

На правах рукописи



Бельтюков Николай Леонидович

**РАЗРАБОТКА СКВАЖИННОГО МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ
НАПРЯЖЕНИЙ В МАССИВЕ ГОРНЫХ ПОРОД
НА ОСНОВЕ ЭФФЕКТА КАЙЗЕРА**

Специальность 25.00.20 «Геомеханика, разрушение горных пород,
рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Пермь – 2018

Работа выполнена в филиале Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук «Горный институт Уральского отделения Российской академии наук» («ГИ УрО РАН») и Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет».

Научный руководитель: **Асанов Владимир Андреевич,**
доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией физических процессов освоения георесурсов «ГИ УрО РАН»

Официальные оппоненты: **Леонтьев Аркадий Васильевич,**
доктор технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории горной информатики Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт горного дела им. Н.А. Чинакала Сибирского отделения Российской академии наук (ИГД СО РАН)

Николенко Петр Владимирович,
кандидат технических наук, доцент кафедры физических процессов горного производства и геоконтроля Горного института Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» (НИТУ «МИСиС»)

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук (ИПКОН РАН)

Защита диссертации состоится «___» _____ 2019 г. в ___ ч. на заседании диссертационного совета Д 004.036.02 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук (ПФИЦ УрО РАН) по адресу: 614007, Пермский край, г. Пермь, ул. Сибирская, д. 78-А, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке «ГИ УрО РАН» и на сайте «ГИ УрО РАН» <http://www.mi-perm.ru/>.

Отзывы необходимо направлять по адресу: 614007, Пермский край, г. Пермь, ул. Сибирская, д. 78-А. Тел.: +7(342)216-09-86, e-mail: bba@mi-perm.ru.

Автореферат разослан «___» _____ 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
к.г.-м.н., доцент



Бачурин Б.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. Истощение запасов действующих горных предприятий требует вовлечения в разработку новых участков месторождений полезных ископаемых, что зачастую сопровождается увеличением глубины ведения горных работ и ухудшением горно-геологических условий. Вследствие этого повышенное горное давление и сдвигание массива могут приводить к нарушению устойчивости горных выработок и развитию аварийных ситуаций. Поэтому важной задачей является оперативное получение достоверной информации о природном напряженном состоянии массива пород, необходимой для прогноза опасных проявлений горного давления и параметрического обеспечения геомеханических расчетов.

На сегодняшний день существуют два основных инструментальных метода измерения напряжений: гидроразрыв скважины и метод полной разгрузки в скважине. Совершенствование данных методов идет непрерывно, в результате чего удалось добиться высокой степени достоверности результатов. Однако в квазипластичных породах из-за ярко выраженной ползучести их точность ограничена рамками применяемой упругой модели. Кроме того, использование этих методов затруднено в условиях слоистых и трещиноватых массивов. Также измерение деформаций на малой базе в методе разгрузки может приводить к значительному разбросу результатов в крупнозернистых породах и скальных массивах блочного строения. В связи с этим методы на основе акустоэмиссионного эффекта памяти в горных породах, позволяющие определять напряжения в перечисленных сложных условиях, представляют особый интерес.

Эффект Кайзера в горных породах заключается в отсутствии акустической эмиссии (АЭ) при циклическом нагружении пород до превышения уровня максимальной нагрузки предыдущего цикла, а также в последующем резком увеличении параметра активности АЭ. Существуют две принципиальные схемы реализации методов определения напряжений на основе данного явления: испытание образцов керна и нагружение стенок скважины в массиве. При использовании гидродомкрата во втором варианте осуществляется разгрузка и восстановление компоненты поля напряжений, действующей в направлении оси нагружения. В этом случае нивелируется проблема несоответствия условий испытаний керна в лаборатории и напряженного состояния пород в массиве. Поэтому тема диссертационной работы, посвященная разработке метода измерения напряжений на основе эффекта Кайзера при нагружении околоскважинного пространства гидродомкратом, является актуальной.

