

На правах рукописи



Морозов Иван Александрович

**ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК В
СОЛЯНЫХ ПОРОДАХ ГРЕМЯЧИНСКОГО
МЕСТОРОЖДЕНИЯ**

Специальность 2.8.6

Геомеханика, разрушение горных пород,
рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Пермь 2022

Диссертация подготовлена в «Горном институте Уральского отделения Российской академии наук» («ГИ УрО РАН») – филиале Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук (ПФИЦ УрО РАН) и в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет».

Научный руководитель: **Паньков Иван Леонидович**
кандидат технических наук, доцент,
старший научный сотрудник лаборатории физических
процессов освоения георесурсов.
«ГИ УрО РАН» (г. Пермь).

Официальные оппоненты: **Балек Александр Евгеньевич**
доктор технических наук,
ведущий научный сотрудник лаборатории геомеханики
подземных сооружений.
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт горного дела Уральского отделения Российской
академии наук (г. Екатеринбург).

Цой Павел Александрович
кандидат физико-математических наук,
заведующий центром коллективного пользования
геомеханических, геофизических и геодинамических
измерений СО РАН.
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт горного дела им. Н.А. Чинакала Сибирского
отделения Российской академии наук (г. Новосибирск).

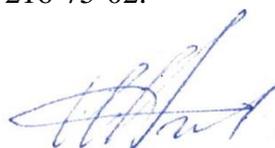
Ведущая организация: **Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский технологический
университет «МИСиС» (г. Москва).**

Защита диссертации состоится «__» июня 2022 года в __-__ часов на заседании диссертационного совета 24.1.201.02 при ПФИЦ УрО РАН по адресу: г. Пермь, ул. Сибирская, 78-А. С диссертационной работой можно ознакомиться в библиотеке и на сайте «ПФИЦ УрО РАН»: <http://www.permisc.ru>.

Автореферат разослан «__» _____ 2022 года. Отзывы, заверенные печатью организации, просим направить в двух экземплярах не позднее, чем за 10 дней до защиты диссертации. В отзыве должны быть указаны фамилия, имя, отчество, должность, организация, почтовый адрес, телефон и электронная почта лица, представившего его.

Отзывы необходимо направлять по адресу: 614007, г. Пермь, ул. Сибирская, 78-А, Ученый совет «ГИ УрО РАН». Телефон/факс: (342) 216-75-02.

Ученый секретарь диссертационного совета,
канд. техн. наук



С. Ю. Лобанов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации

Деятельность горнодобывающих предприятий неразрывно связана с вовлечением в отработку все новых участков месторождений, увеличением глубины ведения горных работ, постепенным усложнением горно-геологических условий.

С переходом горных работ на большие глубины ползучесть соляных пород, вмещающих горные выработки, зачастую носит незатухающий характер на протяжении всего времени эксплуатации выработок. Наличие вблизи горных выработок, пройденных в соляных породах, пород с более высокими прочностными и деформационными характеристиками приводит к изменению характера деформирования породных обнажений. Залегание вблизи почвы промышленных пластов слабых пород в условиях больших глубин приводит к интенсивному их выдавливанию в выработку, пучению почвы, что требует необходимости проведения дорогостоящих ремонтных работ.

В настоящее время на стадии подготовки первых выемочных участков идет строительство Гремячинского рудника. Глубина залегания промышленного сильвинитового пласта в пределах месторождения изменяется от 1100 до 1300 м. Вблизи кровли промышленного пласта залегают ангидритовые, ангидрит-доломитовые породы с более высокими прочностными и деформационными характеристиками по сравнению с соляными, вблизи почвы сильвинитового пласта залегают карналлитовые породы с пониженными прочностными характеристиками.

В связи с малой изученностью особенностей деформирования породных массивов в указанных условиях, недостаточной информацией о физико-механических свойствах пород и малым опытом разработки месторождения, тема диссертационной работы, посвященная оценке устойчивости горных выработок в соляных породах Гремячинского месторождения, является актуальной.

Цель работы

Разработка способов оценки и прогноза устойчивости горных выработок, пройденных в соляных породах в условиях больших глубин вблизи вмещающих ангидрит-доломитовых и карналлитовых пород.

Основная идея работы

Использование закономерностей деформирования горных пород в лабораторных и натуральных условиях, методов математического моделирования для оценки геомеханического состояния горных выработок и определения оптимального их расположения.

Основные задачи работы

1. Проведение исследований физико-механических свойств пород Гремячинского месторождения. Исследование влияния формы образцов на прочностные и деформационные характеристики соляных пород при сжатии.

2. Разработка рекомендаций по определению прочностных и деформационных характеристик соляных пород методом объемного многоступенчатого нагружения.

3. Проведение комплекса инструментальных наблюдений для исследования особенностей деформирования горных выработок, пройденных в соленосных отложениях вблизи ангидрит-доломитовых и карналлитовых пород.

4. Выбор и обоснование модели деформирования вмещающих горные выработки пород.

5. Проведение численных экспериментов для исследования особенностей деформирования горных выработок, пройденных в отложениях сильвинита, вблизи вмещающих пород с резко отличающимися прочностными и деформационными свойствами.

6. Разработка на основе результатов численного моделирования и данных инструментальных наблюдений способов оценки и прогноза устойчивости горных выработок, пройденных в соляных породах в условиях больших глубин.

Методы исследований предусматривали комплексный подход к решению поставленных задач и включали: анализ и обобщение научного и практического опыта поддержания горных выработок в соляных породах, лабораторные и натурные исследования деформирования пород Гремячинского месторождения, статистическую обработку результатов экспериментов, использование математических моделей механики сплошных сред для моделирования процессов деформирования горных пород.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Представительные результаты механических испытаний продуктивных и вмещающих пород Гремячинского месторождения, оценки коэффициента формы соляных пород, являющиеся основой параметрического обеспечения геомеханических расчетов и определения безопасных параметров камерной системы разработки.

2. Основным фактором, определяющим величину смещений почвы, является мощность ближайшего к контуру выработки породного слоя, залегающего в почве. При мощности сильвинитовой пачки, оставляемой в почве протяженной горной выработки, менее 0,6-0,7 м скорость ее смещения по сравнению с боками увеличивается более чем в 3 раза, что приводит к пучению почвы и интенсивному ее расслоению.

3. Устойчивость кровли горной выработки, пройденной в соленосных отложениях вблизи вышезалегающих более прочных ангидритовых, ангидрит-доломитовых пород, зависит от мощности пачки соляных пород, оставляемой в кровле выработки. При этом прогнозируется снижение смещений пород кровли и боков, соответственно, в 1,7–4,4 и 1,3–1,5 раз за первый год эксплуатации выработки при уменьшении мощности соленосных отложений в кровле с 3,5 до 0,5 м. Для одиночной горной выработки шириной 6,0 м и высотой 3,7 м с овално-арочной формой поперечного сечения оптимальная мощность соляной пачки, оставляемой в кровле, находится в диапазоне от 0,5 до 1,4 м.

Научная новизна

- По результатам испытаний образцов на одноосное сжатие получены зависимости, отражающие влияние фактора формы на касательный и секущий модули деформации, модуль спада, а также предел прочности соляных пород Гремячинского месторождения по результатам сжатия образцов в лабораторных условиях.

- Экспериментально установлено, что метод объемного многоступенчатого нагружения отражает изменение прочностных и деформационных характеристик соляных пород в зависимости от уровня бокового давления и стадии деформирования и позволяет сократить необходимый объем породного материала по сравнению с одноступенчатыми испытаниями.

- По результатам инструментальных наблюдений в горных выработках, пройденных в соляных породах, установлено, что при наличии вблизи кровли выработок ангидритовых и ангидрит-доломитовых отложений скорости смещений почвы и боков в 3 раза и более превосходят соответствующие скорости смещений кровли.

- На основе численных экспериментов получены зависимости влияния карналлитовых пород, залегающих вблизи почвы горных выработок, и ангидритовых, ангидрит-доломитовых пород, залегающих вблизи кровли выработок, на размеры областей нарушенных пород вокруг выработок, пройденных в соляных породах.

