные численные эксперименты позволили получить закономерности изменения коэффициента запаса устойчивости откоса в процессе его подработки. Установлено, что в большей степени на

устойчивость откоса влияние оказывает изменение геометрических параметров сооружения, при чем как в худшую, так и в лучшую сторону. Остальные факторы оказывают негативное влияние, примерно в равной степени.

5. Выполнены расчеты устойчивости откоса гидроотвала в зависимости от направления проходки очистных выработок относительно его размещения в пространстве. Наихудшие условия устойчивости при развитии горных работ под гидроотвалом достигаются в случаях непосредственной подработки призмы упора (нижняя часть откоса) сооружения. Подработка призмы активного давления (верхняя часть откоса) напротив может увеличить коэффициент запаса устойчивости. При расположении очистных выработок вкrest простиранию откоса предпочтительным с точки зрения устойчивости является направление ведения горных из-под откоса. В таком случае в мульду сдвижения вначале попадает призма активного давления, а затем уже призма упора, тем самым минимизируется негативное влияние подработки. При параллельной ориентации очистных выработок относительно откоса их следует располагать по принципу минимального воздействия на призму упора.

6. Численное моделирование позволяет оценить напряженно-деформированного состояния пород ПТС «очистная выработка -подработанный массив - гидроотвал» при ведении подземных горных работ, а также выполнить прогноз формирования избыточного порового давления в водонасыщенных породах и с его учетом произвести оценку устойчивости откосов гидроотвала. Основным недостатком такого способа является значительная требуемая вычислительная мощность, что затрудняет его использование для проведения массовых расчетов.

7. На основе выполненных численных экспериментов установлен факт возникновения избыточного порового давления в водонасыщенных породах основания и намывном массиве при их попадании в область объемных деформаций в мульде сдвижения. Выполнены расчеты консолидации по его рассеиванию с учетом скорости продвижения очистного забоя. Произведена оценка степени влияния данного фактора на условия устойчивости сооружения.

ГЛАВА 4 СИСТЕМА ГЕОМЕХАНИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ ГИДРООТВАЛОВ НА ПОДРАБАТЫВАЕМЫХ ТЕРРИТОРИЯХ

4.1 Общие положения

Научно-методические основы системы обеспечения безопасности гидроотвалов были сформулированы в работах [54, 55, 64, 101, 114, 116] применительно к различным задачам, актуальным на этапах строительства гидротехнических сооружений, эксплуатации накопителей, рекультивации сооружений, частичном удалении намывных массивов, использовании территорий гидроотвалов под отвалы «сухой» вскрыши. При этом под термином **«система обеспечения безопасности гидротехнических сооружений»** понимается комплекс работ и исследований по изучению, обоснованию, управлению и контролю состояния гидротехнических сооружений, выполняемых с целью обеспечения безопасности и экономической эффективности горных работ и предотвращения их негативного воздействия на окружающую среду.

В настоящей работе разработана **система геомеханического обеспечения устойчивости гидроотвалов** - как частный случай системы обеспечения безопасности гидротехнических сооружений на период ведения подземных горных работ под гидроотвалами, находящимися на различных стадиях существования – эксплуатации, консервации, рекультивации и др.

Система геомеханического обеспечения устойчивости (СГОУ) включает в себя следующие виды работ и исследований:

- изучение и оценку инженерно-геологических и гидрогеологических условий природно-технической системы «очистная выработка-породный массив-гидроотвал»;

- расчетное обоснование устойчивости ограждающих конструкций гидроотвала (плотин и дамб) с учетом ожидаемых деформаций при различных технологических параметрах ведения горных работ под гидроотвалом;

- обоснование специальных мероприятий по обеспечению устойчивости гидроотвала в период ведения подземных горных работ, повышению уровня безопасности входящих в его состав гидротехнических сооружений.

- мониторинг состояния конструктивных элементов гидроотвала на всех этапах его подработки;

На рисунке 4.1 представлена принципиальная схема организации системы геомеханического обеспечения устойчивости подрабатываемых гидроотвалов, которая отражает полный комплекс работ и исследований в рамках выделенных четырех направлений (изучение природно-технической системы - расчетное обоснование оптимальных параметров - мониторинг состояния - управление устойчивостью), функциональные взаимосвязи компонентов системы и последовательность их реализации.

Фундаментом СГОУ является научно-исследовательское направление, обеспечивающее исходную информационную базу для решения последующих геомеханических и технологических задач, которое получило обобщающее название «изучение условий природно-технической системы». Это направление включает в себя сбор и анализ материалов инженерных изысканий на стадиях разведки и доразведки месторождений, проектирования гидроотвалов, а также любых выполнявшихся в ходе эксплуатации гидроотвалов дополнительных инженерно-геологических исследований. В результате работ должна быть получена информация о геологическом строении, инженерно-геологических условиях и гидрогеологическом режиме углевмещающего породного массива, неоген-четвертичной толщи и техногенного массива гидроотвала на участке ведения подземных горных работ. К числу необходимых сведений также относятся характеристика сейсмичности территории и климатических условий местности.

Исходная информация используется для разработки частных инженерно-геологических и гидрогеологических моделей ПТС, а также обобщённой геомеханической модели. Исходная информационная база должна быть достаточной для выполнения геометризации расчетных областей,

пространственного позиционирования в них подземных горных выработок и конструкций гидроотвала, определения границ породных слоев с различным деформационным поведением, выбора расчетных физико-механических характеристик, выделения элементов гидрогеологической структуры и определения свойственных этим элементам параметров гидродинамического режима.



Рисунок 4.1 – Система геомеханического обеспечения устойчивости гидроотвалов на подрабатываемых территориях

Ключевым звеном СГОУ является расчетное обоснование параметров системы «очистная выработка - породный массив - гидроотвал», которое выполняется на базе разработанной геомеханической схемы ПТС. Расчетное

обоснование включает в себя прогноз параметров процесса сдвижения, прогноз изменения НДС гидроотвала на различных этапах его подработки и оценку устойчивости откосов ограждающих дамб (плотин) с учетом влияния подземных горных работ. Конечной целью геомеханических расчетов является обоснование оптимальных технологических параметров ПТС, обеспечивающих экономически эффективную отработку запасов угля при соблюдении устойчивости ограждающих сооружений гидроотвала и других требований, регламентированных нормативными документами в области безопасности гидротехнических сооружений [83].

На базе геомеханических расчетов оценивается влияние технологических параметров ведения горных работ (раскройка шахтного поля, направление движения очистных выработок, мощности вынимаемых пластов, порядок отработки пластов по глубине и др.) на состояние устойчивости гидроотвала. Рассмотрение нескольких технологических вариантов позволяет выбрать из них наиболее оптимальный – с наименьшим отрицательным воздействием на состояние гидротехнических сооружений. При неизбежном развитии опасных деформаций при реализации любого технологического варианта требуется разработка предупредительных мероприятий по улучшению состояния устойчивости ограждающих дамб, которые должны быть организованы до начала ведения горных работ под гидроотвалом.

Проработка на геомеханической модели различных вариантов ведения подземных горных работ под гидроотвалом в сочетании с предупредительными мерами по изменению условий устойчивости ограждающих дамб служит механизмом управления состоянием ПТС «очистная выработка -породный массив - гидроотвал».

Мониторинг безопасности при подработке гидроотвалов организуется с целью контролирования устойчивости ограждающих гидротехнических сооружений (дамб и плотин), недопущения аварийных ситуаций, способных привести к изливу пульпы за пределы чаши гидроотвала, разрушению коммуникаций и механизированного оборудования, нанесению вреда здоровью

эксплуатационного персонала. Мониторинг безопасности предполагает ведение наблюдений за основными показателями состояния ограждающих сооружений с применением визуального осмотра, инструментальных маркшейдерских и гидрогеологических измерений, а в случае необходимости – с применением инженерно-геологического бурения.

4.2 Изучение и оценка условий природно-технической системы

Данное научно-исследовательское направление в рамках общей системы геомеханического обеспечения устойчивости гидроотвала при подработке включает систематизацию всей имеющейся горно-геологической, гидрогеологической и инженерно-геологической документации по участку подземных горных работ и гидроотвалу с целью создания инженерно-геологической и гидрогеологической вербальных моделей, а также обоснования расчетной гидрогеомеханической модели объекта и расчетных показателей физико-механических характеристик пород выделенных ИГЭ. В особых случаях, при отсутствии вышеперечисленной информации о строении и функционировании изучаемой ПТС, следует предварительно провести дополнительные исследования на предмет восполнения недостающих сведений, либо, по возможности, организовать опытно-промышленный эксперимент, моделирующий развитие определенного геодинамического процесса, играющего определяющую роль при разработке рекомендаций по подработке гидроотвала.

Горно-графическая документация. Для корректного прогноза смещений и деформаций гидроотвала при подработке гидроотвала в первую очередь необходимо выполнить позиционирование подземных горных выработок и гидротехнического сооружения в пространстве. Для этого отстраивается совмещенный план горных работ и гидроотвала в единой системе координат, анализ которого позволяет выявить наиболее опасные сечения откосов гидроотвала по следующим признакам:

- с наибольшей высотой сооружения;
- с наибольшим генеральным углом откоса;

- с наибольшим углом наклона основания;
- расположенные в тальвеге лога;
- расположенные в главном сечении мульды (при расположении очистной выработки вкрест простиранию откоса или под небольшим углом);
- в которых призма упора попадает в точку с максимальным оседанием (при расположении очистной выработки параллельно простиранию откоса или под углом к нему).

Для выделенных наиболее опасных сечений гидроотвала необходимо выполнить исполнительную маркшейдерскую съемку поверхности и откосов сооружений (в случае отсутствия таковой) и построить расчетные профили по состоянию на начало ведения подземных горных работ на участке расположения гидроотвала.

При анализе горно-графической документации необходимо также оценить возможность образования провалов в местах расположения оградительных конструкций, как по геологическому признаку (мощности, глубине залегания и углу падения отрабатываемых пластов), так и по склонности четвертичных пород к образованию провалов и трещин разрыва [30].

Материалы инженерно-геологических изысканий являются информационной базой для построения инженерно-геологических моделей ПТС и отдельно гидроотвала по намеченным для расчетов опасным сечениям. Как правило, имеющаяся на предприятиях документация, полученная на этапе разведки и доразведки месторождения угля, содержит геологическое описание месторождения в объеме, достаточном для построения инженерно-геологических разрезов углевмещающего породного массива и построения геомеханических схем по прогнозу процессов сдвижения и деформаций ложа гидроотвала в пределах мульды сдвижения. Необходимые для этого характеристики физико-механических свойств углевмещающих пород либо получены непосредственно в ходе разведки месторождения, либо могут быть приняты по обобщающей справочной литературе для конкретного угольного месторождения и литологических типов углевмещающих пород [107].

Оценка инженерно-геологических условий техногенного массива и естественного основания гидроотвала на участке подработки требует проведения дополнительных исследований. Ранее выполненные изыскания на гидроотвалах (если таковые были) могут не отражать фактического состояния объекта, что связано с существенными изменениями как намывных грунтов с течением времени, так и неоген-четвертичных отложений под влиянием эксплуатации гидротехнических сооружений. Поэтому на этапе обоснования подработки гидроотвала следует выполнить дополнительные исследования пород гидроотвала и его основания. Данный вопрос рассмотрен ниже, а в первой главе диссертации рассмотрены результаты исследований состава, состояния и свойств на некоторых гидроотвалах АО «УК «Кузбассразрезуголь».

Дополнительные инженерно-геологические исследования ориентированы на уточнение строения и опробование грунтов техногенного массива и естественного основания сооружения в выделенных наиболее опасных сечениях. Работы должны включать бурение нескольких скважин в пределах призмы возможного оползания откоса гидроотвала на полную мощность техногенных и неоген-четвертичных пород основания, геологическое описание разреза, отбор монолитов, лабораторные испытания на предмет определения расчетных характеристик физико-механических свойств пород. Дополнительные инженерно-геологические исследования производятся по общепринятым в практике изысканий правилам СП 11-105-97 [103], оценка физико-механических свойств грунтов выполняется по методикам ГОСТ 5180-2015 [20], ГОСТ 12248-2010 [19] при соблюдении основного требования – схема механических испытаний должна отражать «работу» грунтов в массиве.

К числу специальных видов лабораторных исследований неоген-четвертичных грунтов следует отнести проведение сдвиговых испытаний с целью определения величин остаточного и структурного сцепления. Методика исследований в данном случае включает проведение сдвиговых испытаний по двум схемам: быстрый сдвиг с определением общего сцепления (максимального) и повторный сдвиг («плашка по плашке») с определением остаточного

сцепления. Разница между двумя полученными величинами составляет структурное сцепление. При назначении расчетных характеристик сопротивления сдвигу неоген-четвертичных грунтов следует учитывать, что в процессе подработки в зонах сжатия и растяжения будет происходить частичная или потеря структурной прочности пород, т.е. снижение сцепления на величину структурной составляющей. Подробно данный эффект описан в разделе 3.2.3.

По результатам геологической разведки участок размещения гидроотвала должен быть охарактеризован **гидрогеологическими условиями**, которые включают типы и условия залегания водоносных горизонтов, а также их характеристику: количество, гидродинамический режим, мощность, распространение в пространстве (по площади и в разрезе), гидравлическая связь друг с другом и с поверхностными водотоками и водоемами, режим питания, гидродинамические показатели: водопроницаемость, водоотдача, влагоемкость, водоприток.

Для определения взаимосвязи водоносных горизонтов с поверхностными водоемами необходимо определить их пространственное расположение относительно друг друга и установить гидравлическую взаимосвязь. С этой целью в гидроотвале бурится система гидронаблюдательных скважин, оборудованных пьезометрами либо датчиками порового давления. Их количество, глубины и места расположения определяются в проекте инженерно-геологических изысканий. Однако места расположения следует выбирать таким образом, чтобы в последствии использовать данные скважины для проведения гидрогеологического мониторинга на этапе подработки и дальнейшей эксплуатации сооружения.

По полученным данным гидрогеологических исследований на расчетные профили наносятся уровни грунтовых вод в сооружении. В случае нелинейного распределения напоров по глубине, например, при наличии избыточного порового давления в основании сооружения, необходимо построить различные пьезометрические поверхности для отдельных инженерно-геологических элементов.

Сведения о климатических и сейсмических условиях региона. При проработке календарного плана ведения подземных горных работ необходимо принимать во внимание сезонные явления, характерные для рассматриваемого региона, такие, например, как паводки. Наиболее неблагоприятной является ситуация, при которой фаза активных сдвижений приходится на осенний паводковый период и, особенно, на период весеннего снеготаяния. Увеличение количества атмосферных осадков в эти периоды сопровождаются неизбежным подъемом уровня воды в чаше гидроотвала, а также уровней грунтовых и подземных вод в основании сооружения, что ухудшает состояние устойчивости ограждающих дамб. Сейсмичность региона необходимо учитывать при обосновании устойчивости ограждающих дамб гидроотвала на особое сочетание нагрузок, т.е. максимальную балльность возможного сейсмического события. Сведения о климатических и сейсмических условиях в достаточном объеме содержатся в декларациях безопасности гидротехнических сооружений гидроотвалов, и при необходимости могут быть получены из СП 131.13330.2012 «Строительная климатология» [104], СП 14.13330.2014 «Строительство в сейсмических районах» [105].

Специальные опытно-промышленные эксперименты. Для повышения достоверности прогноза сдвижений и деформаций земной поверхности рекомендуется предварительно изучить фактические параметры процесса сдвижения опытным путем. Для этого необходимо выбрать очистную выработку, расположенную максимально близко к планируемому участку подработки гидроотвала и заложить над ней маркшейдерскую станцию в главных сечениях мульды. По результатам наблюдений необходимо установить: фактические угловые параметры процесса сдвижения, величины оседаний и горизонтальных сдвижений и деформаций земной поверхности. Затем по полученным данным следует откалибровать используемую методику прогноза под установленный фактический характер сдвижения.

