

«Горный институт Уральского отделения Российской академии наук»  
филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки  
Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения  
Российской академии наук

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Пермский национальный исследовательский политехнический университет»



*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

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
кандидат технических наук, доцент

**Паньков Иван Леонидович**

Пермь – 2022

**СОДЕРЖАНИЕ**

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	10
1.1. Краткая характеристика Гремячинского месторождения калийных солей .....	10
1.2. Устойчивость горных выработок в соляных породах.....	16
1.3. Физико-механические свойства соляных пород.....	34
Выводы по главе. Цель и задачи исследования .....	41
2. ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОРОД ГРЕМЯЧИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ .....	44
2.1. Изготовление образцов горных пород для лабораторных исследований	44
2.2. Исследование прочностных и деформационных свойств пород при одноосном сжатии и растяжении .....	46
2.3. Исследование прочностных и деформационных свойств пород методом объемного многоступенчатого сжатия .....	48
2.4. Результаты исследования физико-механических свойств пород Гремячинского месторождения .....	59
Выводы по главе.....	67
3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРА ДЕФОРМИРОВАНИЯ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК И ВМЕЩАЮЩИХ ПОРОД .	70
3.1. Методика исследования .....	70
3.2. Геологическая характеристика экспериментальных участков.....	72
3.3. Параметры крепления экспериментальных участков .....	75

3.4. Результаты исследования характера деформирования горных выработок и вмещающих пород .....	76
Выводы по главе.....	89
4. ОЦЕНКА И ПРОГНОЗ УСТОЙЧИВОСТИ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК В СОЛЯНЫХ ПОРОДАХ ГРЕМЯЧИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ .....	91
4.1. Выбор и обоснование математической модели деформирования неоднородного слоистого массива пород Гремячинского месторождения....	91
4.2. Сопоставление результатов моделирования с данными натуральных наблюдений.....	101
4.3. Анализ влияния карналлитовых отложений в почве на состояние вмещающих выработки пород .....	103
4.4. Анализ влияния мощности соляных отложений в кровле на состояние вмещающих выработки пород .....	108
4.5. Оценка влияния анкерной крепи на напряженно-деформированное состояние массива горных пород, вмещающего одиночную выработку.....	118
4.6. Оценка и прогноз устойчивости горных выработок в соляных породах Гремячинского месторождения .....	121
Выводы по главе.....	124
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	126
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	129
ПРИЛОЖЕНИЕ .....	146

## ВВЕДЕНИЕ

### **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

овально-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 внутри 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.

# 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

## 1.1. Краткая характеристика Гремячинского месторождения калийных солей

Гремячинское месторождение калийных солей располагается в преднадвиговой зоне на юге Приволжской моноклинали, к северо-востоку от Северо-Котельниковского надвига. В административном отношении месторождение находится в 170 км к юго-западу от г. Волгограда и в 20 км к северо-востоку от районного центра г. Котельниково. Площадь лицензионного участка составляет 96,9 км<sup>2</sup>. Запасы полезного ископаемого, подсчитанного по категории С<sub>2</sub>, составляют 1,2 млрд.т [87].

Месторождение относится к пластовым пологозалегающим месторождениям. Стратиграфический разрез представлен сверху-вниз следующими системами: четвертичной, неогеновой, палеогеновой, меловой, триасовой и пермской (рис. 1.1) [46]. Геологические особенности строения как галогенной толщи, так и вмещающих пород подробно рассмотрены в работах [2, 11, 22, 46, 58, 69, 87].

В настоящее время промышленное значение имеет сильвинитовый пласт, приуроченный к погожимской ритмопачке кунгурского яруса (P<sub>1k</sub>) и представляющий собой моноклираль, погружающуюся с юго-запада на северо-восток (рис. 1.2). Губина залегания промышленного пласта изменяется от 1100 м в южной части до 1300 м в северной, мощность – от 2 до 20 м.

Продуктивная залежь сложена сильвинитом светло-серым, мелко-среднекристаллическим с редкими крупнокристаллическими прослоями. Повсеместно в промышленном пласте встречаются нитевидные прослои ангидрита, иногда до 4 мм.

Ниже промышленного пласта, в пределах всего шахтного поля, залегают карналлитосодержащие породы суммарной мощностью от 1,0 до 7,0 м, которые на значительной части месторождения непосредственно подстилают сильвинитовый пласт. Содержание карналлита составляет от 20 до 60 %.

Система мра	Отдел	Ярус	Индекс	Мощность	Характеристика пород
ЧЕТВЕРТИЧНАЯ			Q <sub>iv</sub>		Суглинки, пески, глины
			Q <sub>i</sub>		
			N <sub>er</sub>	15-48	Ергенинская свита. Элювиальные красноцветные глины
ПАЛЕОГЕНОВАЯ	Плиоцен		N <sub>er</sub>	0-59	Ергенинская свита. Пески
			P <sub>2kv</sub>	0-119	Киевская свита. Глины, мергели
			P <sub>1-2</sub>	45-100	Пески с прослоями алевритов, глин, реже песчаников (нерасчлененные отл.)
ПАЛЕОГЕНОВАЯ	Палеоцено-эоцен		P <sub>1sz</sub>	30-52	Сызранская свита. Алевриты, пески, глины, песчаники
			K <sub>1m</sub>	15-63	Глины
			K <sub>1km</sub>	54-69	Глины, пески, алевриты, опоки, алевролиты
МЕЛОВАЯ	Верхний		K <sub>1st</sub>	18-65	Глины с прослоями опок и мергелей
			K <sub>1+k</sub>	7-41	Мел писчий, мергель (нерасчлененные отл.)
			K <sub>1s</sub>	16-66	Пески с прослоями песчаников
			K <sub>1al</sub>	0-40	Пески, алевриты
			K <sub>1a</sub>	79	Глины с прослоями алевритов и песчаников
			Нижний		
T <sub>1v</sub>	0-190	Ветлужская серия. Гравелиты, песчаники, алевролиты, мергели, глины, алевриты			
ПЕРМСКАЯ	Верхний		P <sub>2t</sub>	41-276	Глины, гравелиты, песчаники, алевролиты, мергели
			P <sub>1k</sub>	185-367	Каменная соль, ангидриты, доломиты, ангидрит-доломиты, калийные соли
			P <sub>1s+</sub> P <sub>1ar</sub>	23-187	Ангидрит-доломиты с прослоями ангидритов и доломитов
			P <sub>1a</sub>	0-198	Известняки, аргиллиты, доломиты

Рисунок 1.1 – Сводная стратиграфическая колонка района Гремячинского месторождения калийных солей [46]

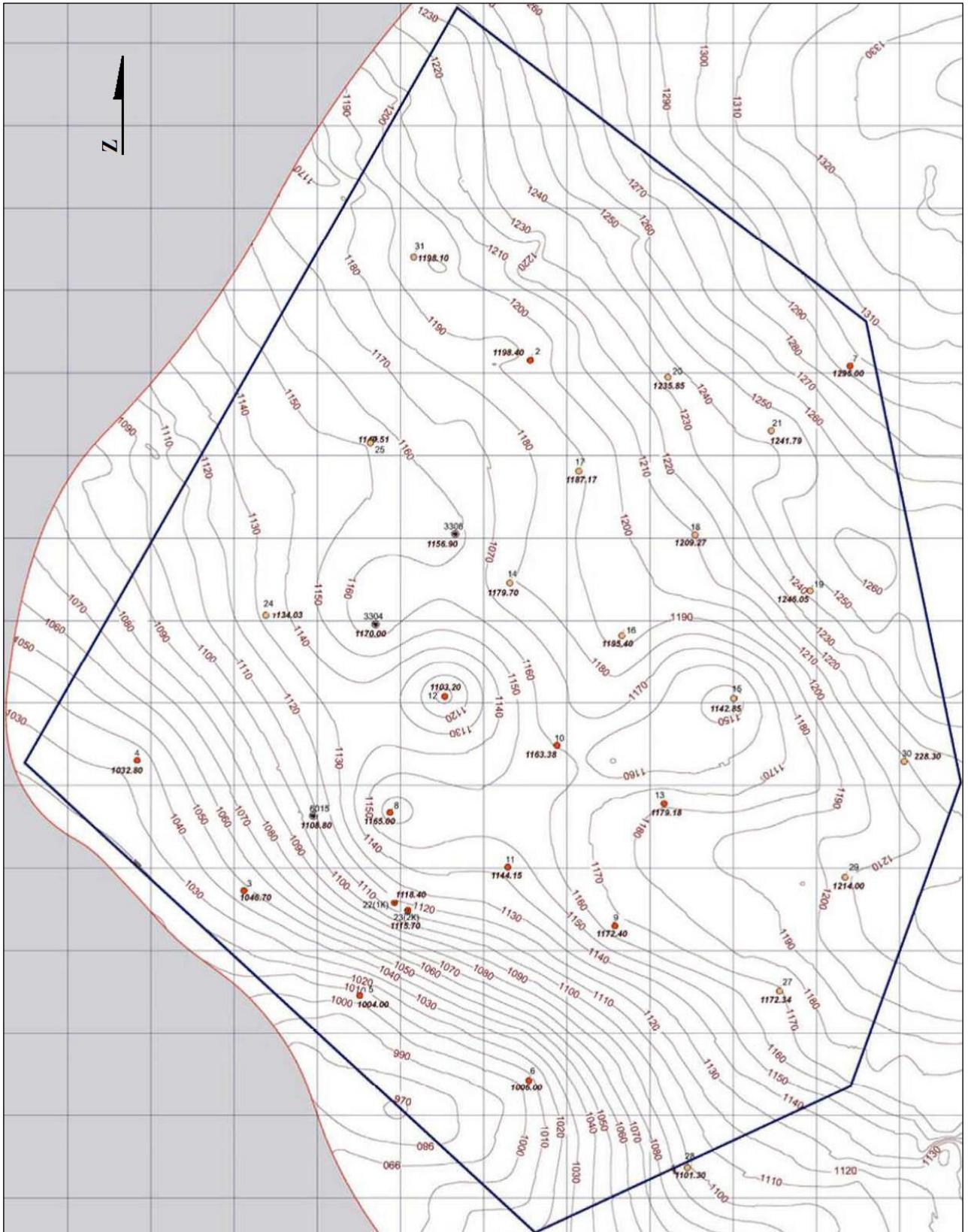


Рисунок 1.2 – Изолинии глубины залегания первого (промышленного) сивинитового пласта [46]

По всей площади месторождения сильвинитовую залежь покрывает пласт каменной соли мощностью до 5,0 м. Пласт представлен мелко- либо среднезернистой каменной солью с отдельными включениями крупнозернистой. Выше перекрывающей каменной соли залегает базальный доломит-ангидрит-галитовый пласт средней мощностью более 60,0 м, в котором выделяется четыре слоя: ангидритовый, магнезит-доломит-ангидритовый, ангидрит-галитовый и доломит-ангидритовый.

Ангидритовый слой прослеживается практически по всей площади лицензионного участка. Магнезит-доломит-ангидритовый слой встречается не повсеместно. Слой залегает на породах перекрывающей каменной соли погожимской ритмопачки либо на ангидритовом слое. Мощность магнезит-доломит-ангидритового слоя изменяется в пределах от 2,0 до 20,0 м. Ангидрит-галитовый слой также развит не повсеместно и представлен либо каменной солью, либо переслаиванием каменной соли и ангидрита. Доломит-ангидритовый слой прослеживается практически по всей площади месторождения. Слой представлен переслаиванием доломита и ангидрита. Доломитовые прослойки включают тонкорассеянную примесь глины и редкие угловато-окатанные зерна кварца. Мощность доломит-ангидритового слоя изменяется от 12,0 до 38,0 м.

В налегающей толще пород выделяется несколько водоносных горизонтов. В связи с тем, что калийные руды водорастворимы, разработка месторождения должна вестись с сохранением сплошности водозащитной толщи (ВЗТ) [16, 17], которая определяется как часть разреза между кровлей промышленного пласта и нижним водоносным горизонтом. Мощность ВЗТ Гремячинского месторождения изменяется в пределах от 0 до 320 м [46]. За границу ведения горных работ принята минимально допустимая мощность ВЗТ – 60 м.

В настоящее время на месторождении идет строительство первого Гремячинского рудника. Месторождение вскрыто по фланговой схеме с

расположением стволов в южной части шахтного поля. Выработки околоствольного двора расположены в ангидрит-доломитовых породах, обладающих наибольшей прочностью по сравнению с другими вмещающими породами.

Основной способ проходки выработок в ангидрит-доломитовых породах – буровзрывной, в соляных – комбайновый. Отработка запасов планируется с применением камерной системы разработки с поддержанием пород налегающей толщи на ленточных целиках [46].

Особенностью массивов горных пород является наличие исходного (естественного) поля напряжений, качественные и количественные особенности которого определяют величины и характер распределения индуцированного поля в окрестности породных обнажений [12, 80]. В работах [15, 80] указывается на то, что в массивах, сложенных релаксирующими (соляными) породами, с увеличением глубины напряженное состояние стремится к гидростатическому.

Оценка исходного поля напряжений в соляных породах Гремячинского рудника была выполнена специалистами ГИ УрО РАН: Токсаровым В.Н., Бельтюковым Н.Л. и др. Ими был использован метод, основанный на разгрузке некоторой области массива бурением скважины и повторном нагружении её стенок гидродомкратом Гудмана с регистрацией активности акустической эмиссии (АЭ). Подробно указанная методика изложена в работах [7, 9, 10, 19, 98] и основана на проявлении эффекта Кайзера, который заключается в сохранении активности АЭ на уровне фона при нагружении материала вплоть до максимального напряжения, действовавшего в прошлом, при достижении которого указанный параметр скачкообразно возрастает [106, 121, 124].

Экспериментальные исследования по оценке напряжений в соляных породах Гремячинского рудника выполнялись в проходческом транспортном штреке № 1 (глубина 1100 м). Схема расположения скважин представлена на

рис. 1.3. В вертикальном направлении оценка напряжений выполнялась в скважинах 9, 15, в горизонтальном – 8, 10, 11, 14 [19].

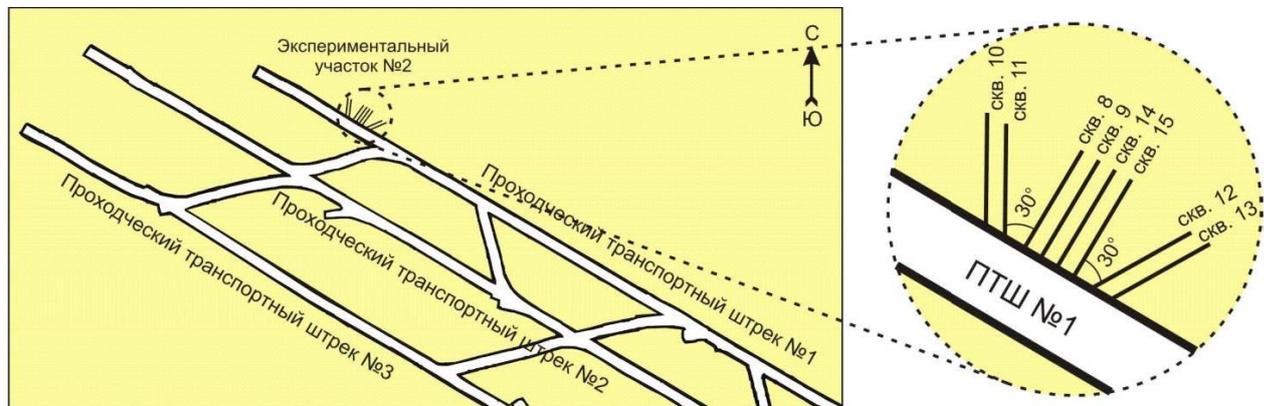


Рисунок 1.3 – Схема расположения экспериментального участка на шахтном поле Гремячинского рудника [19]

На рис. 1.4 представлены некоторые результаты исследования поля напряжений в соляных породах Гремячинского месторождения [19].

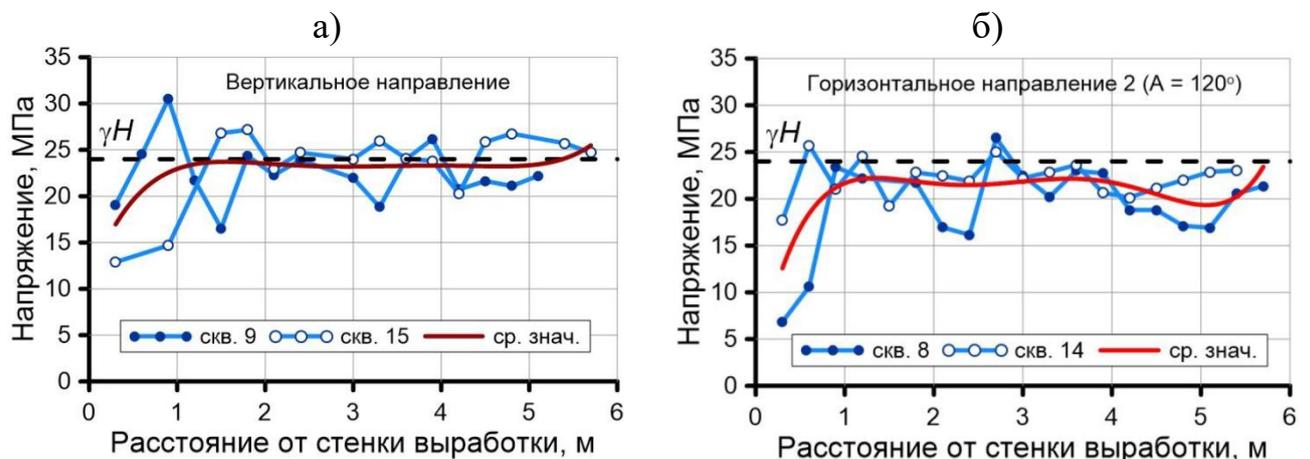


Рисунок 1.4 – Результаты исследования поля напряжений в соляных породах Гремячинского месторождения: распределение вертикальных (а) и горизонтальных (б) напряжений в зависимости от расстояния до стенки выработки [19]

Вертикальная компонента поля напряжений в массиве месторождения в месте проведения экспериментальных исследований, определяемая весом вышележащих пород, составляет примерно 24 МПа. Горизонтальные напряжения чуть ниже или равны указанной величине в зависимости от

направления (рис. 1.4, б). При этом коэффициент бокового давления изменяется в диапазоне от 0,8 до 1,0, что соответствует исходному полю напряжений близкому гидростатическому.

Обобщая вышеизложенное, необходимо отметить, что основными особенностями Гремячинского месторождения калийных солей являются следующие:

- большая глубина разработки (1100–1300 м) обуславливает высокий уровень естественных напряжений;
- вблизи почвы промышленного пласта залегают карналлитовые породы прочностью менее 10-15 МПа, что в условиях больших глубин может приводить к пучению почвы выработок [65, 129];
- вблизи кровли сильвинитового пласта залегают ангидритовые, ангидрит-доломитовые породы, обладающие более высокими прочностными и деформационными характеристиками по сравнению с соляными [51, 131], влияние которых на устойчивость выработок в соляных породах требует проведения дополнительных исследований;
- малый опыт разработки и, как следствие, малая изученность месторождения.

## **1.2. Устойчивость горных выработок в соляных породах**

Одним из обязательных требований правил безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых является требование о необходимости обеспечения устойчивости горных выработок в течение всего срока их эксплуатации [101]. 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 [3, 13, 20, 23, 37, 42, 47, 62, 85, 93, 113, 122, 132, 133 и др.].

Под устойчивостью, в соответствии с СП 91.13330.2012 [91], понимается способность выработок выполнять свои функции в течение необходимого отрезка времени. Нарушения требований действующих норм и правил, недостаточная изученность породного массива могут привести не только к остановке отдельных производственных процессов, но и «потере» (затоплению) калийного рудника [59, 132, 143].

В работах Слесарева В.Д., Фисенко Г.Л., Цимбаревича П.М. [89, 102, 103] и других исследователей указывается, что устойчивость подземных горных выработок определяется следующими основными факторами: глубиной заложения, физико-механическими свойствами пород, структурными особенностями строения массива, технологией ведения горных работ, влиянием близко расположенных выработок и сопряжений, формой и размерами поперечного сечения, влиянием очистных работ и пр.

Нарушение устойчивости выработок происходит вследствие действия горного давления, основными формами проявления которого в соляных породах являются следующие: интенсивная ползучесть соляных пород, прогрессирующее расслоение и последующее отслоение пород по глинистым прослойкам, выпучивание боков и почвы, образование областей нарушения сплошности в виде трещин, отслоений, вывалов [50, 52, 64].

По данным Константиновой С.А., Сиренко Ю.Г., Dawson P.R. [20, 88, 113] и др. авторов склонность соляных пород к деформациям ползучести, невысокая прочность на сжатие, которая зачастую не превосходит 30–40 МПа [83, 127, 149], при переходе горных работ на большие глубины, приводят к интенсивному деформированию приконтурных пород на протяжении всего

времени эксплуатации выработок. В отдельных случаях возможно полное заплывание их поперечного сечения [20].

Необходимо отметить, что однозначного определения понятия «большая глубина» не существует. С увеличением глубины ведения горных работ напряжения в породном массиве, обусловленные весом налегающей толщи, возрастают. Начиная с некоторой глубины, при определенной величине напряжений, в породах начинают значительно проявляться реологические процессы. Если массив сложен слабыми породами, то на больших глубинах происходит релаксация и выравнивание компонентов напряжений, а коэффициент бокового давления стремится к единице. При этом на контуре выработки возникают такие напряжения, что их величины оказывается достаточно для перехода пород в запредельное состояние [40]. Таким образом, под термином «большая глубина» для выработок, пройденных в соляных породах, будем понимать такую глубину, при которой вес налегающей толщи превышает предел длительной прочности вмещающих выработку пород при сжатии.

Обширный опыт поддержания выработок в соляных породах в устойчивом состоянии накоплен в процессе разработки Верхнекамского месторождения калийных солей (ВКМКС), расположенного на территории Пермского края. ВКМКС является составной частью Соликамского соленосного бассейна. Площадь бассейна превосходит 6,5 тыс. км<sup>2</sup>. В настоящее время глубина разработки месторождения не превышает 450 м. Промышленный интерес представляют силвинитовые пласты АБ и Красный П. На сегодняшний день геологические особенности месторождения достаточно детально изучены и представлены в работах [43, 57].

Исследованию вопросов устойчивости выработок в соляных породах ВКМКС посвящены труды следующих ученых: Асанова В.А. [3, 8], Баряха А.А. [13, 110], Габдрахимова И.Х. [27, 29], Жихарева С.Я. [39, 56], Константиновой С.А. [20, 52], Маракова В.Е. [21, 62] и многих других.

По данным указанных авторов, а также Бельтюкова Н.Л., Евсеева А.В., Токсарова В.Н., Чернопазова Д.С. [4, 8, 35, 104], поддержание пластовых выработок в устойчивом состоянии в условиях ВКМКС осложняет наличие в кровле промышленных пластов глинистых коржей, мощность которых изменяется от долей миллиметра до нескольких десятков сантиметров [43, 57]. Так, например, в работе [8] авторами установлено, что повышенное содержание глины в породах продуктивной толщи ВКМКС приводит к величинам смещений кровли очистных камер достигающих 100 мм/мес. и более. В результате чего наблюдается расслоение кровли и потеря устойчивости выработок до окончания их необходимого срока службы.

Пример расслоения пород кровли по глинисто-соляному контакту с последующим обрушением в условиях ВКМКС представлен на рис. 1.5 [35].

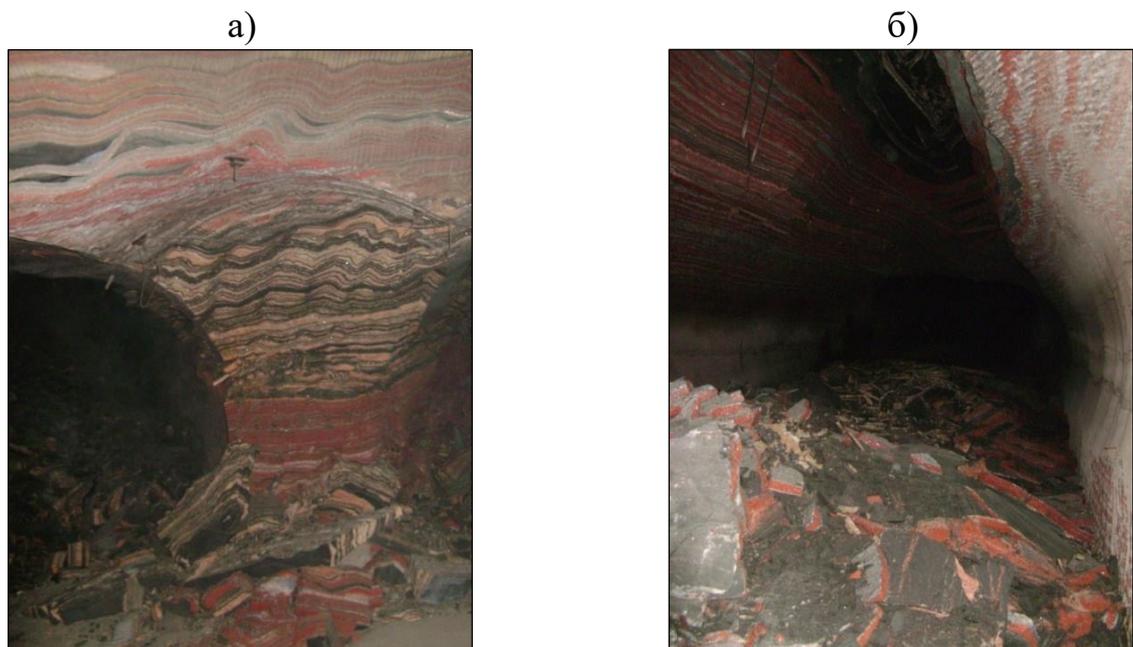


Рисунок 1.5 – Расслоение пород кровли по глинисто-соляному контакту (а) и их дальнейшее обрушение (б) в условиях ВКМКС [35]

В случае проходки выработки в однородном соляном массиве деформации начинаются с ее контура, постепенно распространяясь вглубь массива. Наличие вблизи кровли выработок, пройденных в соляных породах,

слабых (глинистых) прослоев приводит к возникновению на контактах слоев касательных напряжений и возрастанию в породном слое, расположенном под глинистым прослоем, горизонтальных сжимающих, величина которых в 5 раз и более превосходит аналогичные напряжения над прослоем. При этом деформации вмещающих выработку пород начинаются с глубины залегания глинистых прослоев, а потеря устойчивости кровли выработки происходит вследствие продольно-поперечного изгиба породных слоев [39, 56].

Исключение влияния глинистых прослоев (коржей) в кровле на устойчивость пластовых подготовительных выработок в условиях ВКМКС достигается за счет их подрезки либо оставления «защитной пачки» монолитной породы, мощность которой, по данным [104], должна быть не менее 0,15 от величины расчетного пролета выработки или 0,5–0,9 м в зависимости от конкретных горно-геологических и горнотехнических условий проходки [63, 95]. Исключение влияния глинистых коржей на устойчивость капитальных выработок достигается за счет размещения выработок в подстилающей каменной соли.

В работах Константиновой С.А., Поносовой Т.И. [20, 52, 82] представлены подробные исследования влияния формы выработок, пройденных в соляных породах, на напряженно-деформированное состояние вмещающих их пород и время устойчивого состояния. Поносова Т.И. в работе [82] указывает на то, что если в окрестности угловых точек контура выработки формируются области концентрации сжимающих напряжений, то вблизи плоских стенок и кровли появляются области растягивающих напряжений, значения которых с течением времени возрастают по абсолютной величине, а размеры областей увеличиваются. При этом Константинова С.А. [20, 52] отмечает, что наиболее устойчивыми являются выработки с формой поперечного сечения близкой к круговой (эллиптической). Наименьшей устойчивостью обладают выработки, пройденные комбайнами Урал-10КС (10,2 м<sup>2</sup>), Урал-20КС (20,2 м<sup>2</sup>), что объясняется наличием плоской части кровли

и плоской почвой, а также большой площадью их поперечного сечения. Применение комбайнов типа ПК-8 (9,8 м<sup>2</sup>) со сводчатой формой кровли поперечного сечения в соляных породах может увеличить время устойчивого состояния выработок по сравнению с комбайном Урал-10КС более чем в 3 раза, а с Урал-20КС – более чем в 14 раз.

В благоприятных условиях малых глубин обеспечение устойчивости горной выработки в течение необходимого срока службы может достигаться только лишь за счет рационального расположения и придания её сечению более устойчивой формы, размеров [20, 52]. В остальных случаях обеспечение устойчивости выработок в условиях ВКМКС достигается за счет крепления распорными (натяжными) и винтовыми анкерами (рис. 1.6), применение которых может повысить время устойчивого состояния закрепленной выработки по сравнению с незакрепленной в 1,5–2,0 раза [20].

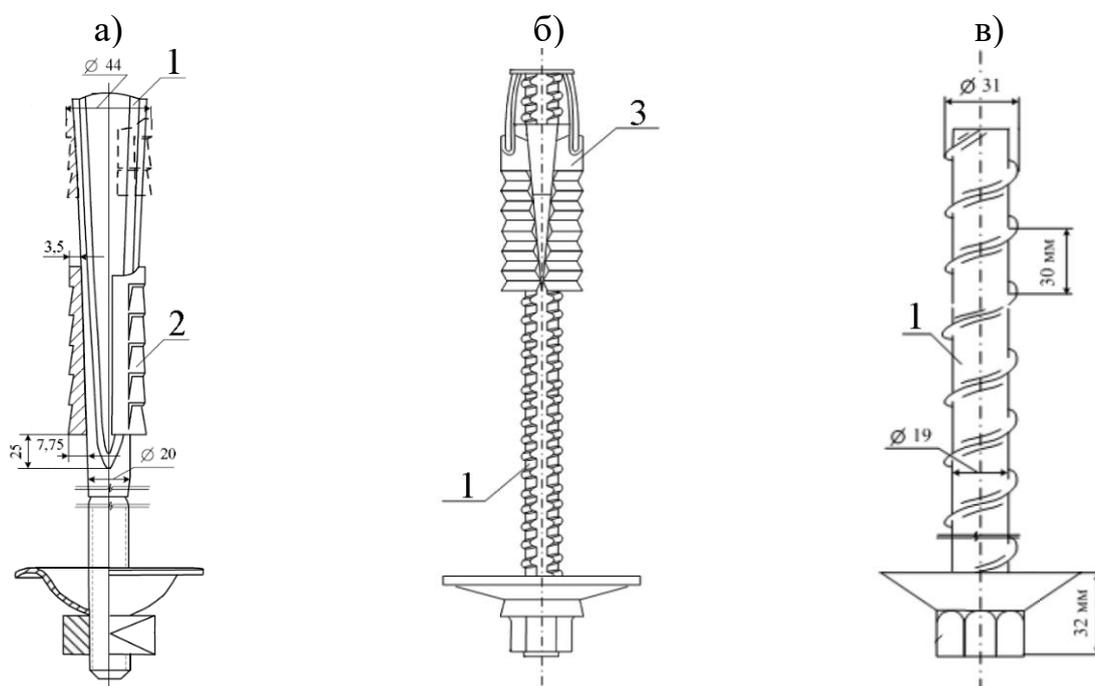


Рисунок 1.6 – Конструкция анкеров, применяемых в калийных рудниках:  
 а – анкер с разрезным распорным замком КАС;  
 б – клинораспорный анкер КРА-16; в – винтовой анкер;  
 1 – стержень анкера; 2 – разрезная полумуфта; 3 – щечки (сухари)  
 клинораспорного замка

С точки зрения обеспечения устойчивости горных выработок в условиях глубоких рудников большой интерес представляет Старобинское месторождение калийных солей, расположенное в пределах Солигорского, Любанского и Слуцкого районов Минской области Республики Беларусь. На месторождении общей площадью около 350 км<sup>2</sup>, приуроченном к северо-западной части Припятского прогиба, развито четыре калийных горизонта. При этом в кровле и почве калийных пластов залегает каменная соль с глинистыми прослоями.

В отличие от ВКМКС, Старобинское месторождение характеризуется благоприятными гидрогеологическими условиями, что связано с наличием одного водоносного комплекса и залеганием выше промышленных пластов регионально выдержанной водоупорной глинисто-мергелистой толщи (ГМТ). Мощность ВЗТ, сложенной нижней частью ГМТ и соленосными отложениями, в пределах месторождения достигает 700 м, в связи с чем основная часть запасов калийных солей извлекается с применением столбовой системы разработки [34]. При этом глубина ведения горных работ на сегодняшний день превышает 800 м.

В 80-е годы на рудниках Верхнекамского и Старобинского месторождений был разработан и реализован способ охраны капитальных и подготовительных выработок компенсационными щелями [39, 71]. Суть способа заключается в разгрузке породного контура от напряжений и переносе их максимума на забой щели. В настоящее время компенсационные щели нашли широкое применение в условиях Старобинского месторождения и могут проводиться как в кровле, так и в почве, а также, по мере необходимости, и в боках выработок, позволяя уменьшить величину прогиба кровли в 1,8–2,5 раз, а смещения стенок в 2,1–2,2 раз [44, 81]. Для увеличения времени схождения щели заполняются податливым материалом – деревянным брусом (рис. 1.7).

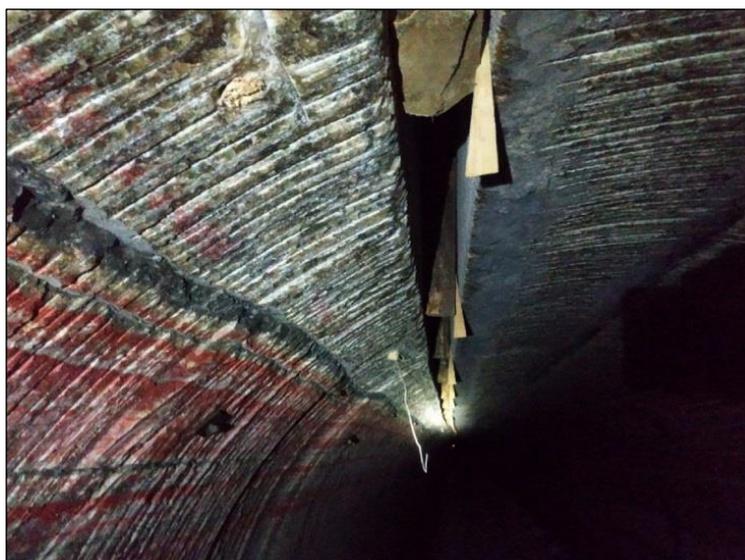


Рисунок 1.7 – Охрана выработки в условиях Старобинского месторождения компенсационной щелью в кровле

По результатам натурных исследований, выполненных в панельном конвейерном штреке 6-й северной панели рудника 4-РУ Старобинского месторождения на глубине 880–900 м, авторы [70] установили, что заполнение пространства компенсационной щели, прорезанной в кровле выработки, деревянными брусками с шагом установки 1,0–1,5 м позволяет уменьшить величину конвергенции кровля-почва на 30–40%. При этом закладочный материал на 1 пог. м щели должен создавать отпор  $3,5 \cdot 10^3$ – $4,0 \cdot 10^3$  кН. Также авторы [70] отмечают, что использование как более мелкого, так и более крупного шага установки брусков в условиях экспериментального участка приводит к возрастанию конвергенции и, как следствие, снижению устойчивости породного контура.

Константинова С.А. в работах [20, 52] указывает на то, что при определенных соотношениях между шириной щели и её высотой, зависящих от конкретных горно-геологических, горнотехнических условий, щель начинает играть роль большой трещины и отрицательно влияет на устойчивость выработки. Причем проведение вертикальных компенсационных щелей в кровле (почве) приводит к возрастанию горизонтальной конвергенции выработки, а проведение горизонтальных щелей в боках увеличивает

вертикальную конвергенцию, что также подтверждается результатами работ Губанова В.А., Башуры А.Н., Николаева Ю.Н. и других [18, 33, 34]. Указанный факт наглядно иллюстрируется на рис. 1.8, на котором представлена зависимость смещения кровли от конвергенции боков вентиляционного штрека лавы № 21 рудника IV РУ Старобинского месторождения: участок I соответствует периоду наблюдений до проведения компенсационных щелей, II – после нарезки в кровле выработки вертикальной щели, III – после проведения двух горизонтальных щелей в боках [52].

По данным рис. 1.8 видно, что проведение вертикальной щели в кровле привело к уменьшению, а горизонтальных в боках – к увеличению скорости смещения кровли по сравнению с неохраняемой выработкой (рис. 1.8, участок I). По мнению автора [52] вертикальная щель в кровле способствовала разгрузке пород кровли от сил бокового распора, а нарезка щелей в боках привела к увеличению пролета выработки и, как следствие, возрастанию скорости смещения кровли.

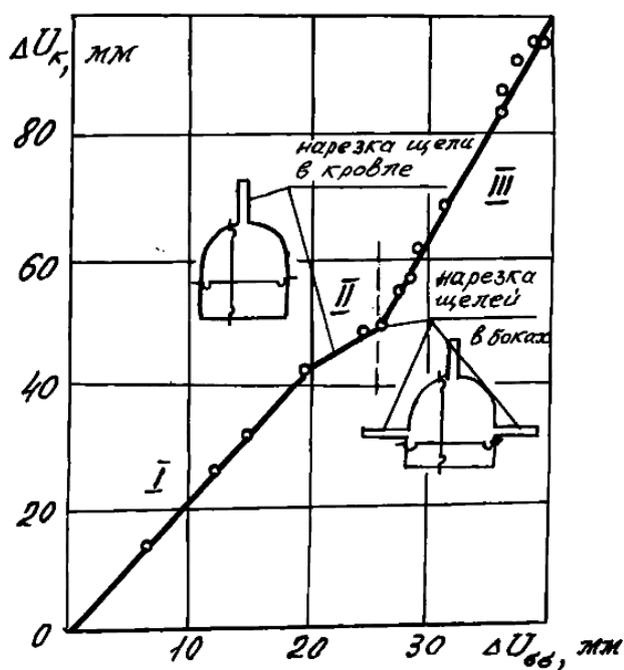


Рисунок 1.8 – График зависимости смещений кровли ( $\Delta U_k$ ) от конвергенции боков ( $\Delta U_{бо}$ ) вентиляционного штрека лавы № 21 рудника IV РУ [52]

Одна из особенностей Старобинского месторождения заключается в том, что с увеличением глубины ведения горных работ растет содержание глинистого материала во вмещающих промышленные пласты породах. Так, например, содержание слабых и глинистых прослоек в кровле Второго калийного пласта (глубина разработки 815 м) в пределах 0–2 м составляет 46,7 %, Третьего калийного пласта на глубине 850 м – 66,1 %, а на глубине 860 м – 70,7 % в пределах того же интервала [85]. Большая глубина и повышенное содержание глины в кровле промышленных пластов в ряде случаев приводят к преждевременному разрушению подготовительных выработок, что проявляется в форме прогиба кровли с образованием трещин и их распространением на высоту до 2 м и более [85]. В этой связи на глубоких горизонтах Старобинского месторождения широкое применение нашли системы двухуровневого анкерного крепления [44], хорошо зарекомендовавшие себя при разработке угольных месторождений [36]. Анкера 1-го уровня служат для «сшивания» приконтурных пород в пределах свода возможного обрушения, 2-го уровня – для «подвешивания» сшитой анкерами 1-го уровня породной балки к устойчивым породам за пределами свода [36, 112]. На рудниках Старобинского месторождения в качестве анкеров 1-го уровня используются анкера распорного (натяжного) либо винтового типа, аналогичные представленным на рис. 1.6. Анкера 2-го уровня – это тросовые либо арматурные анкера повышенной несущей способности, экспериментальные и теоретические исследования возможности применения которых в соляных породах Старобинского месторождения представлены в работах [47, 85]. На рис. 1.9 приводится пример выработки, закрепленной двухуровневой анкерной крепью и охраняемой компенсационной щелью в кровле.

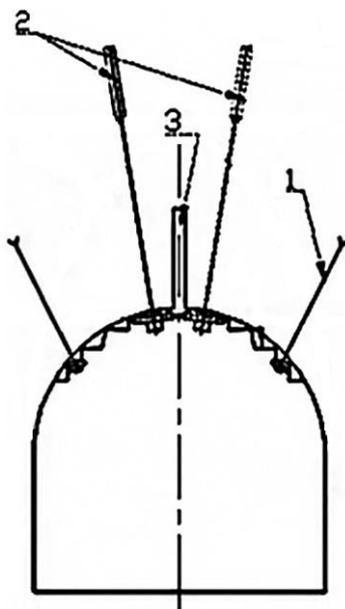


Рисунок 1.9 – Схема крепления выработки двухуровневой анкерной крепью и охраной компенсационной щелью в кровле:  
1, 2 – анкера 1-го и 2-го уровня, соответственно; 3 – компенсационная щель [85]

Необходимо отметить, что в качестве способов охраны горных выработок в условиях Старобинского месторождения помимо компенсационных щелей широкое распространение нашли компенсационные полости, а также разгружающие выработки. Помимо рассмотренных типов крепления также применяются стяжные, комбинированные, навесные и деревянные крепи. Указанные способы охраны и крепления используются, в основном, в подготовительных выработках в зоне влияния длинных очистных забоев, что не является предметом настоящего исследования, а более подробно с ними можно ознакомиться в ранее упомянутых работах, например, [34, 44, 81, 85, 88 и др].

Особенностью горно-геологических условий Гремячинского месторождения является залегание вблизи кровли промышленного сальвинитового пласта ангидрит-доломитовых пород, обладающих существенно более высокими прочностными и деформационными характеристиками по сравнению с соляными. В этой связи особый интерес представляют работы Аптукова В.Н., Ваулиной И.Б., Константиновой С.А., Крамскова Н.П., Соловьева В.А., Черепнова А.Н., Чернопазова Д.С. [51, 54, 55,

90], посвященные исследованию устойчивости горных выработок в соленосных отложениях Чарской свиты в условиях алмазных месторождений трубок «Интернациональная» и «Мир». Чарская свита прослеживается на глубинах 600–900 м и представлена чередованием пластов (слоев) каменной соли и доломитов. Мощность отдельных пластов каменной соли достигает 30 м [55, 90].