- По результатам численного моделирования установлено, что анкерная крепь замкового типа, используемая в соляных породах Гремячинского рудника, не оказывает существенного влияния на напряженно-деформированное состояние вмещающих выработки пород и может быть использована только для предотвращения расслоения с последующим обрушением пород кровли внутрь выработки.

Достоверность научных положений и выводов обеспечивается: строгой постановкой теоретических задач и корректностью применяемого математического аппарата, надежностью экспериментальных методик,

представительным объемом лабораторных и натурных исследований, удовлетворительной сходимостью и качественным соответствием полученных результатов данным практики и основным закономерностям деформирования породного массива.

Практическое значение и реализация результатов работы

Полученные результаты оценки и прогноза устойчивости горных выработок в соляных породах Гремячинского месторождения использовались при разработке Временного положения по креплению и поддержанию горных выработок на руднике Гремячинского ГОК.

Апробация работы

Основные положения и результаты исследований докладывались на международном форуме-конкурсе молодых ученых (г. Санкт-Петербург, 2015 г.), на X Международной конференции молодых ученых и студентов (г. Бишкек, Киргизия, 2018 г.), Научной сессии ГИ УрО РАН (г. Пермь, 2016–2019 гг.), XXVIII Международном научном симпозиуме «Неделя горняка – 2020» (г. Москва, 2020 г.), XXII Зимней школе по механике сплошных сред (г. Пермь, 2021г.).

Личный вклад автора заключается в:

- непосредственном участии в постановке задач исследования;
- подготовке и проведении исследований в лабораторных и натурных условиях, обработке и анализе полученных результатов;
- численной реализации математических моделей механики сплошной среды методом конечных элементов;
- проведении численных экспериментов, обработке и анализе результатов математического моделирования;
- разработке научных решений и их практической реализации;
- формулировке основных научных положений и выводов.

Публикации

По теме диссертационной работы опубликовано 9 работ, в том числе 4 из списка изданий, рекомендуемых Высшей аттестационной комиссией при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации.

Объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и приложения. Работа изложена на 153 страницах машинописного текста, включая 62 рисунка, 14 таблиц и список использованной литературы из 149 наименований, в том числе 43 зарубежных.

Автор выражает свою искреннюю благодарность сотрудникам лаборатории физических процессов освоения георесурсов «ГИ УрО РАН», сотрудникам кафедры «Разработка месторождений полезных ископаемых»

Пермского национального исследовательского политехнического университета и инженерно-техническим работникам ООО «ЕвроХим-ВолгаКалий» за сотрудничество и помощь в проведении исследований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе выполнен обзор условий разработки Гремячинского месторождения калийных солей. Приводится анализ факторов, влияющих на устойчивость горных выработок в соляных породах Верхнекамского (ВКМКС) и Старобинского месторождений, а также в условиях соленосных отложений алмазных месторождений. Рассмотрены основные положения методик оценки и прогноза устойчивости выработок в соляных породах. Представлен обзор методических особенностей лабораторных исследований механических свойств соляных пород. Сформулированы цель и задачи исследования.

Вопросы устойчивости горных выработок и вмещающих пород рассматривают в своих трудах следующие ученые: Андрейко С.С., Асанов В.А., Барях А.А., Боликов В.Е., Булычев Н.С., Губанов В.А., Ерёменко А.А., Ержанов Ж.С., Жихарев С.Я., Зотеев О.В., Иофис М.А., Константинова С.А., Курленя М.В., Линьков А.М., Макаров А.Б., Мараков В.Е., Мисников В.А., Оловянный А.Г., Опарин В.Н., Протосеня А.Г., Прушак В.Я., Слесарев В.Д., Тапсиев А.П., Титов Б.В., Фисенко Г.Л., Шафаренко Е.М., Шевяков Л.Д., Dawson P.R., Doering T., Erichsen C, Jaeger J.C., Munson D.E., Prugger F., Serata S., Wilson J.W., Wittke W. и многие другие.

Гремячинское месторождение характеризуется сложными условиями ведения горных работ, что обуславливается залеганием промышленного сильвинитового пласта на глубине 1100–1300 м и приводит к высокому уровню естественного поля напряжений, вертикальная компонента которого составляет около 24 МПа, а коэффициент бокового давления в соляных породах изменяется от 0,8 до 1,0. Вблизи почвы сильвинитового пласта залегают слабые карналлитовые породы, вблизи кровли – прочные, несклонные к проявлению деформации ползучести ангидрит-доломитовые породы, влияние которых на характер деформирование контура выработок в соляных отложениях в настоящее время является малоизученным.

Опыт поддержания выработок в условиях ВКМКС, Старобинского месторождения, а также в соленосных отложениях Чарской свиты (глубина 600–900 м) алмазных месторождений Якутии показывает, что одним из основных способов обеспечения устойчивости породных обнажений является рациональное расположение выработок относительно вмещающих пород,

поверхностей ослабления, контактов слоёв (пластов). При этом в качестве основного способа крепления следует рассматривать анкерный.

Существующие инженерные методики оценки и прогноза состояния выработок в соляных породах не позволяют учесть наличие вблизи контура выработки пород с существенно более высокими прочностными и деформационными характеристиками по сравнению с соляными. Основные положения указанных методик разработаны с учетом результатов многолетних инструментальных наблюдений за характером деформирования выработок, исследований физико-механических свойств пород, изучения закономерностей изменения напряженно-деформированного состояния (НДС) вмещающего массива, поэтому их применение в условиях малоизученного Гремячинского месторождения нецелесообразно. В этой связи для оценки устойчивости горных выработок в соляных породах месторождения наряду с лабораторными исследованиями механических свойств пород требуется проведение как длительных инструментальных наблюдений за характером деформирования горных выработок, так и численных экспериментов для исследования НДС вмещающих пород методами математического моделирования.

Вторая глава посвящена условно-мгновенным испытаниям образцов пород Гремячинского месторождения. Испытано 237 образцов, в том числе: 142 – на одноосное сжатие; 74 – на одноосное растяжение косвенным методом раскалывания породных дисков соосными клиньями; 21 – на объемное сжатие.

Отработка запасов месторождения планируется с применением камерной системы разработки, а оценка несущей способности целиков выполняется с учетом отношения их высоты к поперечному размеру, поэтому лабораторные испытания образцов также включали исследования влияния фактора формы на механические характеристики соляных пород при сжатии.

По результатам экспериментов на одноосное сжатие образцов соляных пород получены зависимости предела прочности ($\sigma_{пр}$), касательного модуля деформации (D_y), секущего модуля деформации ($D_{пр}$), касательного модуля спада (M_c) от отношения высоты к диаметру (h/d) образцов в виде:

$$X\left(\frac{h}{d}\right) = X_{\frac{h}{d}=2,0} \cdot K_{\phi}, \quad (1)$$

где X – значение механического показателя ($\sigma_{пр}$, D_y , $D_{пр}$ или M_c) для образца с произвольным отношением h/d ; $X_{\frac{h}{d}=2,0}$ – значение механического показателя для образца с $\frac{h}{d} = 2,0$; K_{ϕ} – коэффициент формы.