4.3 Расчетное обоснование

Методологический подход к решению геомеханической задачи по определению устойчивости гидроотвала в условиях влияния подземных горных работ состоит из последовательного решения частных задач:

- прогноз сдвижения породного массива и деформаций земной поверхности на участке ведения подземных горных работ под гидроотвалом;
- оценка устойчивости откосов гидроотвала (дамб, плотин) с учетом изменившегося напряженно-деформированного состояния (НДС) пород гидроотвала при достигнутых деформациях в пределах мульды сдвижения.

Для решения первой задачи применимы различные методы, в том числе инженерные методы прогноза деформаций земной поверхности в пределах мульды сдвижения, рекомендованные «Правилами охраны ...» [84], которые позволяют учитывать специфику горно-геологических условий месторождения, глубину, способ и технологию отработки полезного ископаемого. Наиболее часто используемым (стандартным) является метод типовых кривых. Прогноз деформаций расположенного на земной поверхности гидроотвала в данном случае выполняется с допущением, что деформации техногенного массива и глинистой толщи в его основании согласованы и все сооружение «сидится жестким клином». Однако для получения достоверных результатов о параметрах мульды сдвижения данный метод целесообразно сочетать с натурными наблюдениями за деформациями массива и земной поверхности, которые выполняются в рамках специального опытно-промышленного эксперимента (см. главу 2). Используя уточненные натурными методами угловые параметры (граничные углы δ_0 ; β_0 ; γ_0 ; φ_0 и угол максимального оседания θ) стандартная прогнозная методика подлежит калибровке под фактический механизм сдвижения, характерный для данного месторождения. При этом для более корректного прогноза величины максимального оседания в пределах мульды сдвижения вводится поправочный коэффициент $K_{осед}$ в формулу расчета величины η_{max} .

Альтернативой инженерным методам (эмпирическим, полуэмпирическим) выступают численные методы, с помощью которых возможно смоделировать деформационный процесс сооружения близкий к реальному. Методика прогноза сдвижения горных пород над очистной выработкой, разработанная в рамках диссертационной работы, базируется на численном моделировании МКЭ с использованием вычислительных средств программного комплекса Simulia Abaqus.

Подробное описание построения расчетной модели и методика численного моделирования приведены в разделе 2.3.2.

Решение задачи по оценке устойчивости откосов гидроотвала при подработке осуществляется в следующей последовательности.

Первый этап работ заключается в разработке гидрогеомеханической расчетной модели, позволяющей производить оценку устойчивости сооружения с учетом изменившегося НДС пород гидроотвала при достигнутых деформациях в пределах мульды сдвижения. В общем случае требуется разработка комплекса частных расчетных моделей откосов гидроотвала, соответствующих наиболее опасным сечениям, отбираемым по признакам, рассмотренным выше в параграфе 4.2. Гидрогеомеханическая модель – это геометризованное отображение инженерно-геологического строения откоса сооружения в расчетном профиле, охарактеризованное количественно параметрами физико-механических, фильтрационных свойств и расчетной геомеханической моделью поведения среды по каждой структурной единице модели и реализованное в компьютерном виде средствами программных комплексов по расчету устойчивости откосных сооружений. Методика учета гидрогеологических факторов в расчётной модели, в том числе возможность формирования избыточного порового давления, зависит от выбранного метода расчета устойчивости и программного продукта.

Оценку устойчивости можно проводить любым доступным методом механики сплошной среды. Для расчетов следует использовать методы, позволяющие учесть: - неоднородное строение откосов (несколько грунтовых

элементов произвольной геометрической формы с различным деформационным поведением, физико-механическими и фильтрационными свойствами); - наличие одного или нескольких водоносных горизонтов с напорным или безнапорным режимом фильтрации, - формирование в водонасыщенных слабопроницаемых грунтовых элементах избыточного порового давления; - зависимость параметров физико-механических свойств пород от напряжений; - сейсмичность региона. Предпочтительными являются методы предельного равновесия Е. Спенсера [166], С. К. Сарма [126] или Morgenштерна-Прайса [151], а также метод конечных элементов.

На втором этапе проводится проверка устойчивости ограждающих дамб сооружения до начала подработки на предмет соответствия требованиям, регламентированными нормативными документами. Подработка гидроотвала допустима, если на начало ведения подземных горных работ значение коэффициента запаса (КЗУ) превышает нормативную величину. В противном случае требуется разработка предупредительных мероприятий по улучшению состояния устойчивости откосов гидроотвала (дамб, плотин) на подрабатываемых участках. Нормативная величина КЗУ (k_n) определяется в зависимости от технологической стадии существования гидроотвала.

При эксплуатации, реконструкции, консервации и ликвидации гидроотвалов нормативное значение k_n принимается по нормам проектирования гидротехнических сооружений, изложенным СП 58.13330.2012 «Гидротехнические сооружения. Основные положения» [106]. При этом k_n зависит от ряда факторов - класса ГТС, вида действующих нагрузок, точности расчетных методов и др. Например, для рассмотренных в настоящей работе гидроотвалов, относящихся к I классу, нормативные значения коэффициента устойчивости, рассчитанные по методике СП 58.13330.2012 составляют:

При использовании приближенных расчетных методов (предельного равновесия):

$k_n = 1,32$ – для основного сочетания нагрузок (на период эксплуатации в проектном режиме, долговременной консервации, ликвидации);

$k_n = 1,25$ - для особого сочетания нагрузок (на длительный период дополнительных воздействий при подработке подземными выработками);

$k_n = 1,19$ – для особого сочетания нагрузок (на кратковременные периоды дополнительных воздействий при ведении строительных работ, при сейсмических воздействиях, паводковый период).

При использовании точных расчетных методов (численного моделирования): соответствующие значения будут равны: $k_n = 1,25$; $k_n = 1,19$; $k_n = 1,125$.

Выведенные из эксплуатации гидроотвалы, находящиеся на стадии рекультивации или использования в качестве оснований «сухих» отвалов, рассматриваются как горнотехнические объекты - отвалы открытых горных работ, нормы устойчивости которых определены «Правилами обеспечения устойчивости откосов на угольных разрезах» (далее «Правила») [87].

Согласно «Правил...», нормативная величина коэффициента запаса устойчивости отвалов (k_n) выбирается по таблице в зависимости от типа отвалов (внутренние или внешние), литологического состава отсыпаемых отвальных пород, строения и свойств пород основания. Для гидроотвалов, сложенных обводненными пылевато-глинистыми отложениями, залегающими на слоистом основании, рекомендуемое значение k_n должно составлять 1,20–1,30. Меньшее значение (1,20) допустимо при использовании в расчетах показателей физико-механических свойств пород отвалов и их оснований, определенных методом обратных расчетов или натурными испытаниями.

На третьем этапе производится оценка устойчивости сооружения в процессе его подработки и на конечный ее этап, после завершения периода полных сдвижений. Оценку устойчивости следует проводить с учетом влияния следующих факторов: изменение геометрических параметров сооружения; изменение гидрогеологического режима; снижение прочности основания; формирование избыточного порового давления. Подробное описание каждого из факторов в отдельности, а также анализ степени их влияния на устойчивость сооружения приведены в третьей главе.

В работе предложены две методики проведения расчетов устойчивости с учетом влияния выделенных факторов, подробное описание которых приводится в 3 главе. В первом случае (параграф 3.3) расчеты осуществляются с использованием метода предельного равновесия. Техника расчетов состоит в перестроении вручную геометрии расчетного профиля и уровней грунтовых вод для каждого из положений очистного забоя с последующим вычислением коэффициента запаса. Недостатками этой методики являются большой объем подготовительной работы и невозможность напрямую выполнить прогноз избыточного порового давления в водонасыщенных слоях.

Вторая методика (параграф 3.4) основана на методе конечных элементов и использовании программного комплекса Plaxis2D. Методика дает возможность смоделировать процесс подработки гидроотвала в «квазидинамической» постановке, т.е. оценить изменение НДС пород гидроотвала на различных этапах проходки подземной выработки с последующим расчетом коэффициента запаса устойчивости. Это осуществляется решением набора статических задач нагружения с учетом, что начальное НДС системы заимствуется из предыдущего шага. Данная методика позволяет более точно смоделировать деформационный механизм гидроотвала и выполнить прогноз изменения порового давления в теле гидроотвала и его естественном основании.

По результатам расчетов определяются значения коэффициентов запаса устойчивости как на начало и окончание подработки гидроотвала, так и на промежуточные этапы, что позволяет установить наиболее неблагоприятные условия в ходе ведения подземных горных работ. Путем сравнения полученных значений коэффициентов запаса устойчивости с нормативным показателем, делается вывод о допустимости подработки гидроотвала или необходимости проведения дополнительных мероприятий. Разработанные проектные решения по улучшению состояния устойчивости откосов гидроотвала аналогичным образом должны быть проверены на соблюдение норм промышленной безопасности с применением расчетного обоснования.

4.4 Влияние технологии подземных горных работ на устойчивость подрабатываемых гидроотвалов

Одним из основных факторов, определяющих устойчивость гидроотвалов на подрабатываемых территориях, является процесс сдвижения горных пород в сторону выработанного пространства, формирующегося в массиве при выемке из недр полезного ископаемого (в нашем случае, пластов угля). При сдвижении горные породы, попадая в зону влияния выработки, испытывают различные виды деформаций: сжатия, растяжения, изгиб, сдвиг. На поверхности земли, как результат их развития, формируется мульда сдвижения – участок с деформационно измененной земной поверхностью. Величины этих изменений зависят от **глубины горных работ, вынимаемой мощности и угла падения пласта**, а также **площади отработки**. При попадании гидроотвала в мульду сдвижения происходит изменение в пространстве геометрии откоса, НДС и свойств пород. Кроме того, как уже отмечалось выше, устойчивость откосов гидроотвалов зависит от **направления и скорости проходки очистных горных выработок относительно подпорных конструкций гидротехнических объектов**. Таким образом, технологические параметры горных выработок, направление их проходки и горно-геологические условия существенно сказываются на устойчивости гидроотвалов на подрабатываемых территориях.

Снижение негативного влияния подземных горных работ на подрабатываемые гидроотвалы может быть достигнуто за счет **уменьшения вынимаемой мощности пласта**, так как величины оседаний и деформаций земной поверхности и расположенных на ней грунтовых сооружений напрямую зависят от вынимаемой мощности пласта. Ее уменьшение очевидным образом снизит негативное влияние очистных работ, однако такое решение с экономической точки зрения не всегда оправданно и ведет к потере части запасов угля.

Другим технологическим параметром проходки, влияющим на параметры сдвижения горных пород и устойчивость подрабатываемых гидроотвалов, является **снижение скорости отработки**. В этом случае деформации

земной поверхности и гидроотвала будут развиваться медленнее, будет происходить релаксация напряжений и рассеивание избыточного порового давления. В целом, положительный эффект такого мероприятия не столь велик по сравнению с экономическими издержками для предприятия, поэтому его применение требует достаточно серьезного обоснования.

Из рассмотренных технологических параметров, влияющих на состояние подрабатываемого гидроотвала, наиболее приемлемым является **выбор оптимальной раскройке шахтного поля и направления проходки лав**. При разработке проекта ведения горных работ на горном участке многовариантными расчетами сдвижений можно принять наиболее оптимальную раскройку шахтного поля, руководствуясь принципом минимального воздействия деформаций сдвижения на откос намывного сооружения (особенно, на призму его упора). В частности, при ориентировании очистных выработок параллельно дамбе наибольшее негативное воздействие будет оказывать лава, расположенная под низовым откосом ограждающих дамб, так как в этом случае максимальные оседания будут реализовываться в призме упора. Наименьшее влияние выработок на устойчивость откоса будут оказывать выработки, расположенные под намывным массивом или под верхней частью откоса. Поэтому при выборе последовательности отработки лав в последнюю очередь следует обрабатывать лавы, оказывающие наибольшие влияния на устойчивость откоса гидроотвала. При ориентировании выработок вкрест простиранию откоса отработку лав следует вести в направлении из-под откоса. Это позволит на первом этапе подработать в откосе призму активного давления, обеспечив возрастание коэффициента запаса устойчивости. В дальнейшем при подработке откоса в призме упора коэффициент запаса устойчивости снизится до своего конечного значения.

В случае планирования разработки свиты угольных пластов при любой ориентации очистных выработок относительно гидроотвала, раскройку шахтного поля следует осуществлять таким образом, чтобы минимизировать оседания земной поверхности при повторной подработке. А именно, следует

принять схему, при которой центры нижележащих лав будут совпадать в плане с межлавыми целиками верхних лав и наоборот. Это позволит избежать суммирования максимальных оседаний на определенных участках формирующегося рельефа подработанной территории и позволит ее сnivelировать.

Разработка месторождения с оставлением защитных целиков под дамбой. В зависимости от размера оставляемого целика можно полностью исключить или частично минимизировать негативное влияние подземных работ на устойчивость дамбы.

4.5 Мероприятия по улучшению состояния устойчивости гидроотвала на этапах строительства и эксплуатации

Повышение уровня безопасности и устойчивости гидроотвалов можно обеспечить при выполнении следующих мероприятий в рамках применяемой технологии гидроотвалообразования:

- 1) формирование оптимальных для сооружений по условиям устойчивости конструкций откосов;
- 2) выбор оптимальной технологии намыва пород и отсыпки дамб обвалования;
- 3) организация дренажа.

Параметры и конфигурация откосов гидроотвалов обосновываются при проектировании сооружения расчетами устойчивости по результатам прогнозов состава, состояния и свойств техногенных пород. При отклонении фактических инженерно-геологических условий от принятых в проекте следует произвести текущую оценку устойчивости объекта и обосновать мероприятия по изменению параметров откосов. При уменьшении коэффициентов запаса общей или локальной устойчивости откосов ниже допустимых значений следует изменить их конфигурацию за счет **отсыпки различных пригрузов (контрфорсов)** как на низовых участках, так любых других местах. Пригруз низового откоса обеспечивает усиление призмы упора, в целом, повышая общую устойчивость сооружения. Местоположение, размеры пригруза и его конфигурация обосновывается расчетами устойчивости.

Среди технологических факторов, определяющих прочностные свойства намывных пород в приоткосных частях сооружения и, следовательно, устойчивость гидроотвалов, главными являются **направление, способ и интенсивность намыва, а также цикличность поступления в гидроотвал материала различного гранулометрического состава**. Обычно намыв гидроотвалов осуществляется от дамб обвалования к центру заполняемой территории (при всестороннем обваловании) или в сторону естественных повешений рельефа (формирование в логах при одностороннем обваловании). При данных схемах намыва пруд-отстойник осветленной воды, где обычно откладывается наиболее тонкодисперсный материал с низкой прочностью и проницаемостью, формируется на значительном расстоянии от откосов сооружения. Применение противоположной схемы намыва в сторону дамб обвалования приводит к образованию пруда-отстойника вблизи откоса гидроотвала, неблагоприятным образом сказываясь на его устойчивости и требуя больших затрат для создания мощных упорных дамб. Поэтому одной из основных рекомендаций по формированию устойчивого гидроотвала является недопущение расположения пруда-отстойника рядом с дамбами. Для управления водным режимом гидроотвалов проектом предусматривается строительство водосбросных сооружений, конструкция которых должна обеспечивать пропуск технических и паводковых вод.

