

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»

Липина Александра Валерьевна

**ОБОСНОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ СИСТЕМЫ «ВНУТРЕННИЙ ОТВАЛ –
ПРИБОРТОВОЙ МАССИВ» ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ГИДРОГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ
УСЛОВИЙ РАЙОНА ОТРАБОТКИ УГОЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ**

Специальность 2.8.3

«Горнопромышленная и нефтегазопромысловая геология, геофизика,
маркшейдерское дело и геометрия недр»

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель

к.т.н., доцент Щёкина Марина Владимировна

Москва, 2023

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. В современных экономических условиях большая часть разработки угольных месторождений ведется открытым способом. Усложнение горно-геологических условий, увеличение глубины добычи способствуют интенсивности накопления отвальных масс. Например, на сегодняшний день некоторые угольные предприятия перемещают более 15 м³ пустой породы при добыче 1 тонны угля, в ближайшей перспективе это значение увеличится в 1,5 – 2 раза. Появление более производительной техники, несомненно, нивелирует затраты на перемещение все большего объема горной массы в процессе добычи, однако это, в общем и целом, ухудшает общую экологическую обстановку в угледобывающих регионах.

Значительная часть угольных месторождений, которые на сегодняшний день осваиваются в России, имеют сложное геологическое строение. Это обуславливает необходимость формирования внешних отвалов вскрышных пород, которые занимают большие площади земель. При освоении горизонтальных или пологих пластов технологически возможно формирование внутренних отвалов, в том числе с использованием бестранспортной схемы. Кроме того, в последние два десятилетия при разработке проектов по освоению новых месторождений или их участков рассматриваются варианты складирования горнопромышленных отходов в существующие выработки, что позволяет уменьшить потенциальные площади нарушенных земель и хотя бы частично восстановить рельеф поверхности. В связи с вышеизложенным, вопросы формирования и обеспечения устойчивости внутренних отвалов являются на сегодняшний день актуальными для отечественной и зарубежной науки.

Целью работы является оценка состояния системы «внутренний отвал – прибортовой массив» на основе моделирования изменения инженерно-геологических и гидрогеологических характеристик участка недр под влиянием природных и техногенных факторов.

Идея работы заключается в выявлении и анализе закономерностей изменения гидрогеомеханических условий системы «внутренний отвал – прибортовой массив» при добыче угля открытым способом для предотвращения оползневых явлений.

Задачи исследования:

- анализ опыта формирования внутренних отвалов на угледобывающих предприятиях и методов оценки их состояния;
- исследование инженерно-геологических, гидрогеологических и технологических факторов, влияющих на состояние внутренних отвалов, формируемых при отработке пологих угольных пластов, и прилегающих потенциально оползнеопасных территорий;
- оценка изменения физико-механических свойств техногенных масс внутренних отвалов под влиянием уплотнения и дополнительного увлажнения на основе анализа результатов

инженерно-геологических и гидрогеологических исследований, проведенных на площади расположения внутреннего отвала и прилегающих потенциально оползнеопасных территориях;

- моделирование изменения уровня водоносного горизонта, формирующегося под влиянием природных и техногенных факторов в теле внутреннего отвала на разных этапах его эксплуатации;

- разработка прогнозной модели состояния гидрогеомеханической системы «внутренний отвал – прибортовой массив»;

- оценка влияния внутреннего отвала «Южный» Ерунаковского поля Талдинского филиала АО «УК «Кузбассразрезуголь» на прилегающий не вовлеченный в отработку массив горных пород.

Научные положения:

1. На основании проведенного корреляционного анализа набора показателей вещественного состава, физических свойств техногенных отложений внутреннего отвала «Южный» Ерунаковского угольного разреза и периода нахождения в нем пород t установлено, что значимыми являются только временные зависимости угла внутреннего трения $\varphi(t)$, необходимые для прогнозирования состояния техногенной насыпи.

2. Построена гидрогеологическая модель территории расположения внутреннего отвала, учитывающая образующуюся вдоль борта выработки зону фильтрации и позволяющая определить положение водоносного горизонта на различных этапах формирования отвальной насыпи.

3. Установлено, что с течением времени значение коэффициента запаса устойчивости гидрогеомеханической системы «внутренний отвал – прибортовой массив» в условиях восстановления уровня водоносного горизонта, затрагивающего тело отвальной насыпи, изменяется по параболическому закону, и абсолютное значение коэффициента запаса устойчивости может снизиться на величину до 15% при достижении депрессионной кривой положения, наблюдаемого до начала ведения горных работ.

Для достижения поставленной цели в работе использован **комплекс методов**, включающий:

- анализ и обобщение опыта формирования, оценки и прогноза состояния внутренних отвалов угледобывающих предприятий, а также результатов инженерно-геологических и гидрогеологических исследований;

- математические, в том числе статистические, методы обработки, интерпретации инженерно-геологической и гидрогеологической информации, а также моделирования состояния отвальных массивов;

- методы гидрогеологического моделирования;
- методы оценки устойчивости откосных сооружений на основе теории предельного напряженного состояния массива горных пород.

Научная новизна исследования заключается в:

- определении корреляционной зависимости значения угла внутреннего трения техногенных отложений внутреннего отвала от времени их нахождения в теле насыпи;
- установлении закономерности изменения положения водоносного горизонта в теле внутреннего отвала на различных этапах формирования техногенного массива и изменения гидродинамической обстановки;
- определении закономерности изменения коэффициента запаса устойчивости внутреннего отвала в процессе восстановления положения депрессионной кривой в теле внутреннего отвала до абсолютных отметок, наблюдаемых в естественном водоносном горизонте до начала ведения горных работ.

Практическое значение заключается в:

- создании инструментария для построения гидрогеологической модели уровня техногенного водоносного горизонта, формируемого в теле внутреннего отвала угледобывающего предприятия;
- разработке модели гидрогеомеханической системы «внутренний отвал – прибортовой массив» для условий Ерунаковского каменноугольного месторождения;
- проведении оценки влияния отвальной насыпи на прибортовой массив в условиях естественного наклонного залегания пород, слагающих борт карьера и являющегося потенциально оползневым склоном.

Результаты диссертационного исследования переданы в отдел геомеханического контроля АО «УК «Кузбассразрезуголь» для оценки безопасности отработки пологих угольных пластов и устойчивости прилегающих потенциально оползнеопасных территорий.

Достоверность и обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается:

- использованием комплекса общепризнанных методов исследования свойств отложений естественного и техногенного массивов;
- проведением исследований с использованием сертифицированного оборудования с высокими метрологическими характеристиками;
- удовлетворительной сходимостью данных, полученных при гидрогеологическом моделировании, и результатов измерений, проведенных в наблюдательных скважинах.

Апробация работы. Содержание диссертационного исследования, полученные результаты и основные научные положения докладывались на всероссийских и международных научных конференциях, симпозиумах, форумах и семинарах: Юбилейном XXV Международном научном симпозиуме «Неделя горняка-2017» (Москва, 23–27 января 2017 года); XV Всероссийской конференции-конкурсе студентов и аспирантов «Актуальные проблемы недропользования» (Санкт-Петербург, 29–31 марта 2017 года); The XIVth, International Forum-Contest of Students and Young Researchers «Topical Issues of Rational Use of Natural Resources» (Saint-Petersburg, April 18–20, 2018); IVth International Innovative Mining Symposium, IIMS 2019 (Кемерово, 14–16 октября 2019 года), 5th International Innovative Mining Symposium, IIMS 2020 (Кемерово, 19–21 октября 2020 года); XXIX Международном научном симпозиуме «Неделя горняка-2021» (Москва, 25–29 января 2021 года), XXX Международном научном симпозиуме «Неделя горняка-2022» (Москва, 31 января – 4 февраля 2022 года), XXXI Международном научном симпозиуме «Неделя горняка-2023» (Москва, 30 января–3 февраля 2023 года)..