Диссертационные исследования выполнены в рамках проектов РФФИ № 12-05-31482 «Оценка влияния неоднородного строения продуктивной толщи на несущую способность горнотехнических объектов», 13-05-96029 «Экспериментальные и теоретические исследования длительной устойчивости несущих элементов камерной системы разработки калийных пластов», 17-45-590681 «Экспериментально-теоретические подходы к оценке долговременной устойчивости подземных горнотехнических объектов»; в рамках проекта УрО РАН № 12-П-5-1007 «Проблемы устойчивости структурно-неоднородных элементов

горнотехнических систем»; по гранту Правительства Российской Федерации (Постановление № 220 от 9 апреля 2010 г.), договор № 14.В25.31.0006 от 24 июня 2013 года.

Целью работы является разработка и обоснование скважинного метода определения главных компонент поля напряжений в массиве горных пород на основе эффекта Кайзера.

Идея работы заключается в использовании закономерностей изменения параметров акустической эмиссии при нагружении пород околоскважинного пространства гидродомкратом для оценки величины компоненты естественного поля напряжений, действующей в направлении нагружения.

Основные задачи исследований:

1) разработать аппаратный комплекс и методику проведения измерений напряжений гидродомкратом в скважинах на основе использования эффекта Кайзера;

2) провести лабораторные и натурные исследования проявления эффекта Кайзера в породах околоскважинного пространства при нагружении гидродомкратом;

3) выполнить численное моделирование напряженного состояния пород в окрестности измерительной скважины при нагружении ее стенок гидродомкратом;

4) выполнить лабораторные исследования проявления эффекта Кайзера при режимах нагружения, моделирующих напряженное состояние пород в окрестности измерительной скважины;

5) провести апробацию разработанного метода измерения напряжений в различных горно-геологических условиях.

Методы исследований предусматривали комплексный подход к решению поставленных задач и включали: анализ и обобщение научного и практического опыта по проблеме использования эффекта Кайзера для измерения напряжений в массиве горных пород; разработку измерительной аппаратуры; численное и физическое моделирование напряженного состояния пород околоскважинной области; стендовые и натурные эксперименты по измерению напряжений.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Установлено, что в процессе нагружения пород околоскважинного пространства гидродомкратом параметр активности акустической эмиссии скачкообразно увеличивается, когда давление на стенки скважины достигает значения компоненты поля напряжений, действующей в направлении нагружения. При дальнейшем повышении давления в массиве соляных пород величина активности акустической эмиссии продолжает увеличиваться, а в трещиноватом массиве скальных пород – резко снижается до фоновых значений.

2. Доказано, что начало возникновения акустической эмиссии при нагружении пород околоскважинного пространства гидродомкратом в условиях массива квазипластичных пород в зависимости от направления нагружения обусловлено одним из двух факторов: 1) активизацией трещин в областях сжатия, когда давление на стенки скважины достигает величины компоненты поля

напряжений, действующей в направлении нагружения; 2) образованием трещин разрыва, когда давление на стенки скважины достигает величины, необходимой для возникновения растягивающих тангенциальных напряжений на контуре скважины.

3. Разработана методика измерения напряжений, основанная на использовании эффекта Кайзера в породах нагружаемого околоскважинного пространства, позволяющая оценить величину и направление компонент поля напряжений в условиях массивов квазипластичных и трещиноватых скальных пород.

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций обеспечивается: строгой постановкой теоретических задач; использованием при математическом моделировании апробированного метода конечных элементов; согласованностью численного расчета напряжений с результатами аналитического решения подобных задач; выполнением натурных и лабораторных экспериментов с помощью поверенных приборных комплексов и в соответствии с установленными методиками; представительным объемом инструментальных измерений; удовлетворительной сходимостью результатов определения напряжений разными методами.

Научная новизна:

1. В процессе нагружения стенок скважины гидродомкратом установлены закономерности проявления эффекта Кайзера в породах околоскважинного пространства, позволяющие оценить величину компоненты поля напряжений, действующую в направлении нагружения.

2. Разработана трехмерная численная модель напряженно-деформированного состояния пород в окрестности измерительной скважины при нагружении гидродомкратом с учетом контактного взаимодействия нагружающих пластин и стенок скважины.

3. Для случая нагружения гидродомкратом стенок скважины в массиве квазипластичных пород определены условия возникновения акустической эмиссии в зависимости от направления нагружения и величин главных компонент естественного поля напряжений, действующих перпендикулярно оси скважины.

4. Установлен эффект Кайзера при восстановлении осевой компоненты σ_3 поля напряжений образца соляных пород, разгруженной после исходного напряженного состояния по схеме Беккера ($\sigma_1 = \sigma_2 > \sigma_3$).