Поддержание капитальных и подготовительных горных выработок в породах Чарской свиты осуществляется с применением монолитной бетонной крепи, арочной из профиля СВП с ж/б затяжкой и анкерной крепью. Результаты обследования выработок свидетельствуют о неудовлетворительном состоянии бетонной крепи, что проявляется в возникновении трещин в стенках и сводовой части крепи, последующем расслоении бетонной обделки с обнажением арматуры и обрушением отдельных блоков, в то же время породный контур выработки сохраняет устойчивое состояние [54, 90]. Хорошо зарекомендовала себя арочная крепь из профиля СВП с ж/б затяжкой, основными недостатками которой являются: разрушение затяжки, а также высокая металлоемкость и трудоемкость возведения. В работах [51, 90] отмечается, что наиболее эффективным и в то же время технологичным, в указанных горно-геологических условиях, является анкерный способ крепления.

В работе [51] приводятся результаты многолетних инструментальных наблюдений за процессами деформирования капитальных горных выработок и вмещающего их массива на руднике «Интернациональный». По результатам наблюдений установлено, что скорость смещения контура одиночных протяженных выработок, пройденных в соляных породах на глубине от 620 до 780 м, изменяется в диапазоне от 2,6 до 8,1 мм/год. При этом смещения приконтурных пород выработки, пройденной в однородной каменной соли, в вертикальном и горизонтальном направлении практически одинаковы, что объясняется, по-видимому, гидростатическим характером распределения естественных напряжений в соляном массиве.

Если массив сложен чередованием слоев каменной соли и прослоев доломита, то отмечается возрастание вертикальных смещений кровли по сравнению с горизонтальными смещениями боков выработки в 1,5–2,0 раза. Так, например, для выработки арочной формы пролетом 4,4 м и высотой 3,7 м, пройденной в каменной соли на глубине 780 м с прирезкой доломитовых пород в почве, скорость горизонтальной конвергенции составила 3,5 мм/год, вертикальной – 7,2 мм/год. Наличие же в боках выработок мощных прослоев доломитовых пород приводит к непрерывному их выдавливанию соленосными отложениями [51].

Таким образом, можно сделать вывод о том, что наличие вблизи контура горной выработки, пройденной в соляных породах Чарской свиты, доломитовых пород, обладающих более высокими прочностными и деформационными характеристиками по сравнению с соляными, приводит к изменению характера деформирования контура выработки, а также снижению ее устойчивости, что проявляется в выдавливании несклонных к деформациям ползучести доломитовых пород внутрь выработки.

На основе многолетних инструментальных наблюдений за характером деформирования приконтурных пород, исследований их физико-механических свойств в лабораторных и натурных условиях, изучения закономерностей изменения напряженно-деформированного состояния вмещающего массива для выработок, пройденных в соляных породах, разработаны инженерные методики по оценке и прогнозу их состояния в зависимости от основных влияющих факторов [18, 20, 34, 44, 51, 52, 63, 90, 95]. В основе указанных методик, а также СП 91.13330.2012 [91] лежит категорийный подход к оценке устойчивости породного контура с последующим определением соответствующих способов охраны и крепления выработок.

Для оценки категории устойчивости пород незакрепленной горной выработки на верхнекамских калийных рудниках, по данным работ [20, 52, 63, 95], используются два подхода, основанных на:

- оценке величины смещений породного контура за весь срок службы выработки;
- оценке времени весьма устойчивого состояния выработки.

Величина смещений  $U$  (мм) породного контура в кровле выработки в условиях ВКМКС за весь срок её эксплуатации без крепи определяется по формуле:

$$U = 500\varepsilon_{\theta}L(1 + 0,07t)K_B, \quad (1.1)$$

где  $\varepsilon_{\theta}$  – деформация приконтурных пород в кровле выработки за первый год эксплуатации, определяемая в зависимости от отношения расчетной глубины расположения выработки к расчетному сопротивлению пород сжатию;  $L$  – максимальная ширина протяженной выработки в проходке, м;  $t$  – необходимый срок службы выработки, год;  $K_B$  – коэффициент влияния выработки.

В зависимости от величины смещения  $U$ , полученной по формуле (1.1), определяется категория устойчивости пород по классификации, представленной в СП 91.13330.2012 [91]. Затем выбираются соответствующие способы охраны и крепления выработки, связанные с ее рациональным расположением относительно глинистых прослоев, поверхностей ослабления; приданием выработке рациональных формы и размеров; применением анкерной либо рамной крепи.

Необходимо отметить, что если выработка пройдена в однородном соляном массиве, а смещение кровли не превосходит 200 мм, то соляные породы относят к весьма устойчивым, и эксплуатация выработки допускается без применения крепи [63, 91, 95].

Оценка времени  $T_p$  (год) весьма устойчивого состояния незакрепленной выработки в условиях ВКМКС выполняется по формуле:

$$T_p = A \cdot \exp\left(\frac{\alpha\gamma H}{\bar{\sigma}_{сж}}\right) \cdot \sqrt{\frac{S}{S_p}}, \quad (1.2)$$

где  $\gamma$  – средний объемный вес вышележащих пород, МН/м<sup>3</sup>;  $H$  – расстояние от земной поверхности до кровли выработки, м;  $\bar{\sigma}_{сж}$  – расчетная прочность пород

на сжатие, МПа;  $S = 12 \text{ м}^2$  – площадь поперечного сечения типовой выработки прямоугольной формы;  $S_p$  – площадь поперечного сечения рассматриваемой выработки.

В формуле (1.2)  $A$  и  $\alpha$  – это коэффициенты, определяемые по результатам численного моделирования. Коэффициент  $A$  учитывает влияние формы выработки,  $\alpha$  – влияние фактора глубины.

Расчетная прочность пород на сжатие  $\bar{\sigma}_{сж}$  в формуле (1.2) определяется в пределах максимальной высоты свода возможного обрушения пород кровли. По данным обследования фактического состояния выработок со сводчатой кровлей установлено, что угол образования плоскостей отрыва отслоившихся пород кровли от остального массива для большинства выработок в соляных породах близок к  $55^\circ$  [52]. Поэтому высота свода возможного обрушения  $h_3$  (м), по данным работ [20, 52, 63, 95], может быть оценена по формуле:

$$h_3 = \frac{L_p \cdot \text{tg}(55^\circ)}{2} \approx 0,7L_p, \quad (1.3)$$

где  $L_p$  – расчетный пролет, м.

Расчетный пролет  $L_p$  в формуле (1.3) позволяет учесть влияние формы, размеров поперечного сечения выработки на интенсивность проявления горного давления и для рудников верхнекамского месторождения определяется следующим образом:

$$L_p = l_{пл} + 0,75r, \quad (1.4)$$

где  $l_{пл}$  – ширина плоской части кровли выработки, м;  $r$  – радиус закругления кровли, м.

Геометрический смысл расчетного пролета  $L_p$  заключается в том, что он представляет собой расстояние по горизонтали между точками перегиба кривой смещения породного контура в кровле выработки [20].

Если, полученная по формуле (1.2), величина времени весьма устойчивого состояния меньше необходимого срока службы выработки, то

принимается решение об использовании соответствующих способов охраны и крепления.

Как упоминалось выше, для снижения уровня действующих напряжений на контуре горных выработок в условиях Старобинского месторождения широко используются компенсационные щели, решение о нарезке которых, по данным [18, 44], принимается на основе величины конвергенции «кровля-почва»  $U_{к.п.}$  (мм), определяемой по формуле:

$$U_{к.п.} = ((t - 1) \cdot V_{уст.} + 3 \cdot V_{уст.}) \cdot K_B, \quad (1.5)$$

где  $V_{уст.}$  – скорость конвергенции «кровля-почва» выработки на стадии установившейся ползучести, мм/год;  $t$  – необходимый срок службы выработки, год;  $K_B$  – коэффициент влияния выработки.

Скорость конвергенции «кровля-почва»  $V_{уст.}$  определяется в зависимости от глубины заложения выработки, а также отношения эквивалентного пролета выработки к эквивалентной мощности потолочины в кровле [18, 44]. Под эквивалентным пролетом понимается ширина протяженной выработки прямоугольного сечения, которая определяется из предположения о равенстве максимальных горизонтальных компонентов тензоров напряжений в краевых зонах кровли реальной выработки и введенной протяженной [18]. Под эквивалентной мощностью потолочины в кровле выработки понимается мощность такой потолочины, механические свойства которой определяются механическими свойствами материала нижнего породного слоя в кровле реальной выработки, а прогиб равен прогибу слоистой кровли той же выработки [18].

В зависимости от величины  $U_{к.п.}$  (мм), вычисленной по формуле (1.5), и ширины выработки  $L$  (мм) возможны следующие варианты:

- $U_{к.п.} \leq 0,037L$ : выработка не охраняется;
- $0,037L < U_{к.п.} \leq 0,053L$ : выработка охраняется вертикальной компенсационной щелью в кровле;

-  $0,053L < U_{к.п.} \leq 0,075L$ : выработка охраняется одной вертикальной компенсационной щелью в кровле, которая при необходимости может проводиться повторно, или тремя компенсационными щелями (одна в кровле и две в боках).

По данным работ [18, 84] время  $T_p$  (год) устойчивого состояния незакрепленной капитальной выработки в условиях Старобинского месторождения, учитывая формулу (1.5), может быть оценено по формуле:

$$T_p = \frac{U_{к.п.доп.}}{V_{уст.} K_B} - 2, \quad (1.6)$$

где  $U_{к.п.доп.}$  – допустимая конвергенция «кровля-почва» выработки, мм;  $V_{уст.}$ ,  $K_B$  – то же, что и в формуле (1.5).

Категория устойчивости протяженной горной выработки в однородных соляных породах Чарской свиты рудников «Мир» и «Интернациональный» определяется по результатам оценки величины смещений  $U$  (мм) породного контура в кровле незакрепленной выработки за весь срок её эксплуатации без крепи по формуле аналогичной (1.1) [51]. Авторы [51] предлагают использовать классификацию пород по устойчивости, представленную в СП 91.13330.2012 (табл. 1.1) [91], но не указывают как оценить устойчивость выработки по величине смещений  $U$  контура в тех случаях, когда массив представлен переслоением каменной соли и доломитов, что затрудняет обоснование выбора способов охраны и крепления выработок в условиях Чарской свиты.

Таблица 1.1 – Классификация устойчивости пород в соответствии с СП 91.13330.2012 [91]

Категория устойчивости	Оценка состояния устойчивости пород	Смещение $U$ , мм	
		Осадочные породы	Соляные породы
I	Устойчивое	До 50	До 200
II	Среднеустойчивое	От 50 до 200	От 200 до 300
III	Неустойчивое	От 200 до 500	От 300 до 500
IV	Очень неустойчивое	Свыше 500	Свыше 500

При наличии слоев доломитов, ангидрит-доломитов, известняков в зоне возможного обрушения пород кровли, время устойчивого состояния незакрепленной выработки в соляных породах Чарской свиты может быть оценено по формуле (1.2). При этом коэффициенты  $A$  и  $\alpha$  определяются по результатам численного исследования влияния горно-геологических, горнотехнических условий на напряженно-деформированное состояние вмещающих выработку пород [51].

Из вышеизложенного следует, что:

- к числу основных факторов, определяющих устойчивость горных выработок в соляных породах, относятся: глубина заложения выработок; форма и размеры их поперечного сечения; наличие вблизи контура выработок поверхностей ослабления, контактов пластов (слоев), глинистых прослоев; физико-механические свойства вмещающих выработку пород;

- основным способом крепления выработок в соляных породах является анкерный; в особо тяжелых условиях больших глубин в слоистом массиве с повышенным содержанием глины хорошо себя зарекомендовал двухуровневый способ анкерного крепления;

- для переноса высокого уровня напряжений с контура выработки вглубь массива целесообразно использование компенсационных щелей, что нашло широкое применение в условиях больших глубин Старобинского месторождения;

- наличие вблизи контура выработок, пройденных в соляных породах, доломитовых пород, изменяет характер деформирования породных обнажений и в ряде случаев приводит к выдавливанию доломитов внутрь выработок, тем самым снижая их устойчивость;

- в настоящее время вопросы деформирования, устойчивости горных выработок в массивах, сложенных чередованием соленосных отложений и ангидрит-доломитовых, доломитовых пород, являются малоизученными и требуют дополнительного исследования;

- существующие инженерные подходы к оценке и прогнозу устойчивости пород, вмещающих выработки, основываются на многолетнем опыте поддержания выработок в конкретных горно-геологических, горнотехнических условиях и непригодны для фактических условий Гремячинского месторождения.

### **1.3. Физико-механические свойства соляных пород**

В связи с высокой трудоемкостью и стоимостью натурных исследований, механические характеристики горных пород, как правило, определяются по результатам лабораторных экспериментов, которые включают: условно-мгновенные и длительные испытания, испытания на сжатие и растяжение, сдвиг, изгиб и др.

Как известно, значения прочностных и деформационных показателей зависят не только от состава и структурно-текстурных особенностей породного материала, но также от методики исследования, размеров и качества подготовки образцов, характеристик применяемого оборудования, параметров окружающей среды (влажность, температура, давление) [12, 15, 83, 118, 122, 128]. В связи с тем, что во вмещающем горные выработки породном массиве преобладают сжимающие напряжения, одним из основных типов лабораторных исследований являются эксперименты на сжатие породных образцов. При этом по результатам условно-мгновенных испытаний, в общем случае, определяются следующие показатели: предел прочности, разрушающая деформация, предел остаточной прочности, касательный и секущий модули деформации, модуль упругости, коэффициент Пуассона, касательный и секущий модули спада, энергоемкость деформирования и др. [15, 73]. По результатам длительных испытаний строятся кривые ползучести, кривые релаксации, изохронные кривые и определяются такие показатели как: предел длительной прочности,

длительная прочность, параметры принятой модели ползучести породы и др. [72, 141].

Существенное влияние на характер деформирования и разрушения соляных пород при сжатии оказывают силы трения между торцами образцов и плитами пресса. Проскураков Н.М. в работе [83] указывает, что снижение трения между торцами образцов и плитами пресса, которое достигается за счет применения специальных прокладок, смазки, шлифовки торцов образцов и плит пресса, может приводить к снижению получаемого в ходе эксперимента значения предела прочности на 50 % и более. Причем влияние трения тем больше, чем меньше высота образцов [12, 73, 83].

В работе [78] установлено, что уменьшение коэффициента трения между торцами соляных образцов и плитами пресса приводит не только к снижению предела прочности, но и уменьшению разрушающей деформации, удельной энергоемкости деформирования, наблюдается увеличение модуля спада. По результатам проведенных экспериментальных исследований (рис. 1.10), представленных в [78, 79], получена зависимость, позволяющая оценить значения предела прочности и разрушающей деформации каменной соли ВКМКС, соответствующие стандартным испытаниям (образцы с отношением высоты к ширине  $\frac{h}{d} = 2,0$ ) по результатам сжатия образцов меньших размеров с учетом влияния коэффициента трения:

$$X \Big|_{\frac{h}{d}=2,0} = \frac{X}{1 + a_1 \mu^{a_2} m^{a_3}}, \quad (1.7)$$

где  $X$  – значение предела прочности (МПа) или разрушающей деформации по данным испытания образца с  $m = h/d$  и коэффициентом трения  $\mu$  между торцами и плитами пресса;  $a_1, a_2, a_3$  – эмпирические коэффициенты.

Обозначив предел прочности при одноосном сжатии через  $\sigma_{\text{пр}}$  (МПа) и введя обозначение  $K_{\text{ф}} = 1 + a_1 \mu^{a_2} m^{a_3}$ , путем элементарных алгебраических преобразований формулы (1.7) можно получить:

$$\sigma_{\text{пр}} = \sigma_{\text{пр}} \Big|_{\frac{h}{d}=2,0} \cdot K_{\text{ф}} \quad (1.8)$$

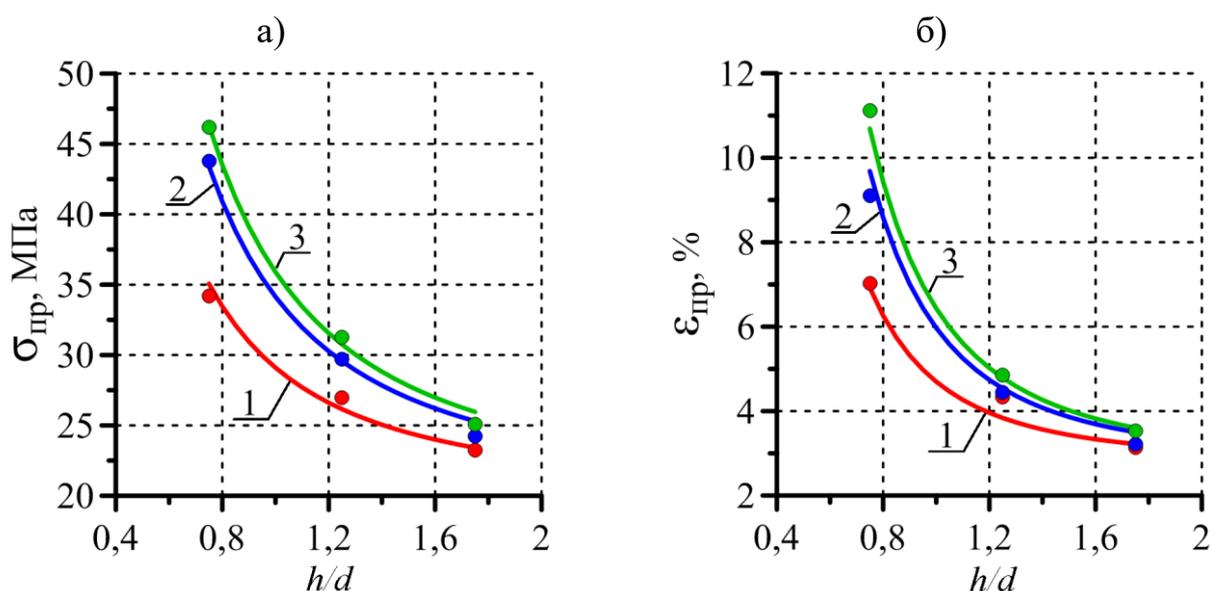


Рисунок 1.10 – Зависимости предела прочности (а), разрушающей деформации (б) образцов каменной соли от отношения их высоты ( $h$ ) к ширине ( $d$ ) и коэффициента трения между торцами и плитами прессы: 1, 2, 3 – коэффициент трения, соответственно, 0,06; 0,31; 0,48 [79]

Коэффициент  $K_{\phi}$  в формуле (1.8) называется коэффициентом формы и позволяет оценить прочность образцов нестандартной высоты ( $\frac{h}{d} \neq 2,0$ ) по результатам испытания стандартных ( $\frac{h}{d} = 2,0$ ).

Исследованием влияния формы образцов на значения прочностных характеристик, определяемых по результатам одноосного сжатия в лабораторных условиях, занимались: Асанов В.А., Баушингер Г., Бенявски З.Т., Ерофеев Н.П., Карташов Ю.М, Машанов А.Ж., Нестеренко Г.Т., Паньков И.Л., Проскуряков Н.М., Серая А.Р., Усаченко Б.М., Церн М., Шашенко А.Н. и др. [26, 48, 73, 79, 83]. При этом наиболее широкое распространение нашли следующие коэффициенты:

- ВНИМИ [48]:

$$K_{\phi} = 0,754 + 0,496 \cdot \frac{d}{h} \quad (1.9)$$

- Г. Баушингера [48]:

$$K_{\phi} = 0,875 + 0,25 \cdot \frac{d}{h} \quad (1.10)$$

- М. Церна [48]:

$$K_{\phi} = \sqrt{\frac{2d}{h}} \quad (1.11)$$

- для соляных пород ВКМКС [99]:

$$K_{\phi} = \begin{cases} 1,06 \cdot \sqrt{\frac{2d}{h}}, & \text{при } 0 < \frac{d}{h} < 0,5 \\ \frac{1}{1,53} \cdot (1 + 1,06 \cdot \frac{d}{h}), & \text{при } \frac{d}{h} \geq 0,5 \end{cases} \quad (1.12)$$

- для соляных пород Гремячинского месторождения [46]:

$$K_{\phi} = 0,650 + 0,689 \cdot \frac{d}{h} \quad (1.13)$$

В формулах (1.9)–(1.13)  $d$ ,  $h$  – ширина (диаметр) и высота образца, соответственно.

Авторы [73] указывают на то, что коэффициент формы для соляных пород ВКМКС в общем случае можно представить в виде:

$$K_{\phi} = a_1 + a_2 \cdot \frac{d}{h}, \quad (1.14)$$

где  $a_1$ ,  $a_2$  – эмпирические коэффициенты, которые должны определяться отдельно для каждого типа пород по результатам лабораторных исследований.

Из результатов лабораторных исследований соляных пород, представленных в [60], следует, что коэффициент формы сильвинита II горизонта Старобинского месторождения может быть также представлен зависимостью вида (1.14).

В [48] говорится о том, что формулы пересчета прочности для различных горных пород должны быть единообразны, в то время как в [24], наоборот, указывается зависимость коэффициента формы от индивидуальных особенностей деформирования и разрушения горной породы. Несмотря на отсутствие единого мнения относительно вида коэффициента формы, исследования влияния высоты образцов на их прочностные характеристики имеют важное практическое значение и применяются для определения параметров системы разработки, в том числе при оценке несущей способности целиков различного назначения в зависимости от отношения их высоты к

ширине [3, 26, 45, 46, 99]. В связи с чем коэффициент формы должен подлежать уточнению в соответствии с накоплением опыта разработки месторождения.

Как указано в разделе 1.2, фактором, осложняющим поддержание выработок в слоистом соляном массиве, является наличие глинистых прослоев, контактов слоев (пластов). Лабораторному исследованию деформирования контактов соляных пород по схеме сдвиг со сжатием посвящены работы Асанова В.А., Баряха А.А., Габдрахимова И.Х., Дудырева И.Н., Панькова И.Л., Нестерова М.П. [14, 28, 76]. По результатам исследований на специальном стенде Габдрахимов И.Х., Нестеров М.П. показали, что паспорта прочности контактов системы «соль-глина-соль» существенно отличаются от паспортов прочности отдельных составляющих системы и зависят от условий контактов, содержания влаги в глине, скорости нагружения и срока изготовления образцов. Авторы [14, 76] исследовали прочностные и деформационные свойства глинистых контактов, контактов «каменная соль-сильвинит», искусственных глинистых контактов при вертикальной (нормальной) нагрузке от 0,1 до 5,0 МПа. Авторы показали, что прочностные характеристики контактов в 2 и более раз ниже прочности однородных соляных пород при тех же режимах нагружения.

Необходимым этапом лабораторных исследований физико-механических свойств пород является определение предела прочности при растяжении, величина которого, по данным Cai M. [111], может составлять не более 2% от прочности при сжатии, что, в случае появления областей растягивающих напряжений вблизи породных обнажений, снижает устойчивость горных выработок [20].

Эксперименты по прямому растяжению горных пород представляют высокую трудоемкость, в связи с чем, для определения прочности при растяжении, применяются косвенные методы, наиболее распространенным из которых является метод разрушения цилиндрических образцов сжатием по образующей [31], известный в мировой практике как Бразильский метод [120].

Значения прочности, получаемые указанным методом, зависят от размеров образцов, их структурно-текстурных особенностей, формы нажимных плит, скорости приложения нагрузки [6, 144, 146]. При этом более простым и технологичным является метод разрушения (раскалывания) образцов в форме дисков (пластин) соосными клиньями. Возможность применения указанного метода для соляных пород изучалась Паньковым И.Л. с соавторами в работах [74, 75], в которых приводятся результаты сопоставительных исследований на прямое и косвенное растяжение соляных пород ВКМКС. Авторы указывают, что прочность при растяжении, определяемая методом раскалывания, существенно зависит от радиуса кривизны клиньев. При этом прочность при прямом растяжении образцов соляных пород ВКМКС, по данным [74], составляет 0,3–1,6 МПа, что в 10–20 раз меньше значения соответствующего показателя при сжатии [15].

В действительности фактическое напряженное состояние в окрестности породных обнажений существенно отличается от одноосного, поэтому комплекс лабораторных исследований должен включать испытания образцов в режиме объемного (трехосного) сжатия. Суть экспериментов заключается в том, что в камере объемного сжатия к образцу прикладывается необходимый уровень всестороннего (гидростатического) давления ( $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ ) с последующим нагружением ( $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$ , схема Кармана) и записью продольной и поперечной деформации, бокового давления и осевой нагрузки. Методики стандартных трехосных испытаний описаны в ГОСТ 21153.8-88 [32] и ASTM D7012-14e1 [109]. Обычно эксперименты выполняются при 2х–3х уровнях бокового давления, на каждом из которых рекомендуется испытывать не менее 3–4 образцов, с последующим определением прочностных и деформационных характеристик.

Основным недостатком стандартных трехосных испытаний является необходимость изготовления большого количества образцов, что зачастую невозможно ввиду ограниченного объема породного материала. В таких

случаях целесообразно применение метода многоступенчатого нагружения, предложенного одними из первых Kovári K и Tisa A. [123]. Отличие многоступенчатого метода [123] от стандартного одноступенчатого [32, 109] заключается в том, что каждый образец испытывается при нескольких ступенях (уровнях) бокового давления. По данным Kovári K и Tisa A. многоступенчатый метод позволяет не только сократить необходимый объем породного материала, но и минимизировать вариацию экспериментальных данных, связанную с индивидуальными особенностями, неоднородностями породных образцов.

Обстоятельные исследования возможности применения многоступенчатого метода для определения прочностных и деформационных характеристик образцов мрамора, известняка, сланца, песчаника, туфа, аргиллита и соляных пород представлены в работах [66, 108, 123, 134, 138, 139, 142, 147].

В связи с накоплением образцами в процессе деформирования поврежденности, многоступенчатый метод дает удовлетворительные результаты только лишь при относительно небольшом количестве ступеней [134, 139, 147]. Необходимым условием применения метода, по мнению Vergara M.R., Kudella P., Triantafyllidis T. [139], является склонность породы к проявлению пластической деформации. Неудовлетворительные результаты для хрупких пород, по данным Amann F., Kaiser P., Button E.A., Sheng-Qi Yang [108, 134], связаны со сложностью определения момента переключения на следующую ступень нагружения, что также подтверждается в работе [137]. Так, например, в [137] указывается, что переход на следующую ступень нагружения на запредельной стадии деформирования или значительно раньше предела прочности образца приводит к недооценке его прочностных характеристик.

Результаты исследований соляных пород в режиме объемного многоступенчатого сжатия, представленные в [66], показали, что переключение

на следующую ступень нагружения в момент достижения образцом предела прочности, как рекомендуется в [123], приводит к заниженным значениям прочностных характеристик по сравнению со стандартными (одноступенчатыми) испытаниями. Одним из путей решения указанной проблемы может быть переключение на следующую ступень нагружения в момент максимального уплотнения образца или на уровне 0,9 от предела прочности текущей ступени [137, 139, 140, 142], что в случае соляных пород требует проведения отдельных исследований.

Подводя итоги вышеизложенному, можно сделать вывод о том, что комплекс лабораторных исследований прочностных и деформационных характеристик пород Гремячинского месторождения должен включать:

- условно-мгновенные испытания на одноосное и объемное сжатие, эксперименты на растяжение;

- длительные испытания.

При этом для определения предела прочности при растяжении необходимо использовать метод раскалывания породных дисков соосными клиньями, а эксперименты на объемное сжатие целесообразно проводить по схеме многоступенчатого нагружения, возможность применения которой для образцов соляных пород требует проведения дополнительных исследований.

## **Выводы по главе. Цель и задачи исследования**

### **Выводы по главе**

1. Влияние отношения высоты к диаметру (ширине) образцов соляных пород на их механические характеристики при сжатии определяется коэффициентом формы и учитывается при оценке несущей способности целиков камерной системы разработки.

2. Применение метода объемного многоступенчатого нагружения для определения прочностных характеристик горных пород позволяет не только

сократить необходимый объем породного материала, но и минимизировать вариацию экспериментальных данных, связанную с индивидуальными особенностями породных образцов. Использование многоступенчатого метода для образцов соляных пород требует проведения дополнительных исследований.

3. Рациональное расположение сечения выработки в соляных породах относительно поверхностей ослабления, контактов слоёв (пластов) позволяет повысить время её устойчивого состояния без крепи вплоть до технологического срока службы и более.

4. Опыт эксплуатации горных выработок в соляных породах свидетельствует о том, что наиболее рациональным способом крепления является анкерный.

5. Наличие вблизи контура выработок, пройденных в соляных породах, доломитовых пород, изменяет характер деформирования породных обнажений и в ряде случаев приводит к выдавливанию доломитов внутрь выработок, тем самым снижая их устойчивость.

6. Существующие методики по оценке и прогнозу состояния выработок, пройденных в соляных породах, непригодны для условий совместного залегания соляных и ангидритовых, ангидрит-доломитовых пород, обладающих более высокими прочностными и деформационными характеристиками по сравнению с соляными.

7. В настоящее время вопросы деформирования, устойчивости горных выработок в массивах, сложенных чередованием соленосных отложений и ангидритовых, ангидрит-доломитовых пород, являются малоизученными и требуют дополнительного исследования.

8. Для Гремячинского месторождения калийных солей характерны тяжелые условия ведения горных работ, обусловленные залеганием промышленного сильвинитового пласта на глубине 1100–1300 м, а также вмещающими породами, представленными ангидритовыми и ангидрит-

доломитами вблизи кровли и карналлитовыми отложениями вблизи почвы промышленного пласта.

### **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.

### **Задачи исследования**

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 методом конечных элементов.

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.

## **2. ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОРОД ГРЕМЯЧИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ**

В главе представлены результаты лабораторных исследований прочностных и деформационных характеристик пород Гремячинского месторождения, предназначенные для выявления особенностей их деформирования и разрушения.

### **2.1. Изготовление образцов горных пород для лабораторных исследований**

Для определения физико-механических свойств пород в выработках Гремячинского рудника установкой DHMS ВТР1-Р бурились скважины с отбором керна диаметром 75 мм. Места отбора проб определялись технической возможностью бурения, а также близостью расположения скважин к экспериментальным выработкам, оборудованных замерными станциями (см. глава 3). Для сохранения естественной влажности фрагменты керна запаковывались в полиэтиленовую оболочку.

Распиловка керна ангидрит-доломитовых, доломитовых пород осуществлялась на алмазном отрезном станке Labotom-3 фирмы Struers (Дания), соляных – с помощью дискового камнерезного станка маятникового типа без использования промывочной жидкости. Окончательная доводка торцевых поверхностей образцов выполнялась на шлифовальном станке LaboPol-25 (Struers). Оборудование для изготовления образцов представлено на рис. 2.1. Отклонение от параллельности торцов образцов составляло не более 0,2 мм, отклонение торцевых поверхностей от перпендикулярности к образующей – не более 0,5 мм, что соответствует требованиям ГОСТов [30, 31, 32].

а)



б)



Рисунок 2.1 – Оборудование Struers для изготовления образцов:  
а – отрезной станок Labotom-3; б – шлифовальный станок LaboPol-25

На рис. 2.2 представлены фотографии образцов, подготовленных для экспериментальных исследований.

а)



б)



в)



Рисунок 2.2 – Пример образцов, подготовленных для экспериментальных исследований: а – одноосное сжатие; б – объемное сжатие; в – раскалывание

Для экспериментов на одноосное сжатие ангидритовых, ангидрит-доломитовых и доломитовых пород были изготовлены образцы с отношением высоты к диаметру  $h/d = 2,0$ , соляных – с  $h/d \in [0,3; 2,0]$ .

Для исследования прочностных свойств пород при растяжении косвенным методом раскалывания породных дисков соосными клиньями изготовлены образцы с  $h/d \in [0,3; 0,4]$ .

Ввиду ограниченного объема породного материала, определение прочностных характеристик в режиме объемного сжатия выполнялось только для соляных пород на образцах с  $h/d = 2,0$ .

Перед испытанием каждого образца выполнялось его фотографирование и описание петрографических особенностей.

## **2.2. Исследование прочностных и деформационных свойств пород при одноосном сжатии и растяжении**

Эксперименты на одноосное сжатие выполнялись в режиме жесткого нагружения с постоянной скоростью деформирования. Образцы соляных пород испытывались на электромеханическом прессе Zwick/Z250 (рис. 2.3, а) с предельным усилием 250 кН, ангидритовых, ангидрит-доломитовых и доломитовых пород – на гидравлическом прессе ИП 2000 (рис. 2.3, б), предельное усилие – 2000 кН.

В ходе экспериментов на сжатие в режиме реального времени велась запись осевого усилия и деформации. По результатам испытаний каждого образца строилась диаграмма деформирования в координатах «продольное напряжение-относительная продольная деформация» и в общем случае определялись следующие механические показатели (рис. 2.4): предел прочности при одноосном сжатии ( $\sigma_{пр}$ , МПа); разрушающая деформация ( $\varepsilon_{пр}$ ); модуль упругости ( $E$ , ГПа); секущий модуль деформации ( $D_{пр}$ , ГПа); касательный модуль деформации (на пределе упругости,  $D_y$ , ГПа); касательный модуль спада ( $M_c$ , ГПа); остаточная прочность при одноосном сжатии ( $\sigma_{ост}$ , МПа).

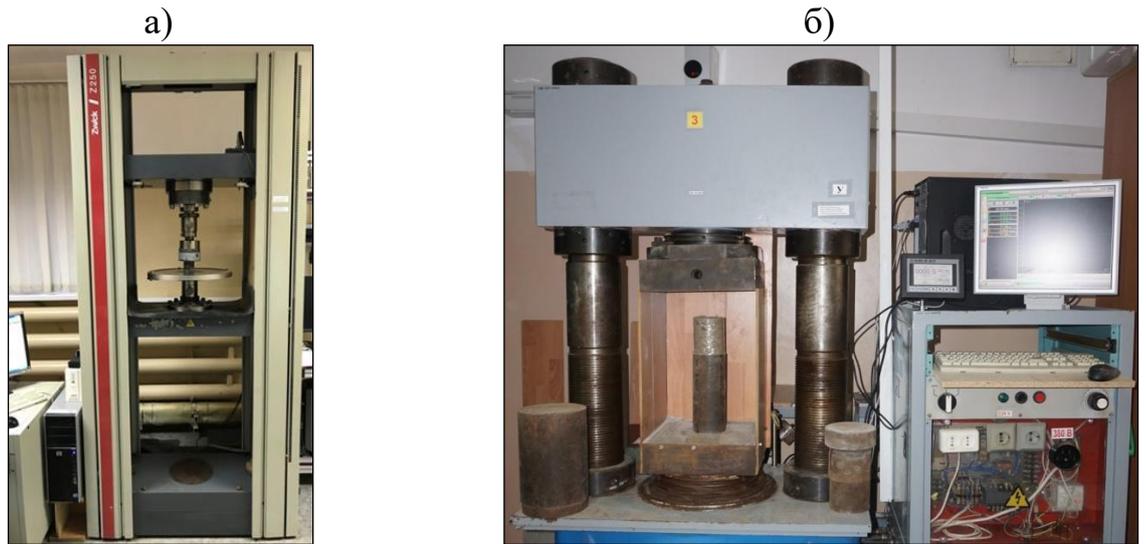


Рисунок 2.3 – Оборудование для проведения экспериментов на одноосное сжатие: а – электромеханический пресс Zwick/Z250; б – гидравлический пресс ИП 2000

Значения  $E$ ,  $D_{пр}$ ,  $D_y$ ,  $M_c$  определялись как тангенсы соответствующих углов, обозначенных на схеме (рис. 2.4).

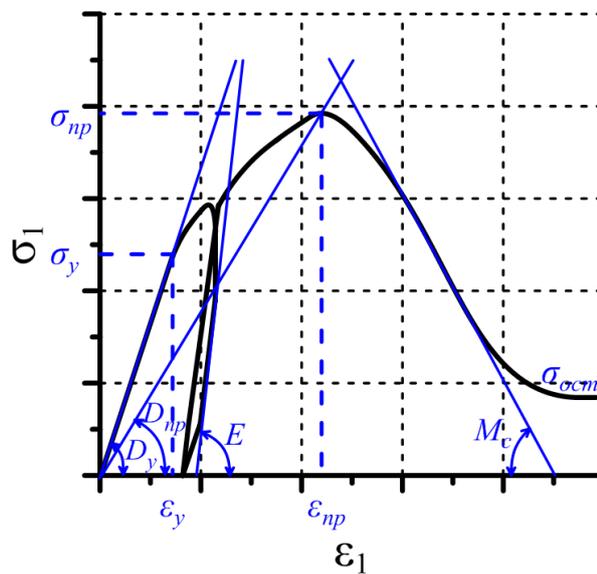


Рисунок 2.4 – Схема к определению механических характеристик по диаграмме «продольное напряжение-относительная продольная деформация»

Для определения предела прочности при одноосном растяжении использовался косвенный метод раскалывания породных дисков соосными клиньями [31, 74, 75]. Эксперименты выполнялись на электромеханическом

прессе Zwick/Z400 (предельное усилие 400 кН) с постоянной скоростью нагружения 5 МПа/с в специально изготовленной обойме, состоящей из стальных клиньев и направляющих (рис. 2.5).

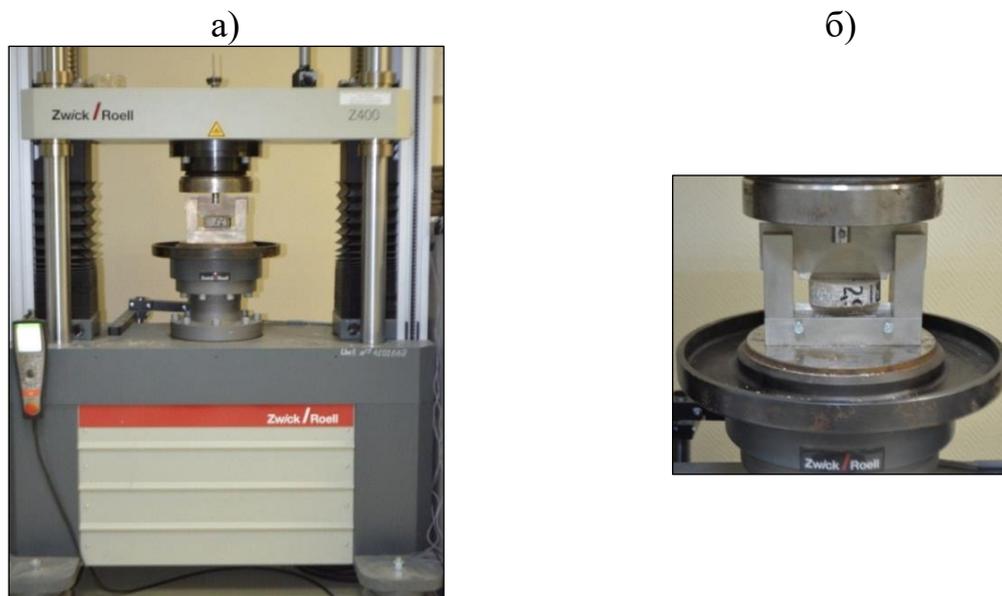


Рисунок 2.5 – Испытание образца по методу раскалывания соосными клиньями на электромеханическом прессе Zwick/Z400:  
а – общий вид пресса; б – нагружение образца

Каждый образец испытывался по 3 раза, то есть раскалывался на 4 части. По результатам эксперимента определялось разрушающее усилие и площадь раскола образца. Предел прочности при растяжении  $\sigma_p$  (МПа) вычислялся по формуле [31]:

$$\sigma_p = \frac{P}{S} \cdot 10, \quad (2.1)$$

где  $P$  – разрушающая сила, кН;  $S$  – площадь раскола образца, см<sup>2</sup>.

### 2.3. Исследование прочностных и деформационных свойств пород методом объемного многоступенчатого сжатия

Эксперименты выполнялись в камере объемного сжатия на универсальном испытательном комплексе MTS 815 (рис. 2.6, а) по схеме

Кармана ( $\sigma_1 \geq \sigma_2 = \sigma_3$ ). Максимальное осевое усилие, развиваемое установкой, – 1600 кН, максимальное давление в камере трехосного сжатия – 80 МПа.

Перед испытанием каждый образец помещался в специальную манжету из эластичного материала, что исключало проникновение масла в камеру объемного нагружения внутрь образца (рис. 2.6, б).

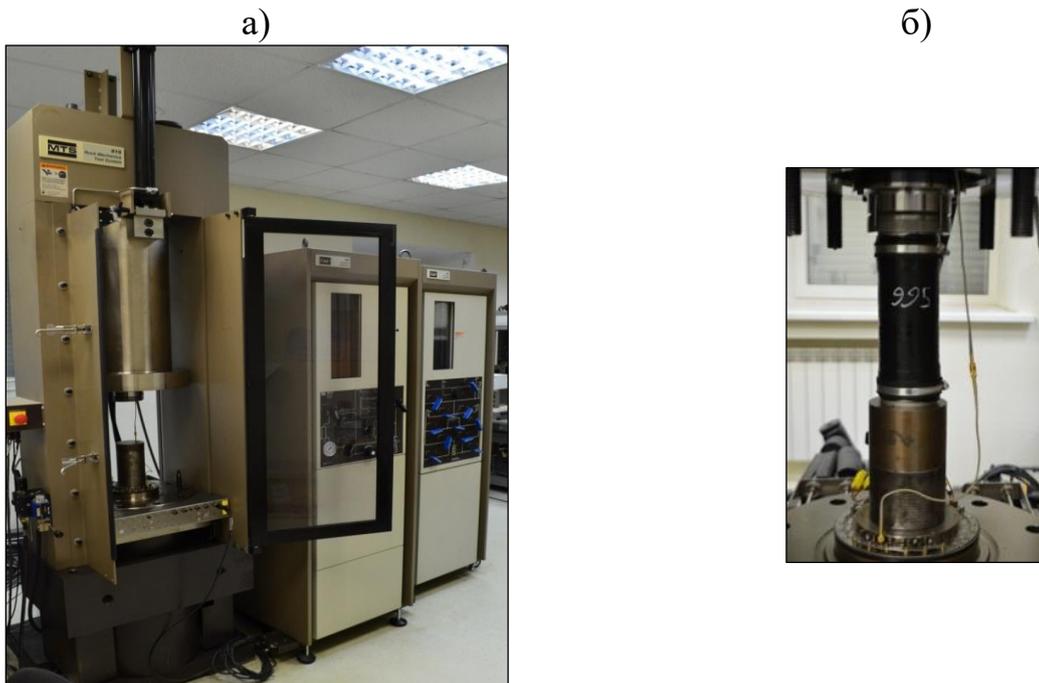


Рисунок 2.6 – Универсальный испытательный комплекс MTS 815 (а) и образец (б), подготовленный к эксперименту на объемное сжатие

Как упоминалось в разделе 1.3, основная сложность объемных многоступенчатых испытаний заключается в необходимости определения момента переключения на следующую ступень нагружения, неточное определение которого может приводить к заниженным значениям механических характеристик испытываемых образцов.