Коэффициент формы в выражении (1) для деформационных характеристик определяется в соответствии с результатами экспериментальных исследований

по табл. 1, для прочностных – по табл. 2. При этом для прочностных характеристик рассмотрено два вида коэффициента формы:

- гиперболический:

$$K_{\Phi} \left(\frac{h}{d} \right) = a_1 + a_2 \cdot \frac{d}{h}, \quad (2)$$

- экспоненциальный:

$$K_{\Phi} \left(\frac{h}{d} \right) = a_1 \cdot \text{Exp} \left(a_2 + a_3 \cdot \frac{d}{h} \right). \quad (3)$$

Таблица 1 – Коэффициент формы для деформационных характеристик соляных пород

Порода	Касательный модуль деформации	Секущий модуль деформации	Модуль спада
	$K_{\Phi} = a_1 + a_2 \cdot \frac{h}{d}$	$K_{\Phi} = a_1 + a_2 \cdot \frac{h}{d}$	$K_{\Phi} = a_1 \cdot \text{Exp} \left(a_2 + a_3 \cdot \frac{h}{d} \right)$
Сильвинит	$a_1 = 0,32;$ $a_2 = 0,34;$ $R^2 = 0,66$	$a_1 = 0,30;$ $a_2 = 0,35;$ $R^2 = 0,70$	$a_1 = 0,05; a_2 = -0,84;$ $a_3 = 1,94; R^2 = 0,96$
Каменная соль	$a_1 = 0,26;$ $a_2 = 0,37;$ $R^2 = 0,76$	$a_1 = 0,40;$ $a_2 = 0,30;$ $R^2 = 0,63$	$a_1 = 0,06; a_2 = -0,49;$ $a_3 = 1,64; R^2 = 0,94$
Карналлит	$a_1 = 0,18;$ $a_2 = 0,41;$ $R^2 = 0,59$	$a_1 = 0,48;$ $a_2 = 0,26;$ $R^2 = 0,25$	–

Таблица 2 – Коэффициент формы для прочностных характеристик соляных пород

Порода	Предел прочности	
	$K_{\Phi} = a_1 + a_2 \cdot \frac{d}{h}$	$K_{\Phi} = a_1 \cdot \text{Exp} \left(a_2 + a_3 \cdot \frac{d}{h} \right)$
Сильвинит	$a_1 = 0,75; a_2 = 0,50;$ $R^2 = 0,94$	$a_1 = 0,76; a_2 = 0,10;$ $a_3 = 0,34; R^2 = 0,97$
Каменная соль	$a_1 = 0,78; a_2 = 0,44;$ $R^2 = 0,89$	$a_1 = 0,79; a_2 = 0,07;$ $a_3 = 0,32; R^2 = 0,91$
Карналлит	$a_1 = 0,45; a_2 = 1,10;$ $R^2 = 0,84$	$a_1 = 0,86; a_2 = -0,14;$ $a_3 = 0,57; R^2 = 0,85$

На рис. 1 приведены зависимости предела прочности от h/d испытанных на одноосное сжатие образцов соляных пород, полученные с использованием гиперболического коэффициента формы (2) и экспоненциального (3). Эмпирические коэффициенты в выражениях (2) и (3) определялись по табл. 2.

На рис. 1 также показана зависимость, полученная с помощью коэффициента формы, применяемого на месторождении для определения параметров целиков:

$$K_{\phi} \left(\frac{h}{d} \right) = 0,650 + 0,689 \cdot \frac{d}{h}. \quad (4)$$

По графикам (рис. 1) видно, что лучше всего зависимость прочности соляных пород Гремячинского месторождения от отношения высоты к диаметру испытываемых на сжатие образцов описывается коэффициентом формы экспоненциального вида с параметрами, представленными в табл. 2.

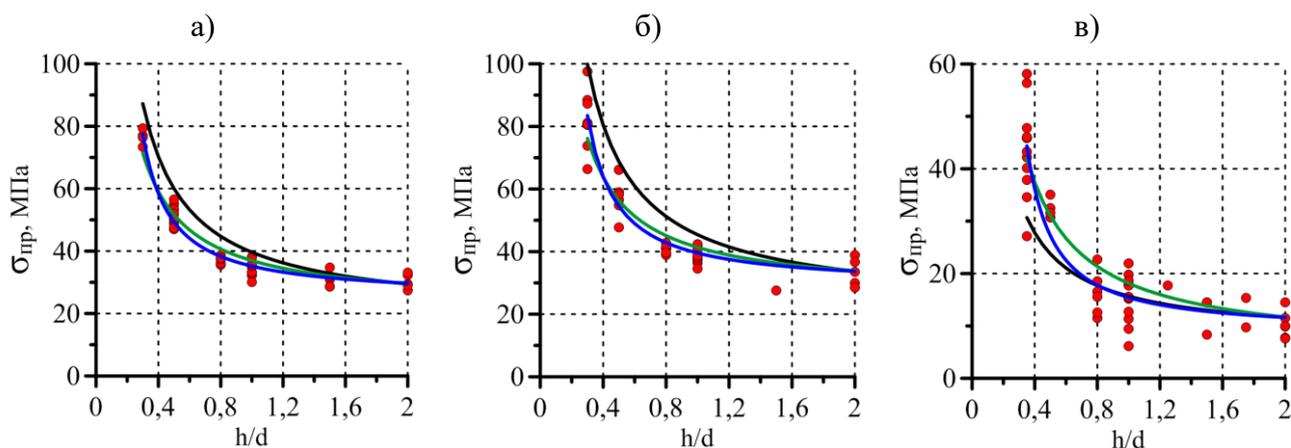


Рисунок 1 – Зависимости прочности соляных пород от отношения высоты к диаметру испытываемых на сжатие образцов: а – сильвинит; б – каменная соль; в – карналлит; — — коэффициент формы, используемый на месторождении; — — коэффициент формы гиперболического вида; — — коэффициент формы экспоненциального вида

В табл. 3 представлены результаты исследований на одноосное сжатие образцов пород с $h/d = 2,0$, а также результаты экспериментов на растяжение, по которым видно, что ангидритовые, ангидрит-доломитовые и доломитовые породы обладают существенно более высокими значениями прочностных и деформационных характеристик по сравнению с соляными.

Таблица 3 – Механические свойства пород Гремячинского месторождения

Порода	$\sigma_{пр}$, МПа	σ_p , МПа	$D_{пр}$, ГПа	D_y , ГПа	M_c , ГПа
Доломит	$85,7 \pm 15,0$	$11,1 \pm 3,3$	$7,1 \pm 3,6$	$10,3 \pm 4,3$	—
Ангидрит-доломит	$63,3 \pm 27,3$	$5,4 \pm 1,4$	$6,8 \pm 1,6$	$10,2 \pm 3,3$	—
Ангидрит	$43,8 \pm 9,6$	$3,5 \pm 0,8$	$5,3 \pm 1,2$	$7,8 \pm 2,5$	—
Сильвинит	$29,6 \pm 3,6$	$1,7 \pm 0,5$	$1,0 \pm 0,2$	$2,3 \pm 0,5$	$3,3 \pm 0,3$
Каменная соль	$33,9 \pm 6,6$	$2,1 \pm 0,6$	$1,2 \pm 0,3$	$3,1 \pm 0,6$	$3,7 \pm 0,3$
Карналлит	$11,7 \pm 3,9$	$0,7 \pm 0,2$	$1,1 \pm 0,4$	$2,7 \pm 0,5$	—

Анализ результатов исследований (табл. 3) показал, что наиболее слабым звеном породного массива Гремячинского месторождения являются карналлитовые породы, прочность которых на одноосное сжатие $\sigma_{пр}$ и растяжение σ_p , соответственно, в 2,5 и в 2,4 раза меньше значений соответствующих показателей сильвинита. При этом прочность на одноосное сжатие ангидритовых и ангидрит-доломитовых отложений в 1,5–2,1 раза больше прочности сильвинитовых пород, а на растяжение в 2,1–3,2 раза.

Определение прочностных характеристик в режиме объемного сжатия выполнялось только для соляных пород. По результатам предварительных исследований, проведенных на 38 образцах пород ВКМКС, установлено: метод объемного многоступенчатого сжатия по сравнению с одноступенчатым удовлетворительно отражает изменения прочностных и деформационных характеристик соляных пород в зависимости от уровня бокового давления и стадии деформирования. Поэтому, с целью экономии породного материала, объемное сжатие соляных пород Гремячинского месторождения выполнялось по многоступенчатой схеме. Результаты представлены в табл. 4.

Таблица 4 – Предел прочности (МПа) соляных пород в зависимости от бокового давления

Порода	Боковое давление, МПа		
	5	10	15
Сильвинит	53,0 ± 6,1	71,2 ± 7,4	84,3 ± 5,3
Каменная соль	65,2 ± 4,3	76,2 ± 3,5	89,0 ± 7,3
Карналлит	24,8 ± 6,2	36,6 ± 4,8	46,6 ± 5,4

По результатам анализа табл. 3, 4 установлено, что с увеличением бокового давления от 0 (одноосное сжатие) до 15 МПа прочность образцов соляных пород возрастает в 2,6–4,0 раза. Наиболее чувствительными к изменению уровня бокового давления являются слабые карналлитовые породы, прочность образцов которых, с увеличением бокового давления от 0 до 15 МПа, возрастает приблизительно в 4 раза.