5. Предложена схема отдельного измерения компонент поля напряжений, основанная на установленных закономерностях изменения параметров акустической эмиссии при нагружении стенок скважины гидродомкратом.

Практическая ценность работы состоит в разработке методики и технических средств определения напряжений в массиве горных пород, применение которых позволяет решать обширный круг задач по геомеханическому обеспечению безопасной эксплуатации подземных сооружений; установлении закономерностей распределения напряжений в нетронутым массиве и элементах системы разработки на рудных месторождениях: Соколовско-Сарбайское, Верхнекамское месторождение калийно-магниевых солей, месторождение Жаман-Айбат, Гремячинское месторождение калийных солей.

Личный вклад автора заключается в:

- разработке аппаратного комплекса и методики проведения измерений напряжений гидродомкратом в скважинах;
- выполнении лабораторных и натуральных исследований проявления эффекта Кайзера в породах околоскважинного пространства при нагружении гидродомкратом;
- разработке метода расчета напряженного состояния пород в окрестности измерительной скважины при нагружении ее стенок гидродомкратом, выполнении численных экспериментов, их обработке и анализе;
- выполнении лабораторных исследований проявления эффекта Кайзера на образцах соляных пород при различных режимах нагружения;
- выполнении натуральных экспериментов по измерению напряжений на рудных месторождениях, их обработке и анализе.

Реализация результатов работы. Результаты данной работы использовались для параметрического обеспечения ряда геомеханических расчетов, связанных с решением следующих задач: оценкой безопасных условий подработки водозащитной толщи на руднике СКРУ-3 ПАО «Уралкалий»; уточнением параметров применяемой системы разработки на руднике «Жомарт» (ТОО «Казахмыс»); разработкой геомеханической модели Сарбайского карьера (АО «ССГПО»).

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались на Международном научном симпозиуме «Неделя горняка» (г. Москва, 2010, 2016 г.), Научной сессии ГИ УрО РАН «Стратегия и процессы освоения георесурсов» (г. Пермь, 2013, 2015 г.), Всероссийской научно-технической конференции «Нефтегазовое и горное дело» (г. Пермь, 2011 г.), Всероссийской междисциплинарной молодежной научной конференции «Информационная школа молодого ученого» (г. Екатеринбург, 2012 г.), Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы и перспективы развития Верхнекамья» (г. Пермь-Березники, 2013 г.), Всероссийской научно-технической конференции «Геомеханика в горном деле» (г. Екатеринбург, 2014 г.), Всероссийской научной конференции «Геодинамика и напряженное состояние недр Земли» (г. Новосибирск, 2015, 2017 г.), 7-м Международном симпозиуме по измерению напряжений (г. Тампере, Финляндия, 2016 г.), Российско-Китайском научно-техническом форуме «Проблемы нелинейной геомеханики на больших глубинах» (г. Екатеринбург-Пермь, 2018 г.).

Публикации. По результатам проведенных исследований опубликовано 15 работ, в том числе 6 из списка изданий, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, содержит 159 страниц машинописного текста, включая 98 рисунков, 2 таблицы и список использованной литературы из 102 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В **первой главе** выполнен обзор современного состояния методов измерения напряжений в массиве горных пород. По результатам обзора сделан вывод, что методы на основе эффекта Кайзера в горных породах обладают рядом достоинств перед остальными техниками. К их преимуществам следует отнести простоту выполняемых операций, высокую скорость получения результатов, отсутствие сложных высокоточных измерений деформаций и необходимости применения аппарата теории упругости. Наибольший вклад в развитие данных методов внесли Лавров А.В., Лыков К.Г., Николенко П.В., Токсаров В.Н., Шкуратник В.Л., Holcomb D.J., Kaiser J., Li C., Lord A.E., Momayez M., van Munster J.G., Pestman B.J., Seto M., Villaescusa E. и др. Однако недостаточная теоретическая изученность вопроса применения эффекта Кайзера для определения напряжений в массиве пород и тот факт, что до настоящего времени не сформировано единого мнения касательно механизмов его возникновения, накладывают существенные ограничения на практическое использование этих методов.