Выполненные сравнительные исследования на образцах соляных пород Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей [66] показали, что, в случае переключения на следующую ступень нагружения в момент достижения образцом предела прочности, объемный многоступенчатый метод дает существенно заниженные значения прочностных характеристик по сравнению с

одноступенчатым методом. В этой связи было рассмотрено два возможных способа переключения на следующую ступень объемного многоступенчатого нагружения [77]:

- на уровне продольного напряжения  $\sigma_{1\theta}$ , соответствующем максимальному уплотнению образца;
- на уровне 0,9 от предела прочности соответствующей ступени нагружения.

Для исследования возможности переключения в момент максимального уплотнения было изготовлено 12 цилиндрических образцов из каменной соли (высота – 86 мм, диаметр – 43 мм), которые испытывались по схеме объемного одноступенчатого нагружения с датчиками продольной (632.90F-04) и поперечной (632.92H-03) деформации фирмы MTS (рис. 2.7) при боковых давлениях: 1, 4, 10 МПа.



Рисунок 2.7 – Испытание на объемное сжатие с датчиками продольной и поперечной деформации

Эксперимент на объемное одноступенчатое нагружение включал следующие основные этапы:

- 1) размещение образца в камере трехосного нагружения и поджатие его осевой нагрузкой 0,7–1,0 МПа;

- 2) закрытие камеры и заполнение её маслом с последующим увеличением гидростатического давления ( $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ ) в режиме пропорционального нагружения (по А.А. Ильюшину) до необходимого уровня: 1, 4 или 10 МПа;
- 3) выдержка при постоянном уровне гидростатического давления в течение 1,5 минут для достижения системой «образец-испытательная машина» состояния равновесия;
- 4) нагружение образца с постоянной скоростью продольного деформирования  $3 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$  в режиме поддержания бокового давления ( $\sigma_2 = \sigma_3 = \text{const}$ );
- 5) завершение эксперимента после получения запредельной части диаграммы деформирования.

По результатам испытания каждого образца строилась полная диаграмма деформирования, определялся предел прочности ( $\sigma_{\text{пр}}$ ) и уровень продольного напряжения ( $\sigma_{1\theta}$ ), при котором происходит максимальное уплотнение образца в процессе нагружения (рис. 2.8).

На рис. 2.9 представлена зависимость относительного напряжения  $\sigma_{1\theta}/\sigma_{\text{пр}}$  от уровня бокового давления  $\sigma_2 = \sigma_3$ , полученная по результатам испытания образцов каменной соли [77]. Зависимость на рис. 2.9 хорошо согласуется с работой авторов Alkan H., Cinar Y., Pusch G. [107]. Анализируя представленные результаты, можно сделать вывод о том, что низкий уровень относительного напряжения  $\sigma_{1\theta}/\sigma_{\text{пр}}$  не позволяет прогнозировать величину предела прочности каменной соли на первых ступенях многоступенчатого нагружения, которые соответствуют малым значениям бокового давления. При этом малая величина  $\sigma_{1\theta}/\sigma_{\text{пр}}$  также может быть связана с низкой пористостью соляных пород, которая, зачастую, не превосходит 0,5–1,0 %, и практически полным отсутствием естественной трещиноватости [116, 136].

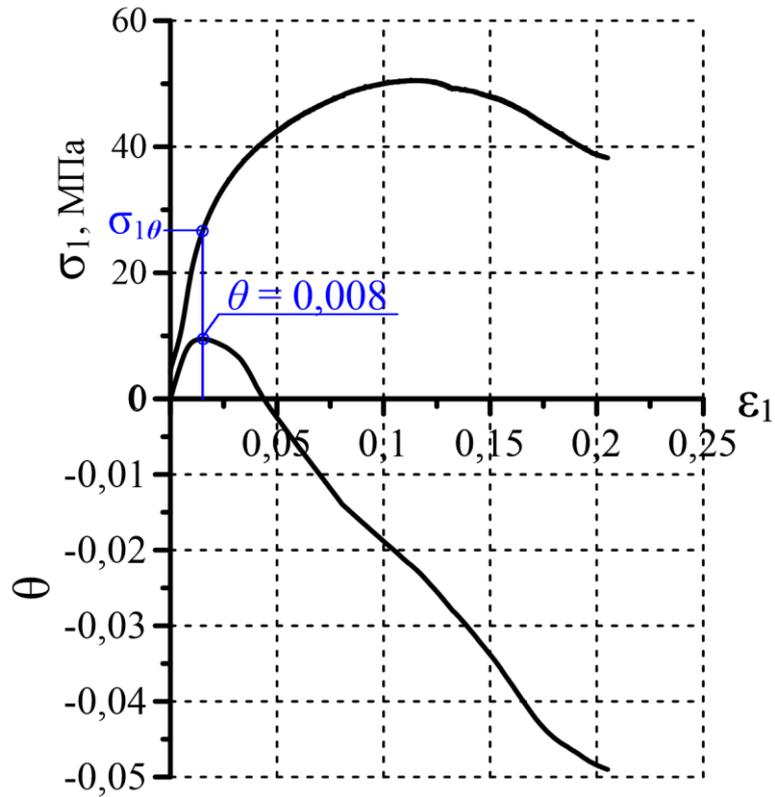


Рисунок 2.8 – Диаграмма деформирования образца каменной соли, испытанного при боковом давлении 4 МПа:  
 $\sigma_{1\theta}$  – величина продольного напряжения, соответствующая максимальному уплотнению образца;  $\theta$  – объемная деформация

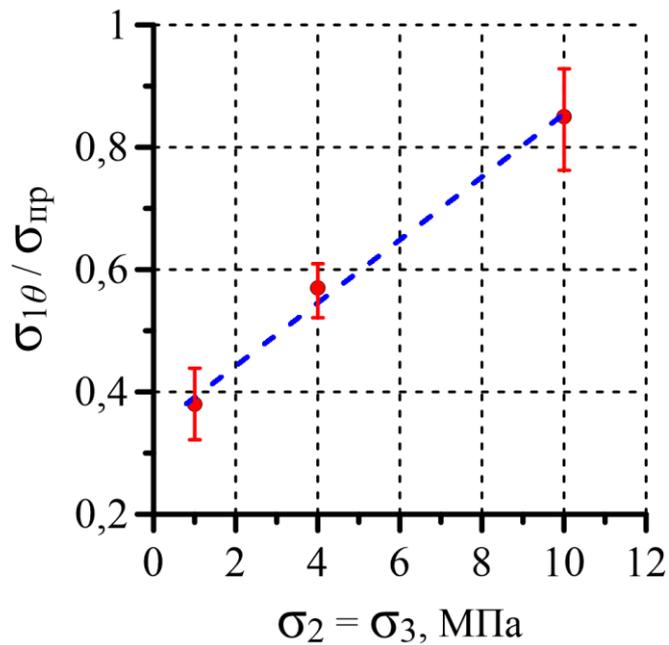


Рисунок 2.9 – Зависимость относительного напряжения  $\sigma_{1\theta} / \sigma_{пр}$  от уровня бокового давления для образцов каменной соли

Для исследования возможности переключения на следующую ступень многоступенчатого нагружения на уровне 0,9 от предела прочности текущей ступени ( $\sigma_2 = \sigma_3$ ), проведены сопоставительные эксперименты в режиме одноступенчатого и многоступенчатого нагружения образцов полосчатого сильвинита. Для этого из породного блока (размер 400x400x400 мм) было изготовлено 26 призматических образцов (35x35x70 мм), в том числе: 21 – для одноступенчатых испытаний, 5 – для многоступенчатых. Эксперименты выполнялись при боковых давления 2, 4, 8 МПа по схеме, аналогичной, представленной выше.

Вид породного блока и образцов представлен на рис. 2.10 [77]. Применение в данной части исследования призматических образцов обуславливается техническими сложностями при выбурировании керна из породных блоков, имеющих ослабленные прослойки.

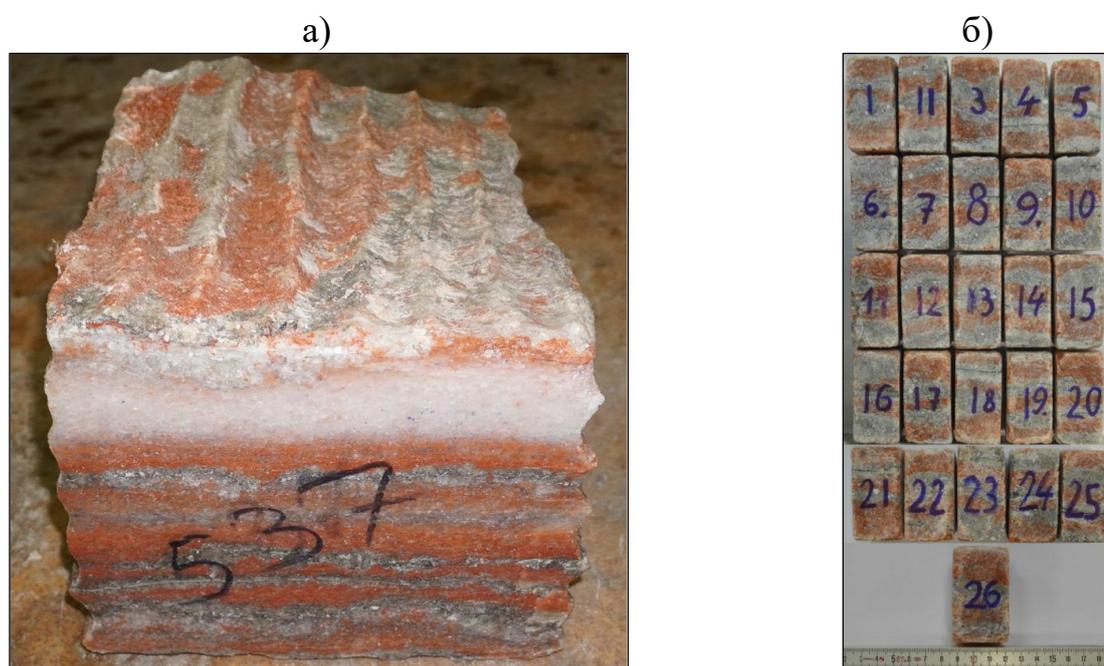


Рисунок 2.10 – Вид породного блока полосчатого сильвинита (а) и изготовленных из него образцов для сопоставительных испытаний (б)

Отличие применяемой схемы многоступенчатого нагружения от одноступенчатой заключалось в том, что при достижении уровня нагрузки 0,9

от предела прочности соответствующей ступени на допредельной стадии деформирования выполнялся сброс осевой нагрузки и увеличение бокового давления до достижения необходимого гидростатического уровня следующей ступени ( $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ ). Затем происходило нагружение образца с постоянной скоростью продольного деформирования по схеме Кармана ( $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$ ) и т. д. На последней ступени образец нагружался вплоть до получения запредельной части диаграммы деформирования. После перехода на участок остаточной прочности выполнялось переключение на предыдущую ступень нагружения и деформирование образца до получения остаточной прочности соответствующей ступени и т.д.

Для исследования изменения деформационных характеристик образцов при одноступенчатых и многоступенчатых испытаниях выполнялась серия разгрузок с последующим нагружением как на допредельной стадии деформирования, так и на запредельной. Впоследствии по разгрузочным ветвям выполнялась оценка величины модуля упругости (рис. 2.4), соответствующего текущей стадии деформирования образца. Также по результатам испытаний определялись предел прочности ( $\sigma_{пр}$ ) и остаточная прочность ( $\sigma_{ост}$ ).

Оценка предела прочности при многоступенчатом нагружении на 2-й, 3-й ступенях выполнялась по формуле:

$$\sigma_{пр} = K\sigma_{0,9}, \quad (2.2)$$

где  $K = 1,1$  – эмпирический коэффициент;  $\sigma_{0,9}$  – продольное напряжение, соответствующее  $0,9\sigma_{пр}$ , МПа.

На рис. 2.11 представлены характерные диаграммы деформирования, полученные по результатам испытаний на объемное нагружение образцов полосчатого сильвинита.

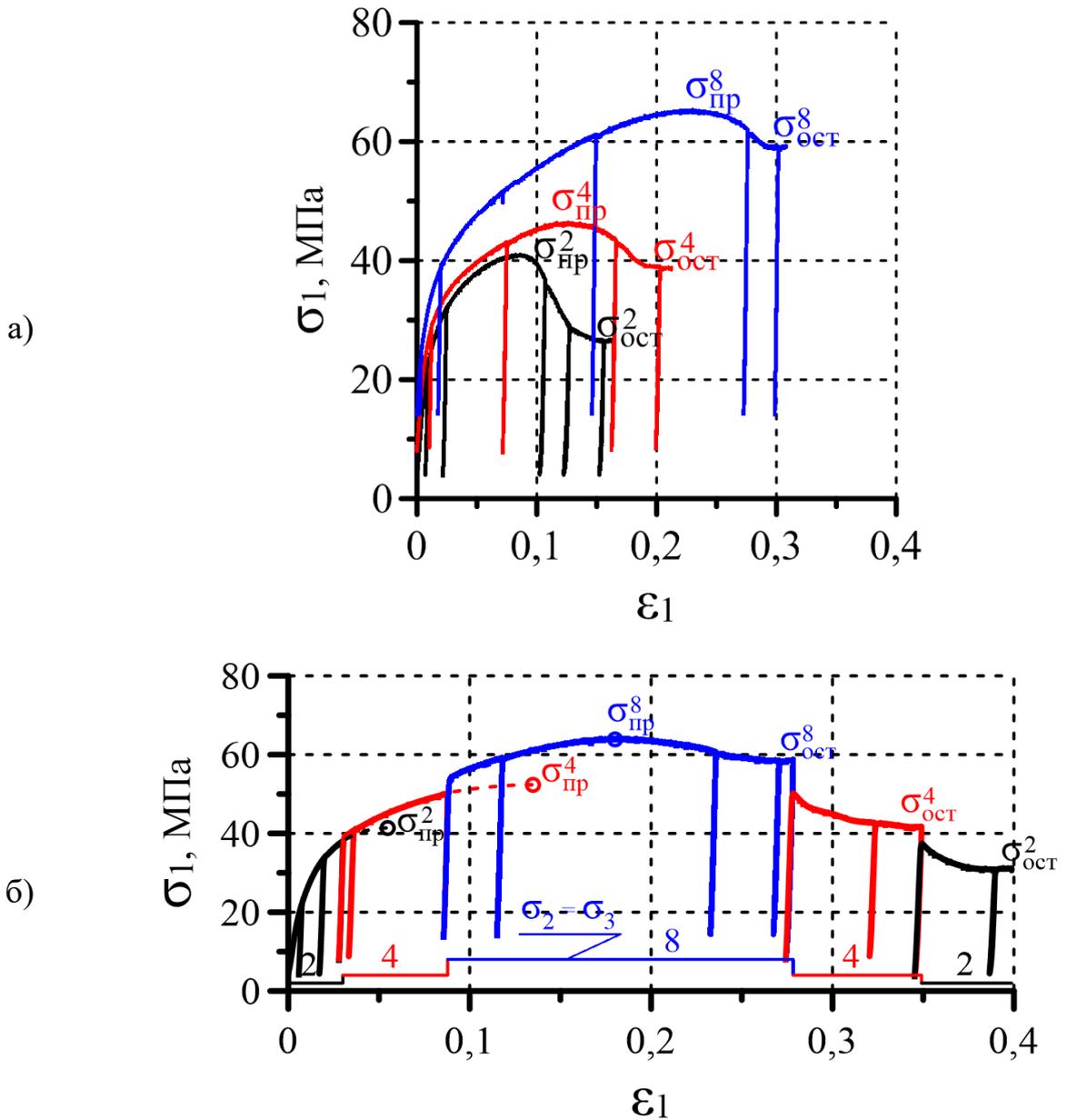


Рисунок 2.11 – Характерные диаграммы деформирования, полученные по результатам объемных одноступенчатых (а) и многоступенчатых (б) испытаний образцов полосчатого сильвинита: —, —, — боковое давление 2, 4, 8 МПа, соответственно

Результаты определения прочностных характеристик полосчатого сильвинита методами объемного нагружения приведены в табл. 2.1, где  $\delta_{пр}$ ,  $\delta_{ост}$  – это относительная погрешность определения предела прочности ( $\sigma_{пр}$ ) и остаточной прочности ( $\sigma_{ост}$ ) методом объемного многоступенчатого нагружения относительно стандартного (одноступенчатого).

Таблица 2.1 – Прочностные характеристики полосчатого сильвинита, полученные по результатам испытаний на объемное сжатие [77]

$\sigma_2 = \sigma_3$ , МПа	Одноступенчатое нагружение, 21 образец		Многоступенчатое нагружение, 5 образцов			
	$\sigma_{пр}$ , МПа	$\sigma_{ост}$ , МПа	$\sigma_{пр}$ , МПа	$\delta_{пр}$ , %	$\sigma_{ост}$ , МПа	$\delta_{ост}$ , %
2	$41,9 \pm 2,0$	$26,8 \pm 1,2$	$37,9 \pm 1,7$	9,5	$32,1 \pm 1,5$	19,8
4	$49,8 \pm 2,0$	$38,8 \pm 4,1$	$48,1 \pm 1,9$	3,4	$42,1 \pm 2,4$	8,5
8	$65,1 \pm 1,3$	$58,0 \pm 6,3$	$61,9 \pm 4,1$	4,9	$56,4 \pm 2,6$	2,7

Анализ данных табл. 2.1 свидетельствует о том, что значения прочностных характеристик полосчатого сильвинита, полученные методом объемного многоступенчатого нагружения по предложенной схеме, аналогичны значениям, определенным в ходе стандартных (одноступенчатых) испытаний. При этом погрешность ( $\delta_{пр}$ ) при определении предела прочности методом многоступенчатого нагружения относительно одноступенчатого находится в диапазоне от 3,4 до 9,5 %. По результатам многоступенчатых испытаний, по сравнению с одноступенчатыми, было получено завышенное значение остаточной прочности при боковом давлении 2 МПа ( $\delta_{ост} = 19,8$  %), что является следствием вдавливания нагружающих пуансонов в торцы образцов из-за их интенсивного деформирования (рис. 2.12). Указанная проблема может быть решена использованием пуансонов больших размеров.



Рисунок 2.12 – Вид образцов после испытания: 1, 20, 9 – по одноступенчатой схеме при боковом давлении 2, 4, 8 МПа, соответственно; 6 – по многоступенчатой схеме при боковых давлениях 2, 4, 8 МПа

На рис. 2.13 представлены результаты исследования изменения модуля упругости ( $E$ ) в зависимости от метода нагружения, уровня бокового давления и стадии деформирования ( $\sigma_1/\sigma_{пр}$ ).

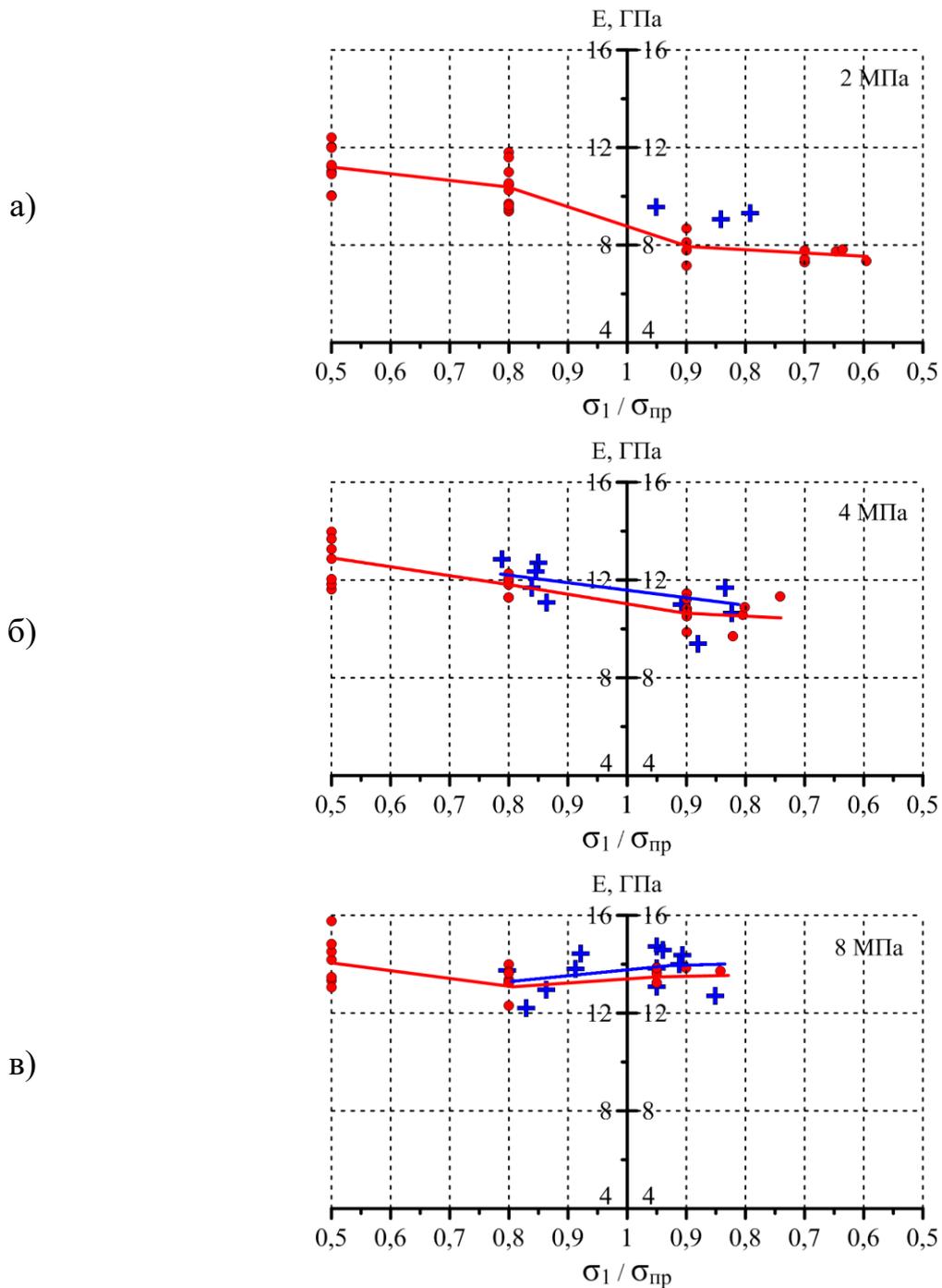


Рисунок 2.13 – Изменение модуля упругости полосчатого сильвинита в зависимости от метода нагружения и стадии деформирования при боковом давлении 2 (а), 4 (б), 8 МПа (в):

•, — — одноступенчатые испытания; +, — — многоступенчатые испытания

По данным рис. 2.13 видно, что в процессе деформирования образцов полосчатого сильвинита происходит снижение модуля упругости, которое наиболее сильно проявляется на уровне нагрузки  $(0,8 \div 1,0) \sigma_{пр}$  при низком уровне бокового давления – 2 МПа.

С возрастанием бокового давления отмечается увеличение модуля упругости на всех этапах деформирования образцов полосчатого сильвинита, а его спад становится менее выраженным (рис. 2.13). Так, например, при боковом давлении 2 МПа на допределельной стадии деформирования ( $\sigma_1/\sigma_{пр} = 0,5$ ) среднее значение модуля упругости составляет 11 ГПа, на запределельной ( $\sigma_1/\sigma_{пр} = 0,6$ ) – 7,5 ГПа, что составляет около 68% от первоначального значения. При боковом давлении 8 МПа среднее значение модуля упругости за весь период деформирования образца снижается не более чем на 4% – с 14,0 до 13,5 ГПа.

Результаты исследований (рис. 2.13) свидетельствуют о том, что значения модуля упругости соляных пород, полученные методом объемного многоступенчатого сжатия, аналогичны значениям, полученным по результатам стандартных (одноступенчатых) испытаний.

Таким образом, метод многоступенчатого нагружения, в предложенной реализации, позволяет исследовать изменения прочностных и деформационных характеристик соляных пород в зависимости от уровня бокового давления.

Объемные многоступенчатые испытания соляных пород Гремячинского месторождения выполнялись по методике аналогичной представленной выше. По результатам экспериментов определялись значения предела прочности, соответствующие уровням бокового давления: 5, 10, 15 МПа.

## 2.4. Результаты исследования физико-механических свойств пород Гремячинского месторождения

Количество испытанных образцов пород Гремячинского месторождения приведено в табл. 2.2.

Таблица 2.2 – Количество испытанных образцов пород Гремячинского месторождения

Порода	Одноосное сжатие, шт.	Раскалывание, шт.	Объемное сжатие, шт.
Доломит	7	7	–
Ангидрит-доломит	5	4	–
Ангидрит	6	4	–
Сильвинит	42	20	7
Каменная соль	36	17	7
Карналлит	46	22	7
Итого	142	74	21

Результаты экспериментального исследования влияния формы ( $h/d$ ) образцов соляных пород на их прочностные и деформационные характеристики при одноосном сжатии представлены на рис. 2.14. При этом наибольший разброс экспериментальных данных характерен для деформационных характеристик.

Анализ экспериментальных данных показал, что изменение отношения высоты к диаметру, испытываемых на одноосное сжатие образцов соляных пород Гремячинского месторождения, в диапазоне от 0,3 до 2,0 приводит к изменению величины предела прочности, касательного модуля деформации, секущего модуля деформации сильвинита и каменной соли в 2–2,7 раз. Те же показатели карналлитовой породы изменяются в 1,6–5,4 раз. При этом наиболее чувствительным к изменению отношения высоты к диаметру испытываемых на одноосное сжатие образцов соляных пород является касательный модуль спада. Его значение может изменяться на порядок и более при изменении отношения высоты к диаметру образцов в том же диапазоне (рис. 2.14).

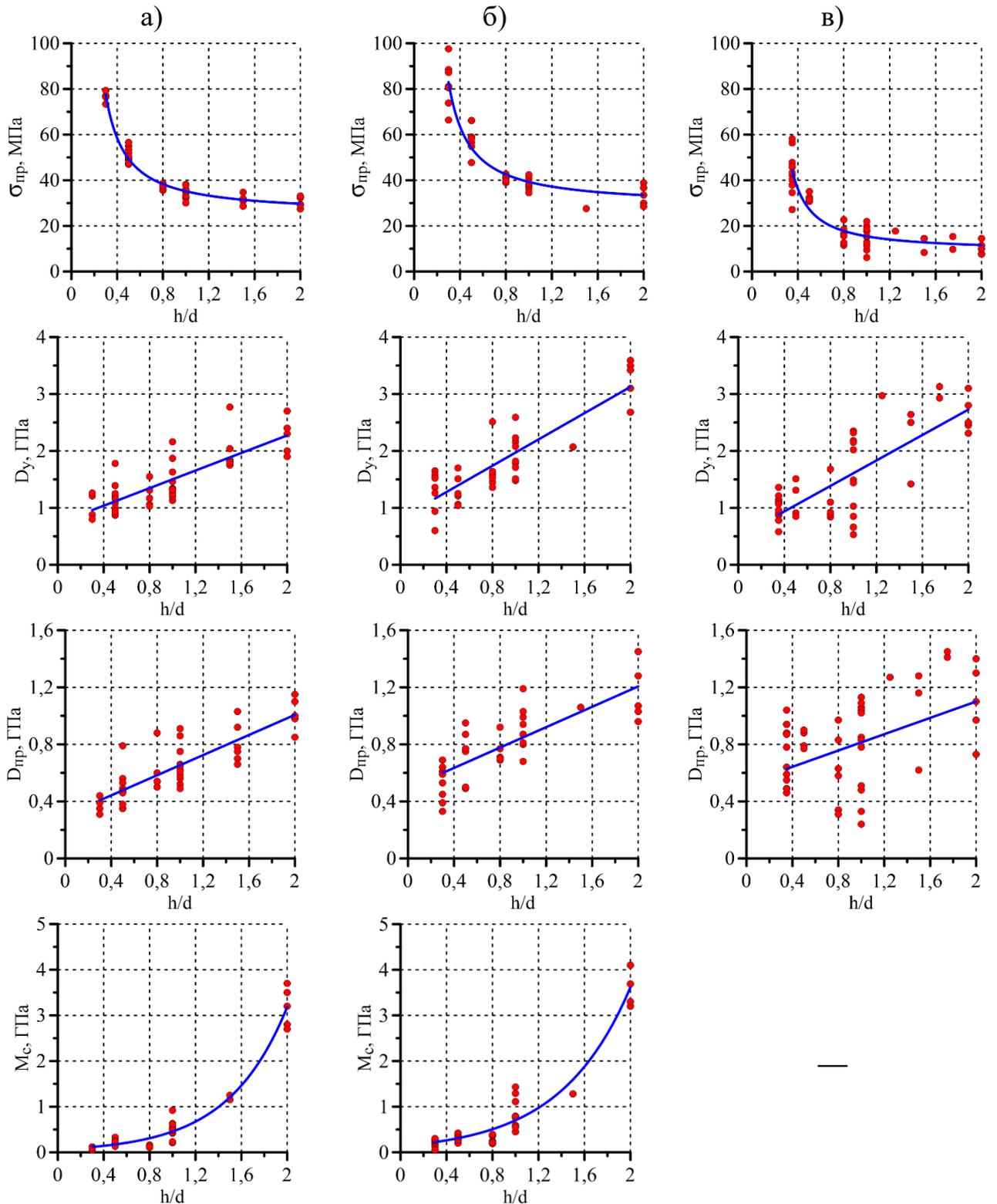


Рисунок 2.14 – Результаты исследования влияния фактора формы на прочностные и деформационные характеристики при одноосном сжатии образцов соляных пород Гремячинского месторождения:

а – сильвинит; б – каменная соль; в – карналлит;

$\sigma_{нр}$  – предел прочности;  $D_y$  – касательный модуль деформации;

$D_{нр}$  – секущий модуль деформации;  $M_c$  – касательный модуль спада

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

$$X\left(\frac{h}{d}\right) = X_{\frac{h}{d}=2,0} \cdot K_{\phi}, \quad (2.3)$$

где  $X$  – значение механического показателя ( $\sigma_{\text{пр}}$ ,  $D_y$ ,  $D_{\text{пр}}$  или  $M_c$ ), соответствующее образцу с отношением высоты к ширине (диаметру) равном  $h/d$ ;  $X_{\frac{h}{d}=2,0}$  – значение механического показателя ( $\sigma_{\text{пр}}$ ,  $D_y$ ,  $D_{\text{пр}}$  или  $M_c$ ), соответствующее образцу с отношением высоты к ширине (диаметру) равном 2,0.

Коэффициент формы ( $K_{\phi}$ ) в выражении (2.3) для деформационных характеристик соляных пород Гремячинского месторождения определяется в соответствии с результатами экспериментальных исследований по табл. 2.3.

Таблица 2.3 – Коэффициент формы для определения деформационных характеристик соляных пород Гремячинского месторождения

Порода	Касательный модуль деформации	Секущий модуль деформации	Модуль спада
	$K_{\phi} = a_1 + a_2 \cdot \frac{h}{d}$	$K_{\phi} = a_1 + a_2 \cdot \frac{h}{d}$	$K_{\phi} = a_1 \cdot \text{Exp}(a_2 + a_3 \cdot \frac{h}{d})$
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	$a_1 = 0,18;$ $a_2 = 0,41;$ $R^2 = 0,59$	$a_1 = 0,48;$ $a_2 = 0,26;$ $R^2 = 0,25$	–

Коэффициент формы ( $K_{\phi}$ ) для прочностных характеристик соляных пород Гремячинского месторождения определяется в соответствии с

результатами экспериментальных исследований по табл. 2.4. При этом рассматривалось два вида коэффициента формы:

- гиперболический:

$$K_{\phi} \left( \frac{h}{d} \right) = a_1 + a_2 \cdot \frac{d}{h} \quad (2.4)$$

- экспоненциальный:

$$K_{\phi} \left( \frac{h}{d} \right) = a_1 \cdot \text{Exp} \left( a_2 + a_3 \cdot \frac{d}{h} \right), \quad (2.5)$$

где  $a_1, a_2, a_3$  – эмпирические коэффициенты.

Таблица 2.4 – Коэффициент формы для определения прочностных характеристик соляных пород Гремячинского месторождения

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. 2.15 представлены зависимости предела прочности от отношения высоты к ширине (диаметру) испытываемых на одноосное сжатие образцов соляных пород, полученные с использованием коэффициентов формы вида (2.4), (2.5): черным показана зависимость, полученная с помощью гиперболического коэффициента формы с эмпирическими коэффициентами  $a_1 = 0,650$  и  $a_2 = 0,689$  и используемая на Гремячинском месторождении для определения параметров системы разработки [46]; зелёным показана зависимость, также полученная с использованием гиперболического

коэффициента формы, но с эмпирическими коэффициентами  $a_1$  и  $a_2$ , значения которых соответствуют проведенным экспериментальным исследованиям (табл. 2.4); синим – зависимость, полученная с использованием экспоненциального коэффициента формы (табл. 2.4).

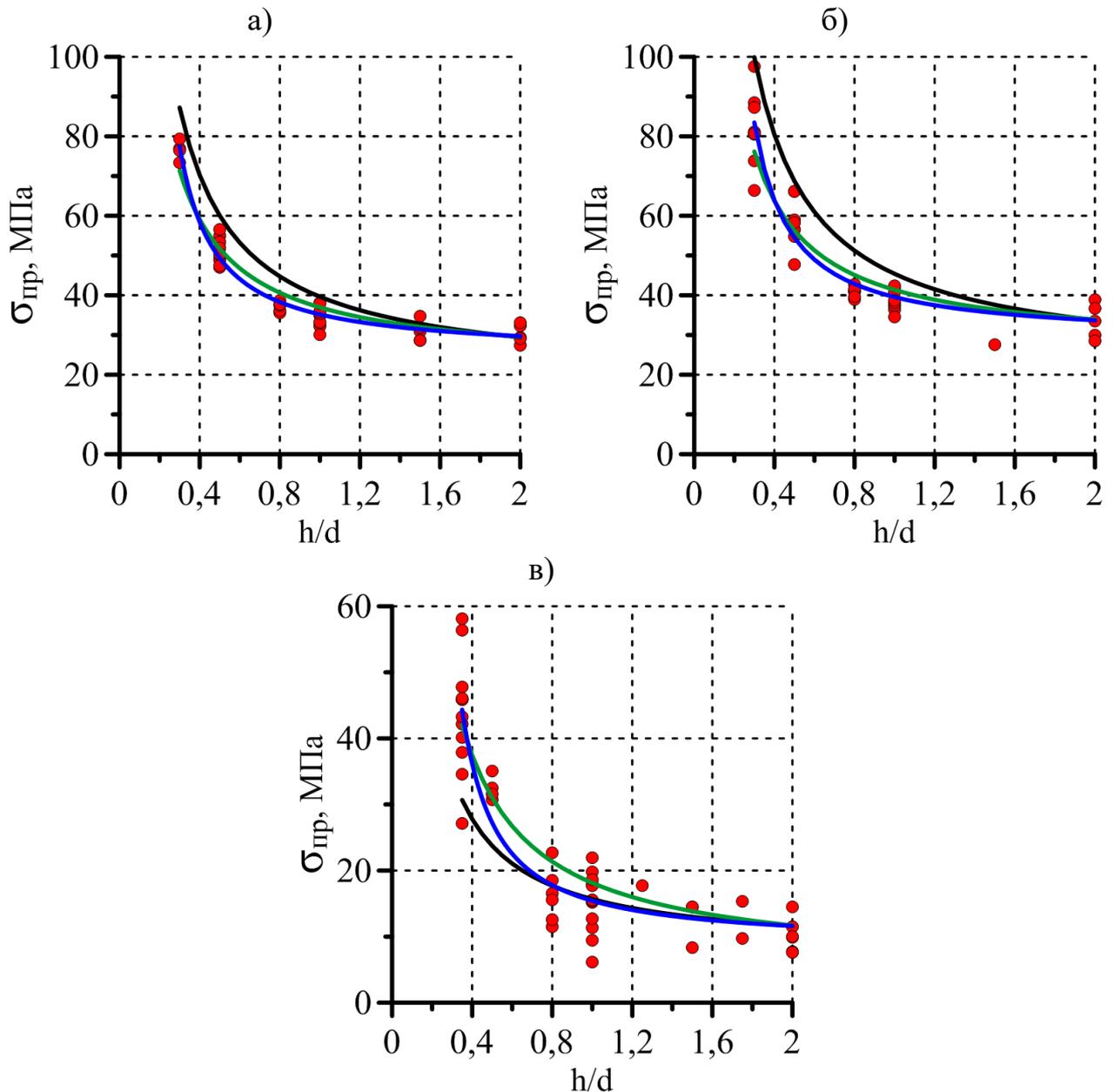


Рисунок 2.15 – Зависимости прочности соляных пород Гремячинского месторождения от отношения высоты к диаметру испытываемых на одноосное сжатие образцов: а – сильвинит; б – каменная соль; в – карналлит;  
 — — коэффициент формы, используемый на месторождении [46];  
 — — коэффициент формы гиперболического вида;  
 — — коэффициент формы экспоненциального вида

По графикам (рис. 2.15) видно, что лучше всего зависимость прочности соляных пород Гремячинского месторождения от отношения высоты к ширине (диаметру) испытываемых на одноосное сжатие образцов описывается коэффициентом формы экспоненциального вида с параметрами, представленными в табл. 2.4.

В табл. 2.5 представлены результаты исследований на одноосное сжатие образцов пород Гремячинского месторождения с  $h/d = 2,0$ , а также результаты экспериментов на растяжение.

Таблица 2.5 Механические свойства пород Гремячинского месторождения

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

Анализ результатов лабораторных исследований породных образцов (табл. 2.5) показал, что наиболее слабым звеном породного массива Гремячинского месторождения являются карналлитовые породы, залегающие вблизи почвы промышленного сильвинитового пласта. При этом прочность карналлита на одноосное сжатие в 2,5 раза меньше прочности сильвинита, в то время как прочность ангидрит-доломитовых пород, залегающих вблизи кровли сильвинитового пласта, в 2,1 раз больше прочности промышленных пород. Необходимо обратить внимание, что прочность на растяжение сильвинитовых пород составляет 1,7 МПа, в то время как прочность на растяжение ангидритовых пород – 3,5 МПа, ангидрит-доломитовых – 5,4 МПа, доломитовых – достигает 11,1 МПа, что в 6,5 раз превышает прочность пород промышленного пласта. Наименьшее значение прочности при одноосном растяжении характерно для карналлитовых пород и составляет 0,7 МПа.

Одним из показателей, характеризующих склонность горных пород к проявлению пластической деформации под нагрузкой, является коэффициент пластичности  $k_{пл}$  [86], который может быть вычислен по формуле:

$$k_{пл} = \frac{D_y}{D_{пр}}, \quad (2.6)$$

где  $D_y$ ,  $D_{пр}$  – соответственно, касательный модуль деформации и секущий модуль деформации, ГПа.

Для ангидритовых, ангидрит-доломитовых и доломитовых пород Гремячинского месторождения  $k_{пл} = 1,5$ , для соляных  $k_{пл} \in [2,3; 2,6]$ , что количественно подтверждает существенно большую склонность соляных пород к проявлению пластических деформаций в тех же условиях нагружения.

Указанные выше особенности деформирования рассмотренных типов пород наглядно иллюстрируют их диаграммы деформирования, полученные по результатам одноосного сжатия образцов с  $\frac{h}{d} = 2,0$  и представленные на рис. 2.16.

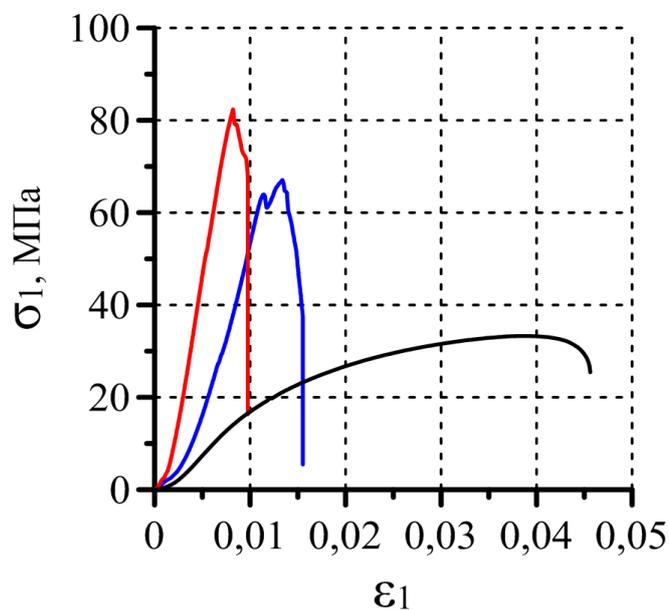


Рисунок 2.16 – Характерные диаграммы деформирования образцов с  $\frac{h}{d} = 2,0$  каменной соли (—), ангидрит-доломитовых (—) и доломитовых (—) пород Гремячинского месторождения при одноосном сжатии

Как упоминалось ранее, соляные породы испытывались не только на одноосное сжатие и раскалывание, но и на объемное многоступенчатое сжатие при боковых давлениях 5, 10, 15 МПа.

На рис. рис. 2.17 представлены примеры образцов сильвинита до и после испытаний на объемное многоступенчатое сжатие, которые наглядно иллюстрируют характерное для образцов соляных пород интенсивное деформирование в ходе эксперимента.



Рисунок 2.17 – Пример образцов сильвинита Гремячинского месторождения до (а) и после (б) испытаний на объемное многоступенчатое сжатие

Необходимо обратить внимание на то, что после завершения эксперимента образцы сохраняли связную структуру, несмотря на продольную деформацию до 30 % и более, появление на поверхности трещин, видимых невооруженным глазом, приобретение бочкообразной формы. Разделить испытанные образцы на отдельные фрагменты после экспериментов вручную удавалось с большим трудом.

Характерная диаграмма деформирования образца сильвинита, полученная по результатам объемного многоступенчатого сжатия, представлена на рис. 2.18.

Результаты определения предела прочности соляных пород методом объемного многоступенчатого нагружения приведены в табл. 2.6.