Высокая интенсивность намыва пылевато-глинистого материала в гидроотвалы предопределяет образование в намывных породах избыточного порового давления, которое снижает их прочностные свойства и, соответственно, ухудшает устойчивость откосов. Для предотвращения развития в породах избыточного порового давления можно снизить интенсивность намыва или организовать специальные дренажные мероприятия, направленные на улучшение условий консолидации намывного массива. При складировании в сооружение материалов с различными фильтрационными свойствами намыв гидроотвала следует организовывать таким образом, чтобы более грубодисперсный материал размещался в нижней части намывного массива, при этом

прочность намывного массива будет увеличиваться с глубиной. В тех случаях, когда из-за особенностей месторождения первоначально отрабатываются мелкодисперсные породы (глины, суглинки), а затем более грубодисперсные (супеси, пески), целесообразно предусматривать размещение первых в определенных местах в средней части гидроотвала, с последующим их замывом более грубодисперсным материалом.

Обеспечение безопасности гидротехнических сооружений на этапе его строительства осуществляется путем применения наиболее оптимальной технологии отсыпки дамб и намыва: интенсивность отсыпки дамб, их высоты и количества ярусов, направление развития. Чем более интенсивно происходит наращивание дамб, тем выше формируется избыточное поровое давление в намывном массиве, что в свою очередь может привести к потере несущей способности ограждающей конструкции и развитию оползня. Параметры наращивания гидроотвала должны быть обоснованы расчетами устойчивости на основании прогноза формирования порового давления под дамбой при отсыпке и его рассеивания в процессе фильтрационной консолидации. С целью снижения негативного влияния порового давления на условия устойчивости рекомендуется проведения следующих мероприятий:

- послойная отсыпка дамбы небольшими по высоте заходками и временными интервалами между отсыпкой;
- отсыпку первого слоя насыпи производить до наступления отрицательных температур воздуха на не замороженную поверхность намывного массива;
- отсыпку следует производить одним фронтом, не допуская встречного развития отвальных работ;
- в наиболее опасных сечениях отсыпку следует производить с интервалами, достаточными для рассеивания порового давления
- в период отсыпки необходимо проводить гидрогеологический мониторинг, включающий в себя частотные наблюдения за напорами и сопоставления их с критериальными значениями. Развитие порового давления можно

регулировать, снижая интенсивность подвигания фронта горных работ, уменьшая мощность отсыпаемого слоя и увеличивая промежуток времени между отсыпками слоев.

В случае планирования подработки гидроотвала на этапе строительства дамб гидроотвала при наличии в основании хорошо проницаемых пород и выхода в них зоны водопроницающих трещин в ложе сооружения следует предусмотреть устройство противofильтрационных экранов из слабопроницаемых пород.

Для улучшения безопасного состояния сооружения на этапе строительства и эксплуатации можно предусмотреть проведение **дренажных мероприятий** [26]. Дренаж в гидроотвалах служит для:

- 1) улучшения условий устойчивости сооружения;
- 2) предотвращения фильтрационных деформаций откосов;
- 3) улучшения условий консолидации намывных пород.

Для снижения уровня воды в откосе и рассеивания избыточного порового давления в теле гидроотвала применяются глубинные средства дренажа:

- а) фильтрующие подушки и банкеты, укладываемые в основании гидроотвала перед его намывом на слабопроницаемые породы;
- б) трубчатые дрены, уложенные под дамбы гидроотвала и в его основания до начала намыва;
- в) дренажные вертикальные скважины, по которым в последствии производится откачка либо перепуск воды в нижележащие горизонты;
- г) горизонтальные дренажные скважины для снятия напоров.

При наличии в основании гидроотвала напорного водоносного горизонта для его дренажа целесообразно применять водопонижающие вертикальные скважины.

Дренирование намывных массивов, представленных глинистыми разновидностями пород, позволяют осуществлять специальные технологические решения, выполняемые в откосных частях сооружения, например создание в намывном теле пластовых дрен из хорошо фильтрующего материала. Данное

мероприятие выполняют либо специальным намывом дрены, либо отсыпкой ее в строительный период сухоройными механизмами.

Для предотвращения фильтрационных деформаций применяются локальные дренажные мероприятия, среди которых наиболее эффективным и универсальным средством борьбы с деформациями фильтрующих откосов являются дренажные пригрузки. Пригрузочным материалом в зависимости от состава пород в откосе гидроотвала могут служить пески, гравийно-галечные или щебенистые разности. Объем дренажных пригрузок зависит от высоты промежутка высачивания и величины расхода потока, выходящего на откос [26].

Мероприятия, направленные на ускорение консолидации намывных пород [26]:

- 1) послонный намыв в гидроотвал хорошо и плохо фильтрующих пород;
- 2) создание дренажных элементов в массиве гидроотвала с использованием торцевого линейного намыва, отсыпка разделительных пионерных насыпей;
- 3) пригрузка гидроотвала насыпью из хорошо проницаемого материала.

4.6 Отсыпка «сухого» отвала на гидроотвале - технологическое мероприятие по предотвращению развития гидродинамической аварии

Дамбы и плотины гидроотвалов - это гидротехнические сооружения, которые характеризуются наличием напорного фронта и при определенных обстоятельствах представляет собой угрозу для окружающей среды и расположенных рядом различных объектов из-за возможности развития на дамбах гидродинамических аварий, сопровождающиеся растеканием воды и водородной смеси за границы данного объекта. При их эксплуатации в соответствии с существующей в РФ нормативно-технической базой и ФЗ № 117 от 21 июля 1997 года «О безопасности гидротехнических сооружений» [78], следует выполнять расчет вероятной зоны затопления и оценивать ущерб от возможного развития данного события. Поскольку верхняя часть намывного массива

сложена обычно текучими породами, то вероятность гидродинамической аварии при подработке дамб гидроотвала является достаточно высокой.

Для предотвращения развития на объекте гидродинамической аварии предлагается использовать способ предварительного уплотнения намывных пород весом насыпи из скальных дезинтегрированных пород сухой вскрыши. Известно, что при размещении на поверхности гидроотвала сухого отвала процесс отвалообразования сопровождается развитием геодинамических процессов, связанных с выдавливанием намывных отложений из-под отвала и замещением их отвальными массами. При развитии отвала со стороны дамб обвалования в первую очередь удаляются текучие породы от откосных частей гидроотвалов, а оставшиеся более прочные отложения – уплотняются и упрочняются под действием нагрузки от веса отвальной насыпи [61]. При этом интенсивность процесса консолидации существенно зависит от мощности слоя, которая значительно уменьшается при «замещении-выдавливании». Таким образом, предварительная отсыпка насыпей из полускальных вскрышных пород на поверхность гидроотвала перед их подработкой позитивно скажется на улучшении его геомеханических условий с позиции устойчивости откосов намывных массивов. Кроме того, удаление текучих пород из зоны подработки ликвидирует риск их попадания в подземные горные выработки через формирующуюся над выработанным пространством зону водопроводящих трещин.

Отвалообразование первым ярусом непосредственно на слабое основание сопровождается деформациями (рисунок 4.2), развивающихся по типу подподошвенных оползней (а) или оседаний с отжатием пород основания из-под насыпи (б). Различие между первым и вторым типом заключается в характере развития деформационного процесса [146]. Так, при возникновении подподошвенных оползней наблюдается формирование плоскости скольжения и образование призмы оползания, оконтуренной трещиной отрыва, при этом ее поверхность характеризуется наклоном вглубь отвала. При развитии подподошвенного оползня глубина «внедрения-замещения» отвального яруса в намывной массив обычно составляет $0,4 \div 0,6 \cdot H$ м, а ширина призмы оползания

$0,4 \div 0,7 \cdot H$ м, где H – высота отсыпаемого яруса, м. Второй тип деформационного процесса, сопровождающего отсыпку отвала на слабом основании, развивается по типу «выдавливания пасты из тюбика», поэтому характеризуется иной морфологией. Так, глубина «внедрения-замещения» здесь значительно больше и достигает значений равных высоте отсыпаемого отвала, а ширина призмы оползания измеряется величинами до $1,2 \cdot H$. Наклон поверхности отвала при этом направлен в сторону откоса [61, 114].

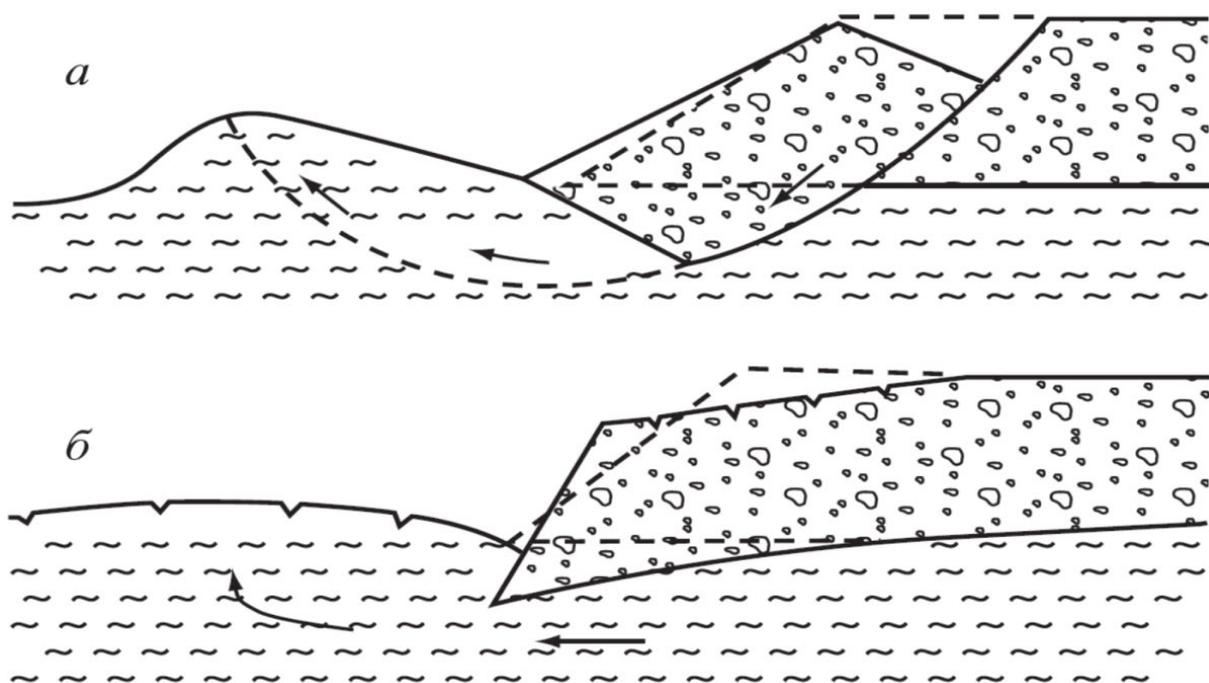


Рисунок 4.2 – Виды деформаций отвалов на гидроотвалах
(а и б см. текст) [114]

Развитие процессов «выдавливания-замещения» при формировании насыпей на намывных массивах в конечном итоге приводит к изменению их размеров и форм. Поэтому при оценке устойчивости подрабатываемого гидроотвала с учетом его предварительного нагружения отвалами сухих пород необходимо предварительно выполнить прогноз изменения строения, состояния и свойств пород природно-технической системы «отвал - гидроотвал». Одним из важных элементов этого прогноза является решение геомеханической задачи – определение величины внедрения отвальной насыпи в нагружаемый намывной массив и изменения мощности последнего.

С целью решения таких задач разработана методика численного моделирования процесса «внедрения-выдавливания» с использованием МКЭ в Эйлеровой постановке, которая успешно зарекомендовала себя в зарубежной практике для решения различных геотехнических задач, таких, например, как прогноз деформаций морских трубопроводов, расчет внедрения свайного фундамента в грунт, моделирование динамики оползневых процессов и т.д. [131–133, 143, 145, 159, 160]. Разработанная методика реализована в качестве базового функционала в программном комплексе для выполнения многоцелевых прочностных расчетов Abaqus/CAE [60, 61].

На рисунке 4.3 приведены результаты моделирования пошагового развития насыпи (отвала) высотой 20 м на слабом основании – намывном массиве.

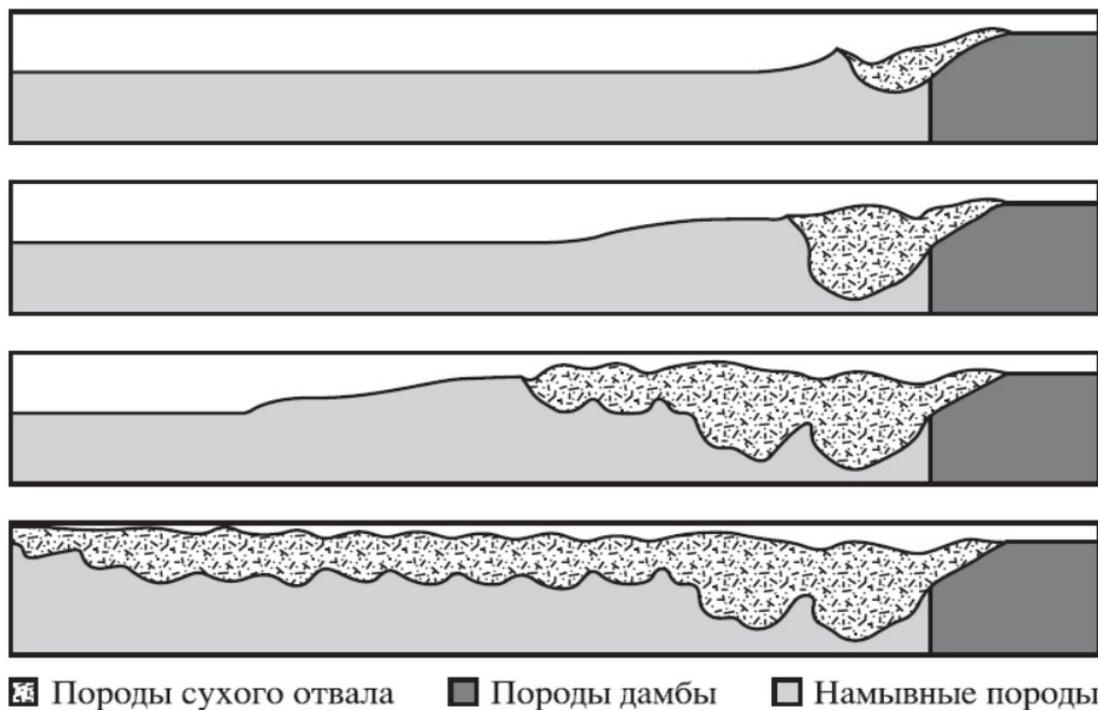


Рисунок 4.3 – Поэтапное моделирование внедрения отвального яруса в намывной массив гидротова [61]

Анализируя результаты моделирования процесса «выдавливания - замещения» при отсыпке отвальных насыпей на слабое намывное основание, можно отметить следующее. Полученные при моделировании картины формоизменения нагружаемых массивов весьма близко соответствуют

фактически наблюдаемым на объектах. Это подтверждено результатами инструментальных геодезических измерений и бурением скважин на предмет выяснения глубины «внедрения-замещения» пород намывного массива. Использование численного моделирования позволяет правильно судить о характере специфических деформаций отвалов на слабых основаниях и в дальнейшем учитывать их в построении новых геомеханических моделей, рассматривающих различные этапы нагружения (отсыпка последующих отвальных ярусов, формирование новых насыпей рядом с первой и т.д.).

Использование разработанной методики осуществлялось для условий гидроотвала на реке Еланный Нарык филиала «Галдинский угольный разрез», который эксплуатировался с 1997 по 2013 г, а в настоящее время используется для размещения сухого отвала. В сформированную строительством двух плотин емкость гидроотвала намывались вскрышные породы глинисто-суглинистого состава, разрабатываемые средствами гидромеханизации. Гидроотвал на момент прекращения эксплуатации имел высоту 57,0-62,0 м при абсолютных отметка гребней плотин в пределах $+307,0 \div +312,0$ м и воды в пруде-отстойнике $+304,0$ м, соответствовал гидротехническим сооружениям I класса согласно СП 58.13330.2012 [106].