В третьей главе приведены результаты инструментальных исследований деформирования горных выработок и вмещающих пород. Выработки пройдены в один ход комбайном Урал-20Р (ширина 6,0 м, высота 3,7 м) в неоднородном слоистом массиве, представленном соляными, ангидрит-галитовыми, ангидритовыми и ангидрит-доломитовыми отложениями. Всего оборудовано 8 замерных (реперных) станций на 4 экспериментальных участках, геологическая характеристика которых приведена на рис. 2.

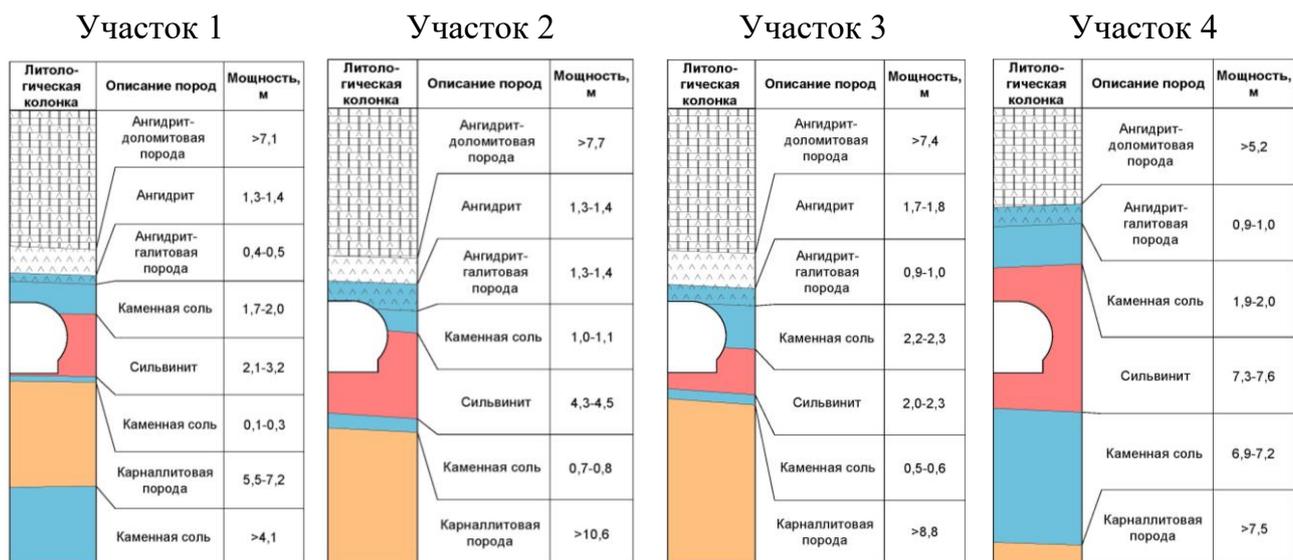


Рисунок 2 – Геологическая характеристика экспериментальных участков

В табл. 5 представлены мощности слоев пород, оставленных в кровле и почве экспериментальных выработок.

Выработки участков 1–3 были закреплены анкерами КРА-16. Участок 4 оставался незакрепленным. Первый замер на участках 1–3 был выполнен спустя 50 суток, на участке 4 – спустя 230 суток с момента проходки выработок. Период наблюдений составлял около 1 года.

Таблица 5 – Мощности слоев пород в кровле, почве экспериментальных выработок

№ участка	№ станции	Кровля, м			Почва, м
		Сильвинит	Каменная соль	Ангидрит-галит	
1	1	–	0,4÷0,5	0,4÷0,5	0÷0,2
	2		1,1÷1,2		
2	3	–	–	1,2÷1,3	1,7÷1,8
	4				
3	5	–	–	0,8÷0,9	0,6÷0,7
	6				
4	7	1,7÷1,9	1,9÷2,0	0,9÷1,0	1,9÷2,0
	8				

На рис. 3 приведены зависимости смещений кровли выработок от времени. Установлено, что используемый на руднике тип анкеров не оказывает существенного влияния на НДС вмещающих выработку пород, что также подтверждается результатами численного моделирования. В связи с этим, учитывая геологическое строение кровли выработок на участках 2, 3 (рис. 2, табл. 5), можно сделать вывод о том, что уменьшение мощности ангидрит-

галитовых отложений с 1,2–1,3 м (уч. 2) до 0,8–0,9 м (уч. 3) в кровле выработки приводит к снижению величин смещений кровли за период наблюдений, примерно, в 1,5 раза (рис. 3, а). При этом отсутствие крепления и увеличение мощности соленосных отложений, по данным участка 4, приводит к смещениям кровли с возрастающей скоростью (рис. 3, б).

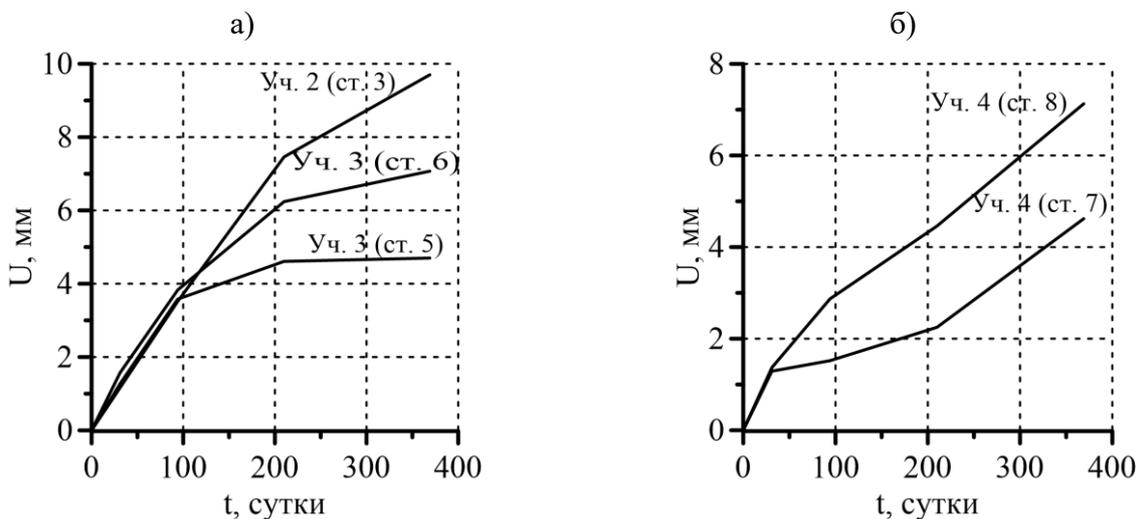


Рисунок 3 – Зависимости смещений контура кровли выработок от времени

На рис. 4 приведены зависимости горизонтальной конвергенции и смещений почвы выработок от времени. Взаимосвязь между горизонтальной конвергенцией (рис. 4, а) и геологическим строением вмещающих выработки пород установить не удалось, что связано с близкими значениями механических характеристик сильвинита и каменной соли, а также изменчивостью горно-геологических, горнотехнических условий экспериментальных участков.