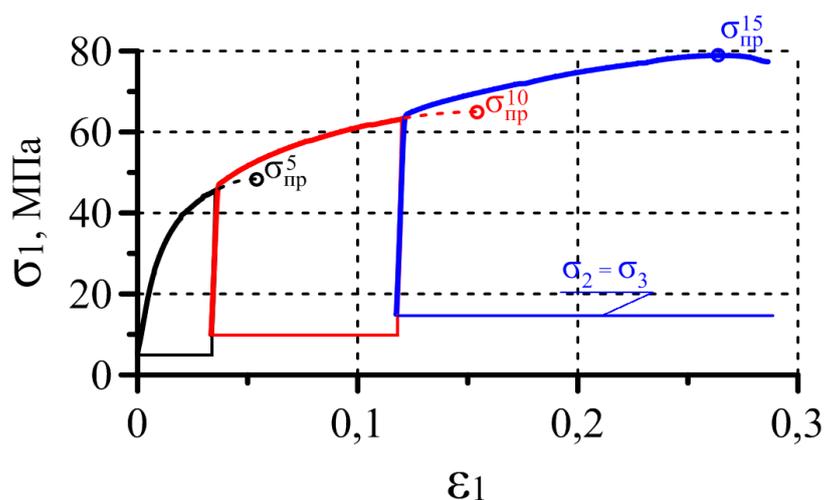


Рисунок 2.18 – Характерная диаграмма деформирования образца сильвинита Гремячинского месторождения при объемном многоступенчатом нагружении: —, —, — боковое давление 5, 10, 15 МПа, соответственно

Таблица 2.6 – Предел прочности (МПа) соляных пород Гремячинского месторождения в зависимости от уровня бокового давления

Порода	$\sigma_2 = \sigma_3$ , МПа		
	5	10	15
Сильвинит	$53,0 \pm 6,1$	$71,2 \pm 7,4$	$84,3 \pm 5,3$
Каменная соль	$65,2 \pm 4,3$	$76,2 \pm 3,5$	$89,0 \pm 7,3$
Карналлит	$24,8 \pm 6,2$	$36,6 \pm 4,8$	$46,6 \pm 5,4$

По результатам анализа данных табл. 2.5, 2.6 установлено, что с увеличением уровня бокового давления от 0 (одноосное сжатие) до 15 МПа прочность образцов соляных пород Гремячинского месторождения возрастает в 2,6–4,0 раз. При этом наиболее чувствительными к изменению уровня бокового давления являются слабые карналлитовые породы, прочность образцов которых, с увеличением бокового давления от 0 до 15 МПа, возрастает в 4 раза. В то время как прочность каменной соли увеличивается только лишь в 2,6 раз.

### Выводы по главе

1. Сравнительные исследования методов объемного многоступенчатого и одноступенчатого сжатия на образцах соляных пород показали, что

многоступенчатый метод адекватно отражает изменение прочностных и деформационных характеристик соляных пород в зависимости от уровня бокового давления и стадии деформирования. Переключение на следующую ступень многоступенчатого нагружения необходимо выполнять в момент достижения осевой нагрузкой на образец величины 0,9 от предела прочности текущей ступени.

2. На примере образцов сильвинита Верхнекамского калийно-магниевого месторождения с помощью метода объемного многоступенчатого нагружения установлено, что в процессе деформирования образцов соляных пород происходит постепенное снижение их модуля упругости на 30 % и более по сравнению с первоначальным значением. Наиболее сильно указанный эффект проявляется на низких уровнях бокового давления.

3. 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. Установлено, что изменение отношения высоты к диаметру, испытываемых на одноосное сжатие образцов сильвинита и каменной соли, в диапазоне от 0,3 до 2,0 приводит к изменению величины предела прочности, касательного модуля деформации, секущего модуля деформации в 2–2,7 раз. Те же показатели карналлитовой породы изменяются в 1,6–5,4 раз. Изменение отношения высоты к диаметру образцов в том же диапазоне приводит к изменению величины касательного модуля спада соляных пород Гремячинского месторождения на порядок и более.

4. Экспериментально установлено, что наиболее слабым звеном породного массива Гремячинского месторождения являются карналлитовые породы, залегающие вблизи почвы промышленного сильвинитового пласта. Прочность карналлитовых пород на одноосное сжатие и растяжение меньше

тех же показателей сильвинитовых пород в 2,5 и 2,4 раз, каменной соли – в 2,9 и 3,0 раз, соответственно.

5. Ангидритовые, ангидрит-доломитовые и доломитовые породы, залегающие вблизи кровли промышленного сильвинитового пласта Гремячинского месторождения, обладают существенно отличающимися прочностными и деформационными характеристиками по сравнению с соляными. Предел прочности на одноосное сжатие ангидритовых, ангидрит-доломитовых и доломитовых пород в 1,5, 2,1 и 2,9 раз превосходит соответствующий показатель сильвинитовых, на растяжение – в 2,1, 3,2 и 6,5 раз, соответственно. Для ангидритовых, ангидрит-доломитовых и доломитовых пород коэффициент пластичности по результатам одноосного сжатия составляет 1,5, в то время как для соляных 2,3–2,6, что количественно подтверждает существенно большую склонность соляных пород к проявлению пластических деформаций в аналогичных условиях нагружения.

6. По результатам лабораторных исследований установлено, что повышение уровня бокового давления от 0 (одноосное сжатие) до 15 МПа приводит к возрастанию прочности образцов соляных пород Гремячинского месторождения в 2,6–4,0 раз. Наименее чувствительными к изменению уровня бокового давления являются образцы каменной соли, наиболее чувствительными – слабой карналлитовой породы, прочность образцов которой возрастает с 11,7 МПа до 46,6 МПа при увеличении бокового давления от 0 до 15 МПа.

### 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРА ДЕФОРМИРОВАНИЯ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК И ВМЕЩАЮЩИХ ПОРОД

В главе представлены результаты инструментальных исследований характера деформирования горных выработок и вмещающих пород в условиях больших глубин Гремячинского месторождения калийных солей. Выработки пройдены в неоднородном слоистом массиве, представленном чередованием соленосных отложений и ангидритовых, ангидрит-доломитовых пород.

#### 3.1. Методика исследования

Для исследования особенностей деформирования горных выработок в соляных породах Гремячинского рудника было оборудовано 8 измерительных станций на 4 экспериментальных участках. Измерительные станции располагались в сбойках, пройденных в один ход комбайном Урал-20Р между проходческими транспортными штреками (ПТШ) № 1, 2 и 3 (рис. 3.1).

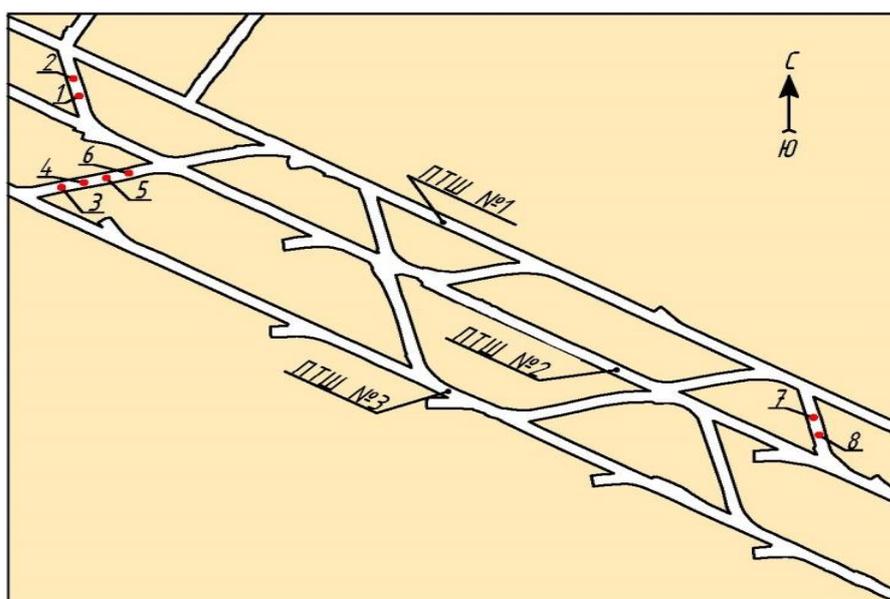


Рисунок 3.1 – Расположение измерительных станций в выработках Гремячинского рудника

Максимальная ширина экспериментальных выработок в проходке составляет 6,0 м, высота – 3,7 м, размер плоской части кровли – 2,4 м.

Каждая замерная станция оборудовалась контурными и глубинными реперами по схеме, аналогичной используемой в работах [5, 117]. Контурные реперы располагались в кровле, почве, боках выработок и представляли собой стальные штыри длиной 0,10 м, забиваемые в деревянные пробки, установленные в шпурах. Глубинные реперы изготавливались из анкеров типа КРА-16 (рис. 1.6, б) и закреплялись путем расклинивания щечек замка в стенки шпура. Свободные концы анкеров не фиксировались и выступали в выработку на 0,10–0,15 м со стороны кровли, боков. Концы штанг реперов, расположенных в почве, оставались заглубленными на 0,05–0,10 м и закрывались специальными колпачками для исключения их повреждения. На каждой замерной станции в кровле устанавливались глубинные реперы длиной 1,0, 2,0, 3,0 м, в боках – 0,5, 1,0, 2,0, 3,0 м, в почве – 0,5, 1,0 м (рис. 3.2).

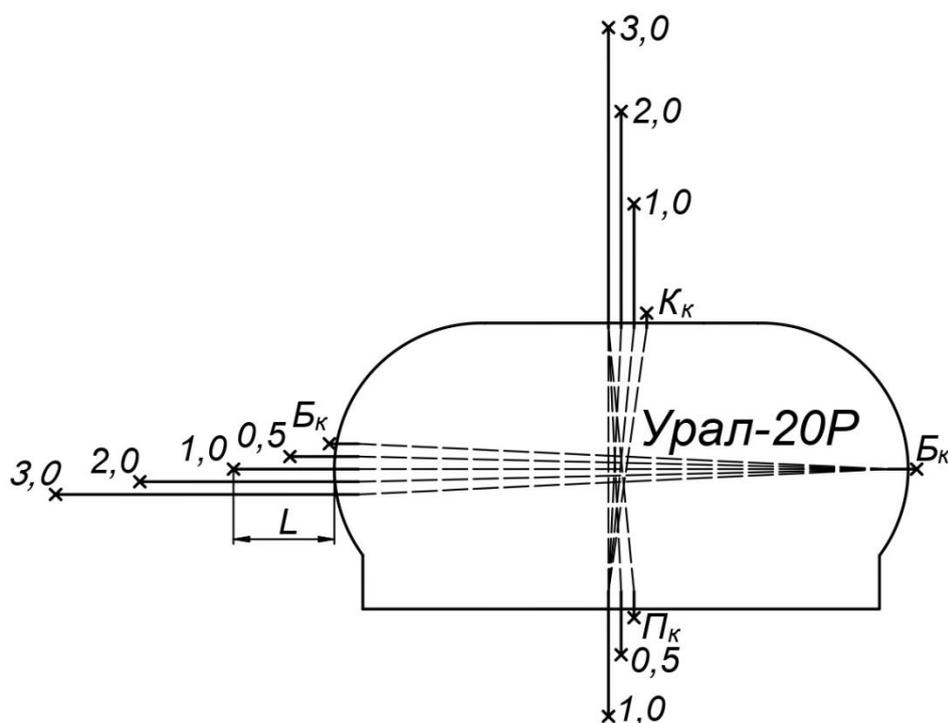


Рисунок 3.2 – Конструкция замерной станции в выработке, пройденной комбайном Урал-20Р:  $K_k$ ,  $P_k$ ,  $B_k$  – контурные реперы; 0,5...3,0 – глубинные реперы на глубине 0,5...3,0 м;  $L$  – расстояние от контура выработки до точки закрепления глубинного репера; «---» – база измерения

Деформация горных выработок измерялась ленточным экстензометром Sisgeo DNP03000 как в направлении кровля-почва, так и в направлении бок-бок (рис. 3.3).



Рисунок 3.3 – Измерение конвергенции кровля-почва выработки ленточным экстензометром Sisgeo DNP03000

На экспериментальных участках 1–3 первый замер был выполнен спустя 50 суток, на участке 4 – спустя 230 суток с момента проходки выработок. В начальный период наблюдения периодичность замеров составляла несколько дней, а в последующем была увеличена до полугода.

### **3.2. Геологическая характеристика экспериментальных участков**

Экспериментальные участки расположены в выработках, пройденных в соляных породах на глубине около 1100 м. Геологические разрезы по экспериментальным участкам приведены на рис. 3.4, по всем замерным станциям – в приложении.

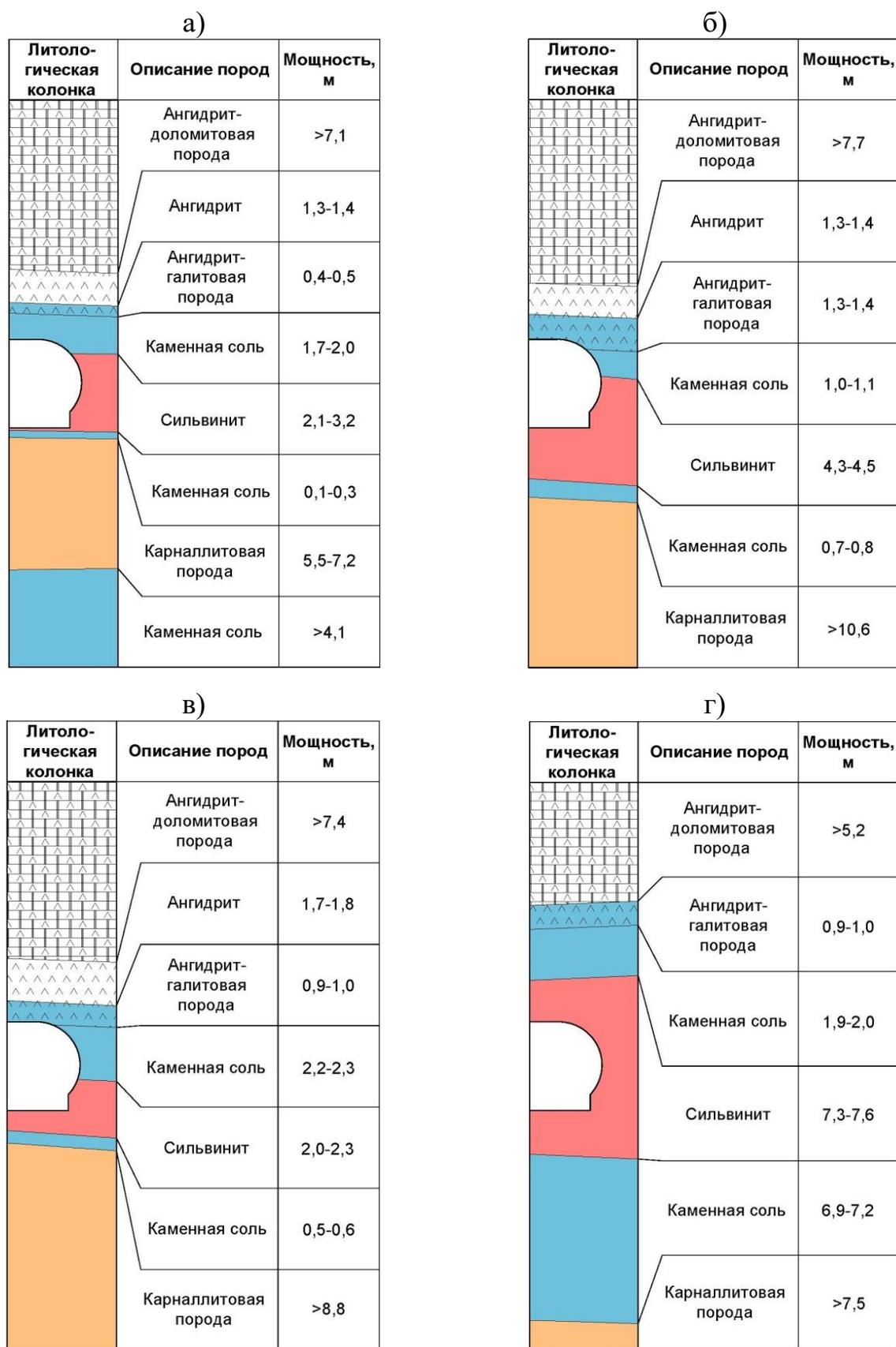


Рисунок 3.4 – Геологическая характеристика экспериментальных участков:  
1 (а), 2 (б), 3 (в), 4 (г)

Бока выработок экспериментальных участков 1–3 представлены чередованием слоев сильвинита и каменной соли. Экспериментальная выработка на участке 4 полностью пройдена в сильвинитовых породах.

В табл. 3.1 слева-направо (от контура вглубь массива) приводятся средние мощности слоев, оставленных в кровле, почве экспериментальных выработок.

Таблица 3.1 – Средние мощности слоев, оставленных в кровле, почве экспериментальных выработок

№ участка	№ станции	Мощность породного слоя, м			
		Кровля			Почва
		Сильвинит	Каменная соль	Ангидрит-галитовая порода	Сильвинит
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				

В сводчатой части кровли выработки на 1-м экспериментальном участке наблюдается подрезка каменной соли. На участках 2, 3 прихватывается каменная соль с прослоями ангидрита. В кровле выработки 4-го участка оставлена пачка сильвинита мощностью более 1,7 м.

Минимальная мощность соленосных отложений в кровле отмечается на экспериментальном участке 3 и составляет около 0,8–0,9 м. В то время как наибольшая мощность соленосных отложений в кровле отмечена на участке 4 и достигает 4,9 м.

На участках 1–3 соляные породы покрывает ангидритовый слой мощностью более 1,3 м. Выше залегают ангидрит-доломитовые породы,

которые на участке 4 непосредственно подстилает ангидрит-галитовая порода – каменная соль с прослоями ангидрита.

Почва экспериментальных выработок представлена сильвинитом и каменной солью, ниже которых залегают карналлитовые породы мощностью от 5,5 до 10 м и более. Минимальная мощность сильвинитовой пачки в почве отмечается на участках 1 и 3 и не превышает, соответственно, 0,2 и 0,7 м. Максимальная – на участках 2 и 4, около, 1,7–2,0 м. Наименьшее расстояние от почвы экспериментальной выработки до кровли ниже залегающего карналлитового пласта составляет не более 0,5 м (участок 1), наибольшее – 9,2 м (участок 4).

### 3.3. Параметры крепления экспериментальных участков

Перед выполнением первого замера кровля выработок экспериментальных участков 1–3 была закреплена клинораспорными анкерами КРА-16. Конструкция указанных анкеров представлена на рис. 1.6, б. Параметры крепления приведены в табл. 3.2, а также в приложении. Экспериментальный участок 4 на протяжении всего периода наблюдений оставался незакрепленным.

Таблица 3.2 – Параметры крепления экспериментальных выработок

Участок, №	Станция, №	Длина анкера, м	Сетка анкерования
1	1	2,0	6 рядов, 1,0×1,0 м
	2	1,8	
2	3	1,8	3 ряда, 2,0×2,0 м
	4		
3	5	1,8	4 ряда, 1,5×1,5 м
	6		
4	7	–	Без крепи
	8		

Расположение анкеров в поперечном сечении экспериментальных выработок представлено на рис. 3.5.

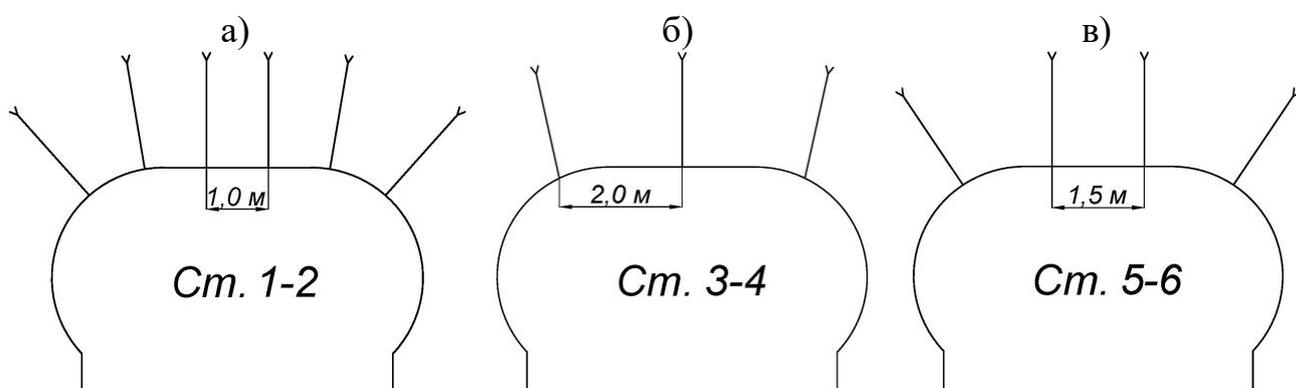


Рисунок 3.5 – Расположение рядов анкеров в поперечном сечении экспериментальных выработок: а – замерные станции 1, 2; б – замерные станции 3, 4; в – замерные станции 5, 6

Наиболее надежной схемой крепления кровли выработки является та, что используется на участке 1 (рис. 3.5, а). Отличие схемы крепления 2-го экспериментального участка от 3-го заключается не только в количестве рядов анкеров и расстоянии между ними, но также в том, что на участке 2 (рис. 3.5, б) один из анкеров попадает в центральную часть плоской кровли, в то время как на участке 3 (рис. 3.5, в) размер незакрепленной центральной части плоской кровли составляет 1,5 м.

### **3.4. Результаты исследования характера деформирования горных выработок и вмещающих пород**

Результаты инструментальных наблюдений за характером деформирования контура экспериментальных выработок и вмещающих пород представлены в приложении.

На рис. 3.6 приведены зависимости горизонтальной конвергенции от времени, полученные по результатам измерений деформации контурных реперов, расположенных в боках выработок [97]. Общий вид представленных

зависимостей является типичным для соляных пород и хорошо согласуется с данными работ [52, 84, 126 и др.].

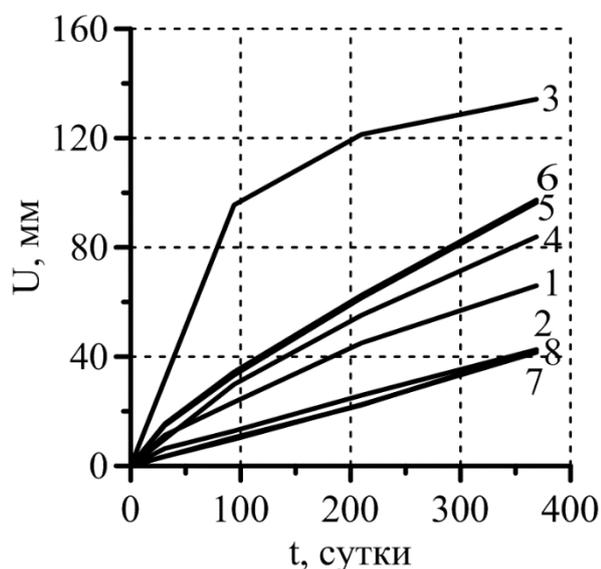


Рисунок 3.6 – Зависимости горизонтальной конвергенции от времени:  
1...8 – номера замерных станций

Близкий к линейному вид зависимостей 7, 8 (рис. 3.6) позволяет сделать вывод о том, что горизонтальная конвергенция на экспериментальном участке 4 имела постоянную скорость на протяжении всего периода наблюдения. Указанный факт свидетельствует о выходе пород боков до начала наблюдения на стадию установившейся ползучести. При этом для участка 4 характерны минимальные величины смещений стенок, что объясняется 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.

Снижение скорости деформирования контурных реперов в стенках выработок на замерных станциях 1, 2, 4–6 свидетельствует о постепенном выходе пород боков на участках 1–3 на стадию установившейся ползучести.

Сравнивая смещения (конвергенцию) боков по данным замерных станций 1, 2, 4–6, можно сделать вывод о том, что наибольшие смещения на протяжении всего периода наблюдений характерны для станций 5, 6, наименьшие – для

станций 1, 2 (рис. 3.6). При этом среднее значение горизонтальной конвергенции на участках 1–3, по данным указанных станций, составляет около 77 мм за период наблюдения.

По результатам инструментальных исследований четкую взаимосвязь между горизонтальной конвергенцией и геологическим строением вмещающих экспериментальные выработки пород установить не удастся. Указанный факт, вероятно, связан с близкими значениями прочностных и деформационных характеристик сильвинита и каменной соли, а также изменчивостью горно-геологических, горнотехнических условий экспериментальных участков.

Отдельно рассмотрим процесс смещения стенок выработки на станции 3, где инструментальные наблюдения показали резкое увеличение горизонтальной конвергенции экспериментальной выработки в период наблюдения 0–100 суток (рис. 3.6).

На рис. 3.7 приведены зависимости горизонтальной конвергенции от времени на экспериментальном участке 2 (станции 3, 4), полученные по результатам измерений смещений боков выработки с использованием глубинных реперов. Анализ данных позволяет сделать вывод о том, что слой приконтурных пород в боку выработки мощностью около 2,0 м смещается обособленно от пород, залегающих на расстоянии более 2,0 м от стенки выработки (рис. 3.7, а). Указанный характер деформирования позволяет предположить, что в месте расположения экспериментальной станции 3 на расстоянии 2,0–3,0 м от контура выработки в боку образовалась трещина.

Смещения пород боков выработок на станциях 1, 2, 4–8, в пределах интервала исследования 0–3,0 м, имели согласованный характер. Для примера на рис. 3.7, б представлены результаты инструментальных наблюдений за смещениями боков на станции 4. По остальным станциям данные приведены в приложении.

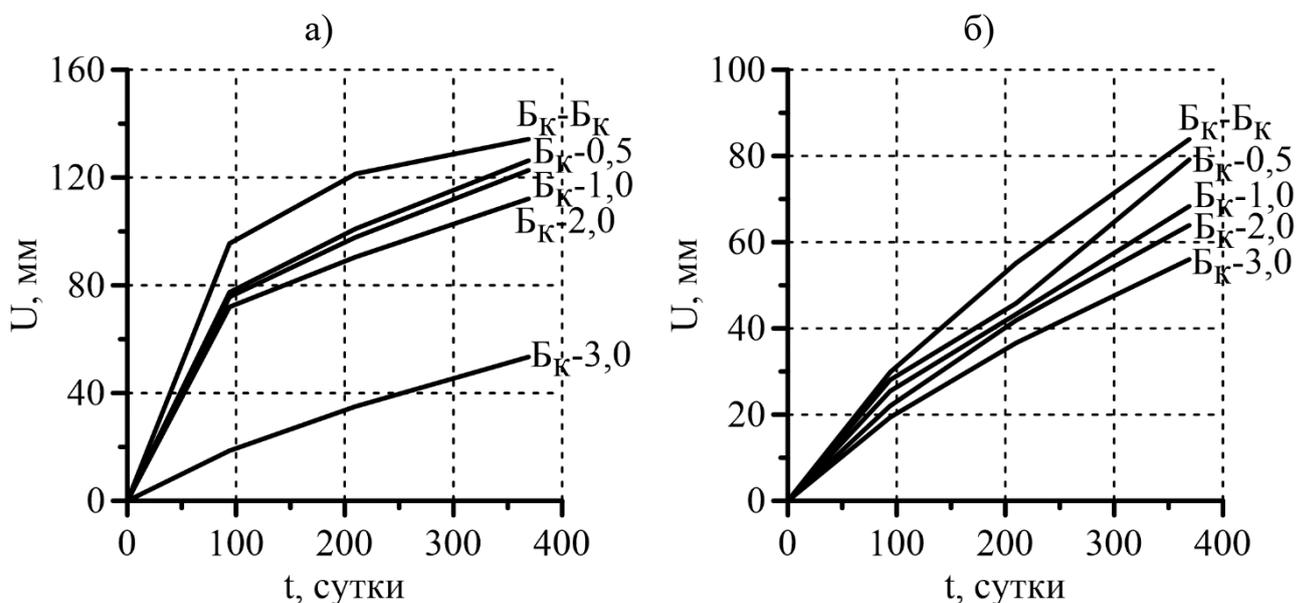


Рисунок 3.7 – Зависимости горизонтальной конвергенции от времени на экспериментальном участке 2: а – станция 3; б – станция 4;  $B_k$  – контурный репер; 0,5...3,0 – расстояние от контура выработки до точки закрепления глубинного репера, м

На рис. 3.8 представлены зависимости смещений реперов, установленных в боках выработок, от расстояния от контура выработки до точки закрепления реперов  $L$  за период наблюдений равный 31 и 369 суток (замерные станции 1, 6, 8). Станции 1, 6 оборудованы в закрепленных выработках в схожих горно-геологических условиях (табл. 3.1, рис. 3.4). Отличие состоит в том, что кровля выработки на станции 1 крепится 6 рядами анкеров, а на станции 6 – 4 рядами (рис. 3.5). Незакрепленная выработка станции 8 пройдена на полгода раньше, чем выработки замерных станций 1, 6.

Деформация вмещающих выработки пород определяется наклоном (тангенсом угла наклона) графиков к оси абсцисс (рис. 3.8). Распределение деформаций в боках выработок на станциях 1, 6 (рис. 3.8, а, б) имеет более неоднородный характер, чем в боках выработки на станции 8 (рис. 3.8, в), что, вероятно, объясняется большим возрастом выработки станции 8.

Несмотря на большую горизонтальную конвергенцию на станции 6, распределение деформаций в боках выработок на станциях 1, 6 (рис. 3.8, а, б) по истечении 369 суток с момента начала наблюдения в целом идентично.

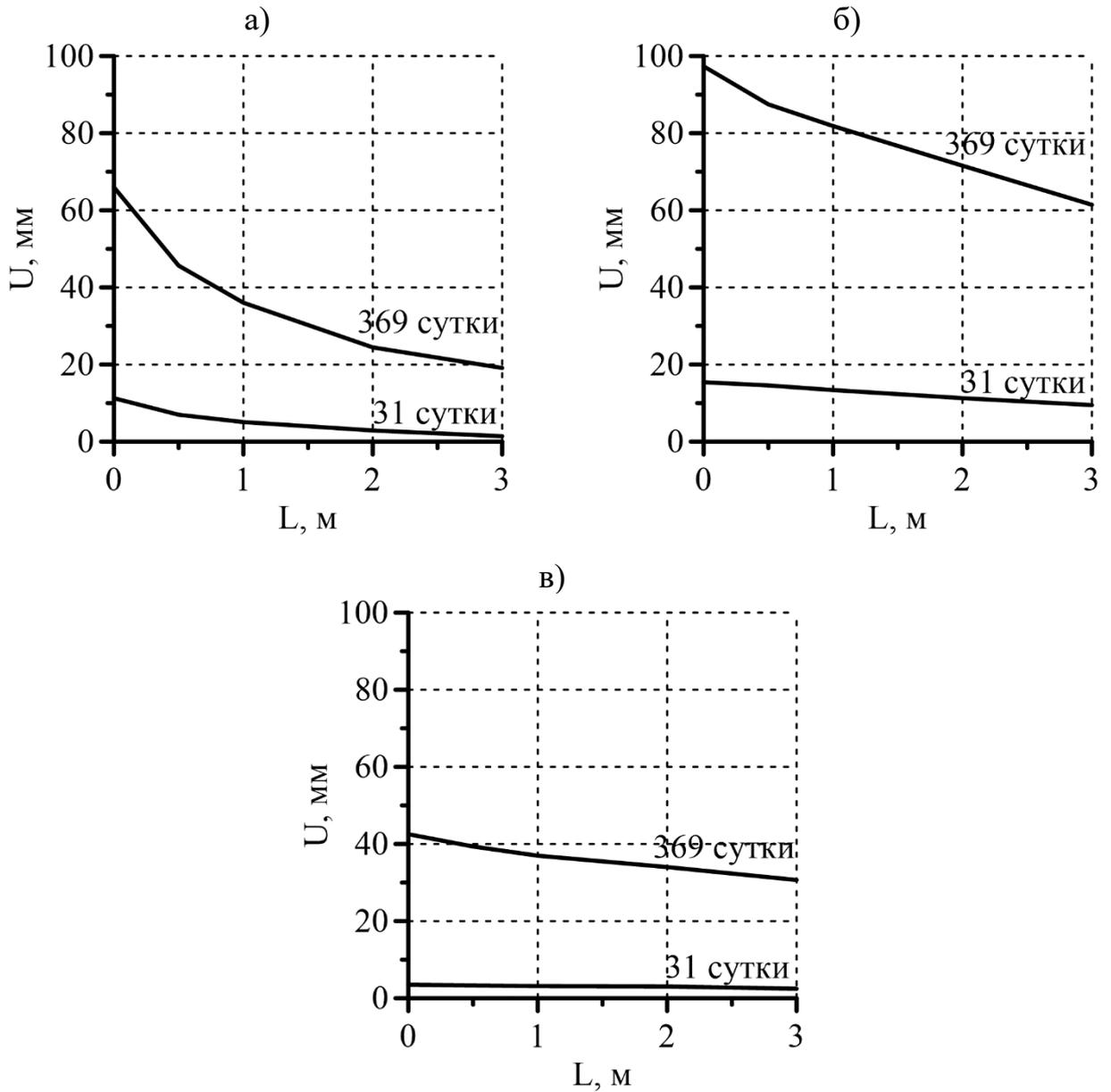


Рисунок 3.8 – Смещения реперов в боках выработок по истечении 31 и 369 суток с момента начала наблюдений на замерных станциях: 1 (а), 6 (б), 8 (в)

Приконтурный массив кровли и почвы экспериментальных выработок представлен породами с резко отличающимися физико-механическими характеристиками. В этой связи, для выявления особенностей деформирования приконтурного массива в кровле и почве выработок, из вертикальной конвергенции необходимо выделить составляющие смещений пород кровли и почвы.

Из геологического строения экспериментальных участков (рис. 3.4, табл. 3.1) следует, что закрепление глубинного репера длиной 3,0 м в кровле экспериментальных выработок на станциях 1–6 попадает в ангидрит-доломитовые породы, а на станциях 7, 8 – в породы каменной соли вблизи ангидрит-галитовых отложений. В связи с тем, что ангидритовые и ангидрит-доломитовые породы менее склонны к проявлению деформаций ползучести по сравнению с соляными, то смещениями указанного репера в кровле, при определении смещений почвы, можно пренебречь. Поэтому смещения пород почвы экспериментальных выработок определялись относительно глубинного репера длиной 3,0 м в кровле. В то время как смещения кровли выработок определялись путем вычитания смещений почвы из соответствующей конвергенции «кровля-почва».

В связи с тем, что часть реперов на участках 1, 2 была повреждены работающей техникой, то некоторые результаты инструментальных исследований, полученные на замерных станциях 1, 2, 4, были исключены из дальнейшей обработки и анализа.

На рис. 3.9 приведены зависимости смещений контура кровли выработок от времени. Установлено, что деформирование кровли на замерных станциях 3, 5, 6 происходит с уменьшающейся скоростью, это подтверждается уменьшением угла наклона графиков к оси абсцисс (рис. 3.9, а).

Мощность ангидрит-галитовых отложений в кровле экспериментальной выработки на станции 3 составляет 1,2–1,3 м, на станциях 5, 6 – 0,8–0,9 м (табл. 3.1). Экспериментальная выработка на станции 3 закреплена 3 рядами анкеров, на станциях 5, 6 – 4 рядами (рис. 3.5). Поэтому можно сделать вывод о том, что увеличение количества рядов анкеров с 3-х до 4-х и уменьшение мощности ангидрит-галитовых отложений с 1,2–1,3 м до 0,8–0,9 м в кровле приводит к снижению величин смещений кровли за период наблюдений, примерно, в 1,5 раза (рис. 3.9, а).

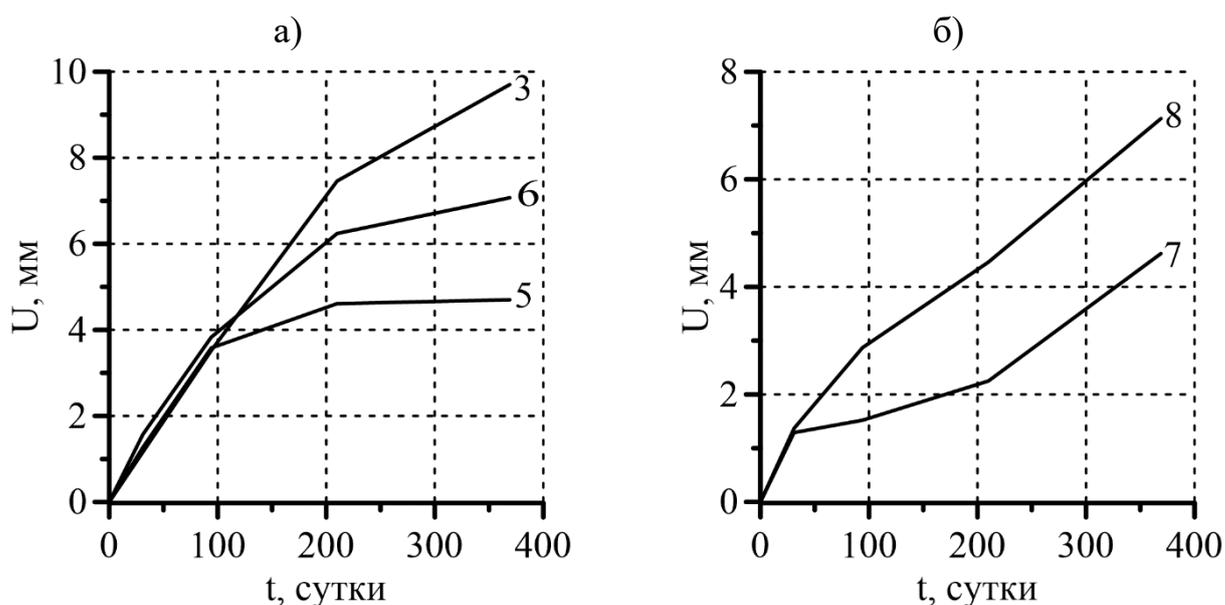


Рисунок 3.9 – Зависимости смещений контура кровли выработок от времени: а – замерные станции 3, 5, 6; б – замерные станции 7, 8

Необходимо учесть, что используемый тип анкеров, по данным работ [51, 52], в условиях больших глубин не может оказывать существенного влияния на напряженно-деформированное состояние вмещающих выработку пород, в связи с чем в качестве основного фактора, определяющего величину смещений кровли, в данном случае следует рассматривать мощность ангидрит-галитовых пород. При этом отсутствие крепления и увеличение мощности соленосных отложений, по данным замерных станций 7, 8, приводит к смещениям кровли с возрастающей с течением времени скоростью (рис. 3.9, б).

На рис. 3.10 представлены графики распределения смещений реперов в кровле относительно глубинных реперов длиной 1,0 м, установленных в почве выработок на экспериментальных участках 1–4.

Сравнительный анализ распределения смещений в кровле выработок на участках 1–3 (рис. 3.10) показывает, что основная часть деформаций в закрепленных выработках локализуется в пределах 1–1,5 м, то есть в пределах соленосных отложений (рис. 3.4). При этом отсутствие крепления и увеличение мощности соленосных отложений в кровле приводит к резкому возрастанию

размеров зоны интенсивных смещений пород до 2,0 м и более за период наблюдений (рис. 3.10, г).

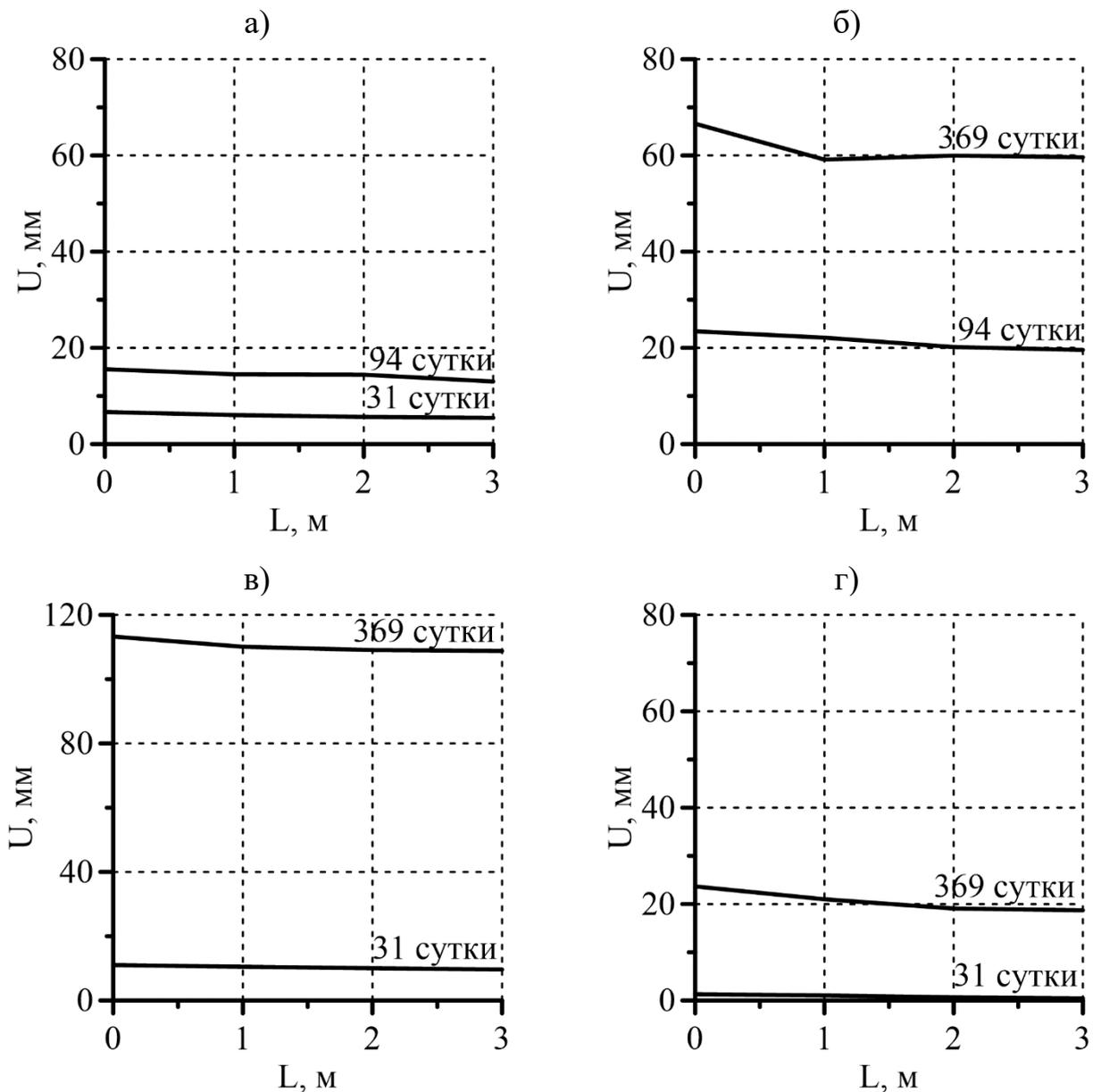


Рисунок 3.10 – Смещения реперов в кровле относительно глубинных реперов 1,0 м в почве выработок: а – станция 2 (участок 1); б – станция 3 (участок 2); в – станция 5 (участок 3); г – станция 7 (участок 4)

Зависимости смещений контура почвы от времени на всех экспериментальных участках имеют близкий к линейному вид (рис. 3.11), что свидетельствует о смещении породного контура с постоянной скоростью практически сразу после проходки выработок.