В 2013 году намыв грунтов в гидроотвал прекращен, сооружение ликвидировано как ГТС, а его поверхность в соответствии с «Проектом ликвидации...» рекомендована для размещения сухого отвала. Начиная с 2015 г., по периметру гидроотвала осуществляется по отметкам $+320$ м формирование отвальных насыпей в виде кольца отвальными заходками шириной 70-100 м. Отсыпка насыпей сопровождалась развитием описанных выше деформаций, что привело к выдавливанию намывных пород из-под отвала и постепенному увеличению их мощности перед движущим отвальным фронтом. На определенном этапе развития отвальных работ возникла геомеханическая ситуация, когда отжавшиеся из-под насыпи породы по отметкам приблизились к отметкам формируемого отвального горизонта, вести дальнейшее отвалообразование стало не безопасно, поэтому отвалообразование было перенесено на второй

ярус по отметкам +340 м. В настоящее время отвальные работы продолжаются по данным отметкам. Общая высота отвала, размещаемого на гидроотвале, будет составлять 90 м при отметках +390 м.

Следует при этом отметить, что данный гидроотвал находится в прибортовой зоне разреза, глубина горных выработок которого достигла 200 м. Геологической разведкой на данном участке установлены законсервированные запасы угля в прибортовой зоне и под гидроотвалом, а также расположенным рядом отвалом сухой вскрыши. Их отработку планируется в 2020-2030 гг. осуществить подземным способом шахтой «Южная-Глубокая». Для обеспечения безопасности открытых и подземных работ в зоне влияния гидроотвала, а также решения проблемы размещения в непосредственной близости от горных выработок разреза, принято решение о начале нагружении гидроотвала со стороны плотины № 2, рядом с которой находился пруд-отстойник и сформировалась толща намывных пород текучей консистенции мощностью около 30 м. Разработке рекомендаций предшествовал прогноз изменения структуры ПТС «отвал-гидроотвал» по разработанной методике. На рисунках 4.4 – 4.6 представлено поэтапное моделирование процессов «выдавливания-замещения» при отсыпке отвальных масс до отметки +340 м.

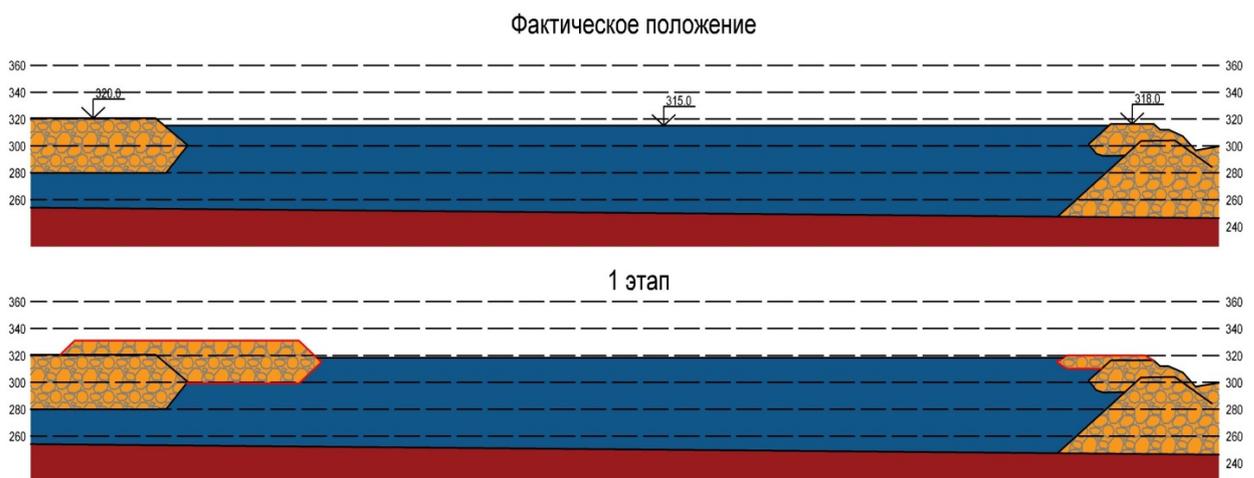


Рисунок 4.4 – Моделирование отсыпки насыпей на первом этапе

Результаты моделирования показывают, что отсыпку отвалов на гидроотвале первым, вторым и, по всей видимости, третьим ярусами придется производить непосредственно на намывную поверхность горизонтами по

отметкам соответственно +320 м, +340 м и 360 м. При этом отвалообразование рекомендуется осуществлять в режиме управляемого деформирования откосов при исключении возможности растекания намывного материала за пределы сооружения. В дальнейшем при отсыпке четвертого и последующих ярусов необходимо обеспечивать условия устойчивости откосов.

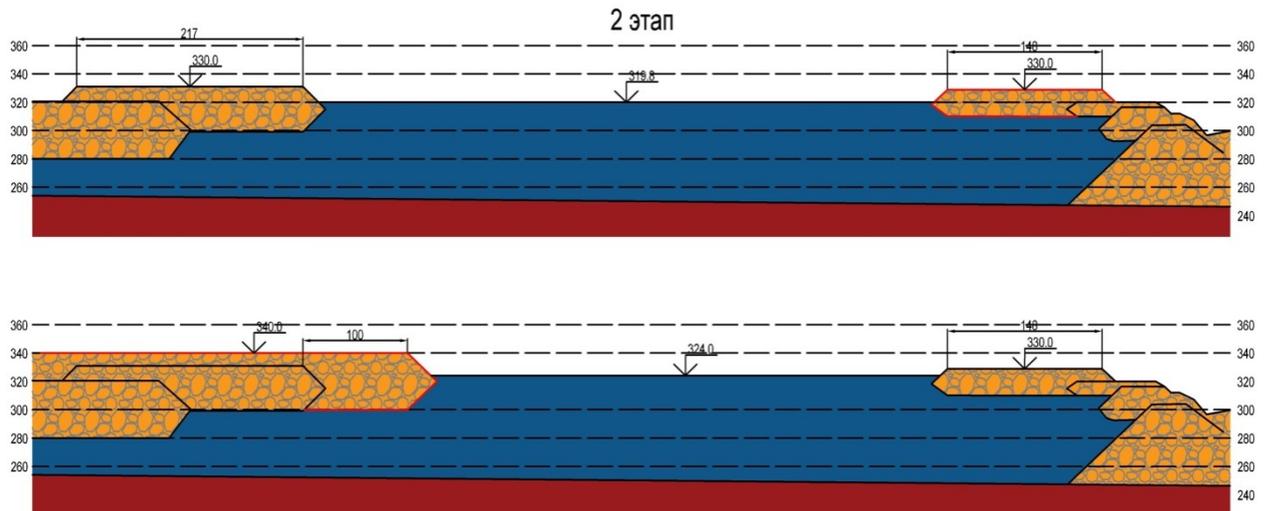


Рисунок 4.5 – Моделирование отсыпки насыпей на 2 этапе

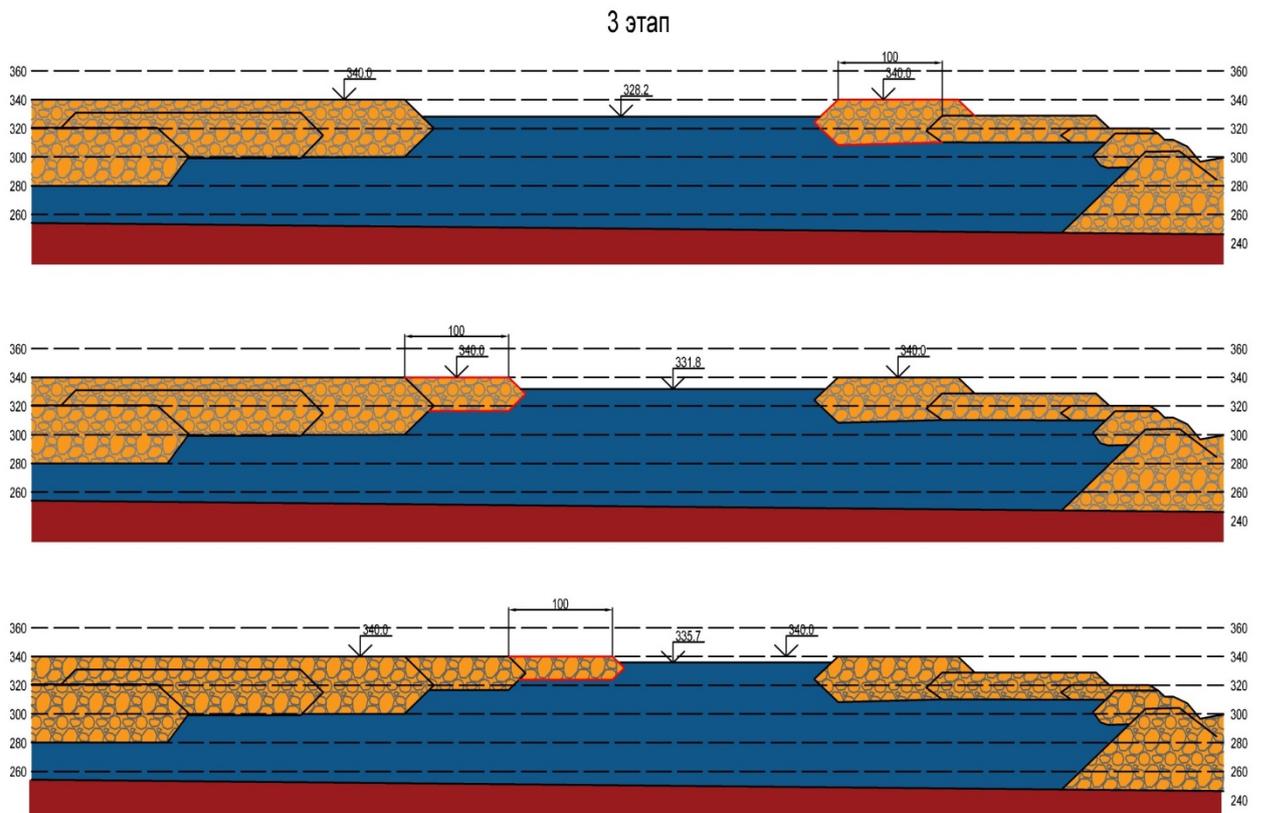


Рисунок 4.6 – Моделирование отсыпки насыпей на 3 этапе

Формирование первых трех ярусов наиболее предпочтительно осуществлять в направлении от периферии к центру, что позволяет отжать слабые намывные породы от откоса из призмы возможного оползания, что в свою очередь, улучшает условия устойчивости всего сооружения. Направление отвалообразования при формировании четвертого и последующих ярусов может быть другим, однако при этом необходимо учитывать характер формирования в намывных породах избыточного порового давления. Неблагоприятным с точки зрения устойчивости отсыпаемых отвалов является направление работ от центра гидроотвала к оградительным конструкциям, так как в этом случае избыточное поровое давление, возникшее вследствие отсыпки, может достигнуть откосных частей сооружения раньше фронта отвальных работ и стать причиной развития оползневых деформаций.

4.7 Разработка мероприятий по улучшению состояния устойчивости гидроотвала на реке Еловка при подработке шахтой Байкаимская

Пример подработки гидроотвала на реке Еловка подробно рассмотрен в третьей главе настоящей работы. В настоящем разделе приведены рекомендации по улучшению состояния его устойчивости, разработанные до начала его подработки [81].

По результатам выполненного прогноза сдвижения земной поверхности и дамб гидроотвала при отработке лав №№ 12, 13, 14 и 5 были определены оседания и наклоны. Данные параметры легли в основу прогнозирования изменений геометрических параметров сооружения, а также выполнения районирования его поверхности по углам наклона участка мульды (рисунок 4.7).

Принципиально вся область влияния разделена на два условных участка:

1) участок с углом наклона $0.8^\circ \div 1^\circ$ в пределах координат в полумульде по простиранию от 0 до 0.7, при этом для расчётов принят угол наклона на этом участке $\delta = 1^\circ$;

2) участок с углом наклона $0.1^\circ \div 0.2^\circ$ в пределах координат в полумульде по простиранию от 0.7 до 1.0, причем для расчётов принят угол наклона на этом участке $\delta = 0.2^\circ$.

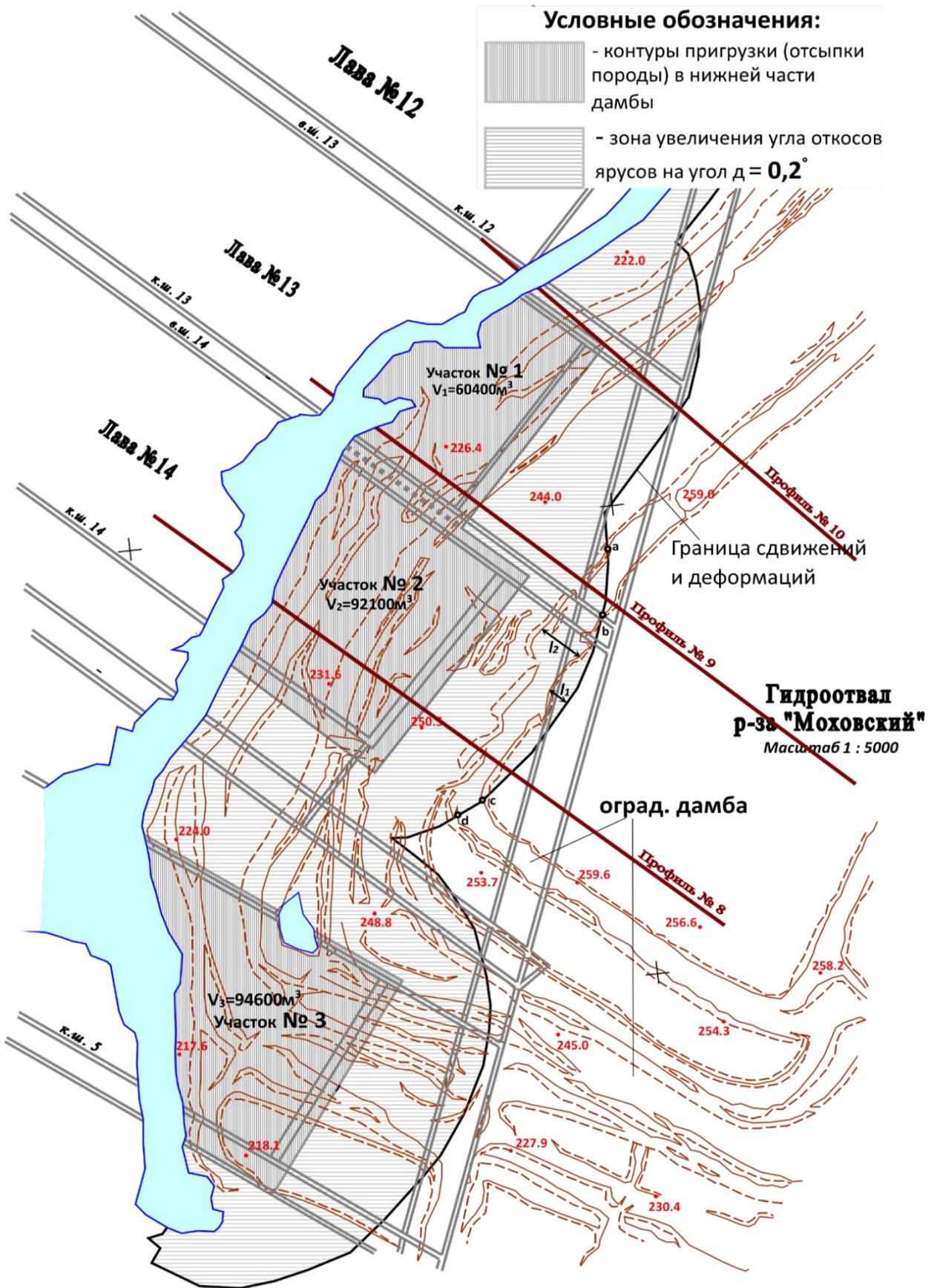


Рисунок 4.7 – Контуры пригрузки нижней части дамбы и подсыпки породы на верхних ярусах дамбы

Результаты прогноза изменений угла наклона гидроотвала использовались для обоснования геомеханических схем и выполнения расчетов устойчивости. В конечном итоге были разработаны рекомендации по укреплению откосов за счет их подсыпки, а также усилению конструкции гидроотвала за счет формирования пригруза на двух нижних дамбах - первичного и последующего обвалования (рисунки 4.8, 4.9).