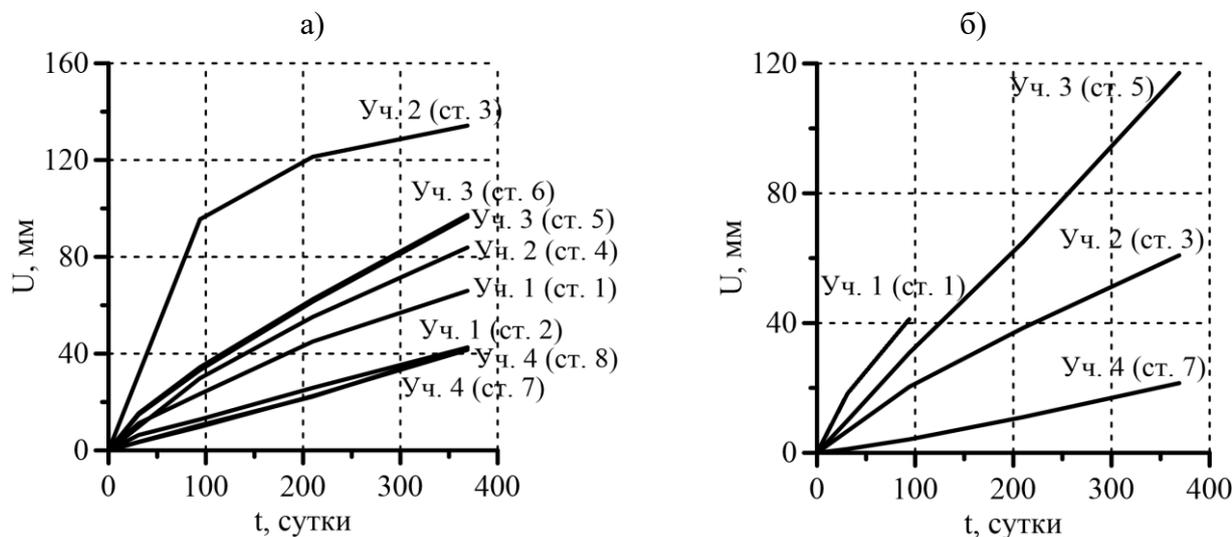


Рисунок 4 – Зависимости смещений элементов горных выработок от времени: а – горизонтальная конвергенция; б – смещения контура почвы выработок

Минимальное смещение почвы на протяжении периода наблюдений фиксировалось на участке 4 (рис. 4, б), что объясняется мощностью сильвинитовых отложений в почве 1,9 м и более, а также началом наблюдения спустя 230 суток с момента проходки выработки, в то время как на других участках первый замер был выполнен спустя 50 суток с момента проходки.

Смещения почвы на участке 3 (ст. 5) по результатам последнего замера составляют около 120 мм (рис. 4, б), что примерно в 2 раза превышает смещения на участке 2 (ст. 3). На участках 2, 3 почва выработок сложена сильвинитом и каменной солью, ниже залегает карналлитовый слой. Мощность каменной соли на указанных участках изменяется от 0,5 до 0,8 м (рис. 2). При этом мощность сильвинитовой пачки в почве на участке 3 составляет не более 0,7 м, а на участке 2 – достигает 1,8 м (табл. 5). В связи с тем, что сильвинит и каменная соль обладают близкими значениями механических характеристик, то основным фактором, определяющим величину смещений почвы в рассматриваемых условиях, является мощность ближайшего к контуру выработки породного слоя в почве. Этот вывод подтверждается также результатами инструментальных наблюдений на станции 1 (рис. 4, б).

В табл. 6 представлены значения накопленных смещений за период наблюдения, а также скорости смещения элементов горных выработок. Наименьшие смещения и их скорости характерны для кровли выработок.

Увеличение расстояния от почвы выработки до ближайшей границы раздела слоев до 1,7 м и более приводит к тому, что величины смещений почвы и боков принимают близкие значения. Это подтверждается результатами наблюдений на участках 2 и 4. Уменьшение указанного расстояния приводит к резкому возрастанию смещений почвы до 2-х и более раз по сравнению с боками, что подтверждается результатами наблюдений на участке 3, где мощность сильвинитового слоя в почве не превосходит 0,7 м (табл. 5).

Таблица 6 – Смещения и скорости смещения элементов горных выработок

№ участка	Накопленное смещение, мм			Скорость смещения, мм / мес.		
	Кровля	Почва	Бок	Кровля	Почва	Бок
1	–	–	27,1	–	–	1,8
2	10,4	56,6	41,9	0,4	3,1	2,6
3	5,9	138,0	48,4	0,1	12,3	3,3
4	5,9	20,8	21,0	0,5	1,9	1,9

Анализируя скорости смещения почвы и геологическое строение вмещающих выработки пород можно сделать вывод: уменьшение мощности сильвинита в почве выработок с 1,7–1,8 м (уч. 2) до 0,6–0,7 м (уч. 3) приводит к

возрастанию скорости смещения почвы по сравнению с боками более чем в 3 раза и в последующем вызывает ее пучение и интенсивное расслоение. Полученный вывод также подтверждается результатами обследования состояния выработок вблизи замерных участков.

В четвертой главе представлены результаты исследований методами математического моделирования состояния одиночных выработок, пройденных в соляных породах Гремячинского месторождения.

Для решения задачи о НДС вмещающих выработки пород использовалась упруго-вязко-пластическая модель среды, численная реализация которой включала 2 основных этапа и была выполнена методом конечных элементов в программном комплексе «ANSYS».

На 1-ом этапе моделирования определялись области запредельного деформирования пород, возникающие в момент проходки выработки. Связь между напряжениями и деформациями на допредельной стадии описывалась законом Гука. Переход в предельное состояние для области сжимающих напряжений определялся с помощью критерия прочности Кулона-Мора. Предельное состояние в области растяжения определялось величиной предела прочности при растяжении. Для описания поведения пород, перешедших в нарушенное (запредельное) состояние, в дальнейших расчетах использовалась упругая модель среды с пониженными значениями упругих характеристик.

На 2-ом этапе моделирования выполнялся расчет изменения НДС вмещающих выработки пород во времени. При этом принималось, что деформациями ползучести ангидритовых и ангидрит-доломитовых пород по сравнению с соляными можно было пренебречь. Соответственно связь между напряжениями и деформациями для ангидритовых, ангидрит-доломитовых отложений описывалась законом Гука, а для соляных пород использовалась упруго-вязкая модель среды, в рамках которой связь скорости деформации ползучести $\dot{\epsilon}^{cr}$ с соответствующей величиной напряжения σ описывалась степенной функцией:

$$\dot{\epsilon}^{cr} = k(\sigma)^n, \quad (5)$$

где k – коэффициент ползучести, $\text{Па}^{-n}\text{с}^{-1}$; n – показатель ползучести.

В первом приближении параметры ползучести определялись по результатам лабораторных исследований 30 образцов соляных пород в режиме длительного нагружения и составляли:

- для сильвинита: $k = 3,18 \cdot 10^{-17} \text{ МПа}^{-n}\text{сутки}^{-1}$, $n = 10,93$;
- для карналлита: $k = 9,35 \cdot 10^{-8} \text{ МПа}^{-n}\text{сутки}^{-1}$, $n = 6,22$.

Параметры ползучести каменной соли принимались равными соответствующим показателям сильвинита.

Задача о НДС массива пород, вмещающего одиночную горную выработку, решалась в постановке плоского деформированного состояния. Принималось, что выработка пройдена комбайном Урал-20Р имеет овально-арочную форму поперечного сечения шириной 6,0 м, высотой 3,7 м. Исходное поле напряжений считалось гидростатическим: $\sigma_x = \sigma_y = \gamma H = 24 \text{ МПа}$, $\tau_{xy} = 0$.

На основе данных инструментальных наблюдений по одному из экспериментальных участков проведена калибровка и верификация модели.

В связи с тем, что каменная соль и сильвинит обладают близкими значениями показателей механических свойств, то для упрощения интерпретации и анализа результатов исследования, дальнейшие численные эксперименты были выполнены на примере типового разреза, представленного снизу-вверх: карналлитом, сильвинитом, ангидритом и ангидрит-доломитом.

По результатам численного моделирования установлено: анкерная крепь замкового типа, используемая в соляных породах месторождения, не оказывает существенного влияния на НДС вмещающих выработки пород. Поэтому в представленных далее результатах влияния анкерной крепи не учитывалось.

На рис. 5 приведены результаты исследования влияния положения выработки относительно слабых карналлитовых пород в почве и прочных ангидрит-доломитовых отложений в кровле на размеры нарушенных зон, образующихся во вмещающих породах по результатам 1-го этапа моделирования, что соответствует моменту проходки выработки.