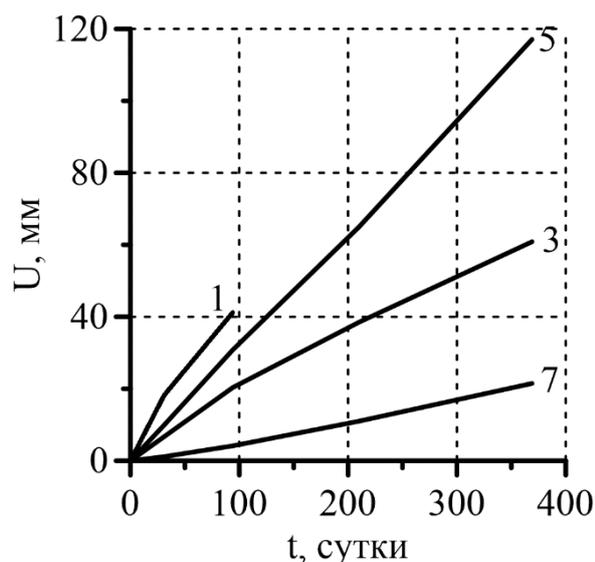


Рисунок 3.11 – Характерные зависимости смещений контура почвы экспериментальных выработок от времени: 1...7 – номер замерной станции

Минимальные величины смещений почвы на протяжении всего периода наблюдений фиксировались на экспериментальном участке 4 (рис. 3.11), что объясняется более поздней закладкой наблюдательных станций по сравнению с другими экспериментальными участками, а также мощностью сильвинитовых отложений в почве выработки равной 1,9 м и более (табл. 3.1).

Смещения почвы выработки на участке 3 (станция 5) по результатам последнего замера составляют около 120 мм, что примерно в 2 раза превышает смещения на участке 2 (станция 3, рис. 3.11).

На участках 2, 3 приконтурный массив почвы экспериментальных выработок сложен сильвинитом и каменной солью, ниже которых располагается карналлитовый слой. Мощность слоя каменной соли на указанных участках изменяется в пределах от 0,5 до 0,8 м (рис. 3.4). В то же время мощность сильвинитовой пачки на участке 3 составляет не более 0,7 м, а на участке 2 – достигает 1,8 м (табл. 3.1). В связи с тем, что сильвинитовые породы и каменная соль обладают близкими значениями прочностных и деформационных характеристик, то основным фактором, определяющим величину смещений почвы в рассматриваемых горно-геологических и

горнотехнических условиях, является мощность ближайшего к контуру выработки породного слоя (в почве). Данное предположение подтверждается, например, результатами инструментальных наблюдений на станции 1 (рис. 3.11, рис. 3.4).

По результатам анализа распределений смещений реперов в почве экспериментальных выработок с учетом геологического строения приконтурного массива можно сделать вывод о том, что уменьшение расстояния от контура выработки до ближайшей границы раздела пластов (слоев) приводит к существенной неоднородности распределения деформаций (рис. 3.12).

На экспериментальном участке 1 деформирование пород почвы в пределах 0–0,5 м от контура выработки носит обособленный характер, что проявляется в резком уменьшении величины смещения глубинного репера длиной 1,0 м по сравнению с репером длиной 0,5 м на станции 1 (рис. 3.12, а). Так, например, смещение репера на глубине 1,0 м на 94 сутки наблюдения составляет около 13 мм, в то время как на глубине 0,5 м смещение достигает 33 мм. Указанный факт может быть связан с расслоением пород в почве выработки на участке 1 в интервале от 0,5 до 1,0 м от контура выработки.

В табл. 3.3 представлены средние величины накопленных смещений элементов горных выработок, соответствующие моменту окончания наблюдений. Смещения боков определялись как половина горизонтальной конвергенции. Данные приведены без учета величин смещений тех элементов горных выработок, где по результатам исследований фиксировались расслоения, появление трещин во вмещающих породах.

Результаты инструментальных наблюдений (табл. 3.3) показывают, что наименьшие смещения характерны для кровли горных выработок – это объясняется залеганием вблизи кровли несклонных к ползучести пород, а также наличием анкерного крепления на экспериментальных участках 1–3 и бóльшим возрастом выработки на участке 4.

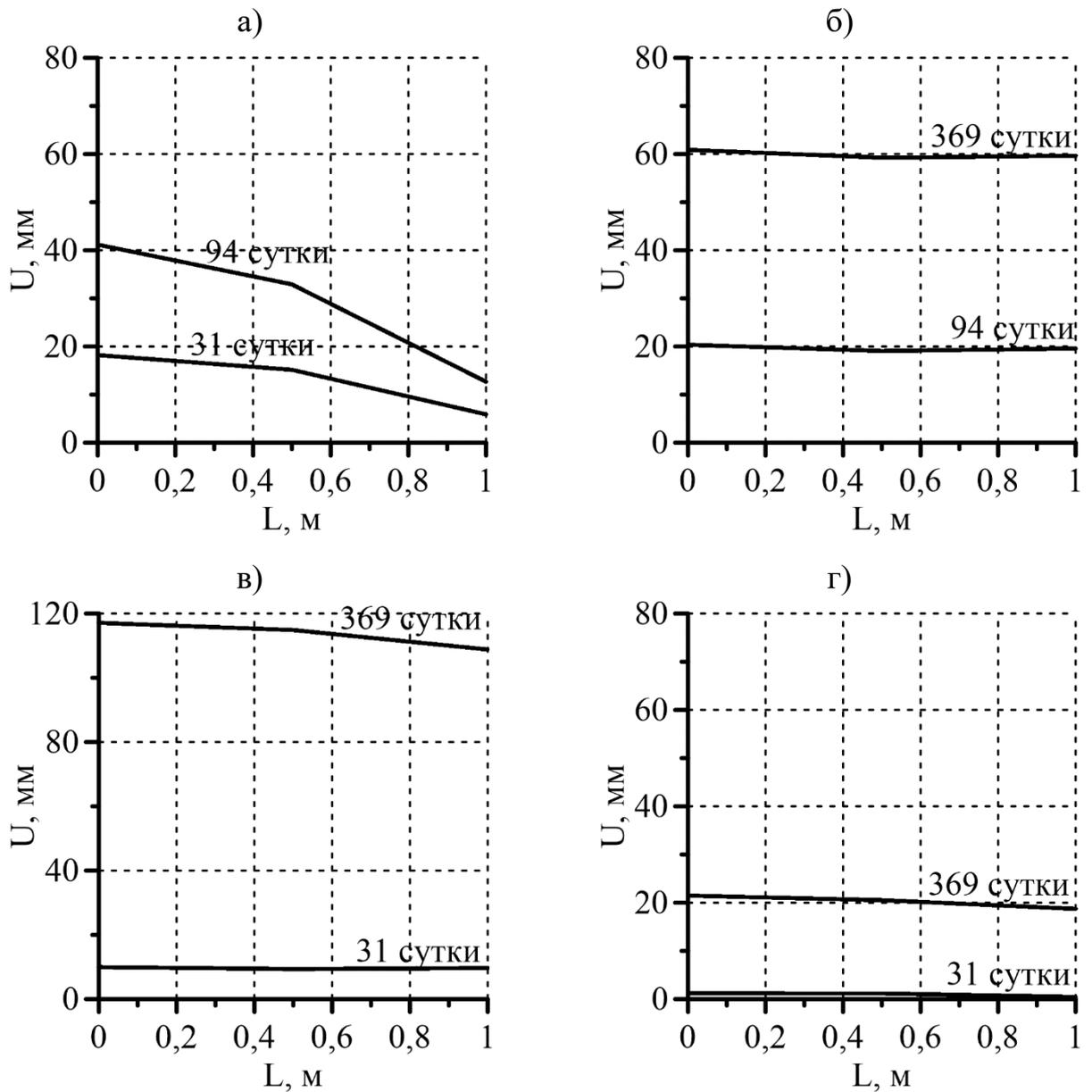


Рисунок 3.12 – Распределение смещений в почве выработок: а – станция 1 (участок 1); б – станция 3 (участок 2); в – станция 5 (участок 3); г – станция 7 (участок 4)

Таблица 3.3 – Величины смещений элементов горных выработок

Участок, №	Кровля, мм	Почва, мм	Бока, мм
1	–	–	27,1
2	10,4	56,6	41,9
3	5,9	138,0	48,4
4	5,9	20,8	21,0

Увеличение расстояния от почвы выработки до ближайшей границы раздела пластов (слоев) до 1,7–2,0 м приводит к тому, что величины смещений

почвы и боков принимают близкие значения. Уменьшение указанного расстояния приводит к резкому возрастанию величин смещений почвы до 2-х и более раз по сравнению с боками, в отдельных случаях приводя к расслоению пород, как, например, на участке 1, о чем было сказано выше.

В табл. 3.4 приведены средние скорости смещения элементов горных выработок. Скорость смещения стенок определялась как половина скорости горизонтальной конвергенции.

Таблица 3.4 – Скорости смещения элементов горных выработок

Участок, №	Кровля, мм/мес.	Почва, мм/мес.	Бока, мм/мес.
1	–	–	1,8
2	0,4	3,1	2,6
3	0,1	12,3	3,3
4	0,5	1,9	1,9

Анализ скоростей смещения элементов горных выработок (табл. 3.4) показал, что наименьшие их значения характерны для кровли экспериментальных участков. Минимальное значение 0,1 мм/мес. зафиксировано на участке 3, что объясняется наименьшей мощностью соленосных отложений в кровле, а также наличием крепления и отсутствием трещин в боках в отличие от участков 2 и 4.

Наибольшая скорость смещения кровли 0,5 мм/мес. отмечается на участке 4, что, скорее всего, связано с большой мощностью сильвинитовых отложений в кровле и деформированием их с возрастающей скоростью, о чем было сказано выше.

Сравнивая скорости смещения почвы (табл. 3.4) и геологическое строение вмещающих выработки пород (рис. 3.4; табл. 3.1), можно заметить: уменьшение мощности пачки сильвинита в почве выработок с 1,7–1,8 м (участок 2) до 0,6–0,7 м (участок 3) приводит к возрастанию скорости смещения почвы по сравнению с боками более чем в 3 раза (с 3,1 до 12,3 мм/мес.), что в последующем вызывает ее пучение и интенсивное расслоение (рис. 3.13).



Рисунок 3.13 – Состояние почвы проходческого транспортного штрека в районе экспериментальных участков

Увеличение мощности сильвинитовой пачки в почве до 1,7 м и более приводит к тому, что скорости смещения почвы и боков принимают близкие значения (табл. 3.4, участок 2, 4), что подтверждает близость исходного поля напряжений в соляных породах Гремячинского месторождения к гидростатическому.

Сравнительный анализ скоростей смещения стенок выработок (табл. 3.4), горно-геологических и горнотехнических условий экспериментальных участков (рис. 3.4; табл. 3.2) показал, что минимальная скорость смещения стенок характерна для выработок с более ранним временем проходки (участок 4). При этом четкой взаимосвязи между геологическим строением вмещающих пород и скоростью смещения стенок выработок не обнаружено, что объясняется, по-видимому, близкими значениями прочностных и деформационных характеристик пород сильвинита и каменной соли.

Необходимо отметить, что скорости смещения пород боков выработок на экспериментальных участках изменяются не более чем в 2 раза, почвы – не более чем в 4 раза, кровли – в 5 раз (табл. 3.4). При этом скорости смещений пород боков и почвы в отдельных случаях могут превышать соответствующие скорости смещений кровли на порядок и более.

## Выводы по главе

1. Проведены длительные инструментальные наблюдения за процессом деформирования горных выработок в условиях больших глубин Гремячинского месторождения калийных солей. По результатам наблюдений, выполненных на 8-ми замерных станциях, установлены характерные особенности деформирования элементов горных выработок, пройденных в неоднородном слоистом массиве, представленном чередованием склонных к ползучести соленосных отложений и несклонных к ползучести ангидритовых, ангидрит-доломитовых пород.

2. Наименьшие скорости смещений в рассмотренных горно-геологических, горнотехнических условиях характерны для кровли горных выработок и составляют 0,1–0,5 мм/мес., что связано с залеганием вблизи контура выработок ангидритовых и ангидрит-доломитовых пород. При этом скорости смещений почвы, боков в 3 раза и более превосходят соответствующие скорости смещений кровли.

3. Уменьшение мощности соленосных отложений в кровле, наличие крепления приводят к уменьшению скоростей смещений кровли выработок. При этом основная часть деформаций в кровле одиночных горных выработок, закрепленных анкерной крепью, локализуется в пределах 1–1,5 м соленосных отложений. Отсутствие крепления и увеличение мощности соленосных отложений в кровле приводит не только к возрастанию скорости смещения кровли, но и распространению зоны интенсивных смещений приконтурных пород в кровле выработок до 2,0 м и более за период наблюдения.

4. Основным фактором, определяющим величину смещений почвы в горно-геологических, горнотехнических 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 в отдельных случаях может приводить к пучению почвы, расслоению приконтурных пород.

5. Установлено, что в случае оставления в почве одиночной выработки сильвинитовой пачки мощностью более 1,7–2,0 м, скорости смещения почвы и боков принимают близкие значения, что подтверждает близость исходного поля напряжений в соляных породах Гремячинского месторождения к гидростатическому.

6. По результатам исследования характера деформирования незакрепленной горной выработки, пройденной в пласте сильвинита, установлено, что стадия неустановившейся ползучести приконтурных пород боков и почвы на Гремячинском месторождении составляет около 8 месяцев.

#### **4. ОЦЕНКА И ПРОГНОЗ УСТОЙЧИВОСТИ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК В СОЛЯНЫХ ПОРОДАХ ГРЕМЯЧИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ**

В главе приведено обоснование принятой математической модели деформирования слоистого неоднородного массива пород Гремячинского месторождения, вмещающего одиночные горные выработки в соляных породах. Численная реализация модели выполнена методом конечных элементов в программном комплексе «ANSYS» с применением макрокоманд, специально разработанных на встроенном языке программирования. На основе данных инструментальных наблюдений проведена верификация результатов моделирования.

Представлены результаты численного исследования влияния положения выработки в промышленном пласте относительно карналлитовых пород в почве, ангидритовых и ангидрит-доломитовых пород в кровле на состояние вмещающих выработки пород. Также приведена оценка влияния анкерного крепления на напряженно-деформированное состояние вмещающих выработки пород.

Выполнено обоснование оптимального расположения поперечного сечения капитальной горной выработки в соляных породах вблизи пород с резко отличающимися прочностными и деформационными характеристиками для условий Гремячинского рудника.

##### **4.1. Выбор и обоснование математической модели деформирования неоднородного слоистого массива пород Гремячинского месторождения**

Характерный геологический разрез, вмещающий экспериментальные горные выработки, представлен породами с резко отличающимися прочностными и деформационными характеристиками: ангидритовыми, ангидрит-доломитовыми, а также соляными (рис. 3.4), особенность которых

заключается в способности интенсивно деформироваться под действием постоянной нагрузки (явление ползучести). Поэтому для решения задачи о напряженно-деформированном состоянии вмещающих выработки пород использовалась упруго-вязко-пластическая модель среды [67].

Численная реализация модели включала 2 основных этапа и была выполнена методом конечных элементов, теоретические основы которого, в том числе применительно к вопросам геомеханики, изложены в работах [41, 100].

*Этап 1.* По результатам решения упругопластической задачи определялись размеры нарушенных зон во вмещающих горные выработки породах. Необходимость выделения этапа 1 обуславливается высоким уровнем исходного поля напряжений, компоненты которого достигают 24 МПа, что сопоставимо с пределом прочности соляных пород при одноосном сжатии. Поэтому в момент проходки выработки в соляных породах следует ожидать перехода части приконтурного массива в запредельное (нарушенное) состояние.

Связь между напряжениями и деформациями на допредельной стадии деформирования в рамках принятой упругопластической модели описывается законом Гука. Переход в предельное состояние для области сжимающих напряжений определяется в соответствии с критерием прочности Кулона-Мора [25]:

$$\tau_{\text{пр}} = C + \sigma_n \operatorname{tg} \varphi, \quad (4.1)$$

где  $C$  – коэффициент сцепления, МПа;  $\sigma_n$  – напряжения нормальные к площадке действия  $\tau_{\text{пр}} = \tau_{\text{max}}$ , МПа;  $\varphi$  – угол внутреннего трения.

Напряжения  $\tau_{\text{max}}$  и  $\sigma_n$  вычисляются через главные напряжения:

$$\tau_{\text{max}} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}, \quad (4.2)$$

$$\sigma_n = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \quad (4.3)$$

Выражение (4.1), используя (4.2), (4.3), можно представить в главных напряжениях:

$$\sigma_3 = -(S + \sigma_1 \operatorname{ctg}\psi), \quad (4.4)$$

где  $S = 2C \operatorname{ctg}\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}\right)$ ,  $\operatorname{ctg}\psi = \frac{1 + \sin\varphi}{1 - \sin\varphi}$ .

Предельное состояние в области растягивающих напряжений определяется пределом прочности на растяжение:

$$\sigma_1 = \sigma_p \quad (4.5)$$

Если значения главных напряжений в произвольном конечном элементе, вычисленные по закону Гука, превышали предельные, то в дальнейших расчетах считалось, что элемент перешел в запредельное состояние, а для описания его поведения также использовалась упругая модель среды, но с пониженными значениями упругих характеристик. Вычислительный процесс продолжался до тех пор, пока размеры нарушенных зон не достигали окончательных (постоянных) значений.

**Этап 2.** Моделирование изменения напряженно-деформированного состояния вмещающих выработки пород во времени.

Деформациями ползучести ангидритовых, ангидрит-доломитовых пород по сравнению с соляными можно пренебречь, поэтому связь между напряжениями и деформациями на втором этапе численного моделирования для ангидритовых, ангидрит-доломитовых пород описывалась законом Гука. В то время как для соляных пород использовалась упруго-вязкая модель среды.

По результатам лабораторных исследований деформирования образцов соляных пород Гремячинского месторождения в условиях длительного нагружения были получены кривые ползучести, пример которых представлен на рис. 4.1 [68]. Эксперименты выполнялись в режиме одноосной ползучести по методике, подробно изложенной в [72], при уровнях осевой нагрузки  $(0,4 \div 0,8)\sigma_{\text{пр}}$ , где  $\sigma_{\text{пр}}$  – прочность породы при одноосном сжатии.

Продолжительность экспериментов при нагрузках  $(0,4 \div 0,5)\sigma_{\text{пр}}$  достигала 25 суток и более.

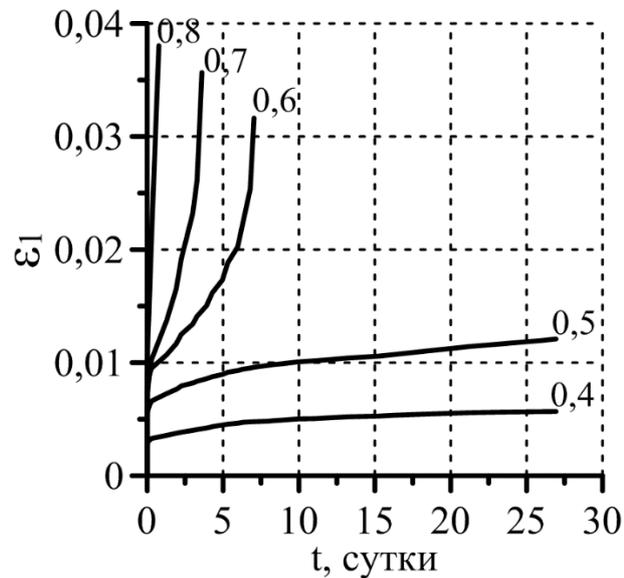


Рисунок 4.1 – Характерные кривые ползучести образцов сильвинита Гремячинского месторождения: 0,4...0,8 – осевая нагрузка в долях от  $\sigma_{\text{пр}}$

По результатам лабораторных исследований (рис. 4.1) установлено, что с увеличением степени нагружения образцы соляных пород проходят все три стадии ползучести: неустановившуюся, установившуюся и прогрессирующую. Увеличение степени нагружения приводит к уменьшению времени нахождения образца на этапах неустановившейся и установившейся ползучести, а переход на стадию прогрессирующей ползучести становится менее выраженным.

В настоящее время разработаны математические модели, позволяющие описать все три стадии ползучести соляных пород, более подробно с некоторыми из них можно ознакомиться в работах Константиновой С.А. [52, 53], Deng J. [114], Wittke W. [145], Kiehl J.R., Doering T., Erichsen C. [115, 122] и др. Необходимо отметить, что основным недостатком указанных моделей является сложность их параметрического обеспечения. Так, например, структурную модель Wittke W., Kiehl J.R., Doering T., Erichsen C. можно представить в виде соединения пяти реологических тел, для описания

поведения которых, в общем случае, необходимо 19 констант. На примере Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей Ермашов А.О. [38] показал, что модель, предложенная авторами [115, 122, 145], может давать удовлетворительные результаты. Но в то же время Ермашов А.О. указывает на нехватку экспериментального материала для определения параметров ползучести соляных пород на прогрессирующей стадии, что связано с необходимостью проведения длительных лабораторных исследований, продолжительность которых может составлять несколько месяцев и даже лет [1, 94, 96]. При этом в процессе длительного нагружения образцов соляных пород периоды с возрастающей скоростью деформирования могут сменяться периодами с уменьшающейся, что также затрудняет интерпретацию экспериментальных данных [18, 94].

В связи с вышеизложенным, полную деформацию  $\varepsilon$  соляных пород можно представить в виде:

$$\varepsilon = \varepsilon^{el} + \varepsilon^{cr}, \quad (4.6)$$

где  $\varepsilon^{el}$  – упругая часть деформации, которая определяется по закону Гука;  $\varepsilon^{cr}$  – деформация ползучести.

С учетом (4.6), скорость полной деформации  $\dot{\varepsilon}$  соляных пород определяется по формуле:

$$\dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}^{el} + \dot{\varepsilon}^{cr}, \quad (4.7)$$

где  $\dot{\varepsilon}^{el}$  – скорость упругой деформации;  $\dot{\varepsilon}^{cr}$  – скорость деформации ползучести.

Учитывая данные о конвергенции экспериментальных выработок, а также работы [49, 119, 125, 135], связь скорости деформации ползучести  $\dot{\varepsilon}^{cr}$  с соответствующей величиной напряжения  $\sigma$  можно представить в виде:

$$\dot{\varepsilon}^{cr} = k(\sigma)^n, \quad (4.8)$$

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

Степенную зависимость 4.8 в литературе также называют законом Нортона [130, 148], в соответствии с которым для писания ползучести соляных пород необходимо всего два параметра, что особенно важно ввиду

ограниченного объема экспериментальных данных и малой изученности пород Гремячинского месторождения.

Прологарифмировав 4.8, получим следующее выражение:

$$\ln(\dot{\varepsilon}^{cr}) = \ln(k \cdot (\sigma)^n),$$

которое после преобразования можно представить в виде:

$$\ln(\dot{\varepsilon}^{cr}) = \ln(k) + n \cdot \ln(\sigma), \quad (4.9)$$

Зависимость  $\ln(\dot{\varepsilon}^{cr})$  от  $\ln(\sigma)$  является линейной, поэтому для определения параметров ползучести необходимо в логарифмической шкале построить зависимость скорости деформации ползучести от уровня нагружения образцов соляных пород и аппроксимировать ее функцией вида [61]:

$$y = a + b \cdot x, \quad (4.10)$$

где  $y = \ln(\dot{\varepsilon}^{cr})$ ;  $a = \ln(k)$ ;  $b = n$ ;  $x = \ln(\sigma)$ .

Таким образом, параметры модели ползучести определяются через эмпирические коэффициенты функции (4.10):

$$k = e^a, \quad n = b \quad (4.11)$$

Для примера на рис. 4.2 в логарифмической шкале представлены зависимости скорости деформации установившейся ползучести  $\dot{\varepsilon}_1^{cr}$  (сутки<sup>-1</sup>) образцов соляных пород Гремячинского месторождения от величины действующего относительного напряжения  $\sigma_1/\sigma_{пр}$ , полученные по результатам испытания 30 образцов карналлитовой и сильвинитовой породы в условиях длительного одноосного нагружения.

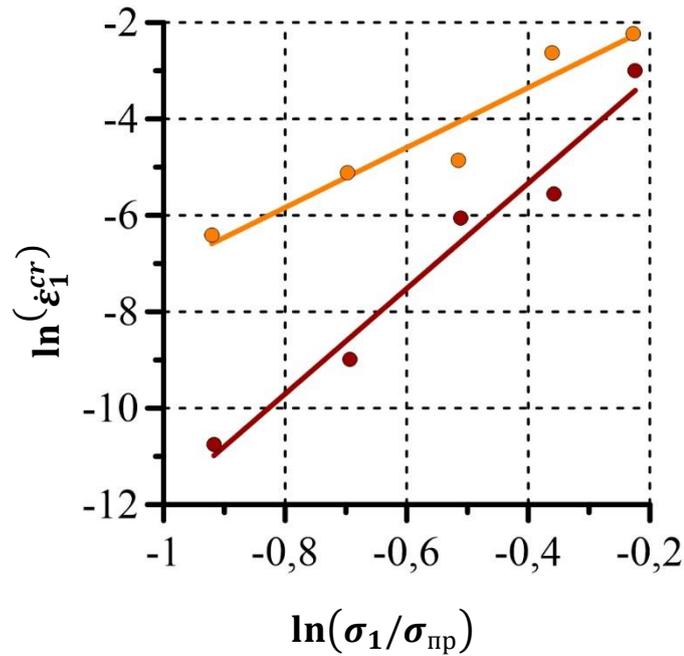


Рисунок 4.2 – Зависимости скорости установившейся ползучести  $\dot{\epsilon}_1^{cr}$  (сутки<sup>-1</sup>) образцов соляных пород Гремячинского месторождения от величины действующего относительного напряжения  $\sigma_1/\sigma_{пр}$ :  
 — — сильвинитовая порода,  $R^2 = 0,97$ ; — — карналлитовая порода,  $R^2 = 0,93$

В табл. 4.1 представлены результаты определения параметров ползучести соляных пород Гремячинского месторождения.

Таблица 4.1 – Параметры ползучести соляных пород Гремячинского месторождения по результатам лабораторных исследований

Порода	Параметры ползучести	
	$k, \text{МПа}^{-n} \text{сутки}^{-1}$	$n$
Сильвинит	$3,18 \cdot 10^{-17}$	10,93
Карналлитовая порода	$9,35 \cdot 10^{-8}$	6,22

Задача о напряженно-деформированном состоянии массива горных пород, вмещающего выработку, решалась в постановке плоского деформированного состояния (ПДС). Дискретизация расчетной области выполнялась треугольными конечными элементами 1-го порядка. Принципиальная расчетная схема на примере 2-го экспериментального участка представлена на рис. 4.3. Геологическая характеристика указанного участка приведена на рис. 3.4, а также в приложении.

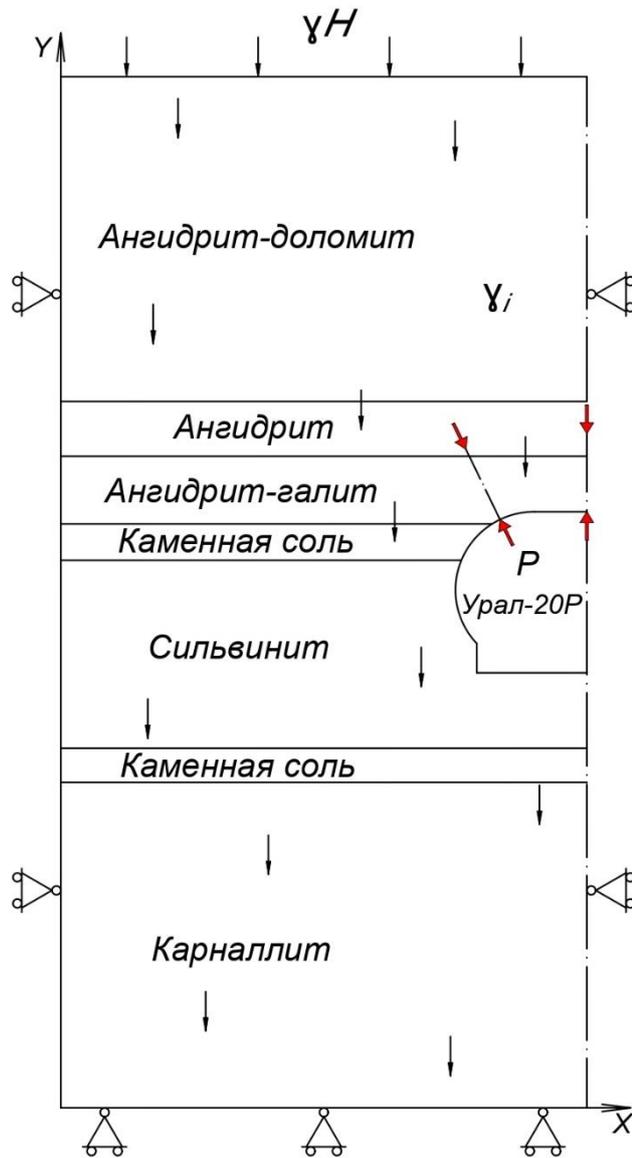


Рисунок 4.3 – Принципиальная расчетная схема на примере 2-го экспериментального участка:  $P$  – усилие, возникающее вследствие натяжения клинового анкера

Как известно, одиночная выработка оказывает влияние на напряженное состояние окружающего массива на расстоянии  $(3\div 5)R$  от контура, где  $R$  – характерный размер выработки (радиус для выработки круглой формы) [51]. Поэтому, с учетом параметров поперечного сечения экспериментальных выработок в проходке (ширина – 6,0 м, высота – 3,7 м), размер расчетной области в симметричной постановке составлял 18x30 м.

Исходное поле напряжений в ненарушенном массиве с учетом результатов исследований, представленных в главе 1, считалось

гидростатическим:  $\sigma_x = \sigma_y = \gamma H = 24 \text{ МПа}$ ,  $\tau_{xy} = 0$ . Указанная величина напряжений соответствует глубине заложения экспериментальных выработок, которая составляет около 1100 м.

Горные выработки на экспериментальных участках 1–3 были закреплены клиновыми анкерами КРА-16 (см. приложение), моделирование воздействия которых на приконтурные породы выполнялось с помощью сосредоточенных, равных по величине и противоположных по направлению усилий  $P$  (рис. 4.3). Аналогичный подход был использован Константиновой С.А. в работе [52].

Считалось, что кровля выработки крепится сразу вслед за проходкой. В этот момент в соответствующих точках расчетной области прикладывались сосредоточенные усилия равные по величине предварительному натяжению анкера – 25 кН. По мере деформирования породного контура натяжение анкера растет, что определяется его силовой характеристикой. При этом необходимо учитывать, что несущая способность анкера КРА-16, в соответствии с опытом крепления выработок, пройденных в соляных порода, составляет 50–65 кН [51, 52, 63].

С учетом вышеизложенного, особенностей работы анкеров замкового типа [105], силовую характеристику  $P$  (кН) анкера КРА-16 можно представить в виде:

$$P = P_0 + D_a \Delta U, \quad (4.12)$$

где  $P_0 = 25 \text{ кН}$  – предварительное натяжение анкера;  $D_a = 0,42 \text{ кН/мм}$  – жесткость анкера;  $\Delta U$  – удлинение анкера, мм.

В связи с тем, что задача решалась в ПДС, результаты численного моделирования дают верхнюю оценку воздействия анкерной крепи на напряженно-деформированное состояние приконтурных пород.

Значения показателей физико-механических свойств пород, параметров ползучести, необходимых для реализации принятой модели среды, определялись на основе лабораторных исследований, а также данных, приведенных в работах [15, 51, 83, 92]. По данным сравнительного анализа

результатов моделирования и результатов натурных исследований выполнялась корректировка параметров модели.

Значения принятых деформационных характеристик пород, а также параметров ползучести представлены в табл. 4.2.

Таблица 4.2 – Деформационные характеристики и параметры ползучести пород Гремячинского месторождения

Порода	$D$ , ГПа	$\mu$	$\gamma$ , $10^4$ Н/м <sup>3</sup>	$k$ , МПа <sup>-<math>n</math></sup> сутки <sup>-1</sup>	$n$
Ангидрит-доломитовая	6,8	0,24	2,8	-	-
Ангидрит	5,3	0,24	2,8	-	-
Ангидрит-галитовая	1,2	0,30	2,4	$1,32 \cdot 10^{-13}$	6,5
Каменная соль	1,2	0,30	2,2	$1,32 \cdot 10^{-13}$	6,5
Сильвинит	1,0	0,30	2,2	$2,12 \cdot 10^{-13}$	6,5
Карналлитовая	1,1	0,38	2,2	$1,82 \cdot 10^{-12}$	5,9
$D$ – модуль деформации; $\mu$ – коэффициент Пуассона; $\gamma$ – удельный вес; $k$ – коэффициент ползучести; $n$ – показатель ползучести					

Для областей массива, перешедших в нарушенное (запредельное) состояние по результатам 1-го этапа моделирования, на 2-ом этапе принимались значения модуля деформации соответствующие 0,5 от исходного; коэффициент Пуассона нарушенных пород принимался 0,48.

Величины прочности на сжатие и растяжение принимались как 0,8 от значений, полученных в лабораторных условиях, что обуславливается неоднородностью строения вмещающих выработки пород, а также разбросом экспериментальных данных и идет в запас устойчивости вмещающих выработки пород. По указанным характеристикам, в соответствии с методикой, изложенной в [86], определялись параметры критерия прочности Кулона-Мора: коэффициент сцепления, угол внутреннего трения.

Значения принятых прочностных характеристик пород представлены в табл. 4.3.

Таблица 4.3 – Прочностные характеристики пород Гремячинского месторождения

Порода	$\sigma_p$ , МПа	C, МПа	$\varphi$ , °
Ангидрит-доломитовая	4,3	11,6	39
Ангидрит	2,8	8,1	37
Ангидрит-галитовая	1,7	9,4	29
Каменная соль	1,7	9,4	29
Сильвинит	1,4	7,5	29
Карналлитовая	0,6	3,6	18
$\sigma_p$ – предел прочности на растяжение; C – коэффициент сцепления; $\varphi$ – угол внутреннего трения			

#### 4.2. Сопоставление результатов моделирования с данными природных наблюдений

На рис. 4.4 представлены результаты расчета горизонтальной  $U_{6-6}$  и вертикальной  $U_{к-п}$  конвергенции, а также данные инструментальных наблюдений, полученные на 2-ом экспериментальном участке (станция 4). Горизонтальная конвергенция определялась на базе «бок-бок», вертикальная – на базе «кровля-почва на глубине 1,0 м».

Анализ рис. 4.4 свидетельствует о том, что принятая модель адекватно отражает характер деформирования породного контура с течением времени.

На рис. 4.5 приведены зависимости горизонтальных  $\sigma_x$  и вертикальных  $\sigma_y$  напряжений в боку выработки в зависимости от расстояния L до её контура по истечении 365 суток с момента проходки, полученные по результатам численного моделирования. Сравнивая расчетные значения напряжений в боку выработки с результатами инструментальных наблюдений, представленных на рис. 1.4, можно сделать вывод о том, что предложенная модель удовлетворительно отражает напряженное состояние вмещающих выработки пород.

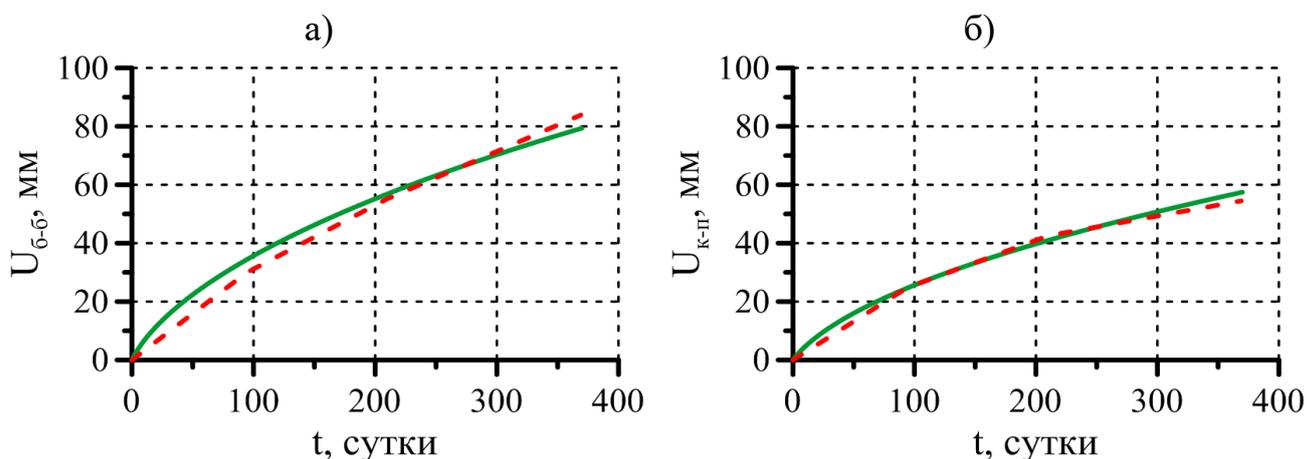


Рисунок 4.4 – Зависимости горизонтальной (а) и вертикальной (б) конвергенции от времени: --- – данные инструментальных наблюдений; — – результаты численного моделирования

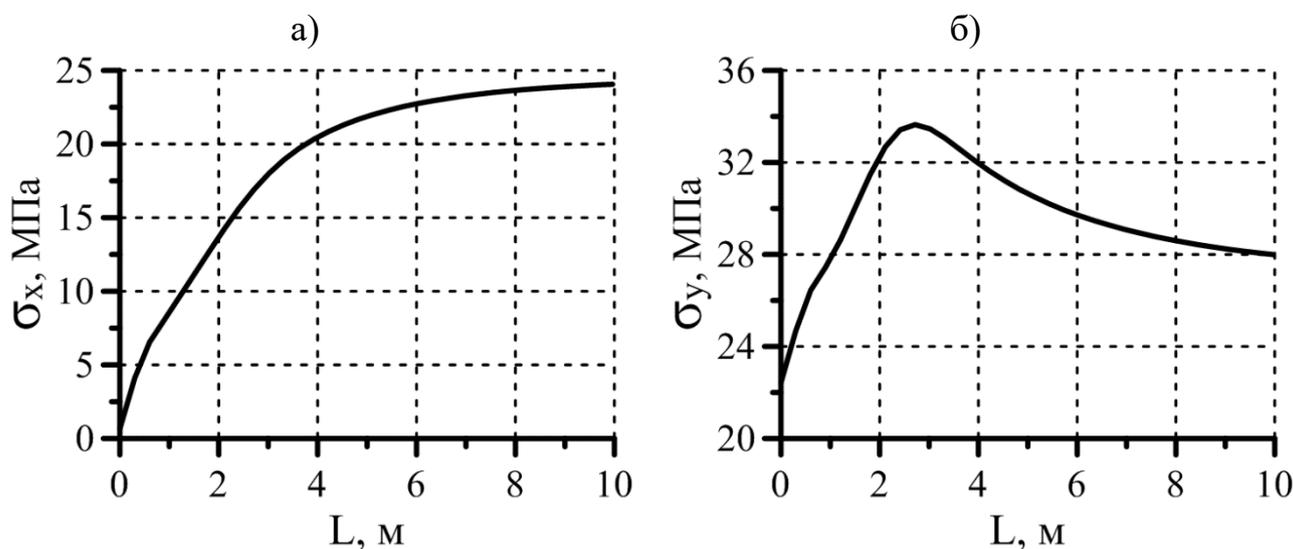


Рисунок 4.5 – Зависимости горизонтальных  $\sigma_x$  (а) и вертикальных  $\sigma_y$  (б) напряжений в боку выработки от расстояния до её контура по истечении 365 суток с момента проходки по данным численного моделирования

Из вышеизложенного следует, что принятая математическая модель с параметрами, представленными в табл. 4.2, табл. 4.3, удовлетворительно описывает напряженно-деформированное состояние пород Гремячинского месторождения, вмещающих капитальные горные выработки, в течение рассматриваемого периода времени.

### 4.3. Анализ влияния карналлитовых отложений в почве на состояние вмещающих выработки пород

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

Влияние анкерной крепи на напряженно-деформированное состояние породного массива, вмещающего выработки, в данной части исследования не учитывалось.

На рис. 4.6 представлены результаты расчета размеров нарушенной зоны вокруг контура выработки, возникающей в момент проходки, в зависимости от расстояния от почвы выработки до карналлитовых отложений – мощности сильвинитовых пород ( $h_{н.с.}$ ), оставляемых в почве выработки. Мощность сильвинитовых пород в кровле –  $h_{к.с.} = 3,5$  м. Принято, что выработка пройдена комбайном Урал-20Р и имеет овально-арочную форму поперечного сечения (ширина – 6,0 м, высота – 3,7 м).

Необходимо отметить, что размеры нарушенных зон определялись по нормали, восстановленной к соответствующему элементу горной выработки, отдельно для сильвинитовых и карналлитовых пород почвы, сильвинитовых пород кровли и боков.

По результатам численного моделирования установлено, что предельный размер нарушенной зоны в почве выработки, сложенной сильвинитовыми породами, в рассматриваемых условиях в момент проходки составляет 2,3 м. При этом с уменьшением мощности сильвинита в почве выработки ( $h_{н.с.}$ ) также формируется область запредельного деформирования в карналлитовых породах. На рис. 4.6 видно, что уменьшение расстояния от контура выработки

до карналлитовых отложений  $h_{н.с.}$  оказывает незначительное влияние на формирование нарушенных зон в боках и кровле выработок, размеры которых составляют около 1,4 и 1,5 м, соответственно.