Личный вклад автора заключается в постановке цели и задач диссертационного исследования, формулировании основных научных положений, проведении анализа научно-технической литературы, осуществлении лабораторных исследований, обработке и интерпретации данных, выполнении гидрогеологического и геомеханического моделирования, анализе и обобщении полученных результатов, исследовании состояния системы «внутренний отвал – прибортовой массив» при изменении природных и техногенных факторов.

Публикации. Основные результаты исследований опубликованы в 9 научных работах, в том числе 6 – в изданиях, рекомендованных ВАК Министерства образования и науки РФ и индексируемых базой данных Scopus.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе проведен анализ опыта формирования техногенных массивов на угледобывающих предприятиях, а также общих тенденций в области складирования вскрышных пород при открытом способе добычи полезных ископаемых, отдельно рассмотрены перспективы и преимущества, используемых на сегодняшний день технологий.

Угольная промышленность является одной из основополагающих топливно-энергетического комплекса Российской Федерации. В последние годы в среднем наблюдается рост объемов добычи твердого топлива в нашей стране, при этом угольные компании и запасы самого полезного ископаемого весьма неравномерно распределены по территории РФ.

Наибольшие объемы добычи приходятся на относительно небольшую по площади Кемеровскую область.

Для Кузнецкого угольного бассейна на сегодняшний день свойственен достаточно жесткий дефицит территорий для формирования отвальных массивов, в связи с этим возникает необходимость разработки новых технологических решений по проектированию отвалов большей высоты, а также использование все более сложных с точки зрения инженерно-геологических и гидрогеологических условий территории для складирования.

Вопросами организации вскрышных работ и непосредственного формирования отвальных насыпей, в том числе в выработанном пространстве карьеров, а также, инженерно-геологического, гидрогеологического и геомеханического обеспечения отвалообразования и обеспечения устойчивости откосных сооружений занимались многие отечественные и зарубежные специалисты. Среди них наибольший вклад в развитие выше перечисленных направлений внесли: Мельников В.Н., Трубецкой К.Н., Ржевский В.В., Абелев М.Ю., Анистратов Ю.И., Арсентьев А.И., Бахаева С.П., Бондарик Г.К., Васильев А.Д., Васильева Н.В., Винницкий К.Е., Галустьян Э.Л., Гальперин А.М., Дашко Р.Э., Демченко А.В., Еременко Е.В., Еременко В.А., Жариков В.П., Зарецкий Ю.К., Иванов И.П., Ильин А.И., Истомин В.В., Кириченко Ю.В., Киянец А.В., Коваленко В.С., Коликов К.С., Косолапов А.И., Крячко О.Ю., Кутепов Ю.И., Кутепова Н.А., Медников Н.Н., Мельников Н.Н., Мироненко В.А., Мосейкин В.В., Мочалов А.М., Норватов Ю.А., Нурок Г.А., Панюков П.М., Пастихин Д.В., Певзнер М.Е., Пендин В.В., Подэрни Р.Ю., Попов В.Н., Попов И.И., Потапов М.Г., Пуневский С.А., Пустовойтова Т.К., Решетняк С.П., Русский И.И., Рутковский Б.Т., Сеинов Н.П., Селюков А.В., Семенов В.В., Сергина Е.В., Серый С.С., Стрельцов В.И., Таланин В.В., Томаков П.И., Федотенко В.С., Флорин В.А., Хохряков А.В., Цепилов И.И., Цытович Н.А., Ческидов В.В., Ческидов В.И., Чирков А.С., Шешко Е.Ф., Шпаков П.С., Ярп Л.А., Arshi An., Atkins L., Bell F.G., Carter T.G., Chen S.-H., Da Zhang, Dawson E.M., Derrington E., Diederichs M.S., Drescher A., Hoek E., Hustrulid W., Kuchta M., Martin R., Muller L., Roth W.H., Stewart T., Szwedzicki T., Tamaskovics N., Zhang X.Q., Zhi-hui Zhang, Zhou X., Zou J.X. Исследования перечисленных выше авторов легли в основу современной теории и практики проектирования и формирования отвальных массивов, а также разработки подходов по управлению их состоянием и рациональному природопользованию.

На сегодняшний день внутренние отвалы формируются по бестранспортной схеме с применением драглайнов, а также с использованием автомобильного и железнодорожного транспорта, в последнем случае вскрышные породы могут доставляться из соседних выработок.

При отсыпке внутренних и внешних отвалов вскрышных и вмещающих пород в них происходит постепенное формирование техногенного водоносного горизонта, который

обуславливает изменение как физико-механических свойств слагающего материала, так и определяет общую устойчивость насыпи.

Проведенный анализ природных и техногенных факторов, влияющих на состояние внутренних отвалов, показывает, что их необходимо рассматривать как сложную систему, прогнозирование состояния которой осуществляется на основе детализированной инженерно-геологической модели и при наличии достоверных оперативно поступающих данных мониторинга характеристик массива, обладающих наибольшей изменчивостью во времени. В рассматриваемом случае, несомненно, что гидрогеологические характеристики обладают наибольшей динамикой, поэтому требуются разработка соответствующих моделей положения водоносного горизонта при изменении природных значений техногенных факторов, а также систематических измерений с периодичностью, обеспечивающей их полноту и точность. Нужно отметить, что большое значение для определения устойчивости внутреннего отвала, имеет его положение относительно выемки (карьера или угольного разреза).

Во второй главе, посвященной оценке состояния внутренних отвалов на разных этапах их формирования, рассмотрена общая характеристика горно-геологических условий месторождений Кузнецкого угольного бассейна, особенности строения, климатических условий Ерунаковского каменноугольного месторождения.

Строение участков недр, освоение которых регламентируется лицензиями КЕМ 11702 ТЭ и КЕМ 01642 ТЭ в рамках вышеуказанного месторождения довольно простое и определяется их переходным положением от сложной присалаирской зоны к спокойной центральной части Кузнецкой впадины. Соотношение литологических разностей в границах участков недр, следующее: песчаники – 29%, алевролиты – 57%; уголь каменный – 14%, аргиллиты – менее 1%. В верхней части разреза породы сильно трещиноватые, так как они были подвержены процессам выветривания.

Песчаники и алевролиты Кузбасса обладают значительно отличающимися физико-механическими свойствами, в них может превалировать карбонатный или глинистый цемент. Во втором случае механические свойства (пределы прочности на сжатие и сдвиг, а также величины угла внутреннего трения и сцепления) имеют гораздо более низкие показатели, а при воздействии атмосферной влаги и температуры быстро разрушаются в насыпи отвала до щебенисто-дресвяных отложений с суглинистым заполнителем.

Для определения фактических свойств техногенных отложений внутреннего отвала «Южный» было пройдено четыре скважины, пересекающие тело насыпи на всю мощность. Отбор проб осуществлялся на основании районирования, выполненного с учетом времени складирования вскрышных пород. Были проведены испытания на 18 образцах с определением

основных физико-механических свойств, а также содержания ионов кальция, магния в техногенных отложениях (рисунок 1).