С целью успешного использования эффекта Кайзера при оценке напряжений в массиве пород необходимо ясное понимание физических механизмов, обуславливающих данное явление. В связи с этим выполнен анализ различных моделей формирования эффекта в горных породах и методов измерения напряжений на их основе. Показано, что подход, использующий эффект Кайзера в породах околоскважинной области при нагружении гидродомкратом, является более предпочтительным, т.к. в этом случае нивелируется проблема несоответствия условий нагружения в тестовом цикле первоначальному напряженному состоянию пород в массиве. Также метод позволяет независимо оценить главные компоненты естественного поля напряжений, действующие перпендикулярно оси скважины. Анализ предшествующих работ по данной теме показал, что их основной целью являлось установление самого факта наличия эффекта Кайзера в породах околоскважинной области. Поэтому исследования причин его формирования, интерпретации и сравнения результатов с другими методами определения напряжений, как правило, не проводилось.

Вторая глава посвящена разработке аппаратного и методического обеспечения предлагаемого скважинного метода измерения напряжений, суть которого заключается в разгрузке некоторой области массива пород посредством бурения скважины диаметром 76 мм и повторном нагружении ее стенок гидродомкратом Гудмана (рис. 1). Особенностью конструкции данного гидродомкрата является возможность приложения нагрузки к породам околоскважинного пространства в одной плоскости, что позволяет оценить величины компонент поля напряжений в различных направлениях. Для приема импульсов акустической эмиссии на одной из нагружающих пластин установлен пьезоэлектрический преобразователь с резонансной частотой 165 кГц. Также в состав комплекса входит портативный прибор регистрации акустической эмиссии,

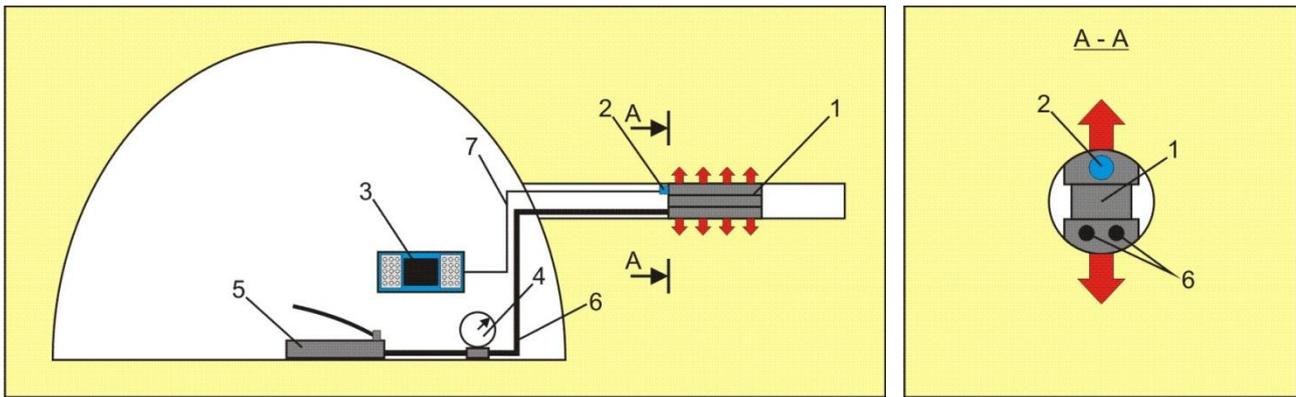


Рис. 1. Схема измерения компонент поля напряжений гидродомкратом в горизонтальной скважине: 1 – гидродомкрат Гудмана; 2 – преобразователь АЭ (резон. част. 165 кГц); 3 – прибор регистрации АЭ; 4 – манометр; 5 – ручной насос; 6 – высоконапорные рукава; 7 – коаксиальный кабель

позволяющий осуществлять синхронную запись АЭ-сигнала и давления в гидросистеме.

С целью исключения взаимного влияния замерных точек нагружение стенок скважины выполняется с шагом 300 мм. По результатам испытаний для каждой точки строятся графики изменения АЭ-параметров и давления гидродомкрата на стенки скважины P от времени (рис. 2). Величина давления гидродомкрата представляет собой давление в гидросистеме P_h с учетом коэффициента передачи давления на стенки скважины k ($P = k \cdot P_h$). Коэффициент k в случае гидродомкрата конструкции Гудмана составляет 0,93. За величину компоненты поля напряжений, действующую в направлении нагружения, принимают значение давления на стенки скважины $P_{эк}$, при котором происходит резкое увеличение АЭ-параметров: активности АЭ – количества импульсов в единицу времени; или суммарного количества импульсов, накопленных с момента начала регистрации.