По результатам моделирования отдельно для сильвинитовых и карналлитовых пород почвы, а также сильвинитовых пород кровли и боков горной выработки, определялись размеры нарушенных зон. Анализ результатов моделирования (рис. 5) позволил сделать вывод: размеры нарушенных зон, формирующихся в момент проходки в боках выработок в рассматриваемых условиях, не зависят от положения выработки в сильвинитовом пласте и составляют приблизительно 1,4 м. Также важно отметить, что при проходке выработки с привязкой кровли по почве ангидритового слоя, в последнем формируется зона нарушенных пород, приуроченная к переходу плоской части кровли в сводчатую, что является крайне неблагоприятным фактором в связи с большей склонностью ангидритовых отложений к хрупкому разрушению по сравнению с соляными породами, что подтверждается результатами лабораторных исследований.

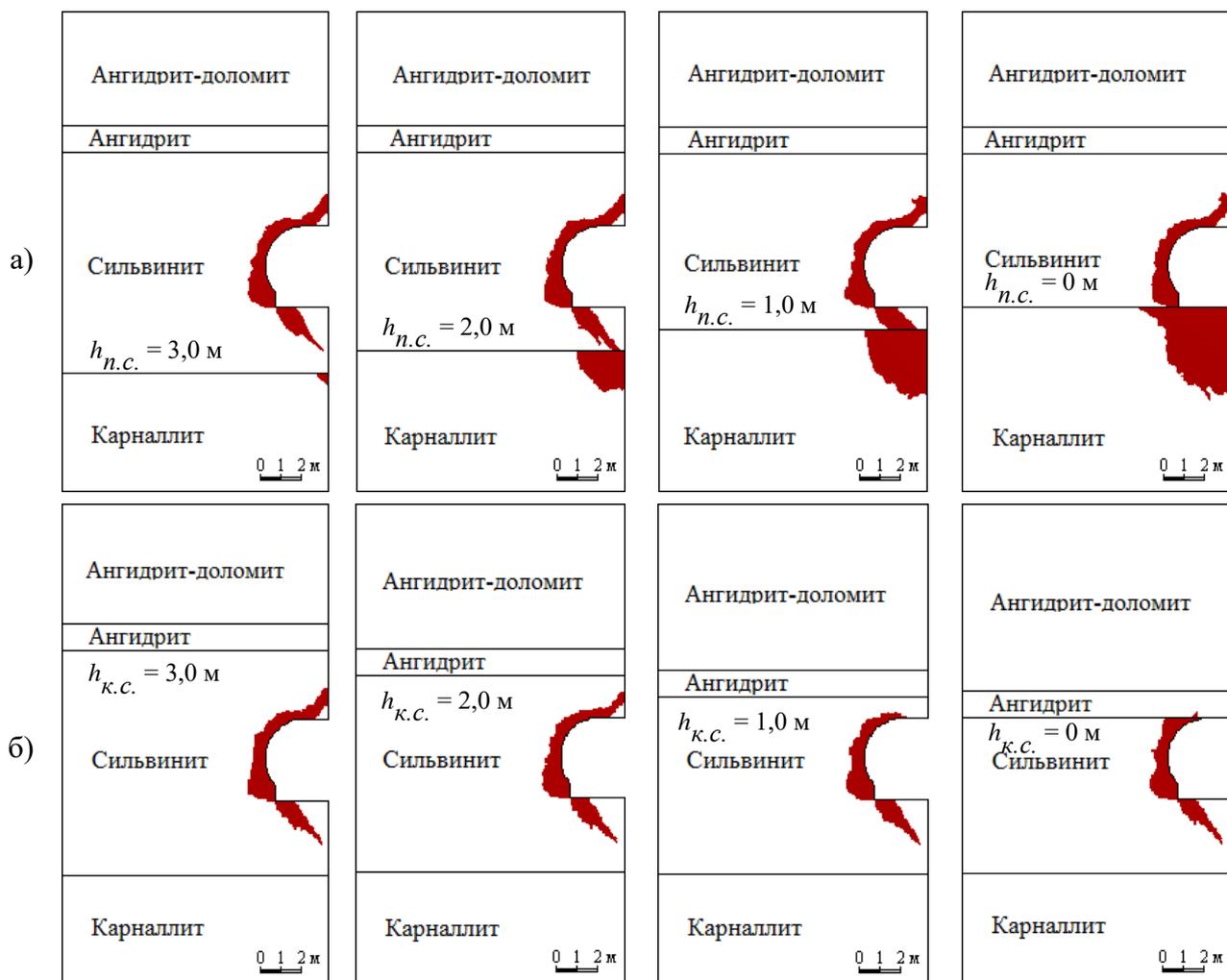


Рисунок 5 – Размеры нарушенных зон в зависимости от мощности сильвинитовых пород в почве $h_{n.c.}$ (а) и кровле $h_{k.c.}$ (б) выработки

По результатам численных экспериментов установлено, что для оценки размеров нарушенных зон в сильвинитовых ($h_{n.c.н.}$, м) и карналлитовых ($h_{n.k.н.}$, м) породах почвы выработок в момент проходки могут быть использованы следующие зависимости:

$$h_{п.с.н.} = \begin{cases} h_{п.с.}, & \text{при } 0 \leq h_{п.с.} < 2,3 \text{ м} \\ 2,3, & \text{при } h_{п.с.} \geq 2,3 \text{ м} \end{cases}, \quad (6)$$

$$h_{п.к.н.} = a \cdot h_{п.с.} + b, \text{ при } 0 \leq h_{п.с.} \leq 3,5 \text{ м}, \quad (7)$$

где $h_{п.с.}$ – мощность слоя однородных сильвинитовых пород, отделяющего контур выработки от карналлитовых отложений, м; $a = -1,20$, $b = 4,21$ – параметры аппроксимации результатов численного моделирования.

Для оценки размеров нарушенных зон в сильвинитовых породах кровли ($h_{к.с.н.}$, м) в момент проходки выработки в рассматриваемых условиях могут использоваться зависимости:

$$h_{к.с.н.} = \begin{cases} a \cdot h_{к.с.}, & \text{при } 0 \leq h_{к.с.} < 1,4 \\ b \cdot h_{к.с.} + c, & \text{при } 1,4 \leq h_{к.с.} < 1,8 \\ d \cdot h_{к.с.}^2 + f \cdot h_{к.с.} + g, & \text{при } 1,8 \leq h_{к.с.} \leq 3,5 \end{cases}, \quad (8)$$

где $h_{к.с.}$ – мощность слоя однородных сильвинитовых пород, оставляемых в кровле выработки, м; $a = 0,32$, $b = 1,85$, $c = -2,14$, $d = -0,12$, $f = 0,81$, $g = 0,12$ – параметры аппроксимации результатов численного моделирования.

Анализ полученной зависимости (8), представленной на рис. 6, позволяет сделать вывод о том, что оптимальная мощность соляной пачки в кровле выработки в рассматриваемых условиях должна составлять не более 1,4 м. В противном случае наблюдается резкое увеличение размера нарушенной зоны в сильвинитовых породах кровли, что наглядно иллюстрируют области II-III графика на рис. 6.

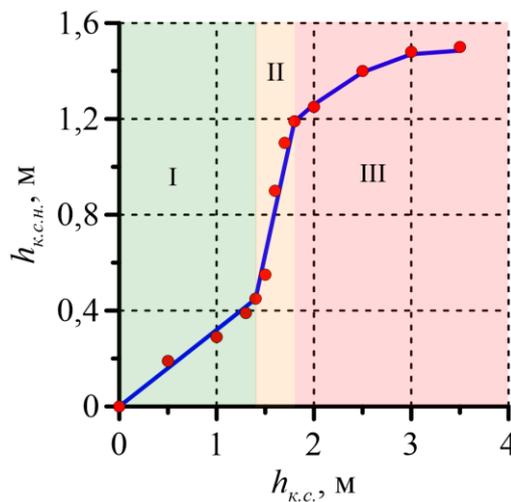


Рисунок 6 – Зависимость размеров нарушенной зоны $h_{к.с.н.}$ в сильвинитовых породах кровли от их мощности $h_{к.с.}$.