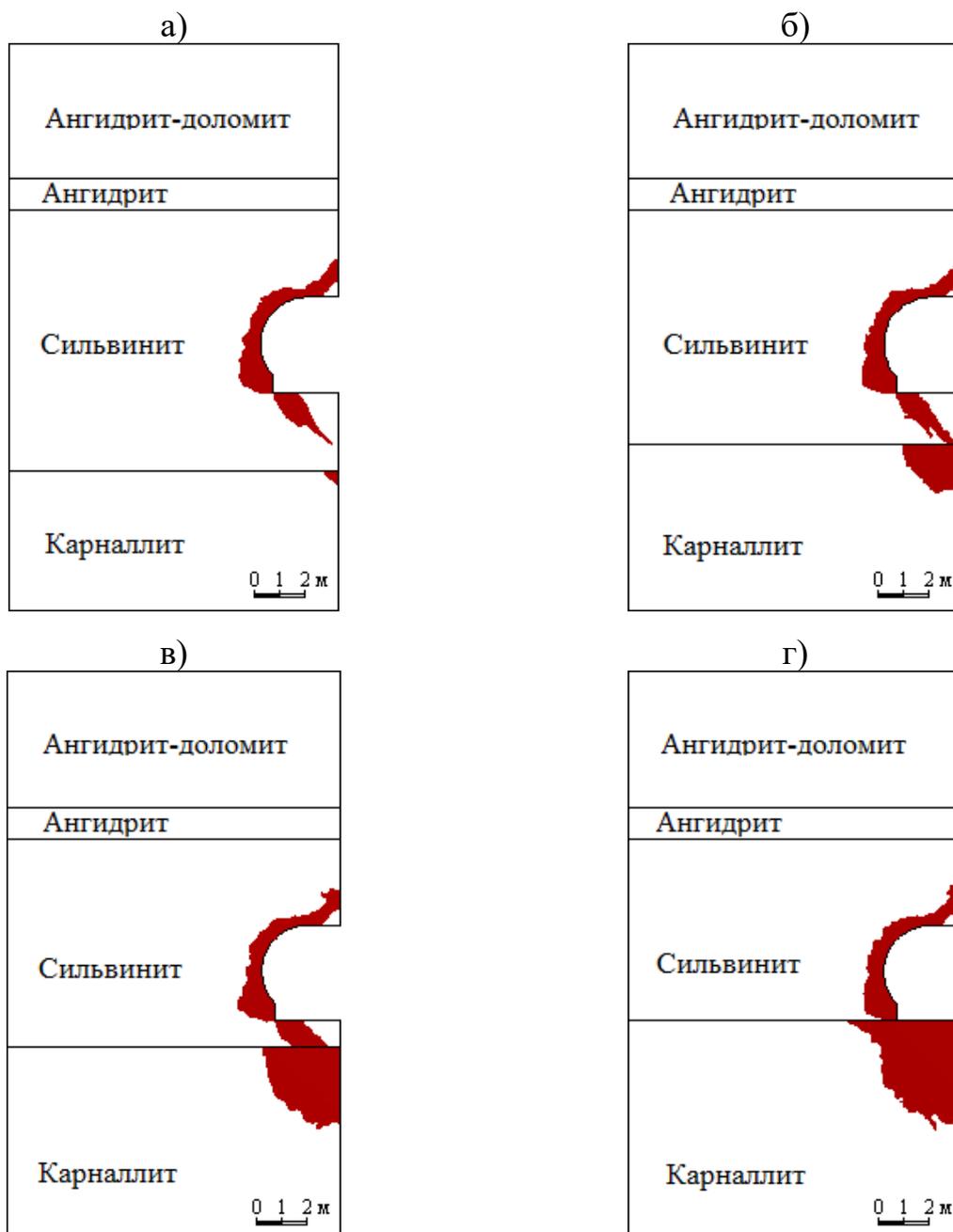


Рисунок 4.6 – Размеры нарушенных зон (показаны красным) в зависимости от мощности сильвинитовых пород  $h_{н.с.}$  в почве выработки:  
а) 3,0 м; б) 2,0 м; в) 1,0 м; г) 0 м

На рис. 4.7 приведена зависимость размеров нарушенной зоны в залегающих ниже почвы карналлитовых породах ( $h_{н.к.н.}$ ), возникающей в

момент проходки, от мощности, оставляемого в почве слоя сильвинитовых пород ( $h_{n.c.}$ ).

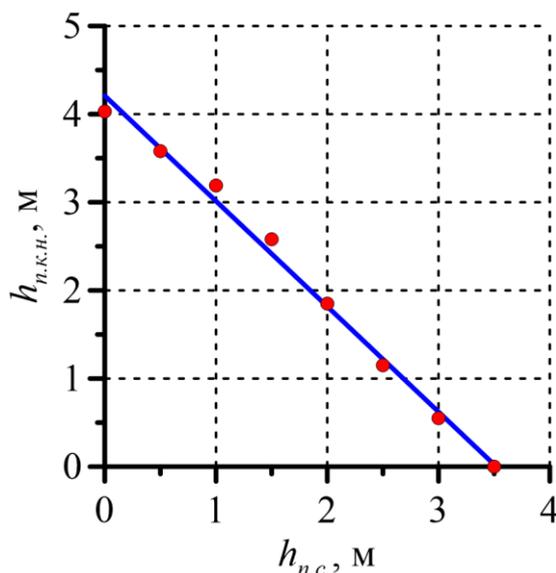


Рисунок 4.7 – Зависимость размеров нарушенной зоны  $h_{n.к.н.}$  в залегающих ниже почвы карналлитовых породах от мощности слоя сильвинита  $h_{n.c.}$ , оставляемого в почве выработки

По рис. 4.7 видно, что при расстоянии от контура выработки до карналлитовых пород в почве  $h_{n.c.} = 3,5$  м и более, нарушенная зона в карналлитовых отложениях, в момент проходки выработки в рассматриваемых условиях, не возникает. В то же время уменьшение  $h_{n.c.}$  до 2,0 м приводит к возникновению области разрушения в карналлитовых породах размером около 1,9 м, а в случае привязки почвы выработки по кровле карналлитового слоя ( $h_{n.c.} = 0$  м) размер нарушенной зоны может достигать 4 м и более.

Из вышеизложенного следует, что для оценки размеров нарушенных зон в сильвинитовых ( $h_{n.c.н.}$ , м) и карналлитовых ( $h_{n.к.н.}$ , м) породах почвы выработок в рассматриваемых условиях могут быть использованы следующие зависимости:

$$h_{n.c.н.} = \begin{cases} h_{n.c.}, & \text{при } 0 \leq h_{n.c.} < 2,3 \text{ м} \\ 2,3, & \text{при } h_{n.c.} \geq 2,3 \text{ м} \end{cases}, \quad (4.13)$$

$$h_{n.к.н.} = a \cdot h_{n.c.} + b, \text{ при } 0 \leq h_{n.c.} \leq 3,5 \text{ м}, \quad (4.14)$$

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.

На рис. 4.8 представлены зависимости смещений  $U$ , возникающих на контуре горной выработки вследствие образования нарушенных зон, от мощности слоя сильвинита в почве  $h_{п.с.}$ .

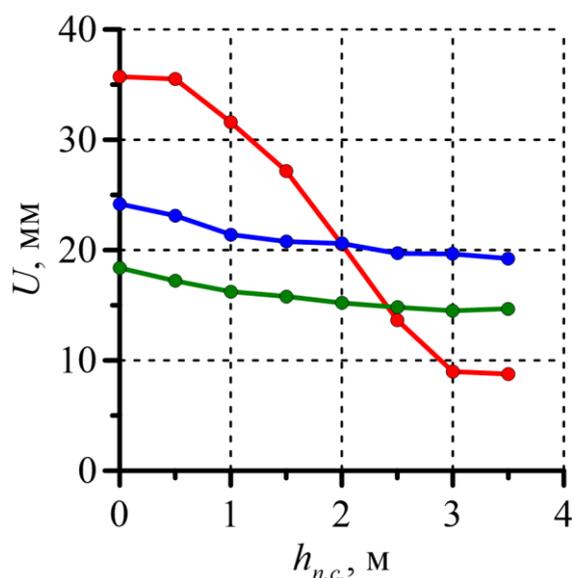


Рисунок 4.8 – Зависимости смещений  $U$ , возникающих на контуре горной выработки вследствие образования нарушенных зон, от мощности слоя сильвинита в почве  $h_{п.с.}$ : — — кровля; — — почва; — — бок

Установлено, что с возрастанием мощности оставляемого в почве выработки сильвинитового слоя  $h_{п.с.}$  до 3,0–3,5 м, величины указанных смещений как в почве, так в кровле и боках меняются незначительно. При этом уменьшение  $h_{п.с.}$  с 3,5 до 0 м приводит к возрастанию смещений, вызванных образованием нарушенных зон, в почве, кровле и боках, соответственно: с 9 до 36 мм, с 15 до 18 мм, с 19 до 24 мм.

Необходимо отметить: увеличение мощности сильвинитовых отложений в почве выработки  $h_{п.с.}$  до 2,0–2,5 м и более приводит к тому, что наименьшие смещения, вызванные образованием нарушенных зон, наблюдаются в почве,

наибольшие в боках, а промежуточные значения указанных величин формируются в кровле выработки (рис. 4.8). Это, по-видимому, объясняется особенностями напряженного состояния вмещающих выработки пород в рассматриваемых условиях. Так по результатам моделирования установлено наличие области повышенных вертикальных напряжений в боках выработок (рис. 4.5), что, судя по всему, приводит к «выдавливанию» пород боков внутрь выработки. В то же время в кровле образуется зона растягивающих напряжений (рис. 4.9), а нарушенные породы перемещаются в сторону открытого пространства под действием собственного веса.

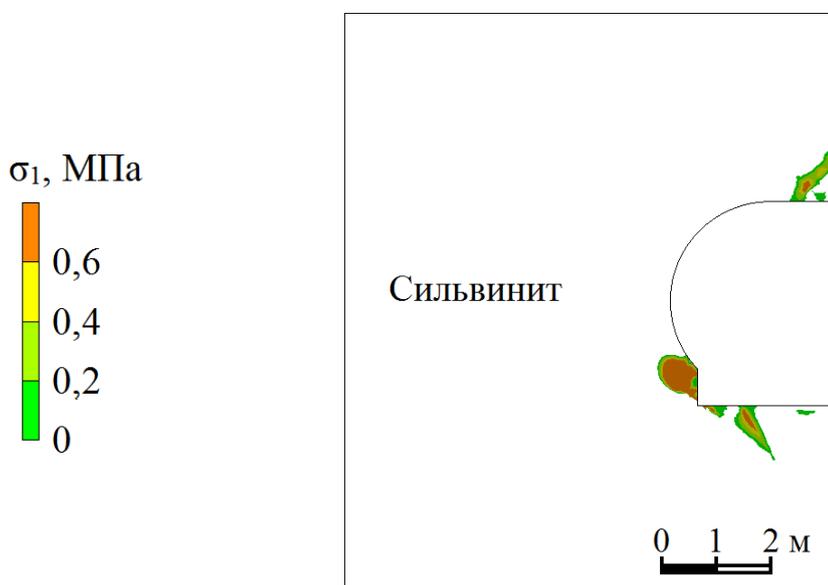


Рисунок 4.9 – Распределение растягивающих напряжений во вмещающих породах,  $h_{п.с.} = h_{к.с.} = 3,5$  м

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

- предельный размер нарушенной зоны в почве выработки с овально-арочной формой поперечного сечения (ширина – 6,0 м, высота – 3,7 м), сложенной однородными соляными породами, в момент проходки может достигать 2,3 м и более;

- при мощности оставляемого в почве выработки слоя сильвинита более 3,5 м нарушенная зона в нижележащих карналлитовых породах, в момент проходки выработки в рассматриваемых условиях, не возникает;

- уменьшение мощности сильвинитового слоя в почве выработки овально-арочной формы, пройденной комбайном Урал-20Р, с 3,5 до 2,0 м приводит к формированию зоны разрушения в карналлитовых породах размером около 1,9 м;

- в случае привязки почвы выработки к кровле карналлитового слоя размер нарушенной зоны в почве в момент проходки может достигать 4 м и более;

- уменьшение мощности слоя сильвинита в почве выработки, пройденной комбайном Урал-20Р, с 3,5 до 0 м вызывает увеличение смещений, вызванных формированием областей запредельного деформирования пород, в почве до 3 раз и более, в кровле и боках, соответственно, на 20 и 25 %;

- в породах кровли, почвы и боков выработки в момент проходки в рассматриваемых условиях формируются зоны растягивающих напряжений, локализация которых совпадает с расположением зон нарушенных пород.

#### **4.4. Анализ влияния мощности соляных отложений в кровле на состояние вмещающих выработки пород**

Влияние анкерной крепи на напряженно-деформированное состояние вмещающих выработки пород в данной части исследования не учитывалось.

На рис. 4.10 приведены результаты моделирования, иллюстрирующие изменение размеров нарушенных зон вокруг контура выработки с овально-арочной формой поперечного сечения (ширина – 6,0 м, высота – 3,7 м), возникающих в момент проходки, в зависимости от расстояния от контура выработки до ангидритовых пород – мощности оставляемых в кровле соляных

пород ( $h_{к.с.}$ ). Мощность сильвинитовых пород в почве  $h_{н.с.}$  считалась постоянной и принималась равной 3,5 м.

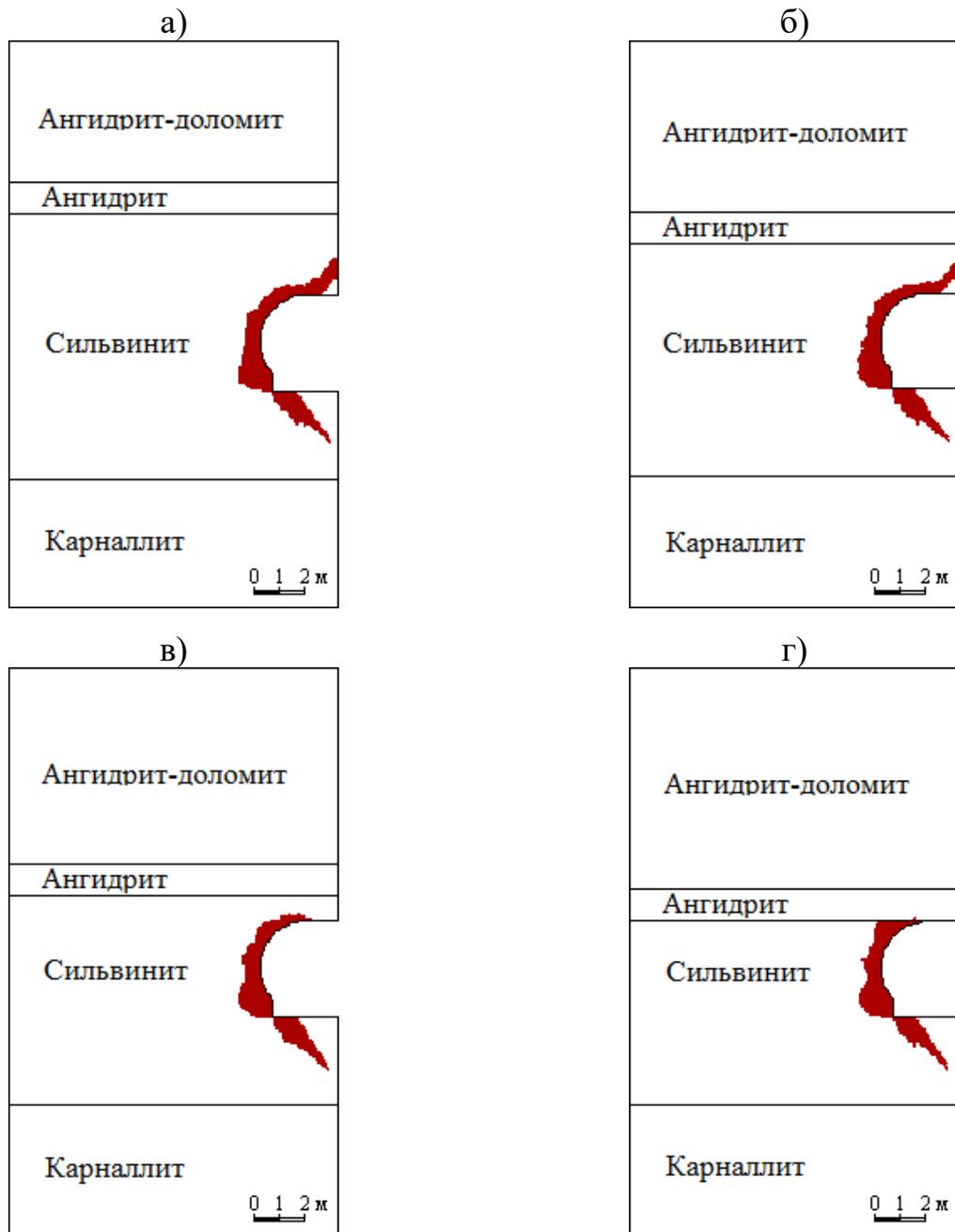


Рисунок 4.10 – Размеры нарушенных зон (показаны красным) в зависимости от мощности соляных пород  $h_{к.с.}$  в кровле выработки:  
а) 3,0 м; б) 2,0 м; в) 1,0 м; г) 0 м

Результаты численного моделирования показывают, что уменьшение расстояния от контура выработки до более прочных ангидритовых, ангидрит-доломитовых пород не оказывает существенного влияние на формирование

нарушенных зон в почве и боках, размеры которых в момент проходки составляют около 2,3 и 1,4 м, соответственно (рис. 4.10). При этом происходит уменьшение мощности нарушенных соляных пород  $h_{к.с.н}$  в кровле выработки. В случае привязки кровли выработки в рассматриваемых условиях к почве ангидритового слоя, в последнем образуется область нарушенных пород, размер которой в момент проходки составляет около 10-15 см (рис. 4.10, г).

Зависимость размеров нарушенной зоны в сильвинитовых породах кровли ( $h_{к.с.н}$ ), формирующейся в момент проходки в рассматриваемых условиях, от мощности сильвинита ( $h_{к.с.}$ ), оставляемого в кровле выработки с овално-арочной формой поперечного сечения, представлена на рис. 4.11.

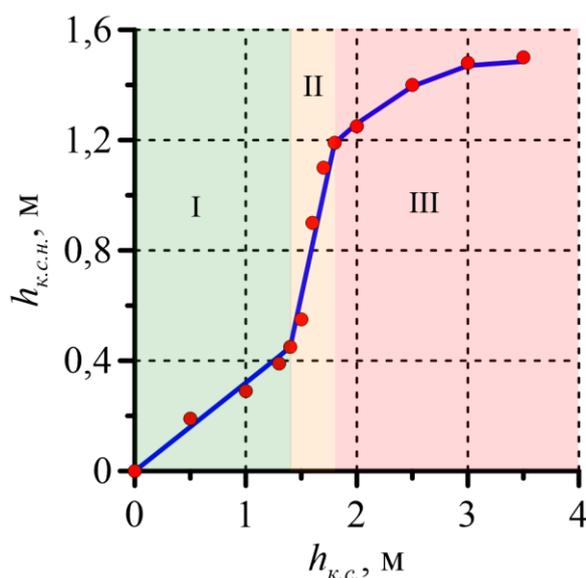


Рисунок 4.11 – Зависимость размеров  $h_{к.с.н}$  нарушенной зоны в сильвинитовых породах кровли, формирующейся в момент проходки выработки, от мощности сильвинита  $h_{к.с.}$  в кровле выработки

По результатам анализа рис. 4.11 в зависимости  $h_{к.с.н}(h_{к.с.})$  можно выделить следующие характерные участки:

- I,  $0 \leq h_{к.с.} < 1,4$  м: с возрастанием  $h_{к.с.}$  от 0 до 1,4 м наблюдается постепенное увеличение  $h_{к.с.н}$  от 0 до 0,5 м;

- II,  $1,4 \leq h_{к.с.} < 1,8$  м: с увеличением  $h_{к.с.}$  от 1,4 до 1,8 м отмечается резкое возрастание  $h_{к.с.н}$  в 2,4 раза: с 0,5 до 1,2 м;

- III,  $1,8 \leq h_{\text{к.с.}} \leq 3,5$  м: с увеличением  $h_{\text{к.с.}}$  от 1,8 до 3,5 м отмечается постепенное возрастание  $h_{\text{к.с.н.}}$  с 1,2 до 1,5 м.

Учитывая представленные результаты, для оценки размеров нарушенных зон в сильвинитовых породах кровли ( $h_{\text{к.с.н.}}$ , м) в момент проходки выработки в рассматриваемых условиях могут быть использованы следующие зависимости:

$$h_{\text{к.с.н.}} = \begin{cases} a \cdot h_{\text{к.с.}}, & \text{при } 0 \leq h_{\text{к.с.}} < 1,4 \\ b \cdot h_{\text{к.с.}} + c, & \text{при } 1,4 \leq h_{\text{к.с.}} < 1,8 \\ d \cdot h_{\text{к.с.}}^2 + f \cdot h_{\text{к.с.}} + g, & \text{при } 1,8 \leq h_{\text{к.с.}} \leq 3,5 \end{cases}, \quad (4.15)$$

где  $h_{\text{к.с.}}$  – 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.

На рис. 4.12 представлено распределение растягивающих напряжений во вмещающих горную выработку породах в зависимости от расстояния от контура выработки до ангидритовых пород  $h_{\text{к.с.}}$ . Анализ рис. 4.12 и рис. 4.9 показал, что с уменьшением величины  $h_{\text{к.с.}}$  происходит уменьшение размеров зоны растягивающих напряжений в кровле. Необходимо отметить: при  $h_{\text{к.с.}} = 0,5$  м зона растягивающих напряжений в сильвинитовых породах кровли не возникает, в то время как при  $h_{\text{к.с.}} = 0$  зона растягивающих напряжений локализуется в ангидритовых породах в районе перехода сводчатой части кровли в плоскую.

Наличие в кровле выработки слоев соляных пород мощностью менее 0,2–0,3 м может приводить к их отслоению и последующему обрушению внутрь выработки, что подтверждается результатами натурных наблюдений (рис. 4.13).

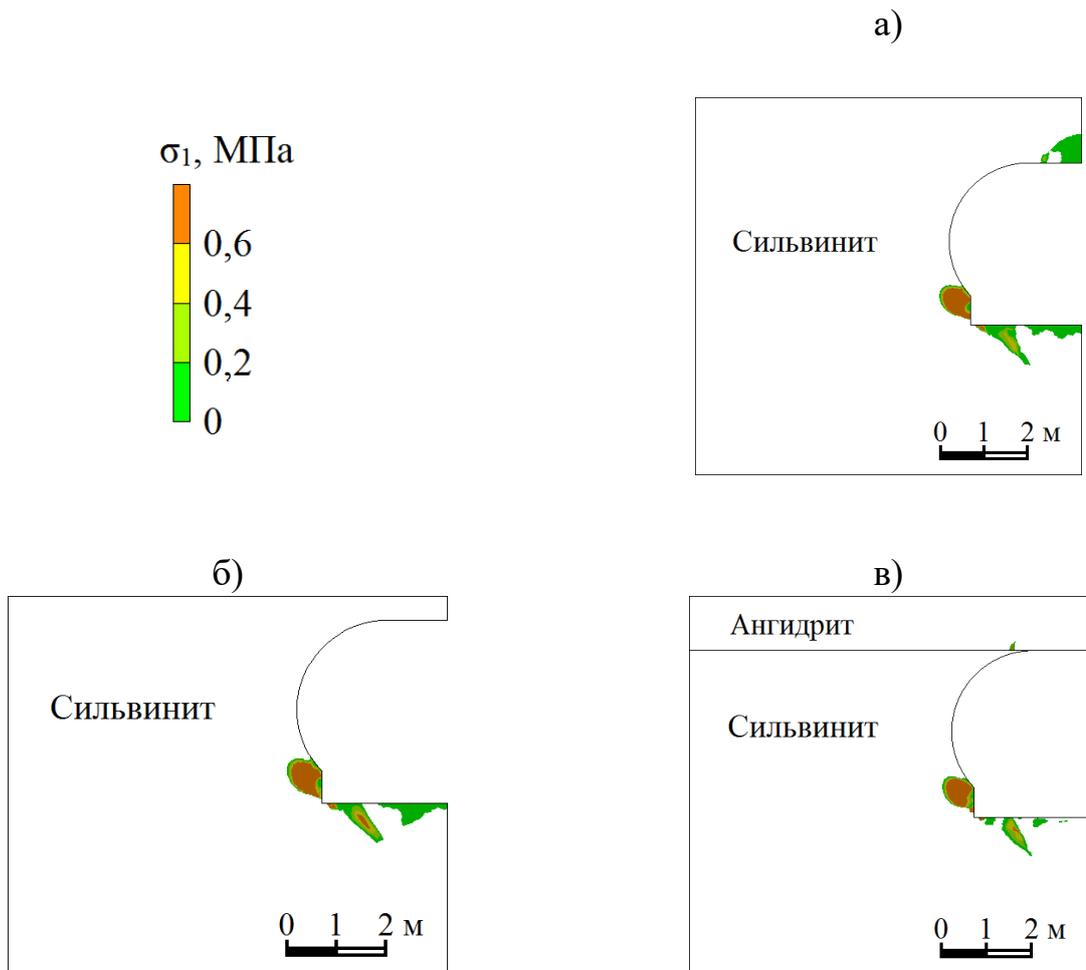


Рисунок 4.12 – Распределение растягивающих напряжений во вмещающих горную выработку породах в зависимости от величины  $h_{к.с.}$ :  
а) 1,5 м; б) 0,5 м; в) 0 м



Рисунок 4.13 – Состояние выработки при наличии в кровле слоев соляных пород мощностью менее 0,2–0,3 м

На рис. 4.14 представлена зависимость величины смещения почвы  $U$ , обусловленного ползучестью соляных пород, от времени  $t$  и мощности сильвинитового слоя в кровле выработки  $h_{к.с.}$ . Величина  $h_{к.с.}$  оказывает незначительное влияние на смещение почвы. Так, например, по истечении 365 суток с момента проходки смещения почвы выработки с овально-арочной формой поперечного сечения, пройденной комбайном Урал-20Р, возрастают с 42 до 44 мм при увеличении  $h_{к.с.}$  в 7 раз: с 0,5 до 3,5 м (рис. 4.14).

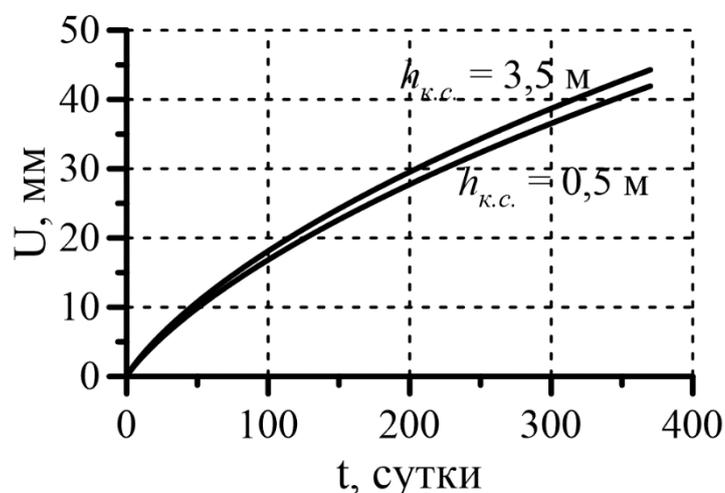


Рисунок 4.14 – Зависимости смещения почвы выработки с овально-арочной формой поперечного сечения от времени и мощности сильвинитового слоя в кровле выработки  $h_{к.с.}$ .

На рис. 4.15 приведены зависимости величин смещения кровли и боков выработки, обусловленного ползучестью соляных пород, от времени. Считалось, что выработка с овально-арочной формой поперечного сечения пройдена комбайном Урал-20Р в массиве, представленном однородными сильвинитовыми породами, на глубине, соответствующей глубине залегания промышленного пласта Гремячинского месторождения. По результатам анализа рис. 4.15 можно сделать вывод о том, что для выработки, пройденной в однородном соляном массиве, характерны близкие значения смещений боков и кровли.

На рис. 4.16 представлены аналогичные рис. 4.15 зависимости для выработки, пройденной на той же глубине в сильвинитовых породах, но вблизи ангидритовых, ангидрит-доломитовых отложений, залегающих на расстоянии  $h_{к.с.}$  от кровли выработки.

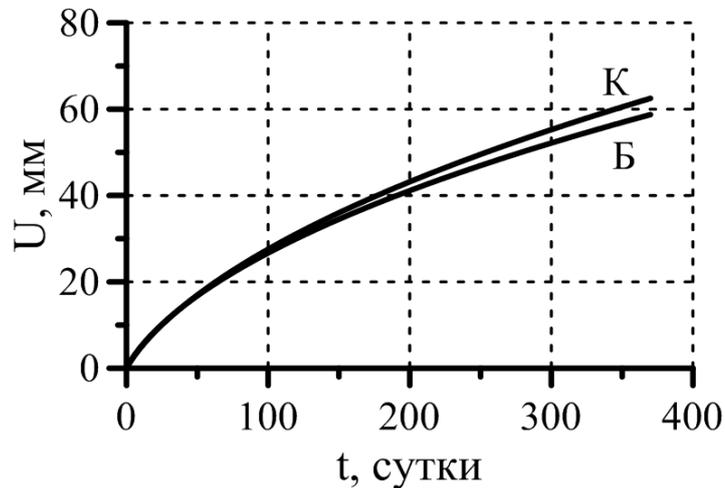


Рисунок 4.15 – Зависимости смещений кровли (К) и боков (Б) выработки с овально-арочной формой поперечного сечения в массиве, представленном однородными сильвинитовыми породами

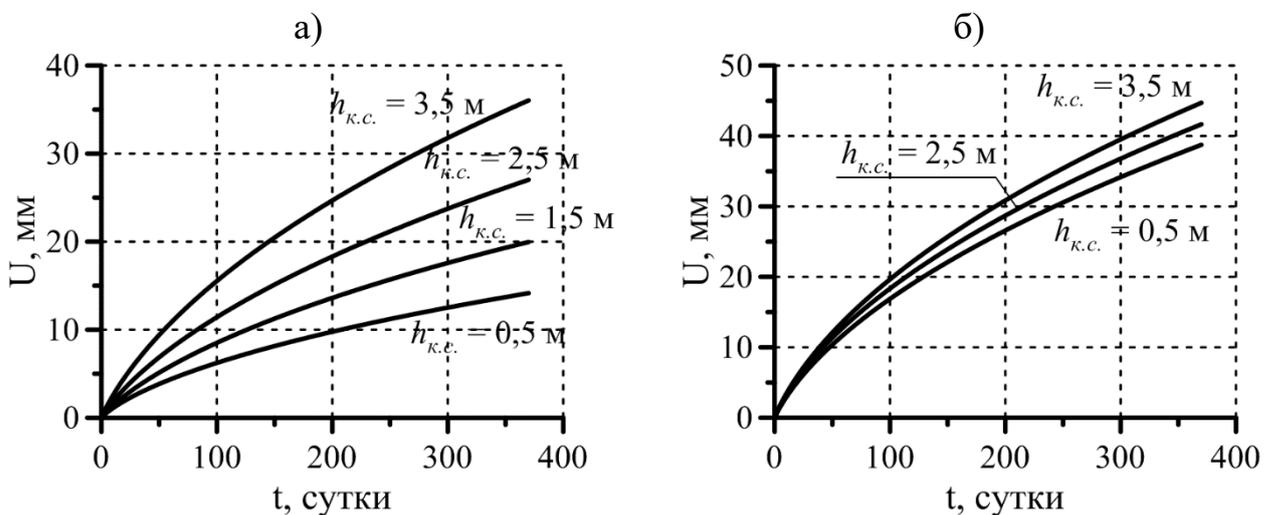


Рисунок 4.16 – Зависимости смещения кровли (а) и боков (б) выработки с овально-арочной формой поперечного сечения от времени и мощности сильвинитового слоя в кровле выработки  $h_{к.с.}$

Анализ результатов моделирования, представленных на рис. 4.15, 4.16, позволяет сделать вывод о том, что наличие более прочных ангидритовых,

ангидрит-доломитовых отложений вблизи кровли выработки, пройденной в соляных породах, приводит не только к уменьшению величин смещений контура выработки, но также изменению характера его деформирования, что проявляется в превышении величин смещений боков соответствующих смещений кровли выработки. Так, например, для выработки с овально-арочной формой поперечного сечения шириной 6,0 м и высотой 3,7 м, пройденной в соляных породах вблизи более прочных ангидритовых, ангидрит-доломитовых отложений, характерно уменьшение величин смещений кровли и боков, соответственно, в 1,7–4,4 и 1,3–1,5 раз по истечении 365 суток с момента проходки при изменении мощности сильвинитовых пород в кровле от 3,5 до 0,5 м, по сравнению с выработкой, пройденной в однородных соляных породах на той же глубине.

Неоднородность деформирования породного контура выработки, пройденной в условиях Гремячинского месторождения, наглядно иллюстрируется на рис. 4.17.

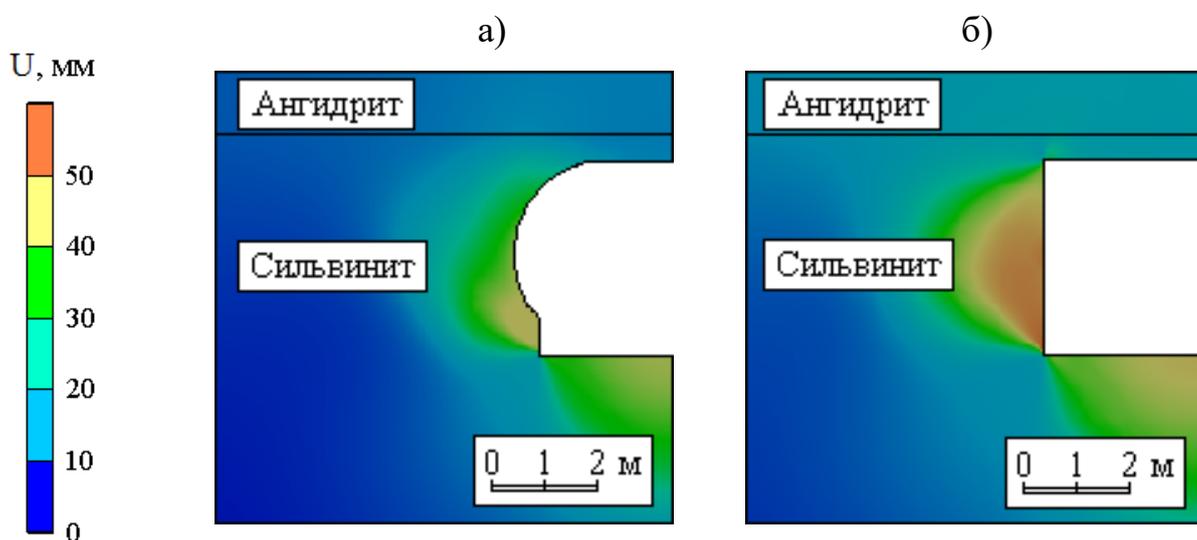


Рисунок 4.17 – Распределение смещений во вмещающих горную выработку породах, обусловленных ползучестью соляных пород, по истечении 365 суток с момента проходки при  $h_{к.с.} = 0,5$  м:

а – выработка, пройденная комбайном Урал-20Р;

б – выработка прямоугольного поперечного сечения 6,0х3,7 м

На рис. 4.18 представлены зависимости смещений кровли (К) и боков (Б) выработки прямоугольного поперечного сечения (6,0х3,7 м) от времени, полученные по результатам численного моделирования. Выработка пройдена в массиве, сложенном однородными сильвинитовыми породами, на глубине, соответствующей глубине залегания промышленного пласта Гремячинского месторождения.

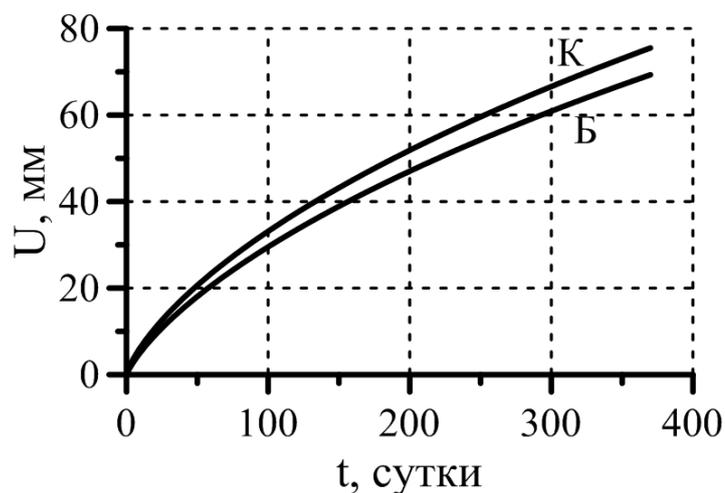


Рисунок 4.18 – Зависимости смещений кровли (К) и боков (Б) выработки прямоугольного поперечного сечения (6,0х3,7 м) от времени в массиве, представленном однородными сильвинитовыми отложениями

Анализ рис. 4.17, б и 4.18 позволяет сделать вывод о том, что проходка выработки прямоугольного поперечного сечения в соляных породах вблизи более прочных ангидритовых, ангидрит-доломитовых отложений, приводит к изменению характера деформирования породного контура по сравнению с аналогичной выработкой в массиве, представленном однородными соляными породами. Так, например, при расстоянии от кровли выработки до ангидритовых, ангидрит-доломитовых отложений  $h_{к.с.} = 0,5$  м величины смещений кровли и боков выработки, обусловленные ползучестью соляных пород, уменьшаются, соответственно, в 4,1 и 1,4 раз по истечении 365 суток с момента проходки по сравнению с выработкой, пройденной в однородном соляном массиве.

По результатам представленного анализа можно сделать следующие выводы:

- вне зависимости от мощности оставляемого в кровле выработки слоя сильвинитовых пород, размеры нарушенных зон в почве и боках в момент проходки выработки с овально-арочной формой поперечного сечения (ширина – 6,0 м, высота 3,7 м) составляют 2,3 и 1,4 м, соответственно, при мощности сильвинитового слоя в почве 3,5 м;

- существует переходная величина мощности сильвинитового слоя в кровле, находящаяся в диапазоне от 1,4 до 1,8 м для выработки, пройденной комбайном Урал-20Р, при которой отмечается резкое возрастание размеров нарушенной зоны в соляных породах кровли – более чем в 2 раза по сравнению с меньшим размером сильвинитового слоя;

- с возрастанием мощности сильвинитового слоя в кровле выработки наблюдается увеличение нарушенной зоны в кровле, предельный размер которой в момент проходки в сильвинитовых породах составляет около 1,5 м для выработки с овально-арочной формой поперечного сечения шириной 6,0 м и высотой 3,7 м при мощности сильвинитового слоя 3,5 м и более;

- возрастание размеров нарушенной зоны в соляных породах кровли с увеличением их мощности объясняется снижением влияния более прочных ангидритовых и ангидрит-доломитовых отложений на приконтурные соляные породы;

- существует размер сильвинитового слоя в кровле выработки, при котором растягивающие напряжения в породах кровли, в рассматриваемых горно-геологических и горнотехнических условиях не возникают, и составляет 0,5 м;

- особенность массива пород Гремячинского месторождения заключается в том, что близкое залегание ангидритовых, ангидрит-доломитовых пород к кровле выработок приводит к тому, что минимальные значения смещений породного контура следует ожидать в центральной части кровли; при этом в

местах перехода плоской части кровли в сводчатую величины смещений за 1 год эксплуатации выработки, пройденной комбайном Урал-20Р, в 1,5–2,0 раза больше чем в центральной части (мощность соляных пород в кровле – 0,5 м);

- установлено, что величина сильвинитового слоя в кровле не оказывает существенного влияния на устойчивость пород почвы; 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 раз за период наблюдения при уменьшении мощности сильвинитового слоя в кровле с 3,5 до 0,5 м.

#### **4.5. Оценка влияния анкерной крепи на напряженно-деформированное состояние массива горных пород, вмещающего одиночную выработку**

Исследование влияния анкерной крепи на напряженно-деформированное состояние вмещающих выработки пород выполнено на примере типового геологического разреза, представленного снизу-вверх: карналлитом, сильвинитом, ангидритом и ангидрит-доломитом по методике, изложенной в разделе 4.1. Мощность сильвинитовой пачки в почве выработки составляла 3,5 м, а в кровле изменялась от 0,5 до 3,5 м.

Расчеты выполнялись при следующих параметрах крепления:

- тип анкера, длина: КРА-16, 1,8 м;
- сетка анкерования: 5 рядов, 1,2x1,2 м.

Расположение рядов анкеров в выработке с овально-арочной формой поперечного сечений (пройдена комбайном Урал-20Р) представлено на рис. 4.19.

На рис. 4.20 приведены результаты исследования влияния анкерной крепи на горизонтальную  $\sigma_x$  и вертикальную  $\sigma_y$  компоненты напряжений во вмещающих выработку породах по истечении 365 суток с момента проходки при мощности сильвинитового слоя в кровле 3,5 м.