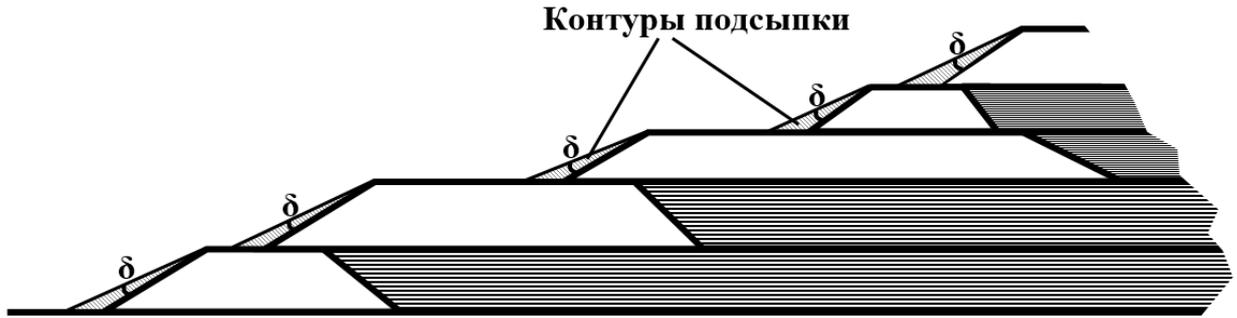


Рисунок 4.8 – Схема подсыпки ярусов дамбы, расположенных ниже самого верхнего яруса; δ - угол наклона мулды



Рисунок 4.9 – Положение зоны отсыпки участка №2 и границы сдвижений и деформаций от лавы №14 на Профиле 8

Формирование предложенных пригрузочных призм на откосе гидроотвала выполнено на трех рекомендованных участках (рисунок 4.7). На рисунке 4.9 в качестве примера приведена разработанная конструкция пригруза для откоса в профиле №8. В процессе подработки, которая осуществлялась в период с 2014 по 2016 гг., в зону влияния очистных выработок попали водоотводной канал и нижняя часть откоса. До отработки запланированных лав на каждом из участков закладывались маркшейдерские станции для контроля процесса сдвижения. Частично результаты данных наблюдений приведены и

проанализированы в 3-й главе. В заключении раздела отметим, что в процессе подработки данных участков опасных деформаций и нарушений устойчивости откосов установлено не было.

4.8 Разработка мероприятий по улучшению состояния устойчивости гидроотвала в выработке пласта Красногорский II при его подработке шахтой «Имени А.Д. Рубана»

АО «СУЭК-Кузбасс» приобрела лицензию на отработку трех пластов на участке «Благодатный-Глубокий». Краткое описание горно-геологических условий данного участка рассмотрено ранее в разделе 1.1.3, где приведен ситуационный план сооружения и возможное расположение горных выработок под ним (рисунок 1.2).

Планируемое извлечение запасов угля по трем пластам повлечет за собой развитие процесса сдвижения, сопровождающегося изменением отметок поверхности подпорных конструкций гидроотвала. Согласно выполненному прогнозу вероятных сдвижений и деформаций дамбы намывного сооружения при отработке пластов «Полысаевский–II», «Надбайкаимский» и «Байкаимский» следует ожидать образование оседаний на величину 8,68 м, что приведет к снижению отметок верхнего гребня дамбы до +220,1 м. Поскольку в настоящее время отметка уровня воды в прудке-отстойнике гидроотвала составляет +221,4 м, то на конец отработки гребень дамбы опустится на 1,3 м ниже отметки воды в пруде-отстойнике, поэтому на определенном этапе подработки гидроотвала следует ожидать возникновение критической ситуации, которая будет сопровождаться перетеканием воды через гребень дамбы, ее размывом и образованием прорана. Для предотвращения данного негативного процесса, связанного с перемещением воды и пульпы за пределы гидроотвала, следует предусмотреть изменение параметров подпорных конструкций, в частности, увеличение высоты дамбы.

Одним из обязательных видов исследований безопасности функционирования гидроотвалов на подрабатываемых территориях является оценка устойчивости их оградительных конструкций, которую следует производить

по наиболее ответственным диагностическим профилям откосов, вовлеченных в деформационный процесс сдвижения. В частности, на исследуемом объекте – гидроотвале в выработке пласта Красногорский-II - оценку устойчивости подработанного откоса производили для условий восточной части сооружения, приуроченной к середине плотины №2, где высота максимальна и составляет 20 м, а угол откоса равен 35° . Оценка была выполнена также для различных этапов подработки гидроотвала: - на фактическое его состояние до подработки; - последовательно после отработки пластов Полысаевский-II; Надбайкаимский и Байкаимский. Геомеханические расчеты осуществлялись с использованием программного комплекса RocSciencePhase 2, базирующегося на МКЭ. Он позволяет учесть изменение инженерно-геологических и гидрогеологических условий при развитии процессов сдвижения.

Выполненные расчеты свидетельствуют о том, что на фактическое состояние гидроотвала (до подработки) устойчивость дамб обеспечивается с коэффициентом запаса ($k_s = 1,31$) выше нормативного значения 1,15. Первичная подработка пластом Полысаевский-II снизит коэффициент запаса устойчивости до значения 1,23, повторная подработка пластом Надбайкаимский уменьшит коэффициент запаса до 1,19, а конечная – до 1,10, что ниже нормативного значения – $k_n = 1,15$. Приведенные значения коэффициентов запаса устойчивости рассчитаны при условии, что период полных сдвижений от каждого пласта завершен, дамба при этом оказалась в плоском дне сформировавшейся мульды. Снижение коэффициента запаса устойчивости k_s на каждом из этапов подработки обусловлено «подъемом» депрессионной поверхности водоносного горизонта относительно откоса сооружения. Однако в активной фазе сдвижения, соответствующей моменту непосредственной подработки дамбы, деформации в откосе будут происходить неравномерно, в намывном массиве будет формироваться избыточное поровое давление при попадании его в зону сжатия. Возрастание нейтральных напряжений в скелете намывных пород приведет к уменьшению их прочности и существенному ухудшению устойчивости откосов.

Для обеспечения безопасности эксплуатации гидроотвала на подрабатываемой территории рекомендуется предусмотреть разработку специальных мероприятий по улучшению устойчивости откосов до начала подработки. Например, наиболее целесообразным будет предусмотреть отсыпку пригруза низового откоса дамбы или снижение уровня воды в пруде-отстойнике. При условии попадания дамбы в плоское дно мульды сдвигения наиболее целесообразно выполнить подсыпку дамбы на высоту, соответствующую максимальным оседаниям, что позволит исключить возможность перетекания воды или пульпы через гребень дамбы. При попадании дамбы в краевую часть мульды помимо ее наростки по высоте необходимо осуществить подсыпку откоса, чтобы компенсировать изменение угла наклона дамбы. Принципиальная схема подсыпки дамб в краевых частях мульды приведена на рисунке 4.10.

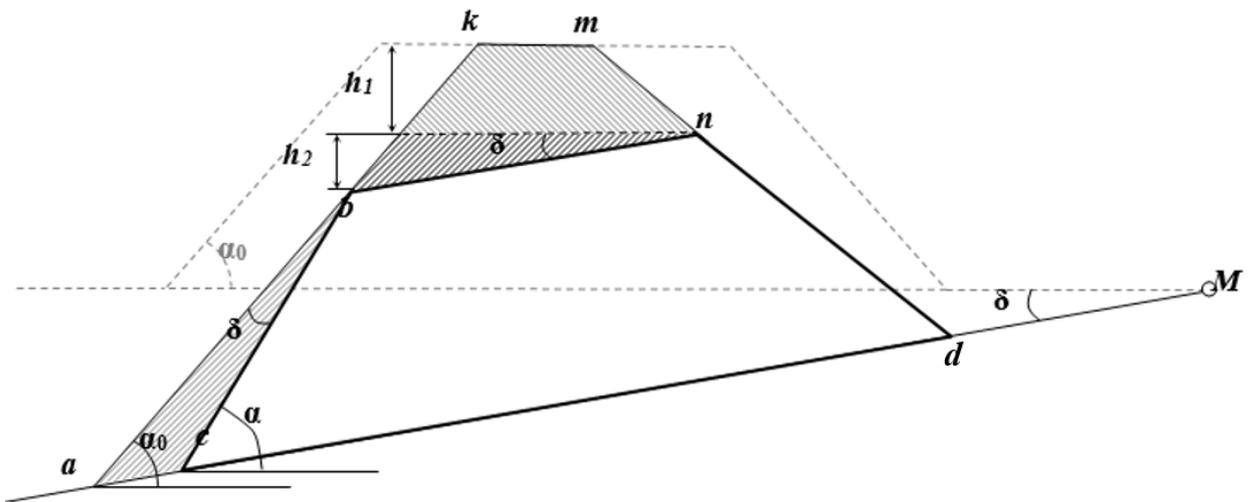


Рисунок 4.10 – Схема к расчёту геометрических параметров подсыпки, подрабатываемой горными работами дамбы:

α_0 – угол откоса дамбы до подработки; α – угол откоса дамбы после подработки; δ – угол наклона мульды; h_1 – высота подсыпки за счёт угла наклона мульды; h_2 – высота подсыпки вследствие оседаний в мульде; $cbnd$ – контур дамбы; abc и $bktm$ – контуры подсыпки

4.9 Мониторинг безопасности

В соответствии с Федеральным Законом № 117 от 21 июля 1997 г функционирование гидротехнических сооружений следует осуществлять при обязательном выполнении мониторинга безопасности (далее – МБ). Общие требования по организации и проведению МБ обозначены в РД 03-259-98

«Инструкция ...» [95]. Согласно данному документу МБ гидротехнических сооружений – «это совокупность постоянных (непрерывных) наблюдений за состоянием безопасности гидротехнических сооружений и характером их воздействия на окружающую среду».

Целью МБ любого гидротехнического объекта, в том числе гидроотвала на подрабатываемой территории, является контроль состояния устойчивости его оградительных конструкций, предупреждение возникновения аварийных ситуаций, создание безопасных условий работы людей и оборудования. Основной задачей МБ являются контролирование устойчивости его откосов на всех этапах существования ГТС [95].

Цели и задачи МБ достигаются посредством организации системы постоянных (непрерывных) визуальных и инструментальных (в том числе автоматизированных, дистанционных) наблюдений, обеспечивающих получение качественной и достоверной информации в необходимых объемах [95].

Основными функциями системы МБ на подрабатываемой территории являются:

- наблюдение за сдвижением поверхности земли и гидроотвала при отработке лавы;
- наблюдения за уровнем воды в пруде-отстойнике;
- наблюдения за устойчивостью откосов гидроотвала в районе отработки лавы;
- повторное определение механических характеристик пород гидроотвала и его основания, попавших в зону влияния подземных горных работ;
- наблюдения за поровым давлением в намывном массиве и естественном основании;
- контроль технологических параметров гидромеханизации и подземных горных работ.

Организации и выполнению мониторинга безопасности на подрабатываемом гидроотвале обязательно предшествует разработка «Проекта мониторинга...». Данный документ подготавливается на основании действующих

нормативно-методических документов. В нем обосновываются параметры, за которыми следует осуществлять периодические наблюдения специализированным подразделением предприятия в составе ее технической службы или сторонней организацией, имеющий разрешительные документы на данный вид деятельности.

При подработке гидроотвала следует осуществлять наблюдения за следующими параметрами:

- горизонтальными и вертикальными смещениями реперов на откосах гидроотвалов;
- горизонтальные и вертикальные смещения реперов в формируемой мульде сдвижения;
- физико-механические характеристики пород, слагающих гидроотвал и пород его основания;
- отметки гребней дамб, поверхности намывного массива и уровня воды в прудке;
- углы заложения откосов, ширины межъярусных берм;
- поровое давление в намывном массиве и породах основания;
- технологические параметры ведения подземных горных работ.

Измерения и наблюдения за представленными выше параметрами должны осуществляться методами и средствами инженерно-геологического, гидрогеологического, геомеханического, деформационного и технологического мониторинга (контроля).

Деформационный мониторинг (ДМ) заключается в измерении фактических значений сдвижений и деформаций сооружения, а также земной поверхности, при подработке. Организуется путем заложения на откосе гидроотвала и поверхности земли, находящихся в зоне влияния подземных горных работ, маркшейдерско-геодезических наблюдательных станций. Конструкция станции должна обеспечивать наблюдения на двух профильных линиях - по оси дамбы и перпендикулярно ей.

При направлении ведения горных работ из-под откоса или на откос, первая реперная линия должна быть расположена в главной оси мульды сдвижения по простиранию выработки, а вторая - перпендикулярно ей на нижних ярусах сооружения.

В случае если очистная выработка ориентирована под углом к откосу, то осевую станцию следует заложить в месте пересечения линии максимального оседания и нижней бровки откоса, так как в данном сечении будут достигаться наихудшие условия подработки. Вторую линию следует заложить, как и в предыдущем случае, на нижних ярусах откоса.

При расположении лавы вдоль откоса, следует предусмотреть заложение нескольких наблюдательных линий. Одна реперная линия должна быть расположена по главной оси мульды сдвижения по простиранию выработки. Другие – параллельно оси откоса в наиболее ответственных сечениях.

В период активной стадии сдвижения измерения необходимо выполнять ежедневно. По полученным экспериментальным данным необходимо в режиме реального времени выполнять корректировку оценки устойчивости гидроротвала и при необходимости оперативным образом предпринимать меры по улучшению состояния устойчивости, чтобы предотвратить возможное развитие гидродинамической аварии.

Деформационный мониторинг выполняется маркшейдерско-геодезическими методами и включает следующие виды работ:

- контроль соответствия проектных параметров: высоты дамб обвалования и общая высота сооружения, уровень воды в прудах-отстойниках, высотные отметки поверхности намывного массива, результирующей угол откоса и углы откосов ярусов, ширина межъярусных берм, ширина пляжа;
- наблюдения за смещениями конструктивных элементов гидроротвалов;
- наблюдения за сдвижением и деформациями земной поверхности и массива горных пород в зоне влияния подземных разработок.
- паспортизация нарушений устойчивости (заколов, деформаций и др.) дамб обвалования;

Кроме того, ДМ должен включать контроль за соблюдением критериев безопасности ГТС, таких как высотные отметки дамбы и пульпы в чаше гидроротвала, особенно в той части дамбы, которая попадает в мульду сдвижения. Его целью является наблюдение за тем, чтобы превышение гребня дамбы над пульпой (или водой) было не ниже обоснованного критериального значения. Также в рамках ДМ должен осуществляться постоянный контроль за уровнем воды в прудке-отстойнике и других элементах ГТС.

Инженерно-геологический мониторинг – это система натуральных наблюдений и лабораторных исследований за изменением инженерно-геологических условий сооружения. Он включает периодическое изучение состава, состояния и свойств пород гидроротвала и его основания на различных этапах его формирования. Инженерно-геологические исследования следует выполнять на стадии обоснования проекта строительства гидротехнического сооружения и далее для обоснования каждой дамбы наращивания, а также при его рекультивации, консервации и ликвидации.