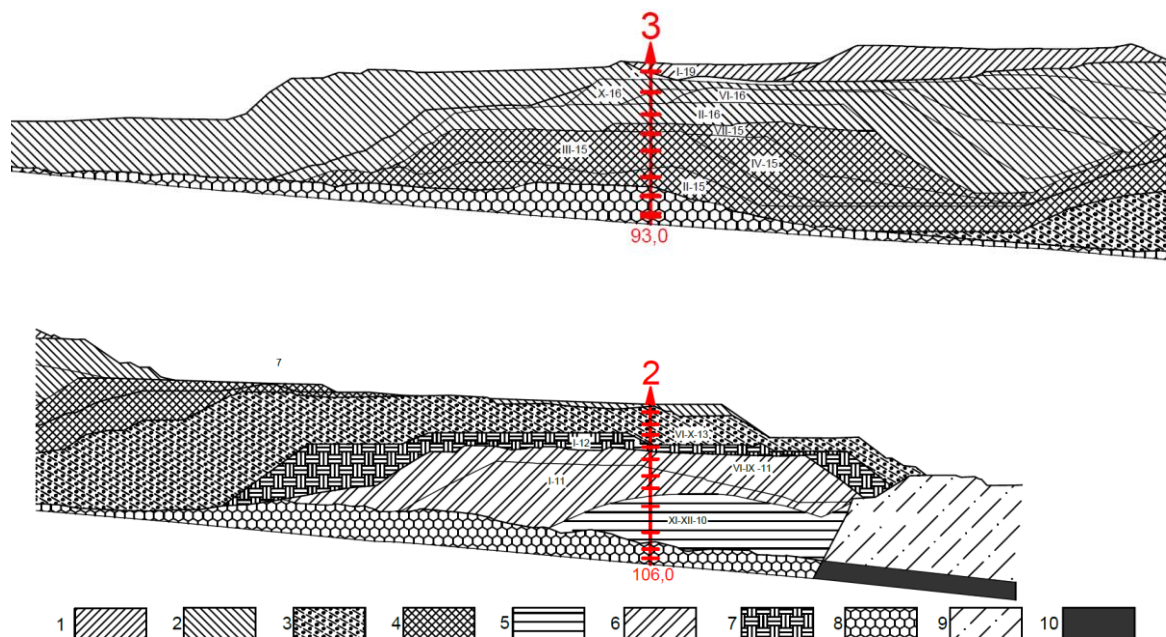


Рисунок 1 – Положение точек опробования отвальных масс в соответствии с порядком формирования отвала: 1-7 техногенные массы, отсыпанные в 2019, 2016, 2013, 2015, 2010, 2011, 2012 годах соответственно, 8 – техногенная насыпь, сформированная бестранспортным способом, 9 – вскрышные породы в борту отвала, 10 – угольный пласт

Для проведения лабораторных испытаний были изготовлены образцы горных пород из кернового материала, полученного в скважинах №1-4, с сохранением свойств и условий естественного залегания горных пород. Керновый материал был представлен монолитами с единичной длиной не менее 20 см и диаметром не менее 11 см.

Проведенный анализ результатов лабораторных исследований техногенных отложений показал, что, несмотря на протекающие процессы уплотнения за счет литостатического давления вышележащих пород, в первые пять лет в основании отвала формируется массив отложений, который имеет показатели механических свойств ниже, чем при их складировании. Данный фактор необходимо учитывать при прогнозировании состояния отвала на различных этапах его формирования. С высокой долей вероятности процессы выветривания со временем будут затухать и показатели механических свойств перестанут уменьшаться, а в результате процессов уплотнения под действием литостатического давления угол внутреннего трения, наоборот, будет несколько расти.

Корреляционный анализ данных, полученных в результате инженерно-геологических изысканий, показал, что взаимосвязи между большинством физико-механических свойств горных пород и временем их нахождения в теле отвала не выявлены. На состояние пород

оказывает влияние комплекс факторов, который включает состав отложений, скорость их выветривания в приповерхностных условиях, влажность, которая обусловлена формированием техногенного водоносного горизонта (таблица 1, рисунок 2).

Таблица 1 – Корреляционная матрица вещественного состава, показателей физико-механических свойств, а также глубины залегания и периода нахождения техногенных отложений в теле отвала «Южный» (интенсивность цвета отображает величину корреляционной связи)

	Глубина взятия образца	Период нахождения породы в отвале	Плотность	Влажность	Удельное сцепление пород	Угол внутреннего трения пород	Коэффициент фильтрации	Содержание песчаных частиц	Содержание пылеватых частиц
Глубина взятия образца	1	0,5861	0,2337	-0,1029	0,1367	-0,1627	0,2627	0,0905	0,0292
Период нахождения породы в отвале	0,5861	1	0,1975	-0,2832	-0,2633	-0,5118	0,3303	0,1904	-0,3926
Плотность	0,2337	0,1975	1	0,2265	0,1654	0,3432	0,2969	0,0141	0,0704
Влажность	-0,1029	-0,2832	0,2265	1	0,2517	-0,0746	-0,2924	-0,5787	0,6355
Удельное сцепление пород	0,1367	-0,2633	0,1654	0,2517	1	0,3745	-0,0344	-0,2423	0,2905
Угол внутреннего трения пород	-0,1627	-0,5118	0,3432	-0,0746	0,3745	1	0,192	-0,0397	0,2432
Коэффициент фильтрации	0,2627	0,3303	0,2969	-0,2924	-0,0344	0,192	1	0,0368	0,0231
Содержание песчаных частиц,	0,0905	0,1904	0,0141	-0,5787	-0,2423	-0,0397	0,0368	1	-0,8524
Содержание пылеватых частиц	0,0292	-0,3926	0,0704	0,6355	0,2905	0,2432	0,0231	-0,8524	1

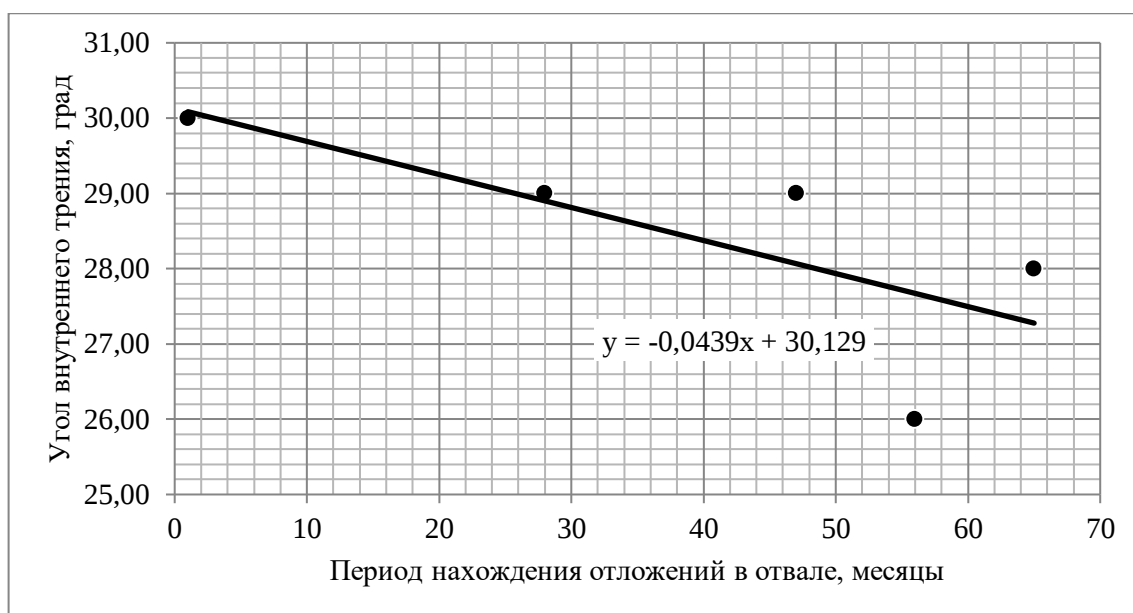


Рисунок 2 – Изменение значений угла внутреннего трения и влажности от периода нахождения отложений в теле отвала

Угол внутреннего трения – единственный физико-механический параметр отложений, который на протяжении первых 60 месяцев имеет обратно пропорциональную зависимость от времени нахождения отложений в отвале. Для отдельных скважин значение коэффициента корреляции между периодом нахождения отложений в отвале и углом внутреннего трения превышает порог в -0,7.

В третьей главе проведен анализ гидрогеологических условий территории Ерунаковского каменноугольного месторождения, а также моделирование положения уровня техногенного водоносного горизонта при изменении природных и техногенных факторов.

При формировании внутренних отвалов на объектах угледобычи необходимо выделить несколько этапов развития горных работ, в рамках которых режимы и уровни водоносного горизонта в его теле характеризуются различными показателями.

Этап 1. Формирование карьера в границах конечного контура. На данном этапе существенно изменяется уровень водоносного горизонта вследствие дренажа в горную выработку, так как с продвижением работ происходит углубление карьера, и, соответственно, в районе месторождения наблюдается постепенное увеличение глубины и радиуса депрессионной воронки.