На рис. 3 показан разработанный аппаратный комплекс для измерения напряжений в породах околоскважинного пространства с использованием эффекта Кайзера.

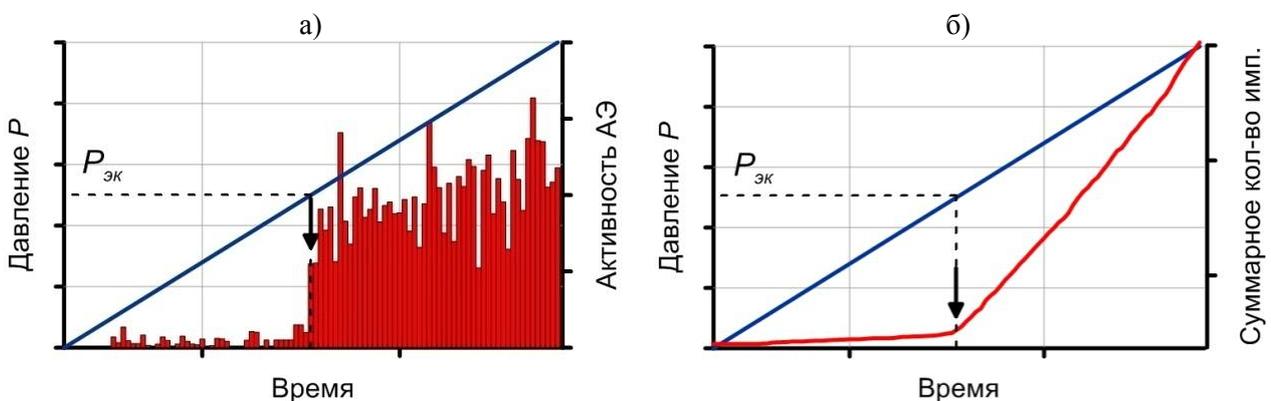


Рис. 2. Идеализированные зависимости АЭ-параметров и давления гидродомкрата от времени в первом цикле нагружения стенок скважины: а – количество импульсов в единицу времени; б – суммарное количество импульсов (стрелками показан момент проявления эффекта Кайзера)

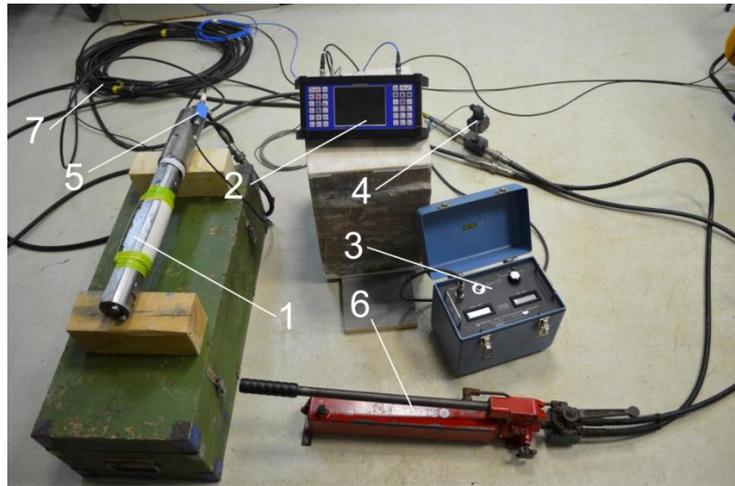


Рис. 3. Сквaziнный комплекс для измерения напряжений в массиве горных пород:
 1 – гидродомкрат Гудмана; 2 – прибор регистрации АЭ; 3 – индикатор деформаций стенок скважины;
 4 – электронный манометр; 5 – предусилитель сигналов АЭ; 6 – гидравлический насос;
 7 – высоконапорные рукава