Подработка гидроротвала является особым специфическим этапом его функционирования, поэтому требует выполнения специальных исследований, направленных на установления факта влияния подработки на состояние и физико-механические свойства намывных отложений и пород естественного основания. На основании выполненного прогноза параметров процесса сдвижения устанавливаются положения зон растяжения в подрабатываемых массивах. После чего осуществляется бурение скважин и отбор образцов четвертичных пород сначала до подработки, а затем и после нее. Образцы далее испытываются в лаборатории по единой методике и производится сравнение полученных результатов. При помощи такого эксперимента определяется изменение прочности пород при подработке в условиях конкретного месторождения.

Гидрогеологический мониторинг (ГГМ) – предназначен для наблюдения за изменениями гидродинамического режима гидроротвала с целью контроля за соблюдением критериальных значений уровней, напоров и порового

давления в намывном массиве и естественном основании всех этапах существования ГТС, в том числе, на стадии подработки.

ГГМ выполняется по пьезометрическим скважинам или датчикам гидростатического давления, заложенным в откосных частях гидроотвалов. Количество наблюдательных пунктов и места их заложения определяются классом гидротехнических сооружений. Рекомендуется закладывать скважины и датчики в тех же профилях, что и наблюдательные линии маркшейдерских станций.

Датчики гидростатического давления могут устанавливаться в пьезометрах для автоматизации гидрогеологических режимных наблюдений, а также непосредственно в породные массивы для измерений порового давления с целью контроля за развитием процесса фильтрационной консолидации. Обычно датчики закладываются в инженерно-геологические элементы, представленные глинистыми сильно сжимаемыми, текучими и пластичными породами. При подработке гидроотвала изменение порового давления следует ожидать в намывных породах, а также в водонасыщенных отложениях естественного основания. В качестве датчиков замера порового давления рекомендуется использовать дистанционно считываемые датчики различной конструкции. В гидротехническом строительстве длительное время применялись струнные датчики ПДС – 3, 10, 30 атм. конструкции ДИГЭС. Принципиальная схема автоматизированной станции гидрогеологического мониторинга представлена на рисунке 4.11.

На базе расчетов устойчивости, выполняемых в рамках геомеханического мониторинга, обосновываются критериальные значения показаний датчиков порового давления, соответствующие трем критериальным значениям коэффициента запаса устойчивости откосов гидроотвала, которые в дальнейшем контролируются в течение всего периода эксплуатации сооружения. При превышении этих значений необходимо в срочном порядке предпринимать меры по улучшению состояния устойчивости откоса.

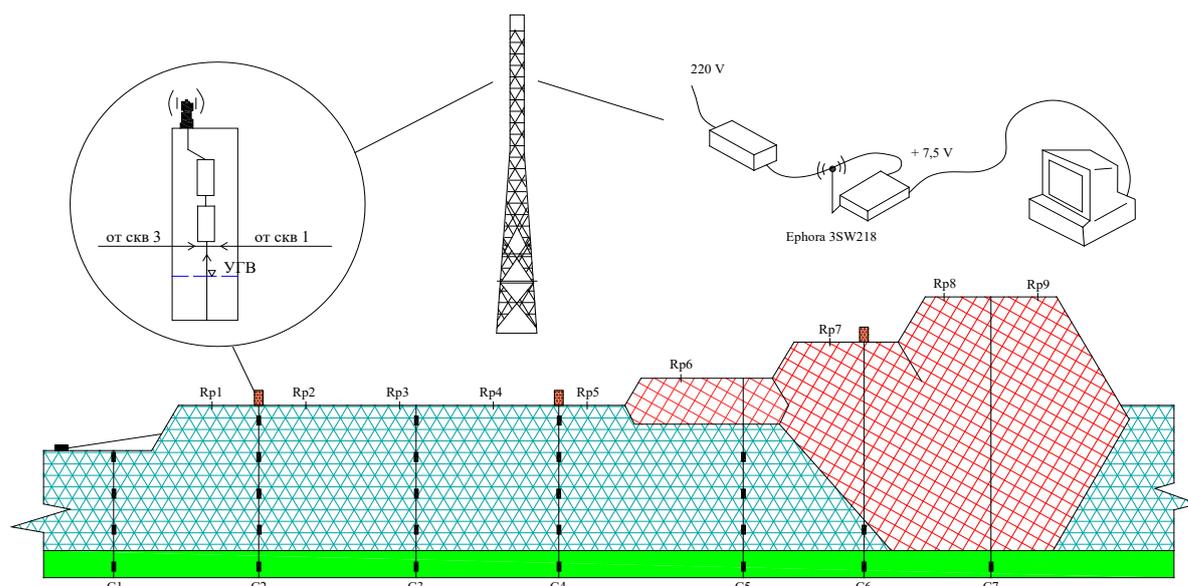


Рисунок 4.11 – Принципиальная схема организации инженерно-геологического мониторинга безопасности на гидроотвале с использованием автоматизированной системы считывания и передачи информации [101]

Технологический мониторинг – это контроль за соответствием фактических параметров применяемых технологических процессов проектным при функционировании природно-технической системы «очистная выработка+подработанный массив+гидроотвал». При подработке гидроотвала технологический мониторинг включает в себя следующие виды контроля:

- соблюдения проектной технологии ведения подземных горных работ под гидроотвалом;
- состояния дамб обвалования и новой устойчивой конструкции гидроотвала;
- соблюдения технологии эксплуатации гидроотвала на период его подработки;
- соблюдения принятых в проекте мероприятий по улучшению состояния устойчивости сооружения;
- соблюдения технологии ликвидации гидроотвала, в частности под средством отсыпки отвалов «сухих» пород на поверхность гидроотвала.

Геомеханический мониторинг проводится с целью контролирования текущего (фактического) коэффициента запаса устойчивости откосов гидроотвала (дамб, плотин) в диагностических профилях на предмет его

соответствия нормативным значениям, регламентированных проектом с учетом действующих норм и правил в области промышленной безопасности и безопасности гидротехнических сооружений. Отклонение текущего коэффициента запаса устойчивости от нормативного значения в сторону ухудшения состояния гидроотвала является сигналом для рассмотрения необходимости разработки и внедрения технических мер по улучшению устойчивости откосов гидроотвала.

Методические аспекты вопроса о назначении нормативного значения коэффициента запаса устойчивости для подрабатываемых откосов гидроотвалов рассмотрены в параграфе 4.3.

Геомеханический мониторинг заключается в проведении расчетов устойчивости откосов гидроотвала на всех этапах их подработки с учетом результатов деформационного, гидрогеологического, технологического и инженерно-геологического видов мониторинга. Для расчетов используются геомеханические модели, разработанные ранее на стадии проектирования подземных горных работ по нескольким наиболее опасным сечениям (диагностическим профилям) с учетом их начальных условий (геометрических параметров откосов, инженерно-геологического строения и гидрогеологических параметров). По мере поступления данных о развитии деформаций в диагностических профилях, изменении показаний гидрогеологической контрольно-измерительной аппаратуры (пьезометрических скважин, датчиков гидростатического давления), снижении расчетных характеристик физико-механических свойств грунтов и др. геомеханические модели корректируются соответствующим образом. Корректировка моделей проводится регулярно согласно общему регламенту ведения мониторинга на объекте.

4.10 Выводы по четвертой главе

1. 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 изучение и оценку инженерно-геологических и гидрогеологических условий ПТС, расчетное обоснование устойчивости ограждающих конструкций гидроотвала (плотин и дамб) с учетом ожидаемых деформаций сдвижения, обоснования специальных мероприятий по обеспечению устойчивости гидроотвала и мониторинг состояния гидроотвала.

2. Изучение и оценка инженерно-геологических и гидрогеологических условий ПТС включает систематизацию всей имеющейся документации по участку подземных горных работ и гидроотвалу для обоснования расчетной геомеханической модели объекта и расчетных показателей физико-механических характеристик выделенных инженерно-геологических элементов. В особых случаях проводят дополнительные исследования или опытно-промышленные эксперименты.

3. Расчетное обоснование в рамках предложенной системы включает последовательное решение частных задач по прогнозу сдвижения породного массива и деформаций земной поверхности на участке ведения подземных горных работ под гидроотвалом и оценке устойчивости откосов гидроотвала (дамб, плотин) с учетом изменившегося напряженно-деформированного состояния (НДС) пород гидроотвала при достигнутых деформациях в пределах мульды сдвижения.

4. Управление устойчивостью подрабатываемых гидроотвалов осуществляется посредством изменения параметров сдвижения, зависящих от горно-технических и горногеологических условий подземной разработки: глубины горных работ, вынимаемой мощности и угла падения пласта, площади отработки, направления и скорости проходки очистных горных выработок, раскройки участка шахтного поля.

5. Повышение уровня безопасности и устойчивости гидроотвалов можно обеспечить при выполнении мероприятий в рамках существующей технологии гидроотвалообразования путем формирования оптимальных конструкций

откосов, выбора технологии намыва пород и отсыпки дамб обвалования и организации дренажных мероприятий.

6. Для предотвращения развития на гидроотвалах гидродинамических аварий предложено использовать способ удаления от откосов слабых водонасыщенных отложений отсыпкой на поверхности сухого отвала. Для прогнозирования процессов «выдавливания-замещения» намывных пород разработана оригинальная методика моделирования МКЭ в Эйлеровой постановке. Результаты применения данной методики проиллюстрированы для условий гидроотвала на реке Еланный Нарык в Кузбассе.

7. Разработанная в работе методология геомеханического обоснования применялась при разработке мероприятий по улучшению состояния устойчивости дамб гидроотвалов на реке Еловка и в выработке пластов Красногорский-II при их подработке шахтами Байкаимская и им. А.Д. Рубана.

8. Обязательным мероприятием на всех этапах существования гидроотвалов, в том числе при их подработке, является мониторинг безопасности, включающий периодические инженерно-геологические исследования, гидрогеологические измерения, наблюдения за деформациями поверхностей земли и гидроотвала, геомеханические расчеты и технологический контроль.

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 натуральных наблюдений за деформациями в формирующейся мульде сдвижения. Наилучшая сходимость результатов моделирования с натурными данными достигаются 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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авершин, С.Г. Некоторые свойства процессов сдвижения горных пород и вопросы расчета сдвижений / С.Г. Авершин // сб. тр. ВНИМИ. – 1961. – № 43. – С. 3-21.
2. Авершин, С.Г. Расчет деформаций массива горных пород под влиянием подземных разработок / С.Г. Авершин – Л.: ВНИМИ, 1960. – 87 с.
3. Авершин, С.Г. Дифференциальное уравнение процесса сдвижения горных пород и деформаций земной поверхности в результате подземных горных работ / С.Г. Авершин, Р.А. Муллер // Вопросы проектирования и защиты зданий и сооружений от влияния горных выработок. – М.: Центрогипрошахт, 1961. – С. 9-21.
4. Акимов, А.Г. Геомеханические аспекты сдвижения горных пород при подземной разработке угольных и рудных месторождений / А.Г. Акимов – СПб.: ВНИМИ, 2003. – 166 с.
5. Аксенов, С.Г. Комплексная система обоснования конструкций ограждающих сооружений гидроотвалов горно-обогатительных комбинатов: автореф. дис. ... д.т.н.: 05.23.07 / С.Г. Аксенов. – СПб., 1991. – 38 с.
6. Бахаева, С.П. Оценка состояния и прогноз устойчивости техногенных грунтовых массивов угольных разрезов на основе комплексного мониторинга: дис ... д-ра техн. наук: 25.00.16 / Светлана Петровна Бахаева. – Кемерово, 2008. – 267 с.
7. Бахаева С.П. Прогноз параметров дамбы на основе моделирования напряженно-деформированного состояния откоса / С.П. Бахаева, Д.В. Гурьев // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2016. – № 1 (113). – С. 12-17.
8. Бахаева, С.П. Исследование гидрогеомеханических процессов техногенных массивов / С.П. Бахаева, С.И. Протасов, Е.В. Костюков, А.И. Федосеев, С.В. Практика // Вестник Кузбасского государственного технического университета, № 3 (47), 2005. с. 41-43.

9. Борщ-Компониец, В.М. Оценка влияния трещиноватости на устойчивость массивов горных пород / В.М. Борщ-Компониец, Б.А. Крайнев, А.П. Логинский, А.Б. Макаров, Н. Мусаев // Горный журнал. – 1960. – № 10. – С. 42-44.

10. Бронштейн, Б.Е. К определению изменения свойств грунтов при их подработке / Б.Е. Бронштейн, С.З. Хаджинов // Строительство сооружений над горными выработками. – М.: Недра, 1965. – С. 9-16.

11. Гадымба, И.М. Экспериментальные исследования по определению изменения прочности и деформативности грунтов подрабатываемого массива / И.М. Гадымба, С.Е. Шагалов // Прогнозирование сдвижений и деформаций горных пород и устойчивости бортов разрезов при разработке угольных пластов. – Л.:ВНИМИ, 1981. – С. 31-41.

12. Гальперин, А.М. Геомеханика открытых горных работ / А.М. Гальперин. – М.: МГГУ, 2012. – 480 с.

13. Гальперин, А.М. Освоение техногенных массивов на горных предприятиях / А.М. Гальперин, Ю.И. Кутепов, Ю.В. Кириченко, А.В. Киянец и др. – М.: Горная книга, 2012. – 336 с.

14. Гальперин, А.М. Техногенные массивы и охрана природных ресурсов: Том I. Насыпные и намывные массивы / А.М. Гальперин, В. Фёрстер, Х.-Ю. Шеф. – М.: МГГУ, 2006. – 391 с.

15. Гальперин, А.М. Специальные вопросы инженерной геологии при гидромеханизации открытых разработок / А.М. Гальперин. – М.: Изд-во МГИ, 1974. – 72 с.

16. Гальперин, А.М. Геомеханика открытых горных работ: Учебник для вузов / А.М. Гальперин – М.: Изд-во МГИ, 2003. – 473 с.

17. Гальперин, А.М. Инженерно-геологическое и геотехническое обеспечение возведения, консервации и рекультивации гидроотвалов и хвостохранилищ (анализ 30-летнего опыта) / А.М. Гальперин, В.С. Зайцев, Ю.В. Кириченко // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. – 2000. – № 4. – С. 307-315.

18. Господариков, А.П. Математическое моделирование прикладных задач механики горных пород и массивов / А.П. Господариков, М.А. Зацепин // Записки Горного института. – 2014. – Т. 207. – С. 217-221.

19. ГОСТ 12248-2010. Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости: утв. МНТКС 06.10.2010 : ввод. в действие с 01.01.2012. –СПб.: Стандартиформ, 2011. – 82 с.

20. ГОСТ 5180-2015. Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик: утв. МГС 22.07.2015 : ввод. в действие с 01.04.2016. –СПб.: Стандартиформ, 2016. – 23 с.

21. Гусев, В.Н. Прогноз безопасных условий разработки свиты угольных пластов под водными объектами на основе геомеханики техногенных водопроводящих трещин / В.Н. Гусев // Записки Горного института. – 2016. – С. 638-643.

22. Демченко, А.В. Формирование дренажных элементов гидроотвалов разрезов Кузбасса для повышения их вместимости и устойчивости: дис. ... канд. техн. наук: 05.15.03 / Демченко Александр Васильевич. – М., 1999. – 147 с.

23. Евдокимов П.Д. Проектирование и эксплуатация хвостовых хозяйств обогатительных фабрик / П.Д. Евдокимов, Г.Т. Сазонов. – М.: Недра, 1978. – 438 с.

24. Ермакова, И.А. Численное моделирование геомеханического состояния отвала на водонасыщенном основании / И.А. Ермакова, С.П. Бахаева, А.В. Дягилева // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2014. – № 4 (104). – С. 11-15.

25. Ермашов, А.О. Геомеханическое обоснование расчетов оседаний земной поверхности при добыче калийно-магниевых руд (на примере Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей): дис. ... к-та техн.наук: 25.00.20 / Ермашов Алексей Олегович. – Пермь, 2015. – 133 с.