На рис. 7 представлено распределение растягивающих напряжений во вмещающих горную выработку породах в зависимости от расстояния $h_{к.с.}$ от контура выработки до ангидритовых пород. Установлено: при $h_{к.с.} = 0,5$ м зона растягивающих напряжений в сильвинитовых породах кровли не возникает, в то время как при $h_{к.с.} = 0$ зона растягивающих напряжений локализуется в ангидритовых породах в районе перехода сводчатой части кровли в плоскую.

По результатам визуального обследования состояния горных выработок установлено, что наличие в кровле соленосных отложений мощностью около 0,2-0,3 м приводит к их выламыванию с последующим обрушением внутрь выработки.

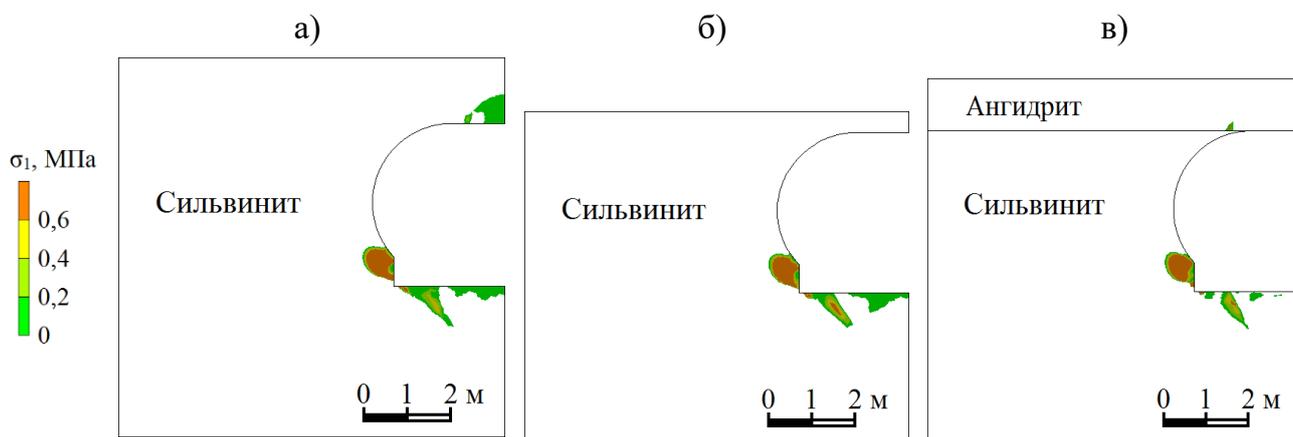


Рисунок 7 – Распределение растягивающих напряжений во вмещающих горную выработку породах в зависимости от мощности сильвинита в кровле $h_{к.с.}$:
а) 1,5 м; б) 0,5 м; в) 0 м

Обобщая вышеизложенное, можно сделать вывод о том, что для одиночной горной выработки шириной 6,0 м и высотой 3,7 м с овально-арочной формой поперечного сечения в рассматриваемых условиях оптимальная мощность соляной пачки, оставляемой в кровле, находится в диапазоне от 0,5 до 1,4 м.

По результатам численного моделирования установлено: мощность слоя сильвинита в кровле выработки $h_{к.с.}$ не оказывает существенного влияния на величину смещений почвы. Результаты исследования влияния положения выработки в сильвинитовом пласте относительно ангидрит-доломитовых отложений на величины смещений кровли и боков показаны на рис. 8, 9.

По результатам расчета смещений кровли и боков выработки в однородном соляном массиве видно, что значения указанных величин за рассматриваемый отрезок времени имеют близкие значения (рис. 8).

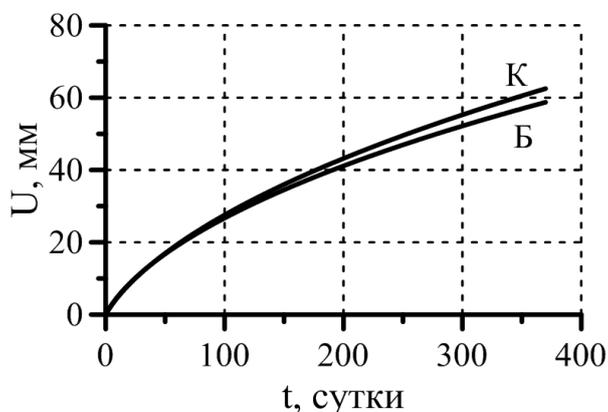


Рисунок 8 – Зависимости смещений кровли (К) и боков (Б) выработки в массиве, представленном однородными сильвинитовыми породами

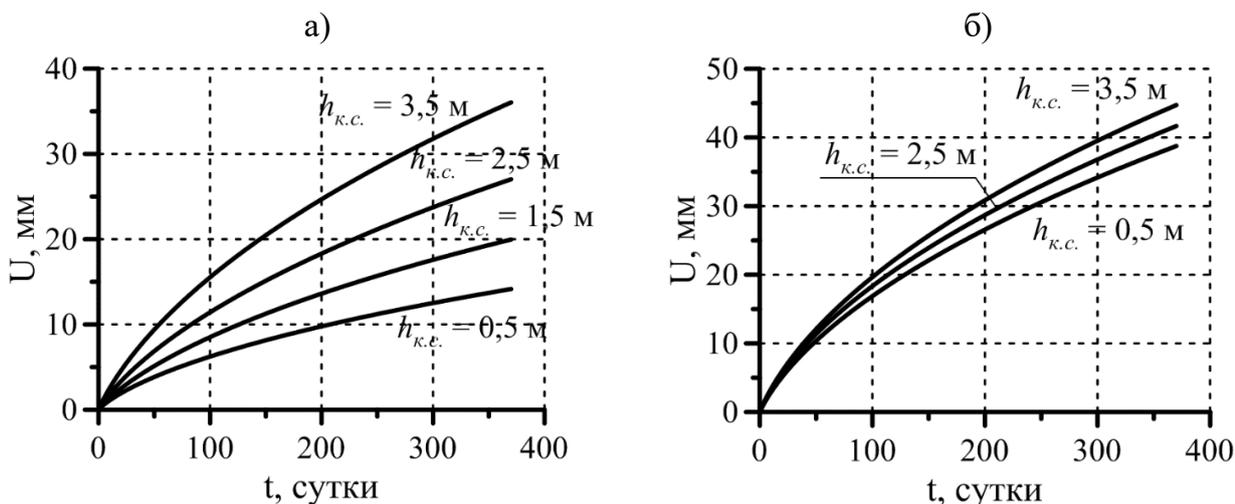


Рисунок 9 – Зависимости смещения кровли (а) и боков (б) выработки от времени и мощности сильвинитового слоя в кровле $h_{к.с.}$

При уменьшении мощности соленосных отложений в кровле с 3,5 до 0,5 м происходит уменьшение смещений кровли в 1,7–4,4 раза, боков – в 1,3–1,5 раза за первый год эксплуатации выработки, что приводит к существенно неравномерному характеру деформирования вмещающих выработку пород (рис. 9). Указанный факт наглядно иллюстрируется распределением полных смещений во вмещающих выработку породах, представленном на рис. 10.