Этап 2. Формирование внутреннего отвала после достижения выработкой конечного контура. Отсыпка вскрышных пород в карьере постепенно приводит к формированию техногенного водоносного горизонта в теле отвала, основное питание которого происходит за счет инфильтрации дождевых и талых вод, воды из искусственных водоемов, а также за счет перетекания подземных вод из естественного водоносного горизонта при их движении к зоне

дренажа. При достижении фронта насыпи конечного положения рабочего борта и складирования горной массы непосредственно на борт в результате значительного сокращения оттока воды из массива происходит восстановление уровня водоносного горизонта, который в большинстве случаев соответствует уровню, наблюдавшемуся до начала ведения добычных работ.

Анализ инженерно-геологической и гидрогеологической обстановки показал, что в районе расположения внутреннего отвала «Южный» наклонное залегание пород, а также особенности рельефа обуславливают движение подземных вод преимущественно в восточном направлении с формированием зоны разгрузки в пойме р.Томи (рисунок 3). В результате формирования системы выработок и последующей отсыпки внутреннего отвала «Южный» образовалась депрессионная воронка с минимальными абсолютными отметками водоносного горизонта 132,5 м.

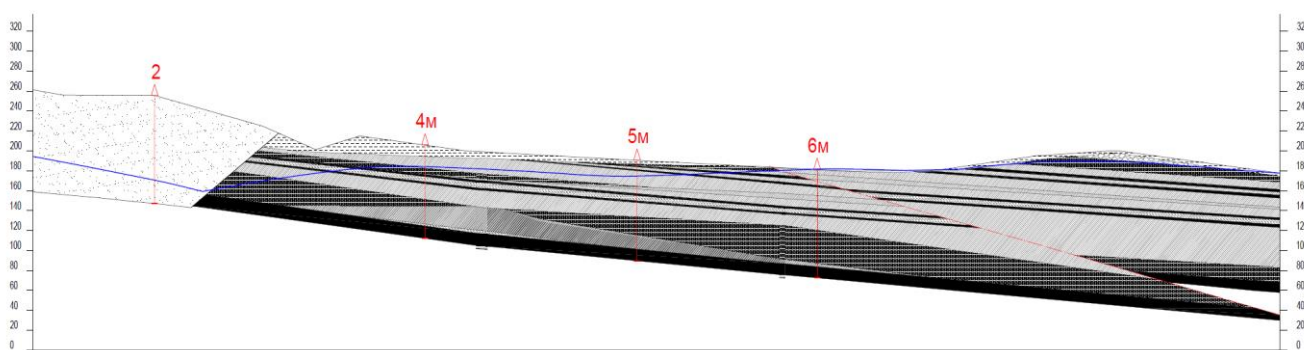


Рисунок 3 – Изменение уровня водоносного горизонта вдоль профиля Сг-Сг

Уровень естественного водоносного горизонта после достижения фронтом отвала восточного борта начал восстанавливаться, об этом свидетельствуют показания, полученные в течение нескольких лет по мониторинговым скважинам восточнее конечного контура карьера, однако на текущий момент уровень водоносного горизонта ниже первоначального, наблюдавшегося до ведения горных работ (Рисунок 4).

Питание исследуемого техногенного водоносного горизонта в теле отвала осуществляется за счет инфильтрации атмосферных осадков и воды, заключенной в двух искусственных водоемах (на западе и юго-западе). Основное направление движения воды осуществляется к водосборному пруду, расположенному в северо-восточной части выработки. В теле отвального массива можно выделить следующие особенности:

- в южной и юго-восточной частях отвала водоносный горизонт имеет высокие отметки, что связано с близостью искусственных водоемов;
- восточная часть отвала, граничащая с бортом карьера, была сформирована последней, и с учетом наименьших абсолютных отметок основания техногенного массива, она

формирует зону повышенной фильтрации вдоль границы «внутренний отвал – прибортовый массив», движение воды по ней осуществляется в направлении юг-север.

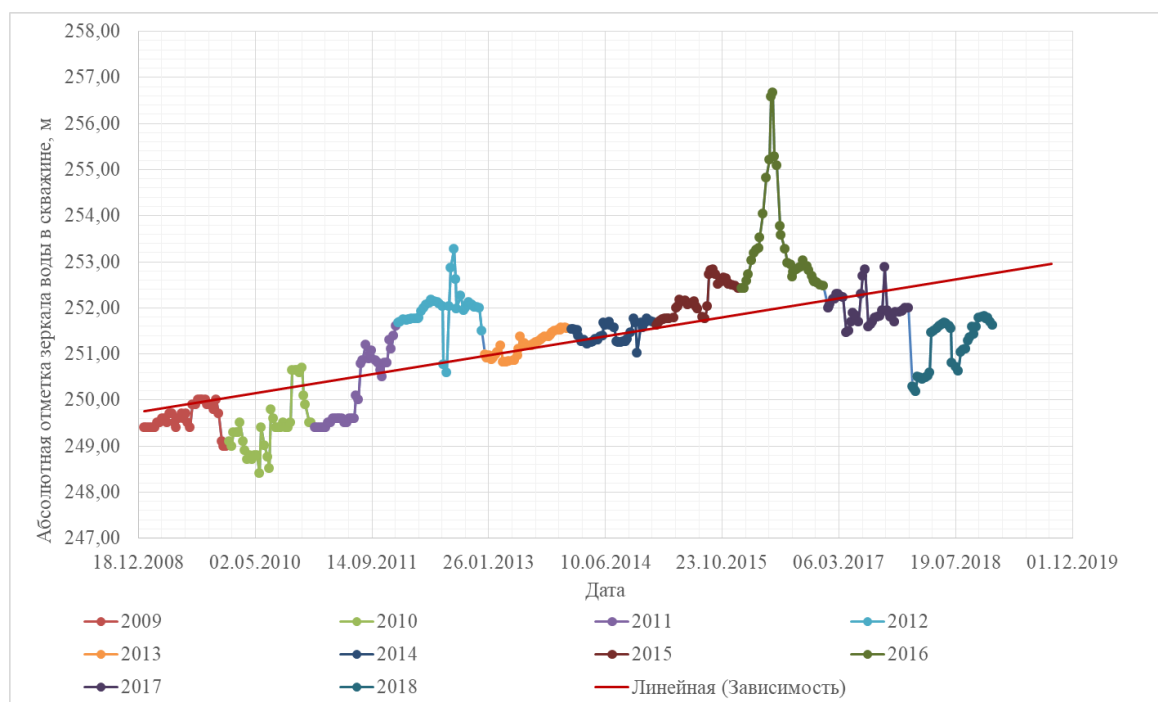


Рисунок 4 – Результаты наблюдения уровня водоносного горизонта в гидрогеологической мониторинговой скважине 1 (по данным гидрогеологических наблюдений, осуществленных специалистами АО «УК «Кузбассразрезуголь»)

Сформировавшаяся зона интенсивной фильтрации вдоль контакта «внутренний отвал – прибортовый массив» в восточной части отвала «Южный» обуславливает отсутствие гидравлической связи между техногенным водоносным горизонтом и естественным водоносным горизонтом, сформированным между восточным бортом карьера и берегом реки Томи.

Для моделирования уровня техногенного водоносного горизонта в теле отвала «Южный» при изменении природных и техногенных факторов использовались результаты, полученные:

- в результате маркшейдерской и геодезической съемки;
- при осуществлении наблюдений в пьезометрических скважинах;
- при выполнении лабораторных исследований техногенных отложений.

На рисунке 5 представлено положение ключевых расчетных гидрогеологических профилей.