26. Ермошкин, В.В. Разработка методики геолого-маркшейдерского обеспечения безопасности гидроотвалов вскрышных пород (на примере

гидроотвалов Кузбасса): дис. ... канд. техн. наук: 25.00.16 / Ермошкин Василий Васильевич. – М., 2001. – 162 с.

27. Жабко, А.В. О проблемах и современных методах оценки устойчивости откосов на открытых горных работах / А.В. Жабко // Проблемы недропользования. – 2018. – № 3 (18). – С. 96-107.

28. Жариков, В.П. Инженерно-геологическое и гидрогеологическое обоснование эксплуатации и рекультивации гидроотвалов вскрышных пород Центрального Кузбасса: дис. ... канд. техн. наук: 25.00.16 / Жариков Вениамин Петрович. – М., 2005. – 186 с.

29. Зверинский, В.Н. Определение параметров однородных и многослойных откосов / В.Н. Зверинский, Л.К. Либерман // Устойчивость откосов на карьерах. – Белгород-Орджоникидзе, 1974. – С. 93-96.

30. 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.

31. Земисев, В.Н. Расчет максимальных горизонтальных сдвижений в подработанной толще пород и на земной поверхности / В.Н. Земисев // Труды ВНИМИ – Л.: ВНИМИ, 1961. – № 42. – С. 154-157.

32. Зенкевич, О. Метод конечных элементов в технике / О. Зенкевич. – М.: Мир, 1975. – 589 с.

33. Зотеев, В.Г. Теоретические основы обеспечения устойчивости и формирования скальных откосов глубоких карьеров: дис. ... д.т.н.: 05.15.03 / В.Г. Зотеев. – Свердловск, 1981. – 403 с.

34. Зотеев, О.В. Моделирование напряженно-деформированного состояния массива горных пород численными методами / О.В. Зотеев // Изв. вузов. Горный журнал. – 2003. – №5.

35. Зубков, В.В. Формирование зоны техногенных водопроводящих трещин над очистной выработкой / В.В. Зубков, И.А. Зубкова // Международный научно-исследовательский журнал. – 2017. – № 05 (59). – С. 172–175.

36. Зубков, В.В. О моделировании сдвижения для обеспечения экологической безопасности на подрабатываемых территориях / В.В. Зубков, А.М. Линьков // Маркшейдерский Вестник. – 2013. – № 4. – С. 5-8.

37. Зубов, В.П. Оценка процессов сдвижения горных пород при отработке крутого пласта на основе метода конечных элементов / В.П. Зубов, Е.Р. Ковальский, К.К. Вьет // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2015. – № 2. – С. 15-19.

38. Инструкция по наблюдениям за сдвижением горных пород и земной поверхности при подземной разработке рудных месторождений. – М.: Недра, 1988. – 112 с.

39. Исомов, Р.Д. Оценка и прогноз устойчивости прибортового массива карьера с учетом особенностей его напряженного состояния: дис. ... канд. техн. наук / Р. Д. Исомов. – М., 1988. – 137 с.

40. Исследовать условия устойчивости высоких отвалов и гидроотвалов с учетом процессов фильтрационной консолидации песчано-глинистых пород: Отчет о НИР – Л.:ВНИМИ, 1975. – 59 с.

41. Исследовать изменение свойств грунта как основания подрабатываемых сооружений с целью уточнения действующих нагрузок: Отчет о НИР – Караганда: Казахский филиал ВНИМИ, 1980. – 220 с.

42. Казаковский Д.А. Сдвижение земной поверхности под влиянием горных разработок / Д.А. Казаковский. – Харьков: Углетехиздат, 1953. – 228 с.

43. Казанин, О.И. Анализ причин провалов земной поверхности при отработке угольного пласта Байкаимский на шахте «Красноярская» ОАО «СУЭК-Кузбасс» / О.И. Казанин, М.Г. Мустафин, А.А. Мешков // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2013. – № 4. – С. 257-261.

44. Каминская, В.И. Основные принципы управления процессом намыва сооружений / В.И. Каминская // Труды ВНИИГ «Технология производства специальных строительных работ». – 1993. – С. 3-14.

45. Карасев, М.А. Прогноз осадки земной поверхности, вызванной строительством подземной скоростной железной дороги на участке Sants – La Sagrera (Барселона) / М.А. Карасев // Записки Горного института. – 2012. – Т. 199. – С. 64-70.

46. Карасев, М.А. Прогноз деформаций земной поверхности при строительстве станций метрополитена в твердых глинах / М.А. Карасев, Н.А. Беляков // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2016. – № 1. – С. 139-155.

47. Кашников, Ю.А. Управление процессом сдвижения горных пород при подработке борта карьера / Ю.А. Кашников, С.Г. Ашихмин, Д.В. Шустов // Маркшейдерский вестник. – 2009. – № 6 (74). – С. 47-53.

48. Кириченко, Ю.В. Управление состоянием массивов гидроотвалов для эффективного использования намывных территорий: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.15.03 / Кириченко Юрий Васильевич. – М., 1983. – 20 с.

49. Кириченко, Ю.В. Устойчивость откосных сооружений намывных массивов Михайловского ГОКа / Ю.В. Кириченко, В.Н. Зуй, В.А. Лаушкина, Ю.С. Спиридонов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2004. – № 5. – С. 153-160.

50. Киянец, А.В. Инженерно-геологическое обоснование мероприятий по управлению устойчивостью бортов в песчано-глинистых отложениях: автореф. дис. ... к.т.н.: 05.15.15 / Александр Валерьевич Киянец. – М., 1990. – 23 с.

51. Клейменов, Р.Г. Комплексный мониторинг техногенных грунтовых массивов гидроотвалов угольных разрезов: дис. ... канд. техн. наук: 25.00.16 / Клейменов Роман Геннадьевич. – Кемерово, 2011. – 124 с.

52. Клещев, П.Е. Результаты экспериментальных исследований при подработке промплощадки шахты Южно-Камышинская / П.Е. Клещев, Р.А. Муллер, И.А. Петухов, С.Г. Синопальников, С.Е. Шагалов // Проектирование и строительство угольных предприятий. – 1973. – №9. – С. 22-23.

53. Кратч, Г. Сдвигение горных пород и защита подрабатываемых сооружений / Г. Кратч. – М.: Недра, 1978. – 494 с.

54. Кузнецова, И.В. Инженерно-геологическое обеспечение безопасности горных работ при ликвидации гидроотвалов: дис. ... к-та геол.-мин. наук: 25.00.08 / Кузнецова Ирина Владимировна. – СПб., 2011. – 184 с.

55. Кутепов, Ю.И. Научно-методические основы инженерно-геологического обеспечения отвалообразования при разработке угольных месторождений: дис. ... докт. техн. наук: 05.15.15 / Кутепов Юрий Иванович. – М., 1999. – 351 с.

56. 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.

57. Кутепов, Ю.И. Изучение порового давления в намывных массивах / Ю.И. Кутепов, Н.А. Кутепова // Геоэкология. – 2006. – № 2. – С. 205-215.

58. Кутепов, Ю.И. Закономерности формирования порового давления при гидроотвалообразовании и отсыпке «сухих» отвалов / Ю.И. Кутепов, Н.А. Кутепова // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2008. – № 11. – С. 212-220.

59. Кутепов, Ю.И. Обеспечение безопасности гидроотвалов при открытой добыче угля / Ю.И. Кутепов, Н.А. Кутепова, В.В. Ермошкин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2007. – № 1. – С. 125-131.

60. 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.

61. Кутепов, Ю.И. Геомеханическое обоснование отсыпки отвалов «сухих» пород на гидроотвалах / Ю.И. Кутепов, Н.А. Кутепова, М.А. Карасев, Н.Г. Фоменко // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. – 2015. – № 3. – С. 220-225.

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

63. 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.

64. Кутепова, Н.А. Инженерно-геологическое обоснование прогноза гидрогеомеханических процессов при ведении горных работ: дис. ... д-ра техн.наук: 25.00.16 / Кутепова Надежда Андреевна. – СПб., 2011. – 424 с.

65. Кутепова, Н.А. Закономерности оползневых процессов на подрабатываемых территориях / Н.А. Кутепова // Геоэкология. – 2005. – № 5. – С. 431-441.

66. Маслов, Н.Н. Основы механики грунтов и инженерной геологии. Изд.2, перераб. и доп. / Н.Н. Маслов. – М.: Высшая школа, 1968. – 632 с.

67. Медянецв, А.Н. Сдвижение горных пород и земной поверхности под влиянием горных выработок / А.Н. Медянецв – Новочеркасск.: НПИ, 1976. – 84 с.

68. Медянецв, А.Н. Графики распределения сдвижений и деформаций земной поверхности над горными выработками в Донбассе / А.Н. Медянецв, М.А. Иофис, А.И. Мазурова // Труды ВНИМИ – Л.: ВНИМИ, 1962. – № 47. – С. 140-154.

69. Мироненко, В.А. Основы гидрогеомеханики / В.А. Мироненко, В.М. Шестаков. – М.: Недра, 1974. – 298 с.

70. Мироненко, И.А. Проблемы переукладки гидроотвалов вскрышных пород / И.А. Мироненко, С.И. Протасов // В сб.: Перспективы инновационного

развития угольных регионов России. Сборник трудов VI Международной научно-практической конференции. – 2018. – С. 146-149.

71. Могилин, А.В. Инженерно-геологическое обоснование технологии формирования отвальных насыпей на гидроотвалах: дис. ... канд. техн. наук: 25.00.16, 25.00.22 / Могилин Александр Валентинович. – М., 2002. – 181 с.

72. Морозов, М.Г. Использование эффекта сегрегации техногенных отходов для решения эколого-технических задач горного производства: дис. ... к.т.н.: 11.00.11 / Михаил Григорьевич Морозов. – Екатеринбург, 1998. – 112 с.

73. Мосейкин, В.В. Геолого-экологическая оценка намывных техногенных массивов хранилищ горнопромышленных отходов: дис. ... д-ра техн. наук: 05.15.15 / Мосейкин Владимир Васильевич. – М., 2000. – 359 с.

74. Мустафин, М.Г. Моделирование разрушения массива горных пород в процессе подвигания очистного забоя с разной скоростью / М.Г. Мустафин // Записки Горного института. – 2007. – Т. 171. – С. 130-133.

75. Мустафин М.Г. Проблемные вопросы сдвижения горных пород / М.Г. Мустафин, С.Н. Зеленцов, Е.И. Кузнецова, А.А. Рожко // Записки Горного института. – 2010. – Т. 185. – С. 227-230.

76. Нурок, Г.А. Гидроотвалы на карьерах / Г.А. Нурок, А.Г. Лутовинов, А.Д. Шерстюков. – М.: Недра, 1977. – 308 с.

77. Нурок, Г.А. Процессы и технология гидромеханизации открытых горных работ / Г. А. Нурок. – М.: Недра, 1985. – 470 с.

78. О безопасности гидротехнических сооружений [Электронный ресурс]: федер. закон от 21.07.97 № 117-ФЗ, ред. от 29.07.2018 – Режим доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_15265/.

79. ОДМ 218.001-2009. Рекомендации по проектированию и строительству водопропускных сооружений из металлических гофрированных структур на автомобильных дорогах общего пользования с учетом региональных условий (дорожно-климатических зон): утв. Росавтодор 21.07.2009: ввод. в действие с 21.07.2009. – М.: Росавтодор, 2009. – 202 с.

80. ОДМ 218.2.006-2010. Рекомендации по расчету устойчивости оползнеопасных склонов (откосов) и определению оползневых давлений на инженерные сооружения автомобильных дорог: утв. Росавтодор 30.03.2011: ввод. в действие с 01.04.2011. – М.: Росавтодор, 2010. – 114 с.

81. Оценка гидрогеомеханических условий ведения горных работ по пласту Полысаевский-II подземного участка филиала «Моховский УР» под гидроотвалом на реке Еловка и разработка мероприятий по безопасным условиям эксплуатации гидроотвала // отчет о НИР – СПб.: ООО НПФ «Карбон», 2011. – 70 с.

82. Патент 2477792 РФ, С1, МПК E21C 39/00. Способ определения высоты зоны водопродящих трещин над выработанным пространством на пластовых месторождениях / В.Н. Гусев, А.С. Миронов, Д.А. Илюхин. Опубл. 20.03.2013. Бюл. № 8.

83. ПБ 03-438-02. Правила безопасности гидротехнических сооружений накопителей жидких промышленных отходов: утв. Госгортехнадзор России 28.01.2002: ввод. в действие с 28.01.2002. – М.: НТЦ «Промышленная безопасность», 2010. – 119 с.

84. ПБ 07-269-98. Правила охраны сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных горных разработок на угольных месторождениях: утв. Минтопэнерго РФ 16.03.1998 : ввод. в действие с 01.10.1998. – СПб.: ВНИМИ, 1998. – 291 с.

85. Петухов, И.А. К вопросу распределения сдвижений поверхности / И.А. Петухов // Труды ВНИМИ – Л.: ВНИМИ, 1954. – № 29. – С. 86-99.

86. Петухов, И.А. Основные направления исследований сдвижений горных пород, охраны сооружений и природных объектов при разработке угольных месторождений / И.А. Петухов // Труды ВНИМИ – Л.: ВНИМИ, 1976. – № 100. – С. 77-85.

87. Правила обеспечения устойчивости откосов на угольных раз-резах. (Минтопэнерго РФ, РАН, Гос. НИИ горн. геомех. и маркшейд. дела –Межотраслевой научн. центр ВНИМИ). – СПб, 1998. – 208 с.

88. Провести исследования по разработке геомеханических схем сдвижения горных работ при совместной разработке угольных пластов открытым и подземным способом: отчет о НИР – Л.:ВНИМИ, 1989. – 98 с.

89. Протосеня А.Г. Геомеханика: учебное пособие / А. Г. Протосеня, О. В. Тимофеев – СПб.: Санкт-Петербургский Государственный Горный ин-т, 2008. – 117 с.

90. Протосеня, А.Г. Прогноз осадок земной поверхности при строительстве метрополитена проходческими комплексами с пригрузом забоя / А.Г. Протосеня, Н.Т. До // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2016. – № 1. – С. 31-34.

91. Протосеня, А.Г. Разработка численной модели прогноза деформаций грунтового массива при строительстве полузаглубленного сооружения в программном комплексе Abaqus / А.Г. Протосеня, М.А. Карасев // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2014. – № 2. – С. 2-6.

92. Протосеня, А.Г. Развитие методов прогноза оседания земной поверхности при строительстве подземных сооружений в условиях плотной городской застройки / А.Г. Протосеня, М.А. Карасев // Метро и тоннели. – 2016. – № 6. – С. 87-91.

93. 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.

94. Пустовойтова, Т.К. Совершенствование методов расчета устойчивости откосов / Т.К. Пустовойтова, А.М. Мочалов, А.Н. Гурин // Сб. научных трудов «70 лет ВНИМИ» – СПб: ВНИМИ, 1999.

95. РД 03-259-98. Инструкция о порядке ведения мониторинга безопасности гидротехнических сооружений предприятий, организаций, подконтрольных органам Госгортехнадзора России // утв. Госгортехнадзор России 12.01.1998: введ. в действие с 12.01.1998 – М.: НТЦ «Промышленная безопасность», 2010. – 12 с.

96. РД 03-443-02. Инструкция о порядке определения критериев безопасности и оценки состояния гидротехнических сооружений накопителей жидких промышленных отходов на поднадзорных Госгортехнадзору России производствах, объектах и в организациях // утв. Госгортехнадзор России 04.02.2002: ввод. в действие с 10.06.2002. – М., 2002. – 17 с.

97. Самоделкина, Н.А. Математическое моделирование деформаций земной поверхности в условиях крупномасштабного растворения соляных пород / Н.А. Самоделкина, А.А. Барях // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2009. – № 7. – С. 240-245.