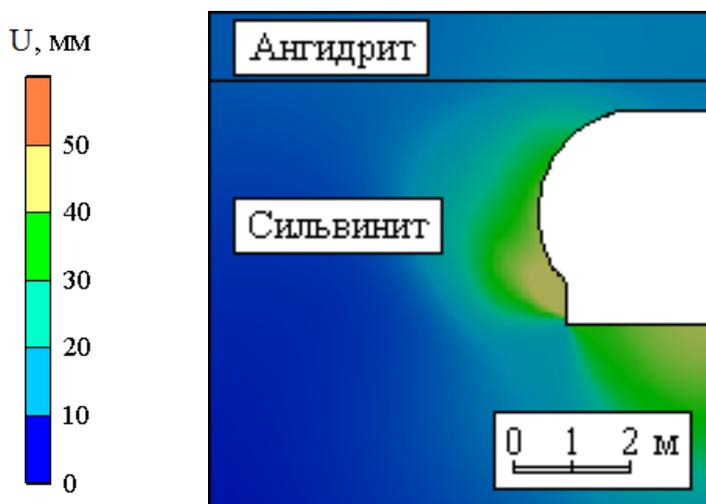


Рисунок 10 – Распределение полных смещений во вмещающих горную выработку породах по истечении 365 суток с момента проходки при мощности сильвинита в кровле 0,5 м

Обобщая вышеизложенное, можно сделать следующий вывод. Устойчивость кровли горной выработки, пройденной в соленосных отложениях вблизи вышележащих более прочных ангидритовых, ангидрит-доломитовых пород, зависит от мощности пачки соляных пород, оставляемой в кровле

выработки. При этом прогнозируется снижение смещений пород кровли и боков, соответственно, в 1,7–4,4 и 1,3–1,5 раза за первый год эксплуатации выработки при уменьшении мощности соленосных отложений в кровле с 3,5 до 0,5 м. Для одиночной горной выработки шириной 6,0 м и высотой 3,7 м с овально-арочной формой поперечного сечения оптимальная мощность соляной пачки, оставляемой в кровле, находится в диапазоне от 0,5 до 1,4 м.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе на основе проведенных автором теоретических и экспериментальных исследований предложено решение актуальной научно-практической задачи по разработке способов оценки и прогноза устойчивости горных выработок в соляных породах Гремячинского месторождения.

Полученные результаты использовались при разработке Временного положения по креплению и поддержанию горных выработок на руднике Гремячинского ГОК.

Основные научные и практические результаты работы заключаются в следующем:

1. Получены зависимости, отражающие влияние фактора формы на значения следующих механических показателей соляных пород Гремячинского месторождения: предела прочности, касательного модуля деформации, секущего модуля деформации, касательного модуля спада. Наиболее чувствительным показателем к изменению отношения высоты к диаметру образцов соляных пород является касательный модуль спада, который изменяется на порядок и более при изменении отношения высоты к диаметру от 0,3 до 2,0.

2. Экспериментально установлено, что метод объемного многоступенчатого нагружения отражает изменение прочностных и деформационных характеристик соляных пород в зависимости от уровня бокового давления и стадии деформирования и позволяет сократить необходимый объем породного материала по сравнению с одноступенчатыми испытаниями.

3. По результатам инструментальных наблюдений в горных выработках Гремячинского рудника установлено, что наименьшие скорости смещений характерны для кровли горных выработок и составляют 0,1–0,5 мм/мес., что объясняется залеганием вблизи контура выработок ангидритовых и ангидрит-

доломитовых пород. Скорости смещений почвы, боков более чем в 3 раза превосходят соответствующие скорости смещений кровли.

4. Анализ данных инструментальных наблюдений показал, что основным фактором, определяющим величину смещений почвы в условиях Гремячинского месторождения, является мощность ближайшего к контуру выработки породного слоя в почве. При мощности сильвинитовой пачки, оставляемой в почве протяженной горной выработки, менее 0,6-0,7 м скорость смещения почвы по сравнению с боками увеличивается более чем в 3 раза, что приводит к пучению почвы и интенсивному ее расслоению. В случае оставления в почве выработки сильвинитовой пачки мощностью более 1,7–2,0 м, скорости смещения почвы и боков принимают близкие значения.

5. По результатам численного моделирования установлено, что устойчивость кровли горной выработки, пройденной в соленосных отложениях вблизи вышезалегающих более прочных ангидритовых, ангидрит-доломитовых пород, зависит от мощности пачки соляных пород, оставляемой в кровле выработки. Для одиночной горной выработки шириной 6,0 м и высотой 3,7 м с овально-арочной формой поперечного сечения оптимальная мощность соляной пачки находится в диапазоне от 0,5 до 1,4 м.

6. В ходе численных экспериментов установлено, что анкерная крепь замкового типа, используемая в соляных породах Гремячинского рудника, не оказывает существенного влияния на напряженно-деформированное состояние вмещающих выработки пород. Основным назначением указанной крепи в условиях месторождения является подвешивание слоя нарушенных пород кровли с целью предотвращения их обрушения внутрь выработки.

7. Анализ результатов численного моделирования показал, что проходка выработки в соляных породах вблизи более прочных ангидритовых, ангидрит-доломитовых отложений приводит к уменьшению величин смещений пород кровли и боков, соответственно, в 1,7–4,4 и 1,3–1,5 раза за первый год эксплуатации выработки, изменяя характер деформирования контура выработки, при уменьшении мощности соленосных отложений в кровле с 3,5 до 0,5 м.

8. Получены зависимости для определения размеров нарушенных зон в почве и кровле в момент проходки, в зависимости от положения горной выработки с овально-арочной формой поперечного сечения относительно ангидритовых и ангидрит-доломитовых пород, залегающих вблизи кровли, карналлитовых пород – вблизи почвы выработки.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

В изданиях, рекомендованных ВАК при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации

1. Паньков И.Л. Деформирование соляных пород при объемном многоступенчатом нагружении / И.Л. Паньков, **И.А. Морозов** // Записки Горного института. – 2019. – Т. 239. – С. 510–519.

2. Токсаров В.Н. Исследование деформирования подземных горных выработок в условиях Гремячинского месторождения калийных солей / В.Н. Токсаров, **И.А. Морозов**, Н.Л. Бельтюков, А.А. Ударцев // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – № 7. – с. 113–124.

3. Морозов И.А. Анализ деформирования соляных пород Гремячинского и Верхнекамского месторождений в лабораторных условиях / **И.А. Морозов**, А.А. Ударцев, И.Л. Паньков // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – № 10. – С. 16–28.

4. Морозов И.А. Изучение устойчивости горных выработок в соляных породах / **И.А. Морозов**, И.Л. Паньков, В.Н. Токсаров // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 9. – С. 36–47.

В прочих изданиях:

1. Паньков И.Л. Экспериментальное исследование зависимости показателей механических свойств от торцевых условий и отношения высоты к диаметру при сжатии образцов каменной соли / И.Л. Паньков, **И.А. Морозов** // Тезисы Международного форум-конкурса молодых ученых «Проблемы недропользования», Санкт-Петербург, 22-24 апреля 2015 г. – Санкт-Петербург : Нац. минерально-сырьевой ун-т «Горный», 2015. – Ч. II. – С. 12–13.

2. Морозов И.А. Определение прочностных характеристик соляных пород по результатам объемного многоступенчатого нагружения / **И.А. Морозов** // Стратегия и процессы освоения георесурсов [Сб. науч. тр.]. – Пермь: ГИ УрО РАН, 2017. – Вып. 15. – С. 142–145.

3. Асанов В.А. Деформирование квазипластичных соляных пород при многоступенчатом объемном нагружении / В.А. Асанов, **И.А. Морозов** // Материалы X Международной конференции молодых ученых и студентов «Современные техника и технологии в научных исследованиях», Киргизия, Бишкек, 18-20 апреля 2018 г. – Бишкек: Дэми, 2018. – С. 305–307.

4. Паньков И.Л. Формирование общих подходов повышения устойчивости капитальных горных выработок в условиях глубоких калийных рудников / И.Л. Паньков, **И.А. Морозов** // Материалы XI Всероссийской конференции «Проблемы разработки месторождений углеводородных и

рудных полезных ископаемых», Пермь, 7-9 ноября 2018 г. – Пермь : Изд-во ПНИПУ, 2018. –С. 351–353.

5. Морозов И.А. Исследование устойчивости капитальных выработок в массивах пород с резко отличающимися прочностными и деформационными характеристиками / **И.А. Морозов**, И.Л. Паньков, В.Н. Токсаров // XXII Зимняя школа по механике сплошных сред Пермь, 22-26 марта 2021 г. [Тезисы докладов]. – Пермь: ПФИЦ УрО РАН, 2021. – С. 221.

Сдано в печать _____ 2022 г.
Формат 60x84/16. Тираж 100 экз.

Отпечатано сектором НТИ
«ГИ УрО РАН»
614007, г. Пермь, ул. Сибирская, 78-а