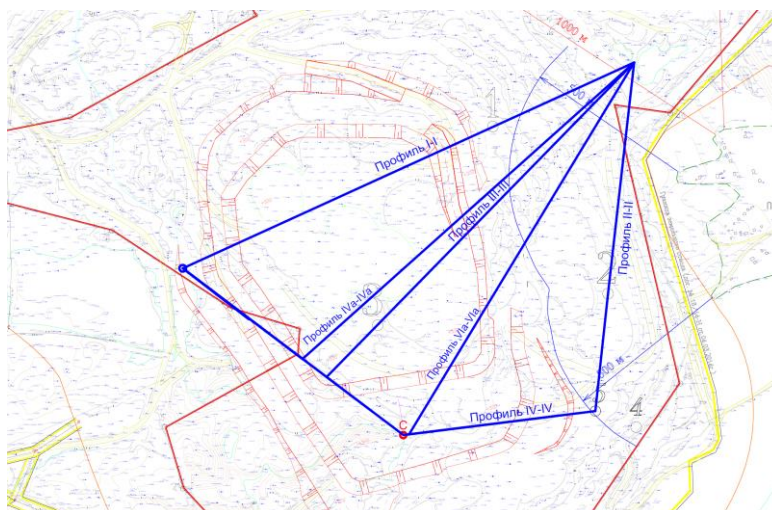


Рисунок 5 – Положение ключевых расчетных гидрогеологических профилей

Водоносный горизонт в теле отвала «Южный» является безнапорным, в связи с этим положение поверхности депрессионной воронки в профиле определялось на основе закона Дарси.

Проведенные вычисления показали удовлетворительную сходимость рассчитанного уровня водоносного горизонта в пройденных инженерно-геологических скважинах и реального по состоянию на момент бурения (рисунок 6). Получившееся расхождение объясняется, в первую очередь, неоднородностью фильтрационных свойств техногенного массива, что обусловлено тем, что соотношение рыхлой четвертичной и скальной вскрыши на этапах формирования отвала было неодинаковым, отложения имеют разную степень выветрелости и т.д.

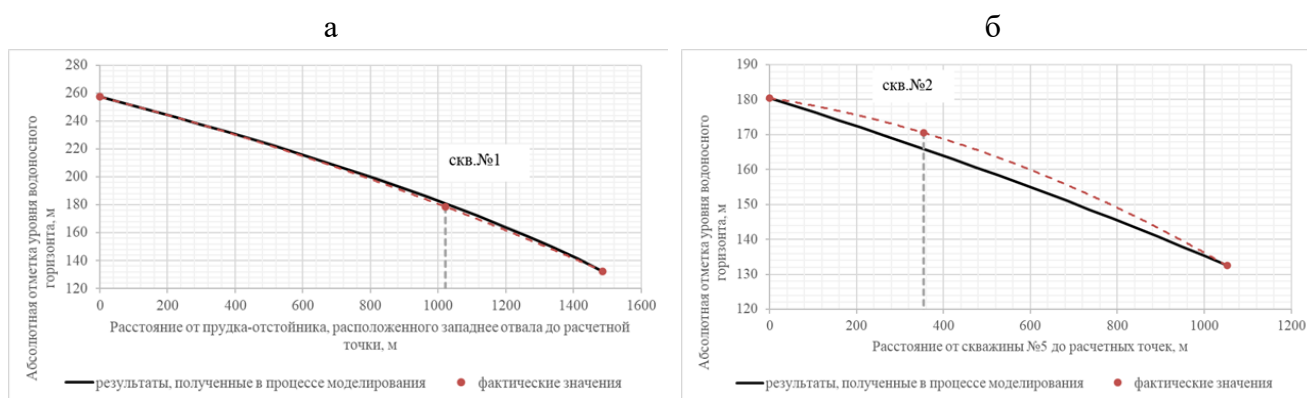


Рисунок 6 – Депрессионные кривые по профилям: а) I-I; б) II-II

Нестыковки между смоделированными и фактическими значениями в профиле II-II можно объяснить более сложной гидродинамической системой, которая сформировалась вдоль борта выработки. В южной части профиля II-II большая часть воды в техногенный горизонт поступает за счет инфильтрации атмосферных осадков, а также воды из прудка, расположенного юго-западнее отвала. По мере продвижения на север к потоку, перемещающемуся от области

скважины 5, добавляется вода, которая в результате сформировавшегося гидрогеологического режима движется с запада (от прудка-отстойника). Данный режим транзита объясняет высокий фактический уровень водоносного горизонта в районе скважины 2, чем полученный в результате расчетов на основе закона Дарси. Последний предполагает моделирование достаточно идеализированной ситуации, при которой движение потока воды однонаправлено, а среда относительно однородна.

С применением полученной гидрогеологической модели, охватывающей большую часть тела внутреннего отвала можно осуществить расчет текущего или прогнозного уровня техногенного водоносного горизонта для произвольной точки, заключенной на плане между профилями I-I, II-II и IV-IV. Выделенная часть техногенной насыпи в наибольшей степени может оказывать потенциальное воздействие на состояние естественного массива пород, заключенного между отвалом и урезом реки Томи.

Для расчета уровня техногенного водоносного горизонта в теле отвала «Южный» при различных гипсометрических отметках уреза воды в прудках-отстойниках и пьезометрических скважинах реализована модель, которая в табличной форме выводит значения для контрольных разрезов, их количество может быть настроено пользователем и составлять от 1 до 9. Положение профилей задается расстоянием от точки пересечения профилей I-I и IV-IV до выбранной пользователем точки вдоль профиля IV-IV, вторая точка профиля является фиксированной – это прудок-отстойник в выработанном пространстве карьера.

Для визуализации уровня водоносного горизонта в теле отвала «Южный» был разработан инструментарий, позволяющий построить поверхности в трехмерной среде (рисунок 7).

Четвертая глава включает в себя результаты натурного обследования отвала «Южный» и потенциально оползневого берега р.Томи в районе ведения горных работ, построение инженерно-геологической и геомеханической моделей системы «внутренний отвал – прибортовой массив» с учетом ее фактических и планируемых параметров, а также текущей гидрогеологической обстановки и ее изменения в процессе добычи угля.

Для оценки состояния отвала «Южный» было определено положение ключевых расчетных геомеханических профилей, по которым был осуществлен расчет коэффициента запаса устойчивости. Очевидно, что наиболее вероятны деформации отвала в сторону реки Томи, это обусловлено наклонным залеганием пород основания в этом направлении. По данным анализа инженерно-геологических и гидрогеологических условий эксплуатации, а также с учетом фактических и проектных параметров отвала «Южный» для оценки его геомеханического состояния было выбрано четыре контрольных расчетных профиля (рисунок 8).

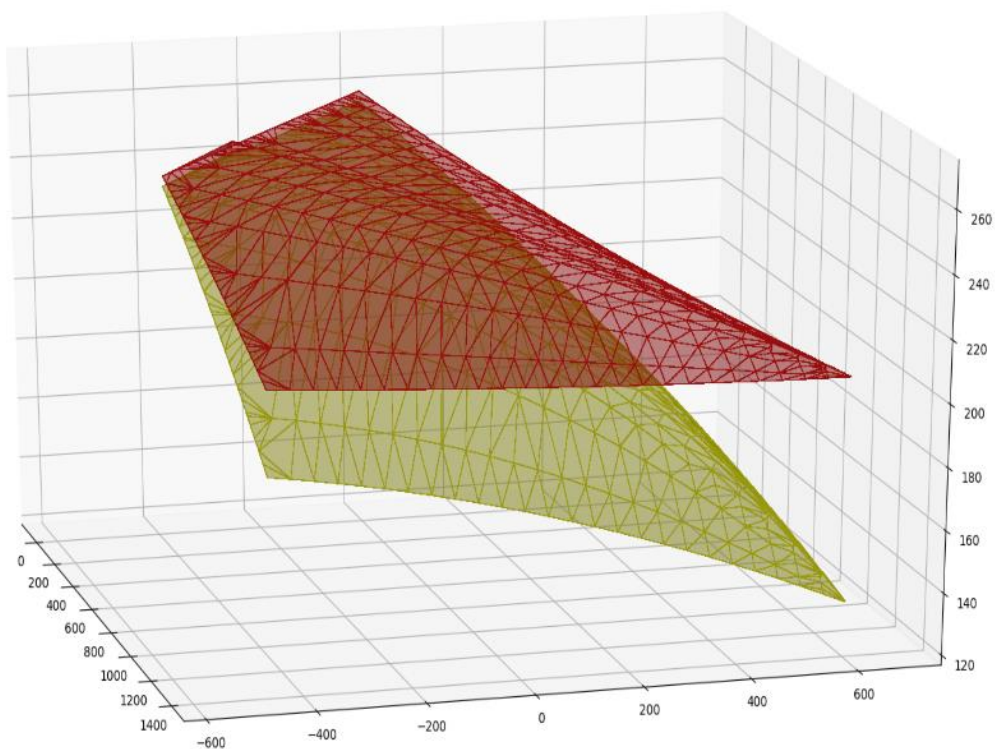


Рисунок 7 – Трехмерная модель фактического (зеленая поверхность) уровня водоносного горизонта в теле отвала «Южный» и при восстановлении отметок, которые были до начала ведения горных работ (красная поверхность)