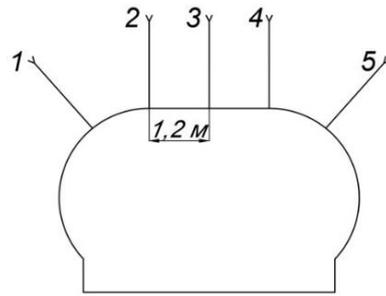


Рисунок 4.19 – Расположение рядов анкеров в поперечном сечении выработки:  
1...5 – номера рядов

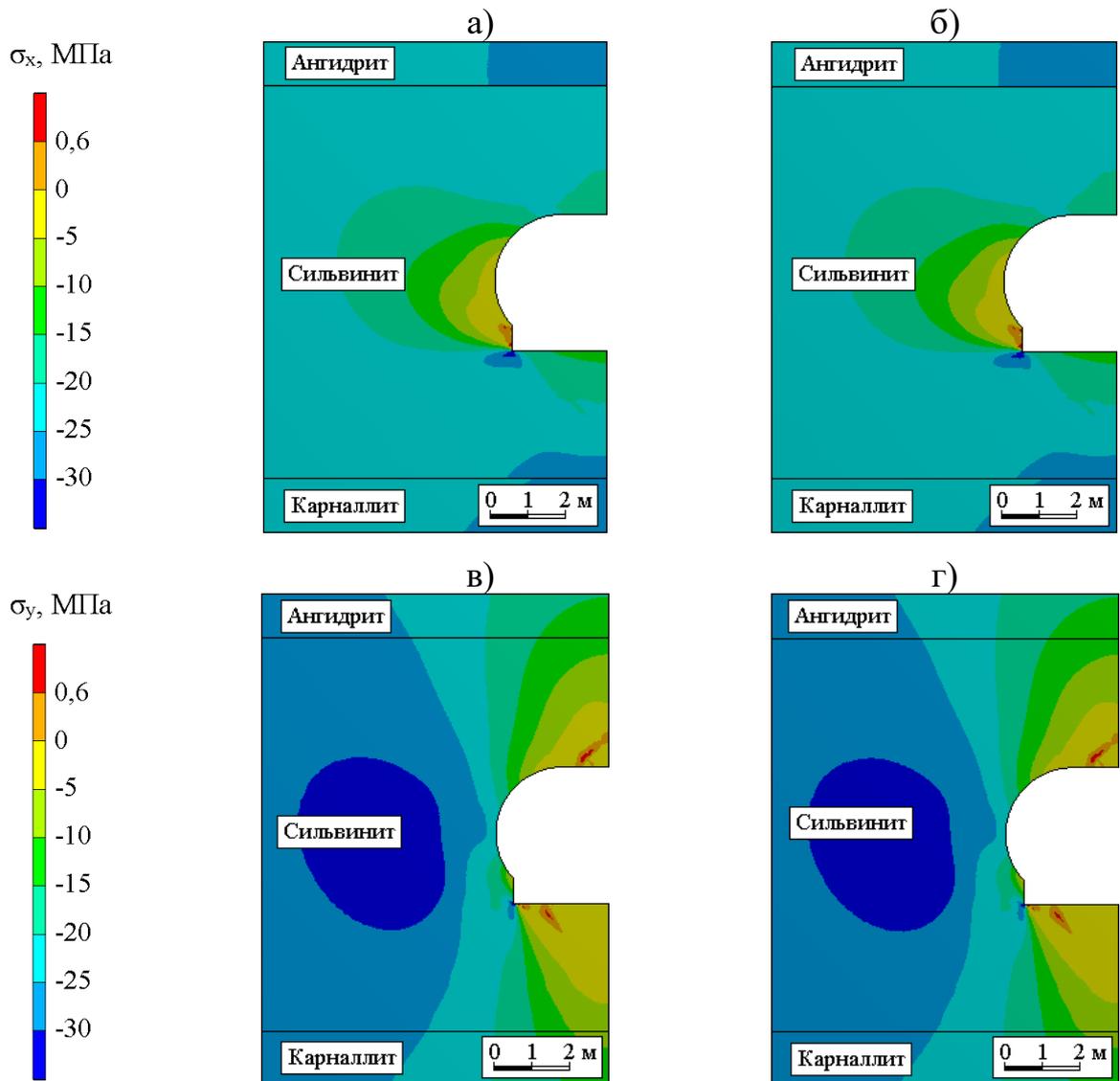


Рисунок 4.20 – Распределение горизонтальной  $\sigma_x$  и вертикальной  $\sigma_y$  компонент напряжений во вмещающих выработку породах по истечении 365 суток с момента проходки при мощности соляных пород в кровле  $h_{к.с.} = 3,5$  м:  
а) и в) –  $\sigma_x$  и  $\sigma_y$  без крепи, соответственно;  
б) и г) –  $\sigma_x$  и  $\sigma_y$  с крепью, соответственно

По представленным на рис. 4.20 результатам видно, что анкерная крепь, в рассматриваемых условиях, влияния на напряженное состояние приконтурных пород практически не оказывает.

Результаты моделирования также показали, что при изменении мощности сильвинитового слоя в кровле от 0,5 до 3,5 м, анкерная крепь с принятыми параметрами позволяет уменьшить величину смещений кровли за 1-ый год эксплуатации выработки не более чем на 1 %.

Из вышеизложенного следует, что основной задачей анкерного крепления в рассматриваемых условиях является подвешивание нарушенных пород для предотвращения их обрушения внутрь выработки.

На рис. 4.21 представлены зависимости силы натяжения анкеров от времени при мощности соляных пород в кровле выработки  $h_{к.с.}$ , которая изменялась от 0,5 до 3,5 м. Анализ результатов исследований показал, что наиболее нагруженным анкером является анкер № 1, расположенный в сводчатой части кровли. Уменьшение  $h_{к.с.}$  приводит к увеличению различия в натяжении анкеров. Так, например, натяжение анкера № 1 на 365 сутки при  $h_{к.с.} = 3,5$  м составляет 33,7 кН, анкера № 3 – 30 кН, в то же время натяжение анкера № 1 при  $h_{к.с.} = 0,5$  м составляет 34,6 кН, а анкера № 3 – 25,2 кН. Указанный факт, вероятно, является следствием увеличения неоднородности деформирования контура выработки с уменьшением расстояния от контура выработки до ангидритовых, ангидрит-доломитовых отложений, о чем было сказано выше.

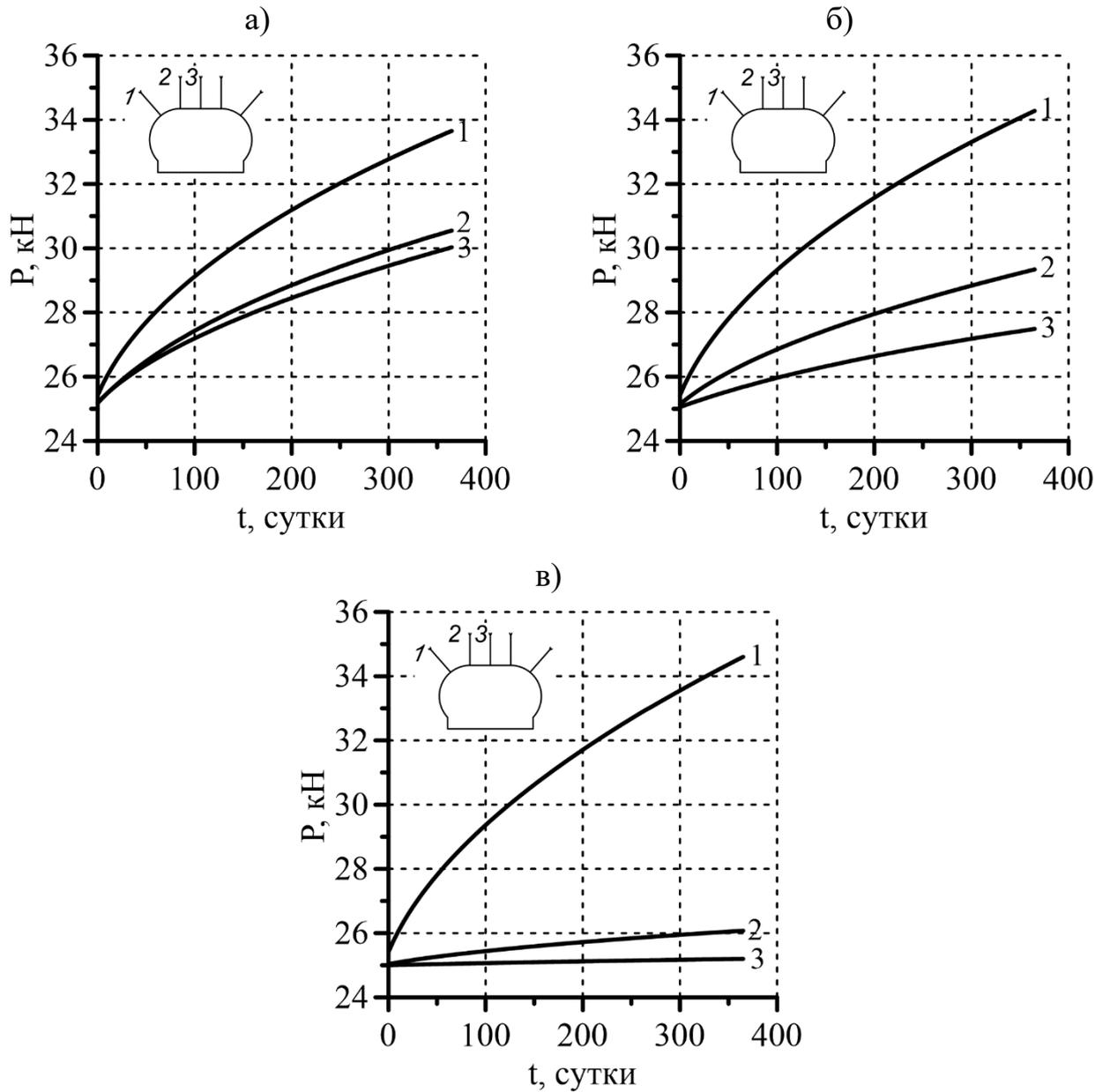


Рисунок 4.21 – Зависимости силы натяжения анкеров от времени и мощности слоя сильвинита в кровле выработки  $h_{к.с.}$ : а) 3,5 м; б) 1,5 м; в) 0,5 м; 1...3 – номера анкеров от стенки выработки к центру

#### 4.6. Оценка и прогноз устойчивости горных выработок в соляных породах Гремячинского месторождения

Принципиальное отличие капитальных горных выработок от подготовительных и очистных заключается в том, что они имеют длительный

срок службы, который в отдельных случаях сопоставим со сроком службы всего горнодобывающего предприятия. Поэтому капитальные выработки располагают так, чтобы минимизировать (исключить) их взаимовлияние.

Устойчивость одиночной горной выработки, как указывалось выше, определяется устойчивостью отдельных её элементов в зависимости от накопленных величин смещений, а также размеров нарушенных зон, формирующихся в процессе проходки и эксплуатации выработки в окружающем массиве.

По результатам математического моделирования установлено: наиболее устойчивое состояние горной выработки достигается при таком расположении её поперечного сечения, при котором в почве и кровле оставляется слой однородных соляных пород, не содержащих карналлитовые отложения. Назначение указанного слоя в почве заключается в минимизации влияния карналлитовых пород на устойчивость контура выработки. При этом необходимо учитывать, что в процессе эксплуатации последней, нарушенные породы почвы могут выдавливаться внутрь выработки (процесс пучения). В таком случае необходимо предусматривать своевременную поддирку и/или укрепление почвы специальными составами на глубину не менее размеров нарушенных зон, оценка которых может быть выполнена по формулам (4.13), (4.14).

По результатам математического моделирования, представленным выше, установлено, что оптимальная мощность однородных соляных пород в почве выработки (за исключением карналлитовых) должна составлять не менее 3,5 м. При этом уменьшение расстояния от почвы выработки до карналлитовых отложений приводит к увеличению размеров нарушенных зон в почве и, как следствие, снижению устойчивости горной выработки.

Как отмечалось выше, полная подрезка соляных пород в кровле выработки приводит к существенной неоднородности деформирования её контура. В случае крепления выработки в указанных условиях анкерами,

следует ожидать их обыгрывания ангидритовыми, ангидрит-доломитовыми породами, что наблюдали авторы работы [51] при обследовании выработок, пройденных в пределах соленосных отложений Чарской свиты месторождений трубок «Интернациональная» и «Мир» в пределах глубин 600–900 м (см. глава 1). Указанное явление, вероятно, связано с существенно меньшей склонностью ангидритовых, ангидрит-доломитовых пород к проявлению пластической деформации по сравнению с соляными в схожих условиях нагружения, на что было указано в главе 2.

Привязка кровли выработки к почве ангидритового слоя приводит к формированию зоны нарушенных пород в момент проходки выработки размером 10-15 см в ангидритовых отложениях. Наибольшая опасность этого явления заключается в том, что указанная зона формируется в районе перехода плоской части кровли в сводчатую и приурочена к контакту «соль-ангидрит», а как указывалось в главе 1, наиболее слабым звеном слоистого породного массива являются поверхности ослабления, в том числе контакты пород.

Оставление в кровле выработки слоев соляных пород мощностью менее 0,2–0,3 м может приводить к их отслоению и последующему обрушению внутрь выработки, что подтверждается результатами натурных наблюдений (рис. 4.13). Математическое моделирование показало, что в случае оставления в кровле выработки слоя однородных соляных пород (за исключением карналлитовых) мощностью 0,5 м область растягивающих напряжений в соляных породах кровли не возникает, что является благоприятным фактором с точки зрения устойчивости кровли выработки.

Также необходимо отметить: увеличение мощности соляных пород в кровле более 1,4 м приводит к резкому возрастанию размеров нарушенной зоны в кровле (раздел 4.5), что может привести к необходимости использования анкеров большей длины, более густой сетки анкерования, невозможности использования технологии анкерного крепления и т. д. Поэтому мощность

однородных соляных пород, оставляемых в кровле выработки (за исключением карналлитовых), должна составлять от 0,5 до 1,4 м.

Учитывая вышеизложенное, в том числе результаты математического моделирования, можно сделать вывод о том, что оценку состояния горных выработок в условиях Гремячинского месторождения следует выполнять на основе определения размеров нарушенных зон, формирующихся в момент проходки в породах кровли и почвы выработок, по формулам (4.13)–(4.15).

### **Выводы по главе**

1. Принятая упруго-вязко-пластическая модель среды удовлетворительно отражает напряженно-деформированное состояние пород, вмещающих выработки в соленосных отложениях Гремячинского рудника.

2. Установлено, что в момент проходки одиночной выработки с овально-арочной формой поперечного сечения (ширина – 6,0 м, высота – 3,7 м) в почве, кровле и боках в условиях больших глубин Гремячинского месторождения образуются области запредельного деформирования пород. Если почва выработки представлена однородными соляными породами, не содержащими карналлитовых отложений, то размеры нарушенных зон в почве, кровле, боках выработки в момент проходки могут достигать, соответственно, 2,3, 1,5, 1,4 м.

3. Если расстояние от контура выработки до кровли карналлитового слоя в почве составляет менее 3,5 м, то в момент проходки выработки с овально-арочной формой поперечного сечения в карналлитовых породах формируется область нарушенных пород. Уменьшение расстояние от контура выработки до карналлитового слоя приводит к увеличению смещений, вызванных формированием областей запредельного деформирования пород, не только в почве, но и в кровле, а также в боках выработки. В случае привязки почвы выработки по кровле карналлитового слоя, в последнем в момент проходки формируется нарушенная зона размером около 4 м и более.

4. Мощность соленосных отложений в кровле выработок не оказывает существенного влияния на величины смещений и устойчивость пород почвы, при этом возрастание мощности соленосных отложений в кровле выработки с овально-арочной формой поперечного сечения приводит к увеличению смещений боков до 10 % и более за первый год эксплуатации выработки.

5. 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 раз за первый год эксплуатации выработки при уменьшении мощности соленосных отложений в кровле с 3,5 до 0,5 м.

6. По результатам моделирования 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 анкерной крепи в условиях месторождения является подвешивание слоя нарушенных пород кровли с целью предотвращения их обрушения внутрь выработки.

7. Получены соотношения, позволяющие выполнить оценку 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.

8. 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.

## 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: 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 раз 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.

**СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Агеенко В.А., Скворцов А.А. Изучение реологических свойств каменной соли в условиях сверхдлительного одноосного нагружения // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2019. – № 11. – с. 27-34.
2. Андреев Г.Н., Иванкин А.В. Особенности строения отложений кунгура в пределах Гремячинского месторождения калийных солей по материалам высокоразрешающей сейсморазведки // Технологии сейсморазведки. – 2008. – № 3. – с. 89–93.
3. Асанов В.А. Геомеханическая оценка устойчивости несущих элементов камерной системы разработки соляных пород : дис. ... д-ра техн. наук : 25.00.20. – Пермь, 2004. – 362 с.
4. Асанов В.А., Евсеев А.В., Токсаров В.Н. Оценка влияния глинистых прослоек на несущую способность соляных междукамерных целиков // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2011. – № 8. – с. 79–83.
5. Асанов В.А., Паньков И.Л., Евсеев А.В., Лобанов С.Ю., Ломакин И.С. Экспериментальные и теоретические исследования длительной устойчивости несущих элементов камерной системы разработки калийных пластов // Вестник Пермского научного центра. – 2017. – № 1. – с. 8–14.
6. Асанов В.А., Паньков И.Л., Кузьминых В.С., Морозов И.А. Методические аспекты определения прочностных, деформационных и энергетических характеристик соляных пород при прямом растяжении породных образцов в лабораторных условиях // Вестник ПНИПУ. Механика. – 2018. – № 4. – с. 58–68.
7. Асанов В.А., Токсаров В.Н., Евсеев А.В., Бельтюков Н.Л. Опыт изучения акустоэмиссионных эффектов в соляных породах с использованием скважинного гидродомкрата Гудмана // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2010. – № 10. – с. 144–148.

8. Асанов В.А., Токсаров В.Н., Евсеев А.В., Бельтюков Н.Л. Особенности поведения кровли выработок на южном фланге Верхнекамского месторождения калийных солей // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2012. – № 1. – с. 84–88.

9. Асанов В.А., Токсаров В.Н., Паньков И.Л. Оценка напряженно-деформированного состояния целиков Верхнекамского калийного месторождения // Проблемы механики горных пород: Труды XI-й Российской конференции по механике горных пород, Санкт-Петербург, 9-11 сентября 1997 г. – Санкт-Петербург, 1997. – с. 31–34.

10. Асанов В.А., Токсаров В.Н. Экспериментальное определение напряжений в соляном массиве с использованием эффекта Кайзера // Геодинамика и напряженное состояние недр Земли: Труды международной конференции. Новосибирск, 1999. – с. 147–152.

11. Ахлестина Е.Ф., Московский Г.А. Надсолевые мезозойско-кайнозойские отложения Гремячинского месторождения калийных солей // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: науки о Земле. – 2008. – т. 8, № 2. – с. 50–55.

12. Баклашов И.В. Геомеханика: Учебник для вузов. В 2 т. – М.: Издательство Московского государственного горного университета, 2004. – Т. 1. Основы геомеханики. – 208 с.

13. Барях А.А. Деформирование и разрушение соляных пород и массивов : автореферат дис. ... д-ра техн. наук : 01.02.07. – Новосибирск, 1993. – 37 с.

14. Барях А.А., Дудырев И.Н., Асанов В.А., Паньков И.Л. Взаимодействие слоев в соляном массиве. Сообщение 1. Механические свойства контактов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 1992. – № 2. – с. 7–11.

15. Барях А.А., Константинова С.А., Асанов В.А. Деформирование соляных пород. – Екатеринбург: УрО РАН, 1996. – 204 с.

16. Барях А.А., Самоделкина Н.А. Разрушение водоупорных толщ при крупномасштабных горных работах. Ч. II // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2012. – № 6. – с. 12-20.

17. Барях А.А., Санфиоров И.А., Федосеев А.К., Бабкин А.И., Цаюков А.А. Сейсмо-геомеханический прогноз состояния водозащитной толщи на калийных рудниках // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2017. – № 6. – с. 10-22.

18. Башура А.Н. Прогнозирование состояния выработок на глубоких горизонтах калийных рудников Старобинского месторождения и обоснование эффективных способов охраны : дис. ... канд. техн. наук : 25.00.22. – Солигорск, 2004. – 146 с.

19. Бельтюков Н.Л. Разработка скважинного метода измерения напряжений в массиве горных пород на основе эффекта Кайзера : дис. ... канд. техн. наук : 25.00.20. – Пермь, 2018. – 159 с.

20. Боликов В.Е., Константинова С.А. Прогноз и обеспечение устойчивости капитальных горных выработок. – Екатеринбург: УрО РАН, 2003. – 373 с.

21. Борзаковский Б.А., Мараков В.Е., Воронцов В.И., Русаков М.И., Гилев М.В. Разработка технологии выемки карналлитового пласта с повышенным извлечением // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2012. – № 8. – с. 5–12.

22. Букина Т.Ф., Яночкина З.А., Московский Г.А. Особенности пермских и триасовых отложений надсолевого комплекса Гремячинского месторождения калийных солей // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: науки о Земле. – 2008. – т. 8, № 2. – с. 35–42.

23. Булычев Н.С., Амусин Б.З., Оловянный А.Г. Расчет крепи капитальных горных выработок. – М.: Недра, 1974. – 320 с.

24. Бурштейн Л.С. Статические и динамические испытания горных пород. – Л.: Недра, 1970 – 181 с.

25. Вялов С.С. Реологические основы механики грунтов: Учеб. пособие для строительных вузов. – М.: Высш. школа, 1978. – 447 с.

26. Ведмедев А.В. Коэффициент формы в расчётах подземных сооружений // Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. тр. – Днепропетровск: ИГТМ НАНУ, 2004. – Вып. 51. – с. 250–257.

27. Габдрахимов И.Х. Исследование длительной прочности горных пород и совершенствование систем разработки в условиях Верхнекамских калийных рудников : автореферат дис. ... канд. техн. наук. – Фрунзе, 1968. – 16 с.

28. Габдрахимов И.Х., Нестеров М.П. Паспорт прочности глины и контактов «соль-глина-соль» // Совершенствование технологии разработки месторождений Западного Урала. Тез. докл. науч-тех. конф.: Пермь, ППИ, 1982. – с. 55-56.

29. Габдрахимов И.Х., Поздеев А.А. К феноменологической теории прочности карналлита и расчет длительной устойчивости в целиках // Проблемы механики горных пород. – Алма-Ата: Наука, 1966. – с. 8–12.

30. ГОСТ 21153.2-84. Породы горные. Методы определения предела прочности при одноосном сжатии. – М.: Изд-во стандартов, 1985. – 10 с.

31. ГОСТ 21153.3-85. Породы горные. Методы определения предела прочности при одноосном растяжении. – М.: Изд-во стандартов, 1985. – 14 с.

32. ГОСТ 21153.8-88. Породы горные. Метод определения предела прочности при объемном сжатии. – М.: Изд-во стандартов, 1988. – 17 с.

33. Губанов В.А., Николаев Ю.Н., Подлесный В.А., Пасюк Э.Б. Влияние степени заполнения пространства компенсационных щелей податливым материалом на эффективность охраны подготовительных выработок // Технология подземных разработок калийных месторождений / Межвуз. сб. Перм. политехн. ин-т. – Пермь, 1988. – с. 25–31.

34. Губанов В.А. Обоснование геомеханических параметров охраны и поддержания подготовительных и очистных выработок при разработке

калийных месторождений : дис. ... д-ра техн. наук : 25.00.20. – Солигорск, 2006. – 305 с.

35. Евсеев А.В. Обеспечение устойчивости кровли очистных камер в условиях повышенного содержания глины в соляном массиве : дис. ... канд. техн. наук : 25.00.20. – Пермь, 2011. – 191 с.

36. Еременко В.А., Разумов Е.А., Заятдинов Д.Ф. Современные технологии анкерного крепления // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2012. – № 12. – с. 38–45.

37. Ержанов Ж.С., Серегин Ю.Н., Егоров В.Д. Устойчивость заштангованной кровли очистных камер. – Алма-Ата: Наука, 1976. – 117 с.

38. Ермашов А.О. Геомеханическое обоснование расчетов оседаний земной поверхности при добыче калийно-магниевых руд : на примере Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей : дис. ... канд. техн. наук : 25.00.20. – Пермь, 2015. – 133 с.

39. Жихарев С.Я. Разработка методов предотвращения обрушений кровли в калийных рудниках : дис. ... канд. техн. наук : 05.15.02. – Ленинград, 1984. – 174 с.

40. Заславский Ю.З., Зорин А.Н., Черняк И.Л. Расчеты параметров крепи выработок глубоких шахт. – Киев: Техніка, 1972. – 156 с.

41. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике: Пер. с англ. / О. Зенкевич; Под ред. Б.Е. Победри. – Москва: Мир, 1975. – 541 с.

42. Зотеев О.В. Научные основы расчета конструктивных параметров систем подземной разработки руд с учетом структуры массива и порядка ведения горных работ : автореферат дис. ... д-ра техн. наук : 05.15.02. – Екатеринбург, 1999. – 44 с.

43. Иванов А.А., Воронова М.Л. Верхнекамское месторождение калийных солей. – Л.: Недра, 1975. – 219 с.

44. Инструкция по охране и креплению горных выработок на Старобинском месторождении. – Солигорск, 2018. – 197 с.

45. Иофис М.А., Гришин А.В., Есина Е.Н. Пути снижения потерь полезных ископаемых при камерных системах разработки // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2015. – № S1. – с. 44–52.

46. Иофис М.А., Есина Е.Н., Мараков В.Е., Чистяков А.Н. Геомеханические критерии безопасной отработки Гремячинского месторождения калийных солей // Маркшейдерский вестник. – 2011. – № 4. – с. 44–52.

47. Карабань Д.Т., Лутович Е.А., Мисников В.А., Губанов В.А., Харитонов И.И. Результаты испытаний анкерной крепи повышенной несущей способности в выработках солигорских калийных рудников // Научные исследования и инновации. – 2011. – т. 5, № 1. – с. 129–131.

48. Карташов Ю.М., Матвеев Б.В., Михеев Г.В., Фадеев А.Б. Прочность и деформируемость горных пород. – Москва: Недра, 1979. – 269 с.

49. Качанов Л.М. Теория ползучести. – М.: Физматгиз, 1960. – 455 с.

50. Кетиков В.Н., Литвиновский О.Н. Устойчивость незакрепленной горной выработки в слоистом массиве соляных пород // Совершенствование разработки соляных месторождений: межвуз. сб. науч. тр. – Пермь, 1990. – с. 51–54.

51. Константинова С.А., Крамсков Н.П., Соловьев В.А. Некоторые проблемы механики горных пород применительно к отработке алмазных месторождений Якутии. – Новосибирск: Наука, 2011. – 222 с.

52. Константинова С.А. Методы прогноза и обеспечения устойчивости капитальных выработок в соляных породах : дис. ... д-ра техн. наук : 05.15.04. – Пермь, 1993. – 482 с.

53. Константинова С.А. Об одной феноменологической модели деформирования и разрушения соляных пород при длительном действии сжимающих нагрузок // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 1983. – № 3. – с. 8–13.

54. Константинова С.А., Соловьев В.А., Черепнов А.Н. О проявлении горного давления в окрестности капитальных выработок на подземном руднике «Интернациональный» АК «Алроса» // Маркшейдерский вестник. – 2005. – № 4 (54). – с. 62–64.

55. Константинова С.А., Соловьев В.А., Чернопазов Д.С. Оценка напряженно-деформированного состояния соленосного массива, вмещающего одиночную выработку на кимберлитовом руднике «Интернациональный» АК Алроса // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2008. – № 3. – с. 59–63.

56. Коротких В.А., Падерин Ю.Н., Жихарев С.Я. Определение напряженно-деформированного состояния глиносоляной кровли одиночной выработки // Совершенствование разработки калийных месторождений: межвуз. сб. науч. тр. – Пермь, 1987. – с. 128–132.

57. Кудряшов А.И. Верхнекамское месторождение солей. – Пермь: Соликам. тип., 2001. – 429 с.

58. Кутырло В.О. Особенности строения калийной залежи Гремячинского месторождения // Літасфера. – 2009. – № 1 (30). – с. 86–94.

59. Лаптев Б.В. Историография аварий при разработке соляных месторождений // Безопасность труда в промышленности. – 2011. – № 12. – с. 63–67.

60. Ливенский В.С., Проскуряков Н.М. Исследование прочностных и деформационных свойств соляных пород Старобинского месторождения // Разработка соляных месторождений: межвуз. сб. науч. тр. – Пермь, 1973. – с. 100–109.

61. Малинин Н.Н. Прикладная теория пластичности и ползучести: Учебник для вузов. – М.: Машиностроение, 1986. – 400 с.

62. Мараков В.Е. Совершенствование метода расчета конструктивных элементов камерной системы разработки калийных пластов Верхнекамского месторождения : дис. ... канд. техн. наук : 05.15.11. – Пермь, 1997. – 181 с.

63. Методическое руководство по ведению горных работ на рудниках Верхнекамского калийного месторождения: утв. Госагрохимом СССР, 12.12.1990 г. / УФ ВНИИГ; [сост.: Г.З. Файнбург и др.]. – М: Недра, 1992. – 468 с.

64. Мисников В.А. О формах и особенностях проявления горного давления в окрестности незакрепленных одиночных выработок Солигорских калийных рудников // Совершенствование разработки калийных месторождений: межвуз. сб. науч. тр. – Пермь, 1987. – с. 48–54.

65. Морозов И.А. Обеспечение устойчивости горных выработок в условиях строящихся калийных рудников // Горное эхо. – 2019. – № 2 (75). – с. 50–53.

66. Морозов И.А. Определение прочностных характеристик соляных пород по результатам объемного многоступенчатого нагружения // Стратегия и процессы освоения георесурсов. – 2017. – № 15. – с. 142–145.

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

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

69. Московский Г.А., Свидзинский С.А., Петрик А.И. Условия формирования галогенных пород района Гремячинского месторождения сильвинитов // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: науки о Земле. – 2008. – т. 8, № 1. – с. 75–85.

70. Николаев Ю.Н., Губанов В.А., Подлесный В.А., Пасюк Э.Б. Влияние степени заполнения компенсационных щелей податливым материалом на эффективность охраны подготовительных выработок // Технология подземной

разработки калийных месторождений: межвуз. сб. науч. тр. – Пермь, 1988. – с. 25–31.

71. Николаев Ю.Н., Журавков М.А., Губанов В.А. Способ охраны горных выработок: авт. св-во №1659658 (СССР) от 27 июля 1989 г. Опубл. в Б.И. № 24 30.06.91 г. – 125 с.

72. Паньков И.Л., Асанов В.А., Ударцев А.А. Изучение влияния степени нагружения и формы образцов на деформирование соляных пород при ползучести // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2013. – № 1. – с. 246-252.

73. Паньков И.Л., Асанов В.А., Ударцев А.А., Кузьминых В.С. Практика использования испытательного оборудования при изучении деформирования и разрушения квазипластичных горных пород в лабораторных условиях // Вестник КРСУ. – 2016. – т. 16, № 1. – с. 163–167.

74. Паньков И.Л., Богданова А.С. Экспериментальное определение прочностных свойств соляных пород при растяжении методом раскалывания // Научные исследования и инновации. – 2011. – т. 5, № 3. – с. 51–53.

75. Паньков И.Л., Гараева Ю.И. Исследование механических свойств соляных пород при растяжении // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2011. – № 9. – с. 154–157.

76. Паньков И.Л. Деформирование и разрушение контактов соляных пород : дис. ... канд. техн. наук: 05.15.11 – Пермь, 2000. – 172 с.

77. Паньков И.Л., Морозов И.А. Деформирование соляных пород при объемном многоступенчатом нагружении // Записки Горного института. – 2019. – т. 239. – с. 510–519.

78. Паньков И.Л., Морозов И.А. Исследование влияние коэффициента трения между торцами образцов различной высоты и плитами пресса на механические показатели соляных пород // Известия вузов. Горный журнал. – 2015. – № 2. – с. 107–113.

79. Паньков И.Л., Морозов И.А. Результаты экспериментального исследования влияния трения на механические показатели соляных пород // Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2017. – т. 16, № 22. – с. 4–15.

80. Певзнер М.Е., Иофис М.А., Попов В.Н. Геомеханика: Учебник для вузов. – 2-е изд., стер. – М.: Издательство Московского государственного горного университета, 2008. – 438 с.

81. Петровский Б.И., Щерба В.Я., Губанов В.А., Поляков А.Л. Развитие способов охраны и крепления горных выработок на калийных рудниках // Вопросы геомеханики подземной добычи калийных солей: сб. статей Горного информационно-аналитического бюллетеня. – 2003. – № 10. – с. 35–44.

82. Поносова Т.И. Напряженно-деформированное состояние и устойчивость соляных пород вокруг капитальных выработок различной формы // Разработка соляных месторождений: межвуз. сб. науч. тр. – Пермь, 1983. – с. 53–58.

83. Проскуряков Н.М., Пермьяков Р.С., Черников А.К. Физико-механические свойства соляных пород. – Л.: Недра, 1973. – 271 с.

84. Прушак В.Я. Деформация контура горных выработок Старобинского месторождения калийных солей при различных глубинах заложения // Доклады Национальной академии наук Беларуси. – 2016. – № 2. – с. 97–101.

85. Прушак В.Я., Поляков А.Л. Крепление горных выработок в сложных горно-геологических условиях глубоких горизонтов калийного месторождения // Актуальные вопросы машиноведения. – 2016. – т. 5. – с. 318–321.

86. Ржевский В.В., Новик Г.Я. Основы физики горных пород: Учебник для вузов. – М.: Недра, 1984. – 359 с.

87. Свидзинский С.А., Музалевский М.М., Ковальский Ф.И. Гремячинское месторождение сильвинитов // Новые данные по геологии соленосных бассейнов Советского Союза. – М.: Наука, 1986. – с. 204–219.

88. Сиренко Ю.Г., Тараканов Н.В. Проблемы поддержания подготовительных выработок Старобинского месторождения на больших глубинах // Записки Горного института. – 2013. – т. 205. – с. 40–43.

89. Слесарев В.Д. Механика горных пород и рудничное крепление: Учеб. пособие для горных вузов. – М.: Изд. и тип. Углетехиздата Западугля, 1948. – 303 с.

90. Соловьев В.А., Аптуков В.Н., Ваулина И.Б. Поддержание горных выработок в породах соленосной толщи. – Новосибирск: Наука, 2017. – 262 с.

91. СП 91.13330.2012 Подземные горные выработки, утв. приказом Министерства регионального развития Российской Федерации (Минрегион России) 30.06.2012 г. – 49 с.

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

93. Ставрогин А.Н., Протосеня А.Г. Прочность горных пород и устойчивость выработок на больших глубинах. – М.: Недра, 1985. – 271 с.

94. Ставрогин А.Н., Тарасов Б.Г. Экспериментальная физика и механика горных пород. – СПб.: Наука, 2001. – 343 с.

95. Технологический регламент по охране и креплению горных выработок на рудниках ПАО «Уралкалий» / Отв. составители-разработчики: Чернопазов Д.С., Соловьев В.А., Секунцов А.И. – Пермь-Березники, 2015 – 159 с.

96. Титов Б.В. Исследование и разработка метода определения длительной прочности соляных горных пород при сжатии : дис. ... канд. техн. наук : 05.15.11. – Березники, 1983. – 248 с.

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

98. Токсаров В.Н. Оценка напряженного состояния соляного массива с использованием акустоэмиссионного эффекта памяти горных пород // Комплексное освоение недр Западного Урала: материалы науч. сес. ГИ УрО РАН. – Пермь, 1998. – с. 6–8.

99. Указания по защите рудников от затопления и охране подрабатываемых объектов на Верхнекамском месторождении калийно-магниевых солей / ГИ УрО РАН. – Пермь, 2014. – 130 с.

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

101. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых»: утв. приказом Ростехнадзора от 08.12.2020 № 505.

102. Фисенко Г.Л. Предельные состояния горных пород вокруг выработок. – М.: Недра, 1976. – 272 с.

103. Цимбаревич П.М. Механика горных пород. – М.: Изд-во и 2-я тип. Углетехиздата, 1948. – 184 с.

104. Чернопазов Д.С. Влияние соленосных глин на устойчивость горных выработок в условиях Верхнекамского месторождения калийных солей : автореферат дис. ... канд. техн. наук : 25.00.20. – Тула, 2013. – 16 с.

105. Широков А.П., Лидер В.А., Писляков Б.Г. Расчет анкерной крепи для различных условий применения. – М.: Недра, 1976. – 208 с.

106. Ямщиков В.С., Шкуратник В.Л., Лыков К.Г., Фарафонов В.М. Оценка напряженного состояния массива на основе эмиссионных эффектов памяти горных пород околоскважинного пространства // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 1991. – № 2. – с. 26–29.

107. Alkan H., Cinar Y., Pusch G. Rock salt dilatancy boundary from combined acoustic emission and triaxial compression tests // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2007. – Vol. 44, № 1. – pp. 108–119.

108. Amann F., Kaiser P., Button E.A. Experimental Study of Brittle Behavior of Clay Shale in Rapid Triaxial Compression // *Rock Mechanics and Rock Engineering*. – 2012. – Vol. 45, № 1. – pp. 21–23.

109. ASTM D7012-14e1. Standard Test Methods for Compressive Strength and Elastic Moduli of Intact Rock Core Specimens under Varying States of Stress and Temperatures. – ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014. – 9 p.

110. Baryakh A., Lobanov S. Geomechanical analysis of the stability of salt stopes in the layered salt mass // 18th International multidisciplinary scientific geoconference, SGEM 2018, July 02 – July 08, 2018, Albena. – Albena, 2018. – pp. 435–441.

111. Cai M. Practical Estimates of Tensile Strength and Hoek–Brown Strength Parameter  $m_i$  of Brittle Rocks // *Rock Mechanics and Rock Engineering*. – 2010. – Vol. 43, № 2. – pp. 167–184.

112. Charlie C.Li. Principles of rockbolting design // *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. – 2017. – Vol. 9, № 3. – pp. 396–414.

113. Dawson P.R., Munson D.E. Numerical simulation of creep deformations around a room in a deep potash mine // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*. – 1983. – Vol. 20, № 1. – pp. 33–42.

114. Deng J., Liu Y., Yang Q., Cui W., Zhu Y., Liu Y., Li B. A viscoelastic, viscoplastic, and viscodamage constitutive model of salt rock for underground energy storage cavern // *Computers and Geotechnics*. – 2019. – Vol. 119. – pp. 1–14.

115. Doering T., Kiehl J.R. Das primaeren, sekundaeren und tertiaeren Kriechen von Steinsalz -ein dreidimensionales rheonomes Stoffgesetz // *Geotechnik*. – 1996. – Vol. 19, № 3. – pp. 194–199.

116. Erling F., Holt R.M., Raaen A.M., Risnes R., Horsrud P. Petroleum Related Rock Mechanics. – Elsevier Science, 2008. – 514 p.

117. Evseev A., Asanov V., Lomakin I., Tsayukov A. Experimental and theoretical studies of undermined strata deformation during room and pillar mining //

EUROCK 2018: Geomechanics and Geodynamics of Rock Masses, London, Taylor & Francis Group. – 2018. – pp. 985–990.

118. Fuenkajorn K., Sriapai T., Samsri P. Effects of loading rate on strength and deformability of Maha Sarakham salt // *Engineering Geology*. – 2012. – Vol. 135–136. – pp. 10–23.

119. Huang X.L., Chao Yu. Studies of Hard Interlayer's Influence on the Creep Deformation of Salt Rock Cavity // *Advanced Materials Research*. – 2012. – Vol. 594–597. – pp. 452–455.

120. ISRM. International society for rock mechanics. Suggested methods for determining tensile strength of rock materials // *Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr*. – 1978. – Vol. 15. – pp. 99–103.

121. Kaiser J. Erkenntnisse und Folgerungen aus der Messung von Geräuschen bei Zugbeanspruchung von metallischen Werkstoffen // *Archiv für das Eisenhüttenwesen*. – 1953. – Vol. 24. – pp. 43–45.

122. Kiehl J.R., Doering T., Erichsen C. Ein räumliches Stoffgesetz für Steinsalz unter Berücksichtigung von primärem, sekundärem und tertiärem Kriechen, Dilatanz, Kriech- und Zugbruch sowie Nachbruchverhalten // *Geotechnik*. – 1998. – Vol. 21. – pp. 254–258.

123. Kovári K., Tisa A. Multiple Failure State and Strain Controlled Triaxial Tests // *Rock Mechanics*. – 1975. – Vol. 7, № 1. – pp. 17–33.

124. Kurita K., Fujii N. Stress memory of crystalline rocks in acoustic emission // *Geophys. Res. Lett*. – 1979. – Vol. 6. – pp. 9–12.

125. Kwon S., Wilson J.W. Numerical analysis of a new mining system at a potash mine // *Mining Technology*. – 2000. – Vol. 109, № 2. – pp. 125–130.

126. Liang G., Huang X., Peng X., Tian Y., Yu Y. Investigation on the cavity evolution of underground salt cavern gas Storages // *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. – 2016. – Vol. 33. – pp. 118–134.

127. Liang W., Yang C., Zhao Y., Dusseault M.B., Liu J. Experimental investigation of mechanical properties of bedded salt rock // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. – 2007. – Vol. 44, № 3. – pp. 400–411.
128. Liang W., Zhang C., Gao H., Yang X., Xu S., Zhao Y. Experiments on mechanical properties of salt rocks under cyclic loading // *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. – 2012. – Vol. 4, № 1. – pp. 54–61.
129. Luangthip A., Wilalak N., Thongprapha T., Fuenkajorn K. Effects of carnallite content on mechanical properties of Maha Sarakham rock salt // *Arab J Geosci*. – 2017. – Vol. 10, № 147. – pp. 1–14.
130. Motta G.E., Pinto C.L. New constitutive equation for salt rock creep // *Rem: Rev. Esc. Minas*. 2014. – Vol. 67, № 4. – pp. 397–403.
131. Patel M.B., Shah M.V. Strength Characteristics for Limestone and Dolomite Rock Matrix using Tri-Axial System // *International Journal of Science Technology & Engineering*. – 2015. – Vol. 1, № 11. – pp. 114–124.
132. Prugger F. Water problems in Saskatchewan potash mining. What can be learned from them // *CIM Bulletin*. – 1991. – Vol. 84, № 945. – pp. 58–66.
133. Serata S. Stress control methods: quantitative approach to stabilizing mine opening in weak ground // *Proceeding of 2nd Int. Conf. on Stability in Underground Mining (AIME, New York)*. – Addendum, 1984. – pp. 52–93.
134. Sheng-Qi Yang. Strength and deformation behavior of red sandstone under multi-stage triaxial compression // *Canadian Geotechnical Journal*. – 2012. – Vol. 49, № 6. – pp. 694–709.
135. Scott Duncan E.J., Lajtai E.Z. The creep of potash salt rocks from Saskatchewan // *Geotech Geol Eng.* – 1993. – Vol. 11. – pp. 159–184.
136. Silberschmidt V.G., Silberschmidt V.V. Analysis of Cracking in Rock Salt // *Rock Mechanics and Rock Engineering*. – 2000. – Vol. 33, № 1. – pp. 53–70.
137. Taheri A., Sasaki Y., Tatsuoka F., Watanabe K. Strength and deformation characteristics of cement-mixed gravelly soil in multiple-step triaxial compression // *Soils and Foundations*. – 2012. – Vol. 52, № 1. – pp. 126–145.