98. Саркисян, А.Х. Инженерно-геологическая оценка и обоснование параметров гидроотвалов на различных этапах существования (на примере гидроотвалов Кузбасса): дис. ... канд. техн. наук: 25.00.16 / Саркисян Арарат Христофорович. – М., 2004. – 182 с.

99. Сахно, И.Г. Математическое моделирование сдвижений горного массива над одиночной лавой / И.Г. Сахно, Н.Н. Грищенко, Ф.М. Голубев // Наукові праці УкрНДМІ НАН України. – 2013. – № I (13). – С. 209-219.

100. Сергина, Е.В. Принципы организации и проведения мониторинга безопасности ПТС при открытой разработке угля на разрезе «Кедровский» в Кузбассе / Е.В. Сергина // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2013. – № 9. – С. 409-412.

101. Сергина, Е.В. Комплексный мониторинг состояния природно-технических систем открытой разработки угольных месторождений: дис. ... к-та техн. наук: 25.00.16 / Сергина Елена Викторовна. – СПб., 2015. – 165 с.

102. СН 522-79. Инструкция по проектированию, строительству и эксплуатации гидротехнических сооружений на подрабатываемых горными работами территориях: утв. Госстрой СССР 21.12.1979: ввод. в действие с 01.01.1981. – М.: Стройиздат., 1981. – 29 с.

103. СП 11-105-97. Инженерно-геологические изыскания для строительства. Часть I. Общие правила производства работ: Госстрой России 14.10.1997: ввод. в действие с 01.03.1998. – М.: ФГУП ЦПП, 2004. – 43 с.

104. СП 131.13330.2012. Строительная климатология: утв. Минрегион России 30.06.2012: введ. в действие с 01.01.2013. – М.: Минстрой России, 2015. – 124 с.

105. СП 14.13330.2014. Строительство в сейсмических районах: утв. Минстрой России 18.02.2014: введ. в действие с 01.06.2014. – М.: Минстрой России, 2014. – 131 с.

106. СП 58.13330.2012. Гидротехнические сооружения. Основные положения: утв. Минрегион России 29.12.2011: введ. в действие с 01.01.2013. – М.: Минрегион России, 2012. – 39 с.

107. Справочник (кадастр) физических свойств горных пород / Под ред. Н.В. Мельникова, В.В. Ржевского, М.М. Протодяконова. – М.: Недра, 1975. – 279 с.

108. Турчанинов, И.А. Основы механики горных пород / И.А. Турчанинов, М.А. Иофис, Э.В. Каспарьян. – Л.: Недра, 1985. – 503 с.

109. Фадеев, А.Б. Метод конечных элементов в геомеханике / А.Б. Фадеев. – М.: Недра, 1987. – 221 с.

110. Федоренко, Е.В. Метод расчета устойчивости путем снижения прочностных характеристик / Е.В. Федоренко // Транспорт РФ. – 2013. – № 6. – С. 24-26.

111. Федосеев, А.И. Опыт отработки намывных четвертичных пород с площади бывшего гидроотвала №3 ОАО «Разрез Кедровский» / А.И. Федосеев, В.Р. Вегнер, С.И. Протасов, С.П. Бахаева // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2004. – № 3. – С. 268-273.

112. Фисенко, Г.Л. Устойчивость бортов карьеров и отвалов / Г.Л. Фисенко. – М.: Недра, 1965. – 378 с.

113. Фисенко, Г.Л. Прочностные характеристики массива горных пород / Г.Л. Фисенко // Механика горных пород и маркшейдерское дело – М.: Углетехиздат, 1959. – С. 91-100.

114. Фоменко, Н.Г. Инженерно-геологическое обоснование параметров и технологии отвалообразования на гидроотвалах при высокой интенсивности

горных работ: дис. ... к-та техн.наук: 25.00.16 / Фоменко Николай Гаврилович. – М., 2016. – 171 с.

115. Фролов, А.Н. Комплексный подход к оценке состояния поверхности намывных золошлакоотвалов в различные периоды года: дис. ... к.т.н.: 05.23.07, 05.23.16 / Андрей Николаевич Фролов. – СПб., 2011. – 177 с.

116. Черемхина, А.П. Оценка закономерностей изменения инженерно-геологических условий устойчивости гидроотвалов вскрышных пород в зависимости от этапа эксплуатации: дис. ... к.т.н.: 25.00.16 / Черемхина Анастасия Петровна. – СПб., 2014. – 201 с.

117. Ческидов В.В. Инженерно-геологическое исследование пород основания ограждающих дамб хвостохранилища Стойленского ГОКа для повышения точности определения текущего коэффициента запаса устойчивости / В.В. Ческидов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2015. – С. 351-360.

118. Ческидов, В.В. Гидрогеомеханический мониторинг состояния откосных сооружений / В.В. Ческидов // Горная промышленность. – 2017. – № 4 (134). – С. 78-80.

119. Чугаев, Р.Р. Расчёт устойчивости земляных откосов и бетонных плотин на нескальном основании по методу круглоцилиндрических поверхностей обрушения / Р.Р. Чугаев – М.: Госэнергоиздат, 1963. – 144 с.

120. Шпаков, П.С. Численное моделирование напряженно-деформированного состояния массива в окрестности очистного пространства в программе «Phase 2» / П.С. Шпаков, В.Н. Долгоносков, А.А. Нагибин, Е.В. Кайгородова // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2015. – № 9. – С. 59-66.

121. Шпаков, П.С. Сравнительный анализ способов расчета предельных параметров откоса на слабом наклонном основании / П.С. Шпаков, М.В. Шпакова, В.Н. Долгоносков, О.В. Старостина // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2010. – № 4. – С. 302-306.

122. Ягунов, А.С. Закономерности сдвижения горных пород в Кузбассе / А.С. Ягунов. – СПб: ВНИМИ, 2000. – 206 с.
123. Bals, R. Beitrag zur Frage der Vorausberechnung bergbaulicher Senkungen / R. Bals // *Markscheidew.* – 1931. – Vol. 42. – pp. 98-111.
124. Bell, F.G. Mining and its Impact on the Environment / F.G. Bell, L.J. Donnelly –Taylor & Francis. – 2006. –561 p.
125. Beyer, F. On predicting ground deformation due to mining flat seams: Habilitation Thesis / F. Beyer // *Tech. Univ., Berlin.* – 1945.
126. Bishop, A.W. The use of slip circles in stability analysis of slopes / A.W. Bishop // *Geotechnique.* – 1955. – № 1 (5). – pp. 7–17.
127. Brady, B.H.G. Rock Mechanics for underground mining. 3rd edition / B.H.G. Brady, E.T. Brown –Springer Science. – 2005. –628 p.
128. Cao, S. Numerical simulation of land subsidence and verification of its character for an iron mine using sublevel caving / S. Cao, W. Song, D. Deng, Y. Lei, G. Lan // *International Journal of Mining Science and Technology.* –2016. –№ 2 (26). – pp. 327–332.
129. Coulomb, C.A. Essai sur une application des règles des maximis et minimis à quelques problèmes de statique relatifs à l'architecture / C.A. Coulomb // *Geotechnique.* – 1776. – Vol. 17. – pp. 11–26.
130. Coulthard, M.A. Numerical modelling of subsidence induced by underground coal mining / M.A. Coulthard, A.J. Dutton // *Key Questions in Rock Mechanics, Proc. U.S. Syrup. Rock Mechanics.* – 1988. – №29. – pp. 529-536.
131. Dey, R. Progressive failure of slopes with sensitive clay layers / R. Dey, B. Hawlader, R. Phillips, K. Soga // *Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Paris.* – 2013. – pp. 2177-2180.
132. Dutta, S., Finite element modeling of partially embedded pipelines in clay seabed using Coupled Eulerian-Lagrangian method / S. Dutta, B. Hawlader, R. Phillips // *Canadian Geotechnical Journal.* – 2014. – Vol. 52. – No. 1. – pp. 58-72.

133. Dutta, S. Numerical Investigation of dynamic embedment of off-shore pipelines / S. Dutta, B. Hawlader, R. Phillips // Proc. of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Paris. – 2013. – pp. 2347-2350.
134. Ehrhardt, W., Die Vorausberechnung von Senkung, Schiefelage und Kriimmung iiber dem Abbau in flacher Lagerung / W. Ehrhardt, A. Sauer // Bergb.-Wiss. – 1961.
135. Fellunius, W. Calculations of the Stability of Earth Dams / W. Fellunius // Proceedings of the Second Congress of Large Dams,. – 1936. – Vol. 4. – pp. 445-463.
136. Gao, F. Evaluation of coal longwall caving characteristics using an innovative UDEC Trigon approach / F. Gao, D. Stead, J. Coggan // Computers and Geotechnics. – 2014. – Vol. 55. – pp. 448–460.
137. Guo, W. Fractured zone height of longwall mining and its effects on the overburden aquifers / W. Guo, Y. Zou, Q. Hou // International Journal of Mining Science and Technology. – 2012. – № 5 (22). – pp. 603–606.
138. Hutton, D.V. Fundamentals of Finite Element Analysis / D.V. Hutton. – New York: The McGraw-Hill Companies, Inc., – 2004. – 505 p.
139. Islam, M.R. Finite element modeling of stress distributions and problems for multi-slice longwall mining in Bangladesh, with special reference to the Barapukuria coal mine / M.R. Islam, D. Hayashi, A.B.M. Kamruzzaman // International Journal of Coal Geology. – 2009 – № 2 (78). – pp. 91–109.
140. Janbu, N. Stability analysis of Slopes with Dimensionless Parameters: Thesis for the Doctor of Science in the Field of Civil Engineering, Harvard University Soil Mechanics Series, 1954. – 87 p.
141. Kay, D.R. Numerical modelling of mine subsidence at Angus Place Colliery / D.R. Kay, K.E. McNabb, J.P. Carter // Proc. Symp. Computer Methods and Advances in Geomechanics, January. – 1991. – pp. 999–1004.

142. Keilich, W. Numerical modelling of mining subsidence, upsidence and valley closure using UDEC: PhD Thesis / W. Keilich. – University of. Wol-longong, 2009. – 380 p.

143. Keilich, W. Numerical modelling of mining subsidence, upsidence and valley closure using UDEC / W. Keilich // Engineering. – 2009.

144. Keilich W., Seedsman R.W., Aziz N. Numerical Modelling Of Min-ing Induced Subsidence / W. Keilich, R.W. Seedsman, N. Aziz // Coal Opera-tors' Con-ference. – 2006. – pp. 313-326.

145. Khoa, H.D.V. Numerical simulation of spudcan penetration using cou-pled Eulerian-Lagrangian method / H.D.V. Khoa // Computer Methods and Recent Advances in Geomechanics: 14th Conference, Japan. – 2014. – pp. 199-204.

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

147. Kutepov, Y.I. Substantiation of Safe Conditions During Under-mining of Hydraulic Waste Disposal / Y.I. Kutepov, A.S. Mironov, M.V. Sa-blin, E.B. Borger // E3S Web Conf. IIIrd International Innovative Mining Symposium. – 2018. – Vol. 41. – 5 p.

148. Kutepov, Y.Y. The study of formation mechanism of earth surface fail-ures due to longwall coal mining / Y.Y. Kutepov // Geomechanics and Geo-dynam-ics of Rock Masses: Proc. of the 2018 European Rock Mechanics Sym-posium. – 2018. – Vol. 2. – pp. 1615-1619.

149. Kutepov, Y.Y. Geomechanical problems during the hydraulic fills oper-ation 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.

150. Li, Y. Impact of longwall mining on groundwater above the longwall panel in shallow coal seams / Y. Li, S.S. Peng, J. Zhang // Journal of Rock Mechan-ics and Geotechnical Engineering. – 2015. – № 3 (7). – pp. 298–305.

151. Morgenstern, N.R. The Analysis of the Stability of General Slip Surfaces / N.R. Morgenstern, V.E. Price // *Géotechnique*. – 1965. – № 1 (15). – pp. 79-93.
152. Muller, L. Der Felsbau, Vol. 1 / L. Muller –Stuttgart: Enke, 1963.
153. Newman, C. Assessment of potential impacts to surface and sub-surface water bodies due to longwall mining / C. Newman, Z. Agioutantis, G. Boede, J. Leon // *International Journal of Mining Science and Technology*. – 2017. – Vol. 27(1). – pp. 57-64.
154. Nuric, A. Modeling and Computer Simulation of Ground Movement Above Underground Mine / A. Nuric, S. Nuric, L. Kricak, I. Lapandic, R. Husagic // *International Journal of Environmental, Chemical, Ecological, Geological and Geophysical Engineering*. – 2012. – № 9 (6). – pp. 579–587.
155. Oka F., et al. Computer Methods and Recent Advances in Geomechanics –London: CRC Press, 2012. –2047 p.
156. Plaxis 3D. Справочное пособие / НИИ-Информатика, 2017. –434 с.
157. Plaxis 3D. Пособие по моделям материалов / НИИ-Информатика, 2017. –211 с.
158. Plaxis 3D. Научное пособие / НИИ-Информатика, 2017. –59 с.
159. Qiu, G. Explicit modeling of cone and strip footing penetration under drained and undrained conditions using a visco-hypoplastic model / G. Qiu, J. Grabe // *Geotechnik*. – 2012. – No. 3. – Vol. 34. – pp. 205-217.
160. Qiu, G. Application of coupled Eulerian-Lagrangian method to geotechnical problems with large deformation / G. Qiu, S. Henke, J. Grabe // *Computers and Geotechnics*. – 2011. – No. 1. – Vol. 38 – pp. 30-39.
161. Ren, G. A Study of Angle of Draw in Mining Subsidence Using Numerical Modeling Techniques / G. Ren, J. Li // *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*. – 2008. – 14 p.
162. Ribeiro e Sousa, L., et al. Innovative numerical modelling in geomechanics / L. Ribeiro e Sousa. – London: CRC Press, 2012. – 475 p.
163. Sarma, S.K. Stability Analysis of Embankment and Slopes / S.K. Sarma // *Geotechnique*, Vol. 23 (3), 1973. pp. 423-433.

164. Seccombe, R. Numerical Modelling of Mining Subsidence: Bachelor Thesis / R. Seccombe. – University of Southern Queensland, 2014. – 124 p.

165. Slide. 2D limit equilibrium slope stability for soil and rock slopes: User's guide / Rocscience Inc., 2002. – 196 p.

166. Spencer, E.A. Method of analysis of the Stability of Embankments Assuming Parallel Inter-Slice Forces / E.A. Spencer // Géotechnique. – 1967. – № 1 (17). – pp. 11–26.

167. Suchowerska Iwanec, A.M. The geomechanics of single-seam and multi-seam longwall coal mining: PhD Thesis / A.M. Suchowerska Iwanec. – The University of Newcastle, 2014. – 304 p.

168. Suchowerska Iwanec, A.M. Geomechanics of subsidence above single and multi-seam coal mining / A.M. Suchowerska Iwanec, J.P. Carter, J.P. Hambleton // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. – 2016. – no. 3. – Vol. 8. – pp. 304-313.

169. Vyazmensky, A. Combined finite-discrete element modelling of surface subsidence associated with block caving mining / A. Vyazmensky, D. Elmo, D. Stead, J.R. Rance // Proc. of 1st Canada - U.S. Rock Mechanics Symposium, Vancouver, Canada. – 2007. – pp. 467–475.

170. Wardle, L.J. Application of the displacement discontinuity method to the planning of coal mine layouts / L.J. Wardle, J.R. Enever // Proc 5th Congress of the international society for rock mechanics, Melbourne. – 1983. – pp. E61-69.

171. Whittaker, B.N. Subsidence. Occurrence, Prediction and Control / B.N. Whittaker, D.J. Reddish – Amsterdam: Elsevier Science Publishers B.V., 1989. – 519 p.

172. Wittke, W. Rock mechanics based on an anisotropic jointed rock model / W. Wittke. – Berlin: Wilhelm Ernst & Sohn, 2014. – 891 p.