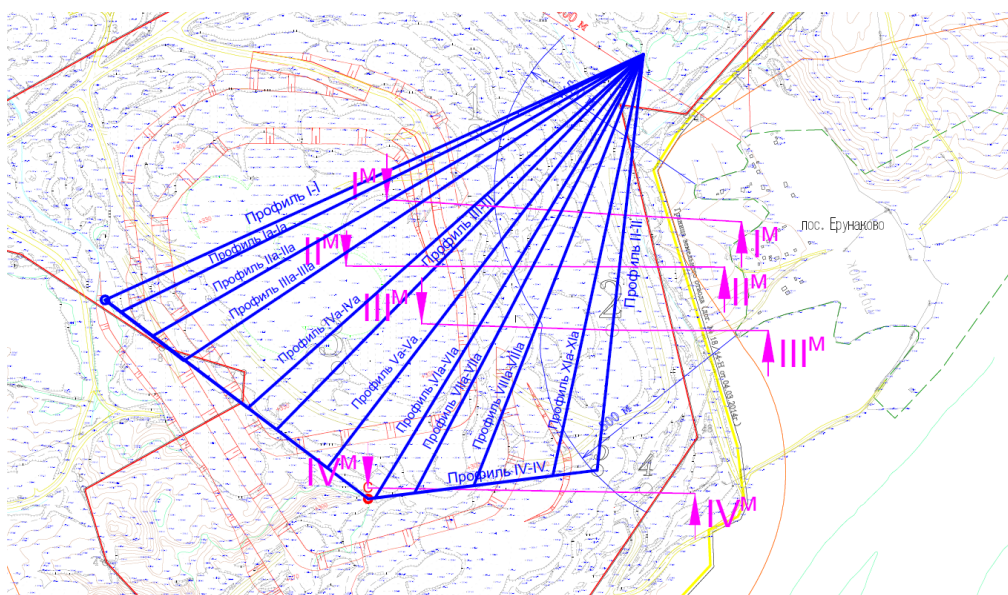


Рисунок 8 – Расположение расчетных геомеханических профилей (синим цветом указаны гидрогеологические профили для вычисления положения уровня водоносного горизонта, малиновым – геомеханические профили)

Для проведения расчетов коэффициента запаса устойчивости на основании геологических данных, маркшейдерской съемки и проекта развития отвала «Южный» были построены разрезы по выбранным профилям при фактических и проектных параметрах техногенного массива (рисунок 9).

С целью прогнозирования состояния рассматриваемого объекта, значение коэффициента запаса устойчивости необходимо определять в зависимости от изменения положений уровня подземных вод, так как этот параметр отличается наибольшей изменчивостью во времени.

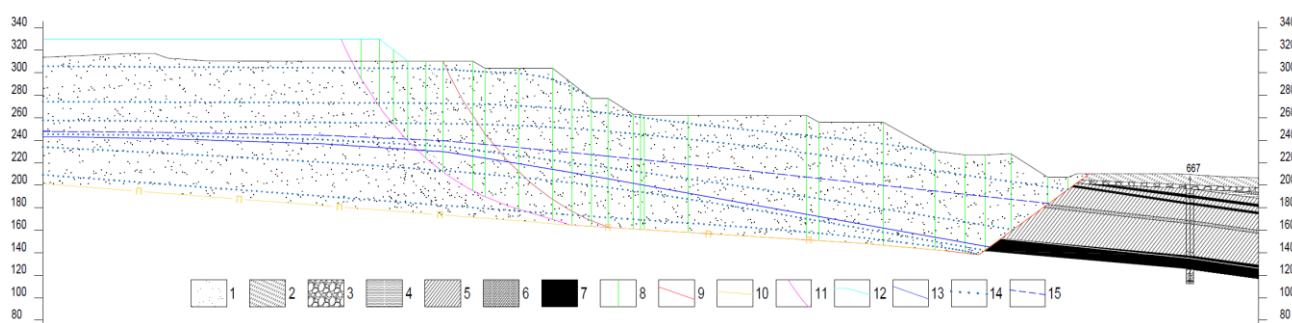
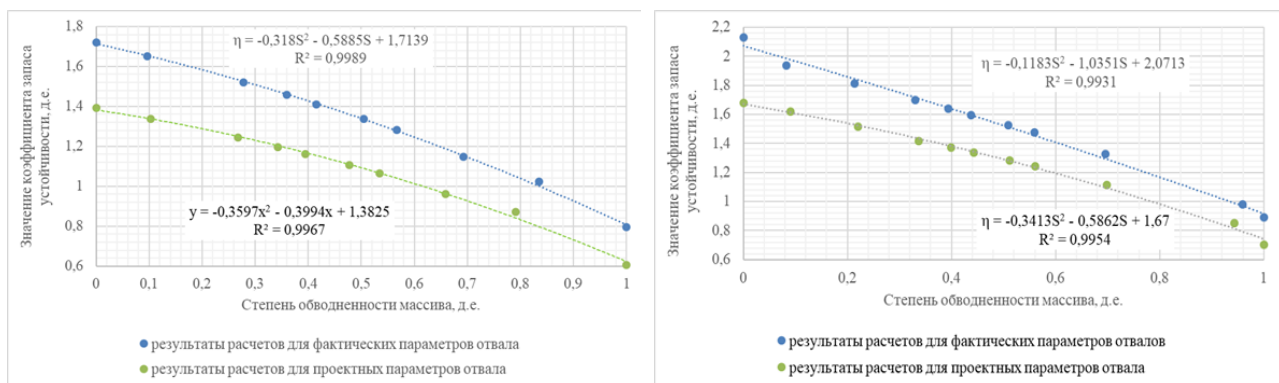


Рисунок 9 – Разрез отвала «Южный» с прилегающей территорией по линии III^М - III^М;
 1 – отвальная насыпь; 2 – рыхлые четвертичные отложения (преимущественно суглинистого и глинистого состава); 3 – четвертичные аллювиальные валунно-галечные отложения;
 4 – песчаники; 5 – мелкозернистые алевролиты; 6 – крупнозернистые алевролиты; 7 – уголь;
 8 – границы расчетных блоков; 9 – наиболее вероятная поверхность скольжения в теле отвала при текущих параметрах насыпи; 10 – линия контакта техногенных отложений и основания;
 11 – наиболее вероятная поверхность скольжения в теле отвала при проектных параметрах насыпи; 12 – проектные отметки отвала «Южный»; 13 – текущий уровень водоносного горизонта; 14 – смоделированные уровни водоносного горизонта, которые использовались в геомеханических расчетах; 15 – уровень водоносного горизонта при его восстановлении до первоначальных отметок (до начала ведения горных работ)