138. Taheri A., Tani K. Use of down-hole triaxial apparatus to estimate the mechanical properties of heterogeneous mudstone // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. – 2008. – Vol. 45, № 8. – pp. 1390–1402.
139. Vergara M.R., Kudella P., Triantafyllidis T. Large Scale Tests on Jointed and Bedded Rocks Under Multi-Stage Triaxial Compression and Direct Shear // *Rock Mechanics and Rock Engineering*. – 2015. – Vol. 48, № 1. – pp. 75–92.
140. Villamor Lora R., Ghazanfari E., Asanza Izquierdo E. Geomechanical Characterization of Marcellus Shale // *Rock Mechanics and Rock Engineering*. – 2016. – Vol. 49, № 9. – pp. 3403–3424.
141. Wang G., Zhang L., Zhang Y., Ding G. Experimental investigations of the creep-damage-rupture behavior of rock salt // *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*. – 2014. – Vol. 66. – pp. 181–187.
142. Wang J., Jung W., Li Y., Ghassemi A. Geomechanical characterization of Newberry Tuff // *Geothermics*. – 2016. – Vol. 63. – pp. 74–96.
143. Whyatt J., Varley F. Catastrophic Failures of Underground Evaporite Mines // *Proceedings of the 27th International Conference on Ground Control in Mining, July 29–July 31, 2008, Morgantown, West Virginia*. – Morgantown, West Virginia University, 2008. – pp. 113–122.
144. Wisetsaen S., Walsri C., Fuenkajorn K. Effects of loading rate and temperature on tensile strength and deformation of rock salt // *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*. – 2015. – Vol. 73. – pp. 10–14.
145. Wittke W. *Tunnelstatik*. – Verlag Glueckauf GmbH. Essen, 1999. – 408 s.
146. Xu X., Wu S., Gao Y., Xu M. Effects of micro-structure and micro-parameters on Brazilian tensile strength using flat-joint model // *Rock Mechanics and Rock Engineering*. – 2016. – Vol. 49, № 9. – pp. 3575–3595.
147. Youn H., Tonon F. Multistage triaxial test on brittle rock // *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*. – 2010. – Vol. 47, № 4. – pp. 678–684.

148. Yu Y.S., Ong C.G., Mottahed P. Viscoelastic finite element analysis in design of potash mines // *Engineering Computations*. – 1988. – Vol. 5, № 3. – pp. 248–253.

149. Zhang H.B., Wang Z., Zheng Y., Duan P., Ding S. Study on triaxial creep experiment and constitutive relation of different rock salt // *Safety Science*. – 2012. – Vol. 50. – pp. 801–805.

**ПРИЛОЖЕНИЕ**

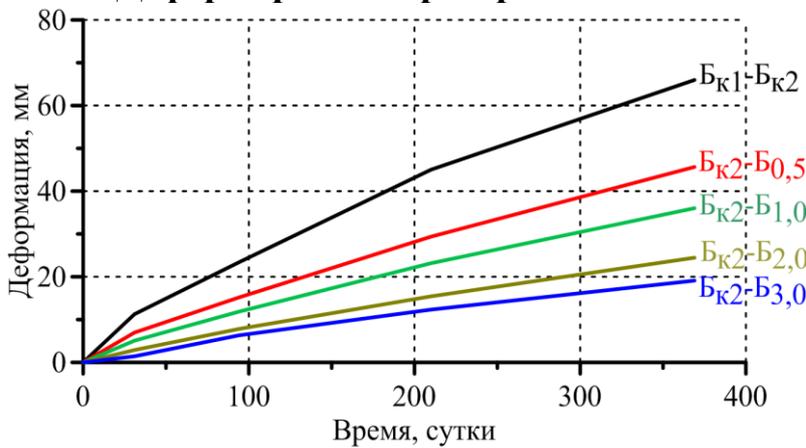
**Экспериментальный участок 1. Замерная станция 1**  
**Описание станции**

**Расположение:** сб. 8-4р  
**Комбайн:** Урал-20Р  
**Ширина хода:** 6,0 м  
**Высота хода:** 3,7 м  
**Дата заложения:** 17.11.2018

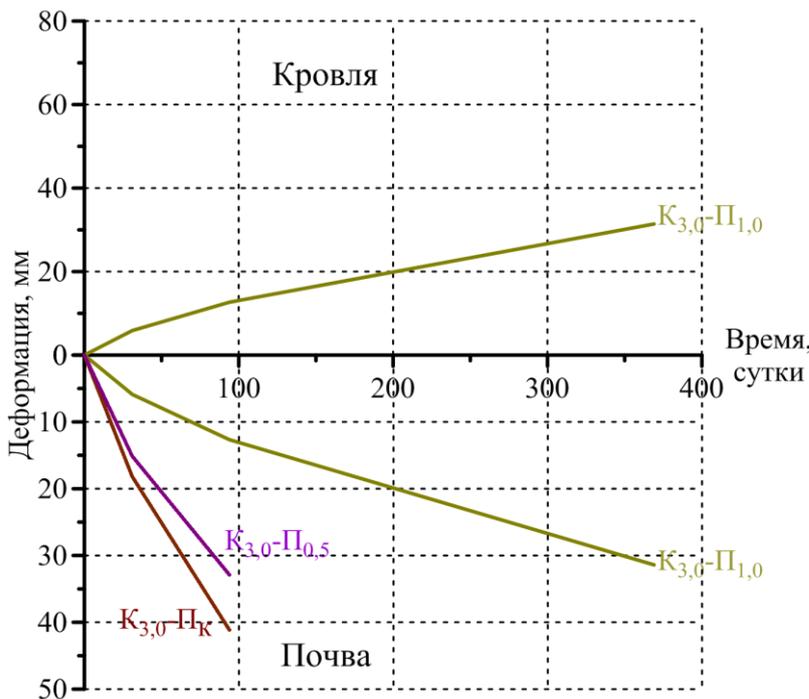
**Параметры крепления**

**Тип анкера:** КРА-16  
**Длина анкера:** 2,0 м  
**Сетка анкерования:** 6 рядов, 1,0×1,0 м

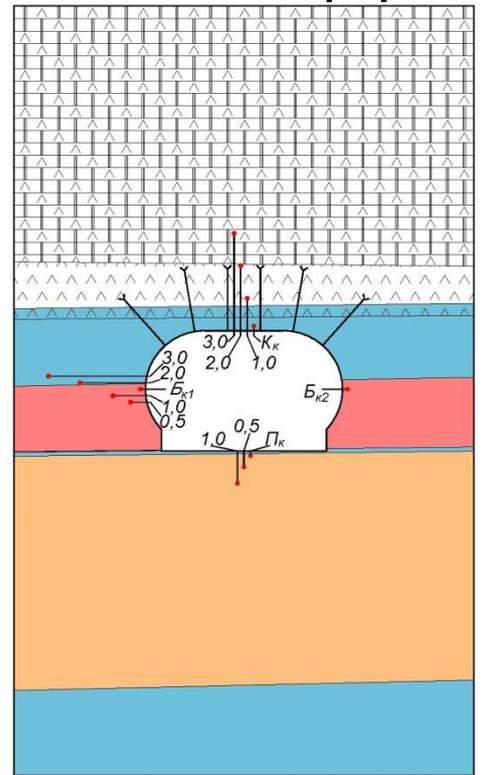
**Деформирование реперов в боках**



**Деформирование реперов в кровле, почве**



**Геологический разрез**



**Условные обозначения**

- ангидрит-доломитовые породы
- ангидрит
- ангидрит-галитовая порода
- каменная соль
- сильвинит
- карналлитовые породы
- замок анкера
- точка закрепления репера

К<sub>к</sub>, П<sub>к</sub>, Б<sub>к1</sub>, Б<sub>к2</sub> – контурные реперы в кровле (К), почве (П), боках (Б)

0,5...3,0 – глубинные реперы на глубине 0,5...3,0 м

## Экспериментальный участок 1. Замерная станция 2

### Описание станции

Расположение: сб. 8-4р

Комбайн: Урал-20Р

Ширина хода: 6,0 м

Высота хода: 3,7 м

Дата заложения: 17.11.2018

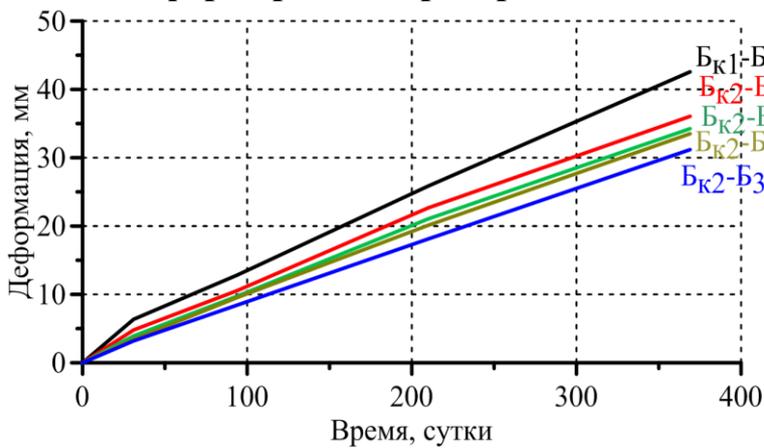
### Параметры крепления

Тип анкера: КРА-16

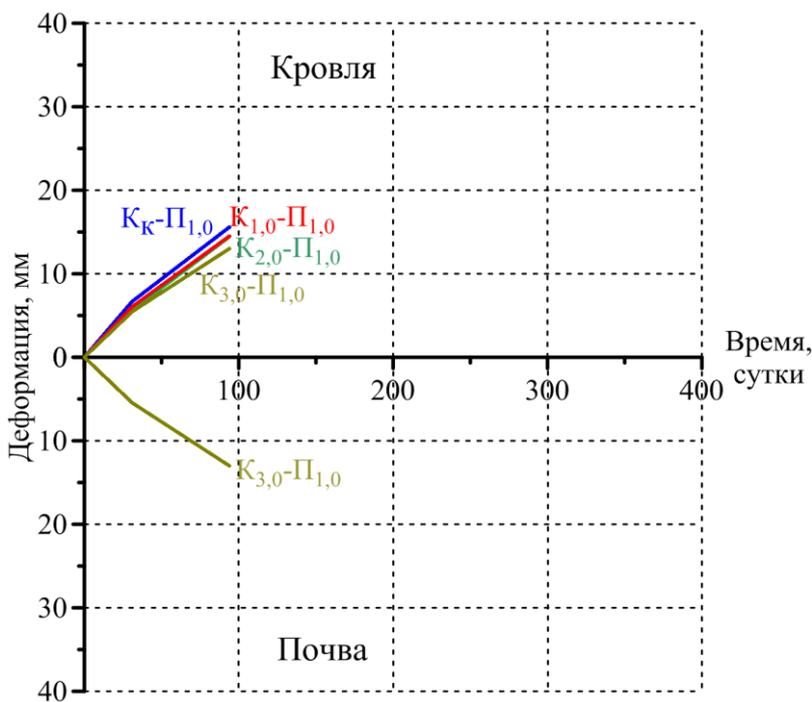
Длина анкера: 1,8 м

Сетка анкерования: 6 рядов, 1,0×1,0 м

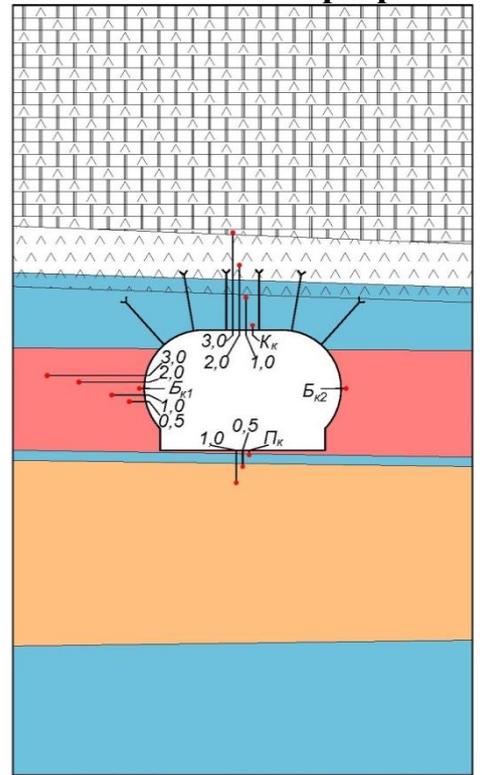
### Деформирование реперов в боках



### Деформирование реперов в кровле, почве



### Геологический разрез



### Условные обозначения

- ангидрит-доломитовые породы
- ангидрит
- ангидрит-галитовая порода
- каменная соль
- сильвинит
- карналлитовые породы
- замок анкера
- точка закрепления репера

Кк, Пк, Бк1, Бк2 — контурные реперы в кровле (К), почве (П), боках (Б)

0,5...3,0 — глубинные реперы на глубине 0,5...3,0 м

## Экспериментальный участок 2. Замерная станция 3

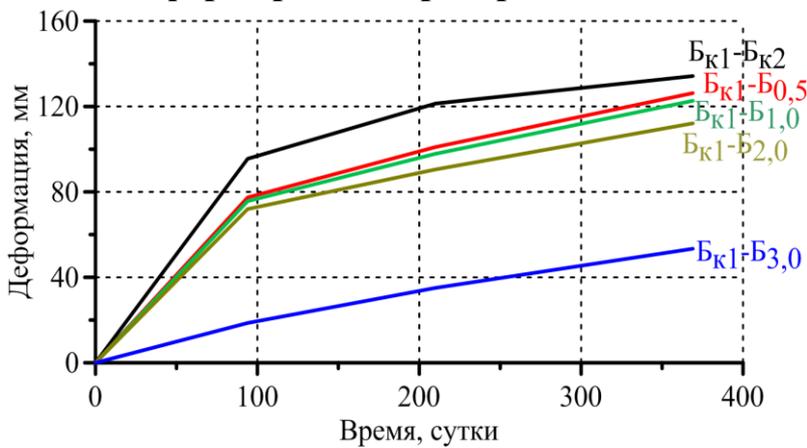
### Описание станции

Расположение: сб. 8-3р  
 Комбайн: Урал-20Р  
 Ширина хода: 6,0 м  
 Высота хода: 3,7 м  
 Дата заложения: 17.11.2018

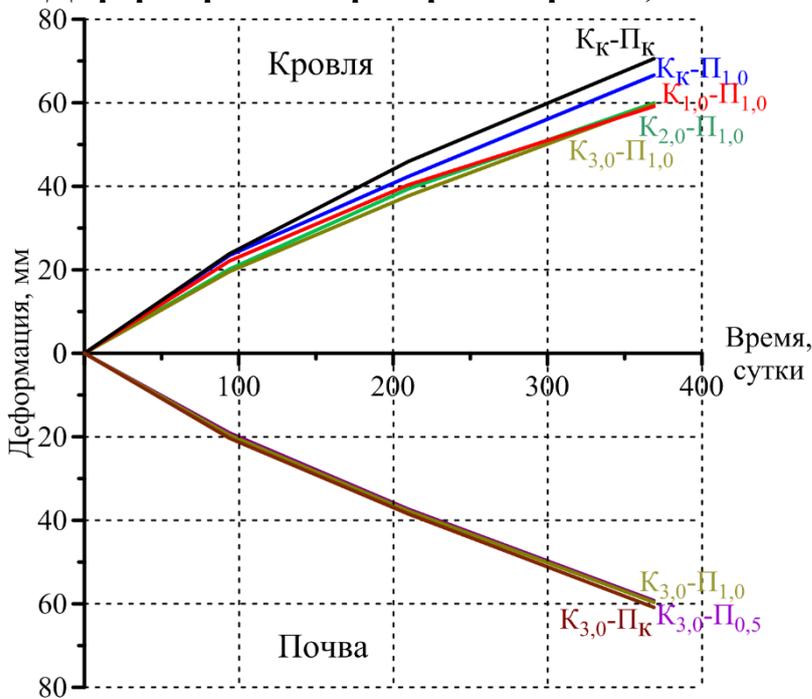
### Параметры крепления

Тип анкера: КРА-16  
 Длина анкера: 1,8 м  
 Сетка анкерования: 3 ряда, 2,0×2,0 м

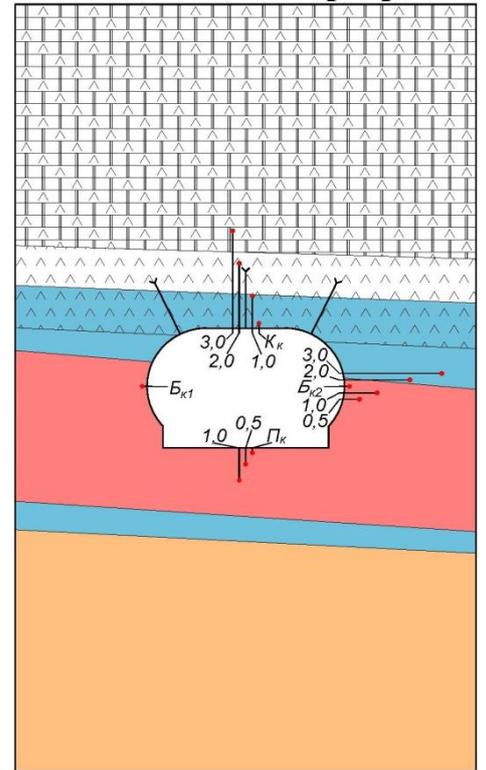
### Деформирование реперов в боках



### Деформирование реперов в кровле, почве



### Геологический разрез



### Условные обозначения

- ангидрит-доломитовые породы
- ангидрит
- ангидрит-галитовая порода
- каменная соль
- сильвинит
- карналлитовые породы
- замок анкера
- точка закрепления репера

Кк, Пк, Бк1, Бк2 – контурные реперы в кровле (К), почве (П), боках (Б)

0,5...3,0 – глубинные реперы на глубине 0,5...3,0 м

**Экспериментальный участок 2. Замерная станция 4**

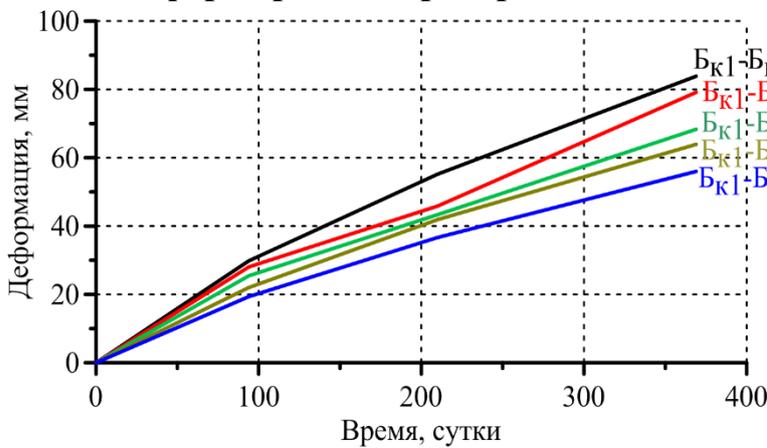
**Описание станции**

**Расположение:** сб. 8-3р  
**Комбайн:** Урал-20Р  
**Ширина хода:** 6,0 м  
**Высота хода:** 3,7 м  
**Дата заложения:** 17.11.2018

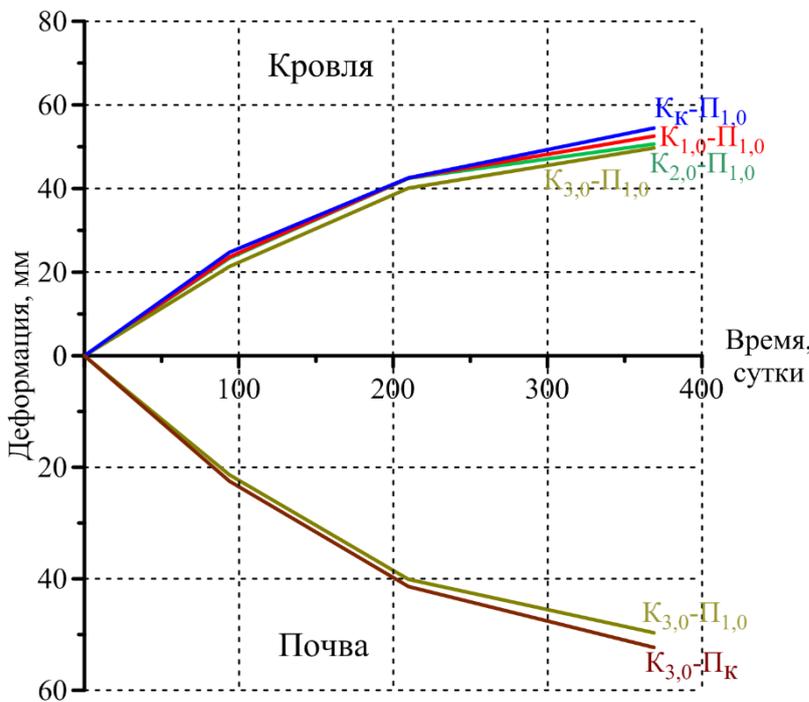
**Параметры крепления**

**Тип анкера:** КРА-16  
**Длина анкера:** 1,8 м  
**Сетка анкерования:** 3 ряда, 2,0×2,0 м

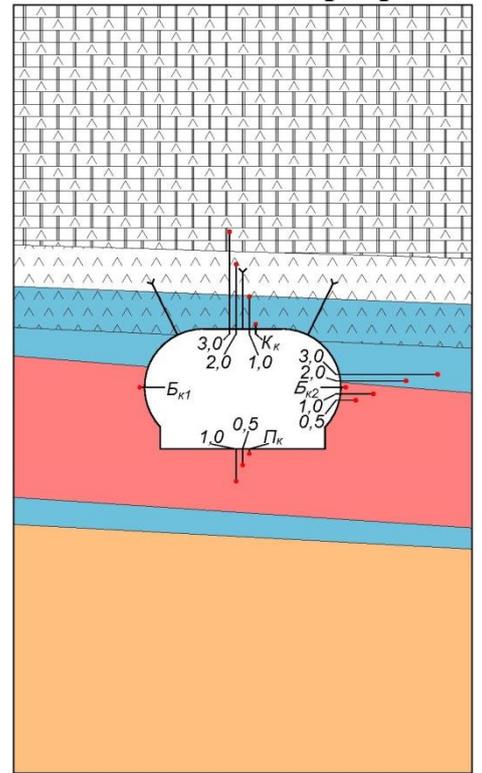
**Деформирование реперов в боках**



**Деформирование реперов в кровле, почве**



**Геологический разрез**



**Условные обозначения**

-  – ангидрит-  
доломитовые породы
-  – ангидрит
-  – ангидрит-галитовая  
порода
-  – каменная соль
-  – сильвинит
-  – карналлитовые  
породы
-  – замок анкера
-  – точка закрепления  
репера

Kк, Пк, Бк1, Бк2 – контурные реперы в кровле (К), почве (П), боках (Б)

0,5...3,0 – глубинные реперы на глубине 0,5...3,0 м

### Экспериментальный участок 3. Замерная станция 5

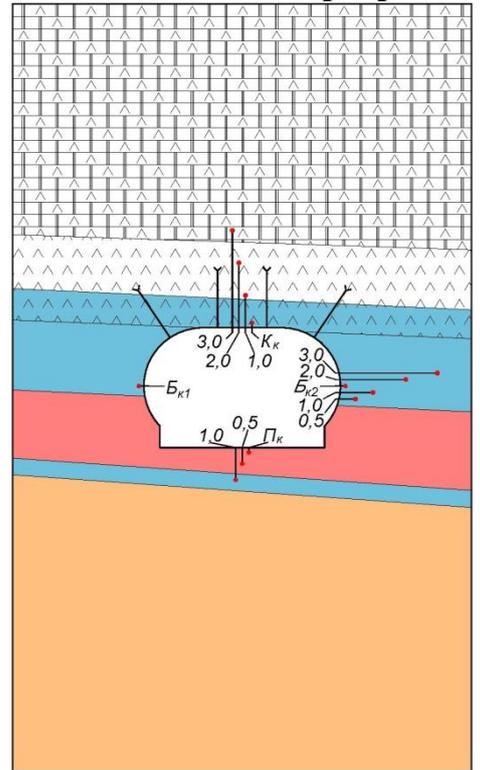
#### Описание станции

Расположение: сб. 8-3р  
 Комбайн: Урал-20Р  
 Ширина хода: 6,0 м  
 Высота хода: 3,7 м  
 Дата заложения: 17.11.2018

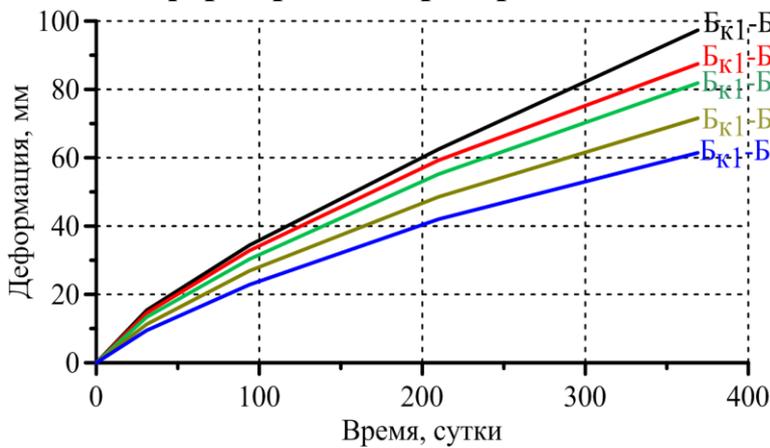
#### Параметры крепления

Тип анкера: КРА-16  
 Длина анкера: 1,8 м  
 Сетка анкерования: 4 ряда, 1,5×1,5 м

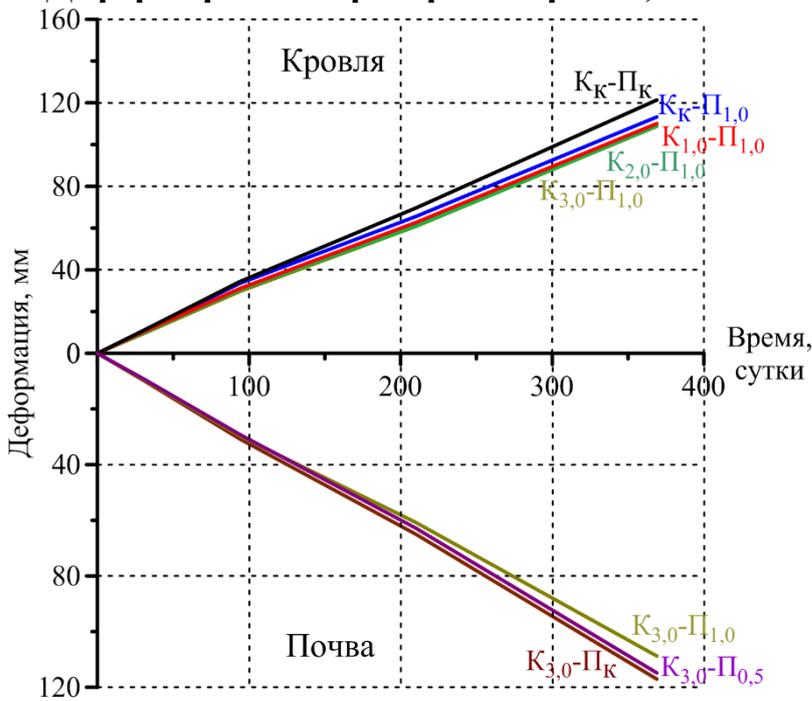
#### Геологический разрез



#### Деформирование реперов в боках



#### Деформирование реперов в кровле, почве



#### Условные обозначения

- ангидрит-доломитовые породы
- ангидрит
- ангидрит-галитовая порода
- каменная соль
- сильвинит
- карналлитовые породы
- замок анкера
- точка закрепления репера

К<sub>к</sub>, П<sub>к</sub>, Б<sub>к1</sub>, Б<sub>к2</sub> – контурные реперы в кровле (К), почве (П), боках (Б)

0,5...3,0 – глубинные реперы на глубине 0,5...3,0 м

**Экспериментальный участок 3. Замерная станция 6**

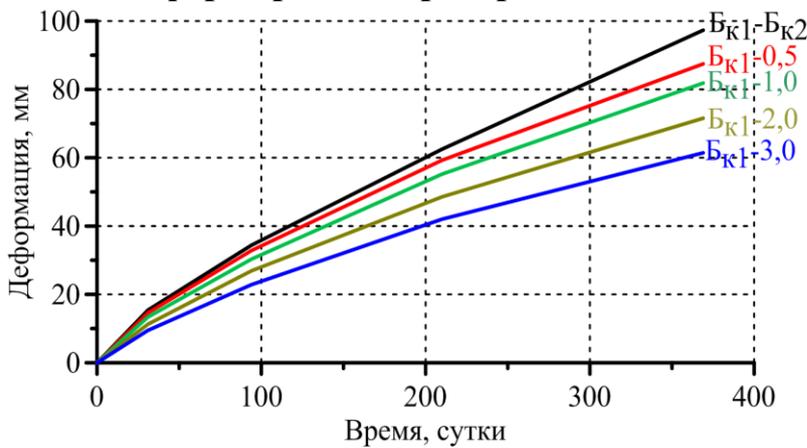
**Описание станции**

**Расположение:** сб. 8-3р  
**Комбайн:** Урал-20Р  
**Ширина хода:** 6,0 м  
**Высота хода:** 3,7 м  
**Дата заложения:** 17.11.2018

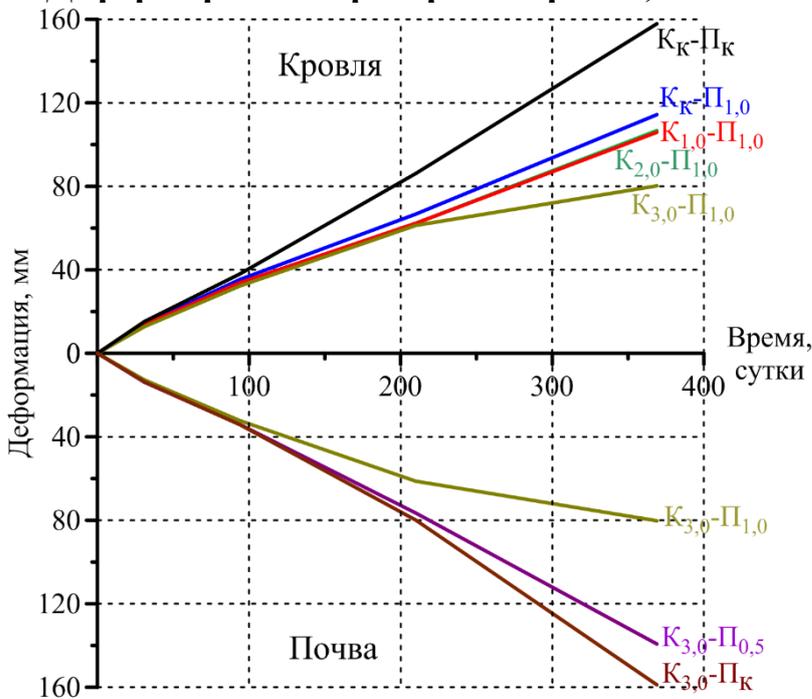
**Параметры крепления**

**Тип анкера:** КРА-16  
**Длина анкера:** 1,8 м  
**Сетка анкерования:** 4 ряда, 1,5×1,5 м

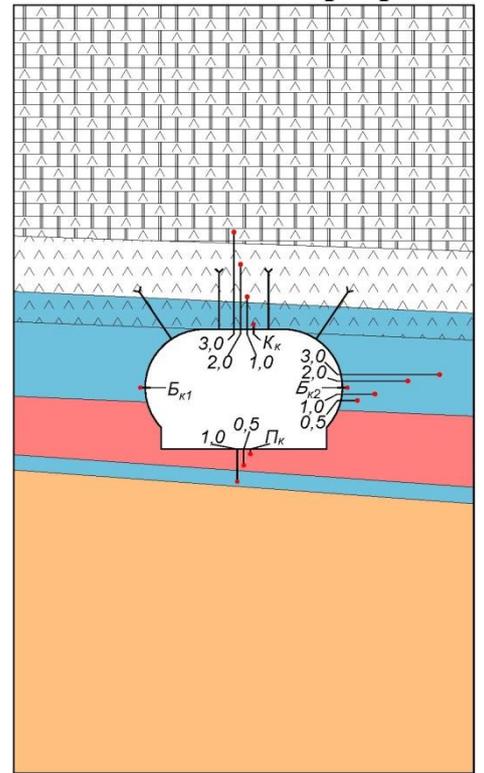
**Деформирование реперов в боках**



**Деформирование реперов в кровле, почве**



**Геологический разрез**



**Условные обозначения**

- ангидрит-доломитовые породы
- ангидрит
- ангидрит-галитовая порода
- каменная соль
- сильвинит
- карналлитовые породы
- замок анкера
- точка закрепления репера

Кк, Пк, Бк1, Бк2 – контурные реперы в кровле (К), почве (П), боках (Б)

0,5...3,0 – глубинные реперы на глубине 0,5...3,0 м

**Экспериментальный участок 4. Замерная станция 7**

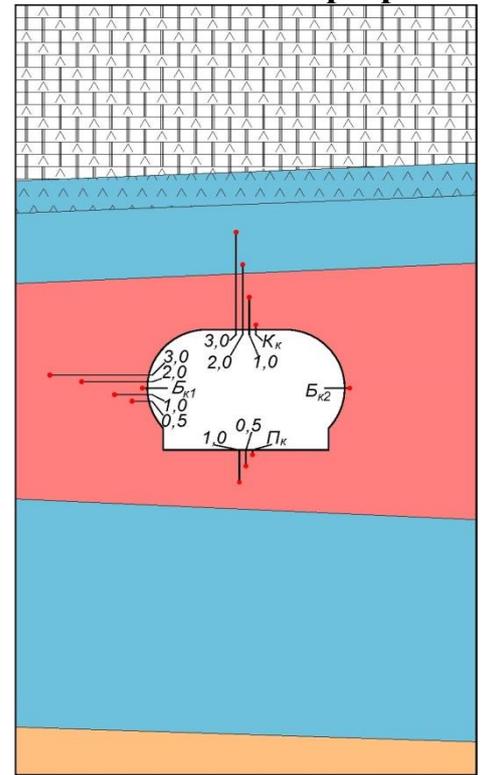
**Описание станции**

**Расположение:** сб. 6-2р  
**Комбайн:** Урал-20Р  
**Ширина хода:** 6,0 м  
**Высота хода:** 3,7 м  
**Дата заложения:** 17.11.2018

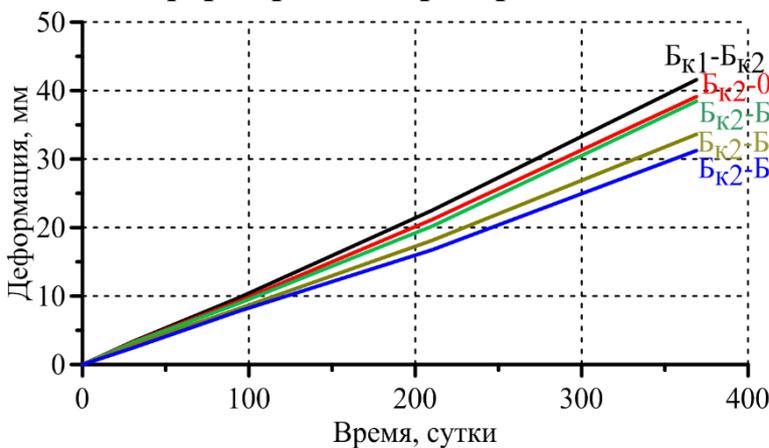
**Параметры крепления**

**Тип анкера:** –  
**Длина анкера:** –  
**Сетка анкерования:** –

**Геологический разрез**



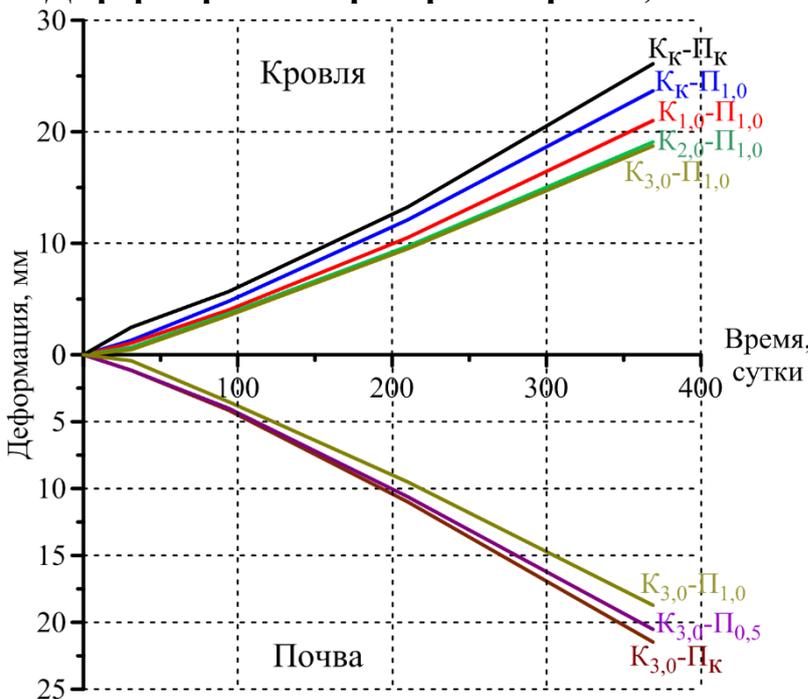
**Деформирование реперов в боках**



**Условные обозначения**

- ангидрит-доломитовые породы
- ангидрит-галитовая порода
- каменная соль
- сильвинит
- карналлитовые породы
- замок анкера
- точка закрепления репера

**Деформирование реперов в кровле, почве**



Кк, Пк, Бк1, Бк2 – контурные реперы в кровле (К), почве (П), боках (Б)

0,5...3,0 – глубинные реперы на глубине 0,5...3,0 м

**Экспериментальный участок 4. Замерная станция 8**

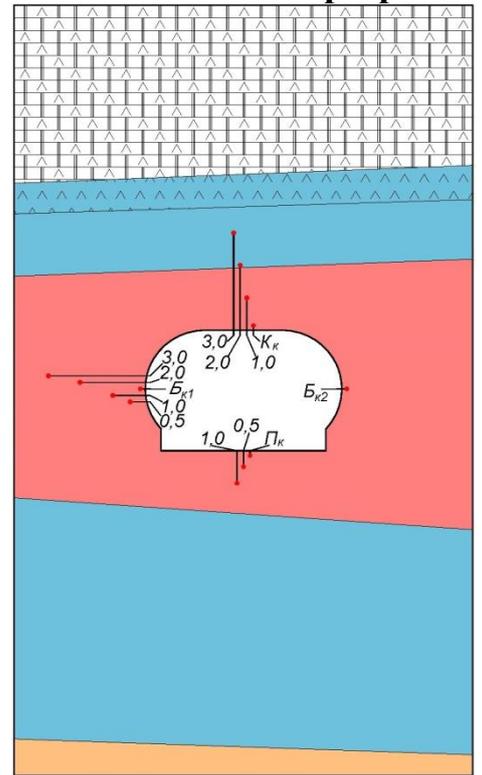
**Описание станции**

**Расположение:** сб. 6-2р  
**Комбайн:** Урал-20Р  
**Ширина хода:** 6,0 м  
**Высота хода:** 3,7 м  
**Дата заложения:** 17.11.2018

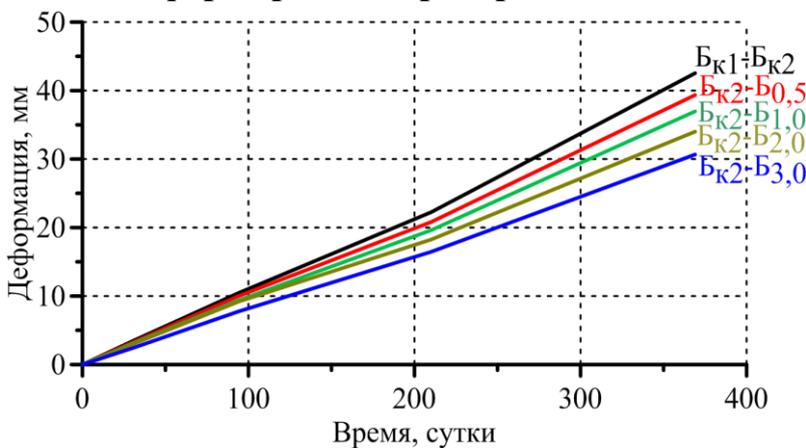
**Параметры крепления**

**Тип анкера:** –  
**Длина анкера:** –  
**Сетка анкерования:** –

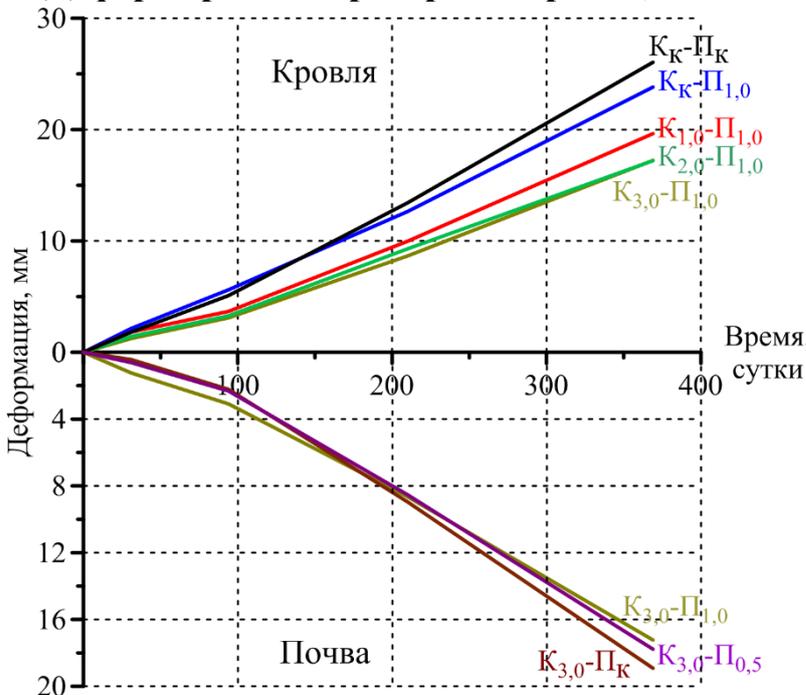
**Геологический разрез**



**Деформирование реперов в боках**



**Деформирование реперов в кровле, почве**



**Условные обозначения**

- ангидрит-доломитовые породы
- ангидрит-галитовая порода
- каменная соль
- сильвинит
- карналлитовые породы
- замок анкера
- точка закрепления репера

Кк, Пк, Бк1, Бк2 – контурные реперы в кровле (К), почве (П), боках (Б)

0,5...3,0 – глубинные реперы на глубине 0,5...3,0 м