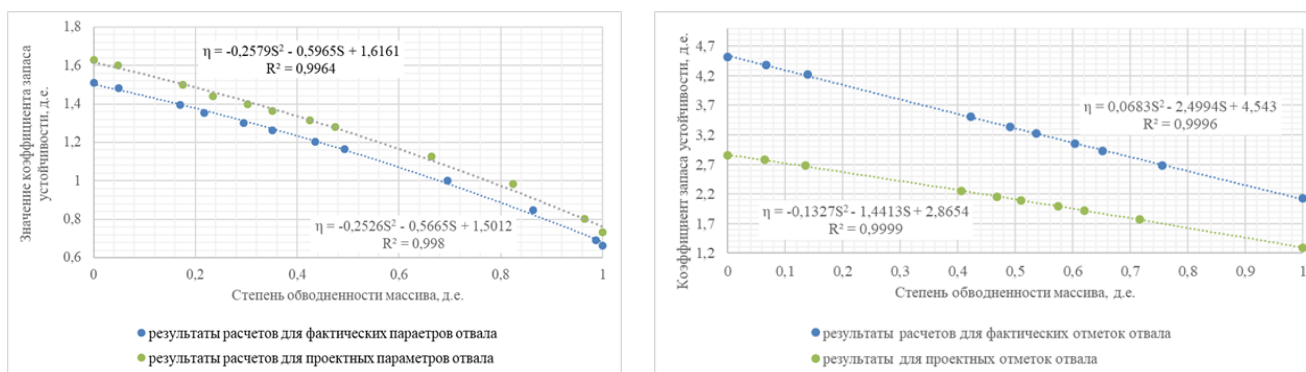
Геомеханическое моделирование отвала «Южный» с учетом текущих и проектных параметров показало, что коэффициент запаса устойчивости (при существующих уровнях водоносного горизонта) превышает значение 1,2. Увеличение обводненности массива, которое может произойти в случае прекращения откачки воды из пруда-накопителя или его ликвидации (засыпки) в результате развития горных работ, приведет к уменьшению показателей устойчивости. Расчеты, проведенные для случая восстановления уровней водоносного горизонта до первоначальных (естественных) отметок показывают, что отвал сохранит устойчивость, и не будет оказывать значительного влияния на естественный породный массив, находящийся восточнее конечного положения борта выработки. Ниже представлены графики изменения коэффициента запаса устойчивости, рассчитанного по контрольным геомеханическим профилям

в зависимости от степени обводненности массива, под которой понимается доля объема оползневого тела лежащего ниже уровня водоносного горизонта (рисунок 10).



Профиль Iм – Iм

Профиль IIм – IIм



Профиль IIIм – IIIм

Профиль IVм – IVм

Рисунок 10 – Изменение коэффициента запаса устойчивости, рассчитанного по контрольным геомеханическим профилям, в зависимости от степени обводненности массива

Несомненно, что значения коэффициентов запаса устойчивости по выбранным контрольным профилям во многом определяются упором техногенной насыпи в борт карьера. Для оценки степени влияния отвала на породный массив, заключенный между телом отвала и рекой Томью, построим эпюры избыточного оползневого давления по контрольным геомеханическим профилям для нескольких степеней обводненности массива (рисунок 11).

Полученные графики имеют выраженную закономерность, каждый из них состоит из трех характерных частей: первая – это активная зона оползня, в ней сдвигающие силы преобладают над удерживающими, соответственно кривая избыточного оползневого давления возрастает; вторая – убывающая часть, которая свойственна для участка потенциально оползневого массива, расположенного на наклонном основании, которым является дно карьера; третья – резко убывающая, которая характеризует соотношение удерживающих и сдвигающих сил вдоль борта карьера. При увеличении уровня водоносного горизонта происходит выполаживание второй

части кривых оползневого давления, это объясняется увеличением гидростатических сил и соответственно, уменьшением удерживающих.

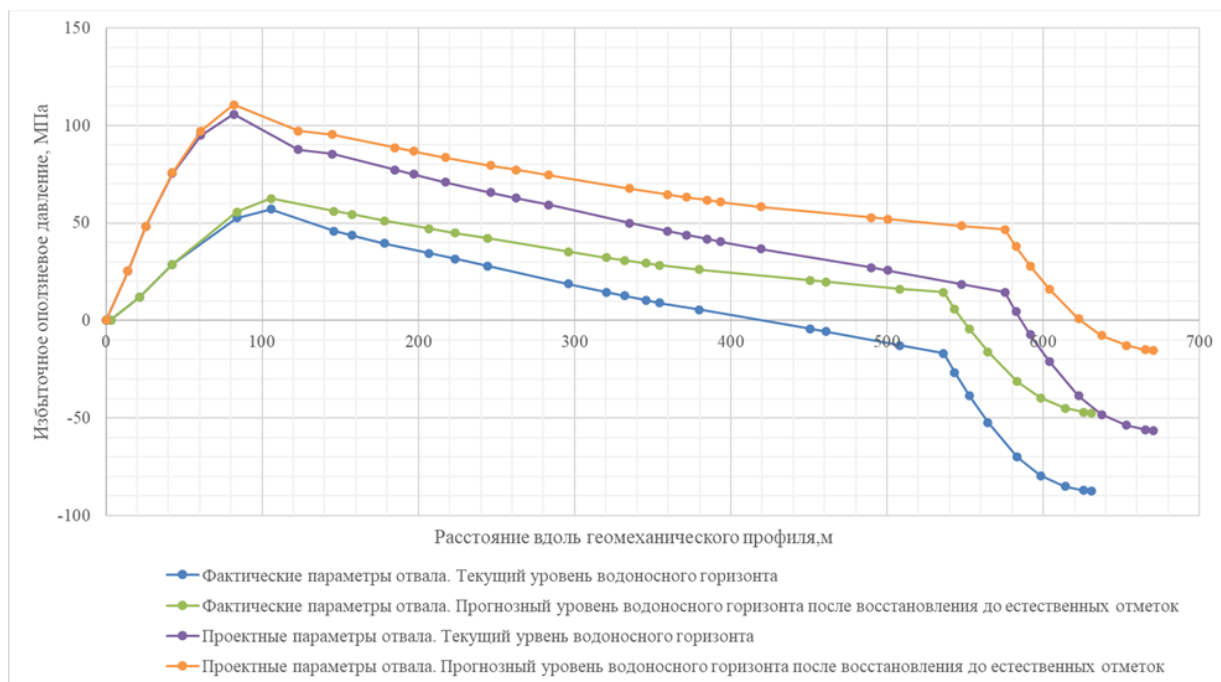


Рисунок 9 – Эпюры избыточного оползневого давления, построенные вдоль профиля $I^M - I^M$

На сегодняшний день для всех профилей, кроме $I^M - I^M$, характерно положительное значение избыточного давления в сечении, проходящем вертикально через точку подошвы нижнего уступа борта выработки. Максимальное значение избыточного оползневого давления у борта определено в профиле $IV^M - IV^M$ и составляет 31,8 МПа. В дальнейшем при развитии горных работ в соответствии с проектом и возможном повышении уровня техногенного водоносного горизонта максимальное избыточное давление для аналогичного сечения будет наибольшим в профиле $II_m - II_m$ (73,75 МПа).

Нужно отметить, что выявленное избыточное оползневое давление достаточно быстро компенсируется за счет сил трения и сцепления пород, слагающих борт карьера. Была осуществлена оценка расстояния, на котором произойдет полная компенсация сдвигающих сил. Для этого использовалось соотношение:

$$\frac{a}{\cos \alpha} = l = \frac{E}{[(\gamma H_{av} \cos \alpha - \gamma_w H_{av.w}) \operatorname{tg} \varphi + C] - \gamma H_{av} \sin \alpha'}$$

где E – величина избыточного давления, т/м² ($\cdot 10^4$ Па);

γ – плотность (объемный вес) отложений в зоне скольжения, т/м³ ($\cdot 10^3$ кг/м³);

H_{av} – высота расчетного блока, м;

l – длина основания расчетного блока, м;

γ_w – вес единицы объема воды (плотность воды), т/м³ ($\cdot 10^3$ кг/м³);

$H_{av.w}$ – средний уровень водоносного горизонта в расчетном блоке, м;

φ – угол внутреннего трения, град.;

C – удельное сцепление отложений в зоне скольжения, т/м² ($\cdot 10^4$ Па);

α – угол наклона основания расчетного блока к горизонтали, град.

Результаты геомеханического моделирования системы «внутренний отвал – прибортовой массив» от границы восточного борта до уреза воды р. Томи показывают, что значение коэффициента запаса устойчивости этого сложного природно-техногенного откосного сооружения еще более высокие. При этом давление, которое оказывается техногенной насыпью на борт карьера, компенсируется массивом естественного сложения на расстоянии менее 110 метров от границы внутреннего отвала.

С целью определения причин возможных деформаций берега р.Томи были проанализированы основные факторы и степень их влияния на устойчивость склона, в том числе:

- геометрические параметры склона;
- гидрогеологические: положение уровня водоносного горизонта в теле массива и его изменение в результате сезонных колебаний;
- инженерно-геологические: литологический состав массива и его основания, физико-механические свойства отложений;
- геодинамические: разрушение коренного берега рекой Томью.

Проведенный анализ показывает, что наибольшее влияние на устойчивость рассматриваемого участка оказывают инженерно-геологические и гидрогеологические показатели. Рассматриваемый участок левого (коренного) берега реки Томи сложен четвертичными суглинками, перекрывающие аллювиальные галечные отложения, ниже которых залегают коренные породы, представленные переслаиванием песчаников и алевролитов. Коренные породы и галечники обводнены, последние имеют высокие показатели фильтрационных свойств и выходят на дневную поверхность в береговой части. Таким образом, слой галечников служит естественной фильтрующей «подушкой» в массиве.

Основной причиной потенциальных деформаций участка берега реки Томи является резкое поднятие уровня грунтовых вод, приводящее к увлажнению глинистых отложений на контакте с галечниками и соответствующему снижению угла внутреннего трения и сцепления. При этом возможно смещение оползневого блока по контакту пород. В периоды высокого поднятия уровня р.Томи выход аллювиальных галечников оказывается ниже уреза воды реки. Активное таяние снега, осадки и поднятие уровня реки (как следствие уменьшение напорного градиента) способствуют резкому поднятию водоносного горизонта. При этом его уровень станет

выше уровня кровли галечников, что приведет к увлажнению четвертичных суглинков, и как следствие значительному снижению их физико-механических свойств.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации, представляющей собой законченную научно-квалификационную работу, на основе выполненных автором теоретических и экспериментальных исследований изменения гидрогеомеханической обстановки в районе угледобывающего предприятия решена актуальная научная задача оценки состояния системы «внутренний отвал – прибортовой массив», имеющая важное значение для обеспечения безопасности отработки пологих угольных пластов и устойчивости прилегающих потенциально оползнеопасных территорий.

Основные научные результаты, выводы и рекомендации, полученные лично автором:

1. Анализ опыта формирования внутренних отвалов на угледобывающих предприятиях показал, что при их отсыпке в теле массива происходит формирование техногенного водоносного горизонта, обуславливающее изменение физико-механических свойств отложений и определяющее общую устойчивость насыпи.

2. Корреляционный анализ данных, полученных в результате инженерно-геологических изысканий, показал, что взаимосвязь между большинством физико-механических свойств горных пород и временем их нахождения в теле отвала не выявлена. Угол внутреннего трения на протяжении первых 60 месяцев имеет обратно пропорциональную зависимость от времени нахождения отложений в отвале.

3. На основании проведенных исследований установлено, что при формировании системы «внутренний отвал – прибортовой массив» можно выделить два этапа развития гидрогеологических условий территории. Первый – при котором происходит перемещение рабочего борта вдоль падения угольного пласта и развитие депрессионной воронки вблизи выработки. Второй – соответствует временному интервалу, при котором формирование отвала в выработанном пространстве препятствует фильтрации подземных вод в карьер.

4. Установлено, что питание техногенного водоносного горизонта осуществляется за счет инфильтрации осадков и поверхностных вод, а также перетекания воды из естественного горизонта западнее, севернее и южнее рассматриваемого внутреннего отвала. Зона интенсивной фильтрации вдоль контакта борта и техногенной насыпи в восточной части отвала «Южный» обуславливает отсутствие гидравлической связи между техногенным водоносным горизонтом и естественным водоносным горизонтом, сформированным между восточным бортом карьера и берегом реки Томи.

5. Разработан инструментарий для построения гидрогеологической модели техногенного водоносного горизонта в теле внутреннего отвала, позволяющий оценить положение депрессионной кривой в зависимости от природных и техногенных факторов.

6. Установлена параболическая зависимость изменения коэффициента запаса устойчивости от степени обводненности массива (при различных уровнях техногенного водоносного горизонта в системе «внутренний отвал – прибортовой массив»).

7. Доказано, что при восстановлении уровня водоносного горизонта на территории формирования внутреннего отвала до отметок, наблюдавшихся до начала ведения горных работ, значение коэффициента запаса устойчивости системы «внутренний отвал – прибортовой массив» снижается в среднем на величину от 10 до 15%.

8. Результаты проведенного моделирования состояния системы «внутренний отвал – прибортовой массив» позволили установить, что оползневое давление, которое оказывается техногенной насыпью на борт карьера, компенсируется воздействием массива естественного сложения на расстоянии менее 110 метров от границы внутреннего отвала.

9. Результаты диссертационного исследования используются для обоснования устойчивости системы «внутренний отвал – прибортовой массив» при оценке состояния оползнеопасного берега реки Томи вблизи расположения внутреннего отвала «Южный» Ерунаковского поля Талдинского филиала АО «УК «Кузбассразрезуголь».

Основные результаты диссертационного исследования опубликованы в следующих работах:

В изданиях, входящих в перечень ВАК Минобрнауки РФ и в изданиях, индексируемых в наукометрических базах Scopus и Web of Science:

1. Cheskidov V., Grobler H., Kurenkov D., Lipina A. Slope Monitoring Systems Design for Mining Enterprises // E3S Web Conf., 2020 – 174 – 01025. DOI: 10.1051/e3sconf/202017401025

2. Cheskidov V., Lipina A., Kassymkanova K.-K., Bornman M. Modern methods of monitoring and predicting the state of slope structures // E3S Web of Conferences, 2019 – 105 – 01001. DOI: 10.1051/e3sconf/201910501001

3. Cheskidov V.V., Lipina A.V., Melnichenko I.A. Integrated monitoring of engineering structures in mining // Eurasian Mining. – 2018. – № 2. – С. 18-21.

4. Ческидов В.В., Маневич А.И., Липина А.В., Получение и анализ больших данных в практике мониторинга состояния горнотехнических сооружений // Горная промышленность. – 2019. – № 2 (144). – С. 86-88. DOI: 10.30686/1609-9192-2019-2-144-86-88

5. Ческидов В. В., Липина А. В., Красноцветов М. А. Моделирование уровня техногенного водоносного горизонта в отвалах угольных разрезов // Горный информационно-аналитический

бюллетень. – 2023. – № 6 (специальный выпуск 5). – С. 3–19. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_6_5_3.

6. *Липина А.В.*, Маневич А.И. Перспективные направления в проектировании сетей пунктов сбора информации при инженерно-геологических исследованиях намывных массивов, откосных сооружений и их оснований // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2017. – № 1. – С. 387-395.

В прочих изданиях:

1. Ческидов В.В., *Липина А.В.* Обоснование и ранжирование комплекса критериев оценки безопасности эксплуатации откосных сооружений // Исследования по геоинформатике: труды Геофизического центра РАН. 2017. Т. 5. № 2. С. 48-53.

2. *Липина А.В.* Закономерности изменения гидрогеомеханических условий системы «внутренний отвал – прибортовой массив» Липина А.В. // Международный журнал прикладных наук и технологий "Integral"– №3 – 2023, 14 с.

3. Cheskidov V.V., *Lipina A.V.*, Manevich A.I. & Kurenkov D.S. Status Monitoring of Sloping Structures // Topical Issues of Rational Use of Natural Resources. – London: CRC Press, 2019. – pp. 41-47. DOI: 10.1201/