На следующем этапе были выполнены натурные исследования проявления эффекта Кайзера в породах околоскважинной области в условиях нетронутого массива соляных пород. Эксперименты заключались в циклическом нагружении гидродомкратом стенок горизонтальной скважины за зоной опорного давления в вертикальном направлении. В результате установлено, что в первом цикле нагружения на начальной стадии деформирования наблюдается достаточно высокий уровень активности АЭ, обусловленный разрушением нагружающими пластинами неровностей стенок скважины и бурового штыба. Данная стадия прослеживается на относительно низких величинах давления (до 1-3 МПа) и не принималась во внимание при анализе результатов. Далее активность АЭ соответствует уровню фона и, начиная с некоторого значения давления гидродомкрата $P_{эк}$, происходит интенсивное увеличение рассматриваемого параметра (рис. 4, а). Установлено, что величина давления на стенки скважины при проявлении эффекта Кайзера примерно соответствует значению вертикальных напряжений ненарушенного массива (γH) для данного района. С последующим повышением нагрузки на породы околоскважинного пространства активность АЭ продолжает увеличиваться. В случае разгрузки и повторного нагружения акустическая эмиссия отсутствует до тех пор, пока давление гидродомкрата не превысит максимальное значение предыдущего цикла. При этом возникает резкое восстановление активности АЭ до уровня, достигнутого ранее.

После этого были выполнены натурные эксперименты по нагружению стенок горизонтальной скважины в вертикальном направлении в условиях трещиноватого массива скальных пород, представленном в основном песчаниками, реже алевролитами и аргиллитами. Установлено, что на начальной стадии нагружения также наблюдается высокий уровень активности АЭ, обусловленный разрушением бурового штыба и неровностей стенок скважины. Далее с повышением нагрузки на породы околоскважинного массива активность АЭ

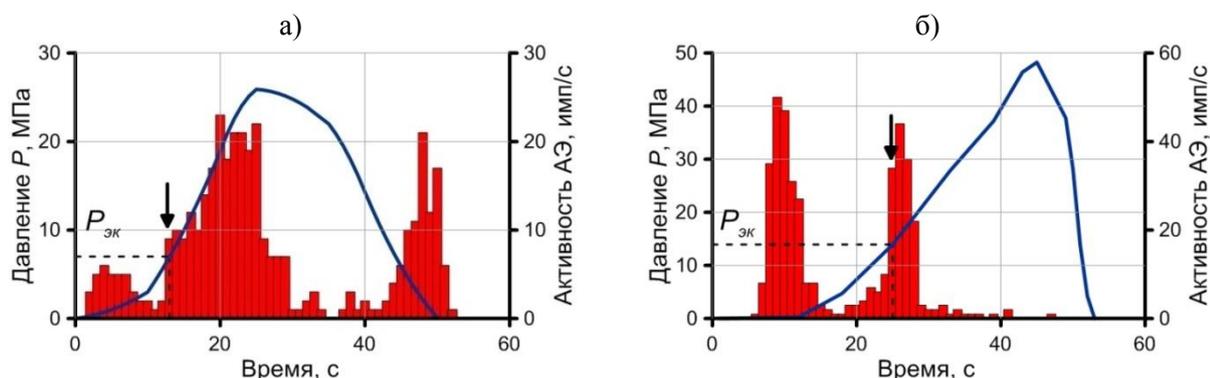


Рис. 4. Характерные графики изменения активности АЭ и давления гидродомкрата от времени в первом цикле нагружения стенок горизонтальной скважины в массиве:
 а – соляных пород; б – трещиноватых скальных пород

снижается до уровня фона и вновь резко увеличивается, когда давление достигает значения, соответствующего величине γH для данного района (рис. 4, б). Дальнейшее нагружение стенок скважины приводит к снижению активности АЭ до уровня фоновых значений. Таким образом, в массиве песчаника по сравнению с соляными породами обнаружен другой характер проявления эффекта Кайзера. Данное обстоятельство можно объяснить различными механизмами его формирования в околоскважинной области массива квазипластичных и трещиноватых скальных пород.

С целью обоснования положения, что эффект Кайзера возникает при давлении, соответствующем величине компоненты поля напряжений в направлении нагружения гидродомкратом, были выполнены стендовые эксперименты по измерению напряжений в крупноразмерных породных блоках. Для проведения экспериментов отбирались монолиты соляных пород, из которых были изготовлены блоки размером $0,4 \times 0,4 \times 0,3$ м. С помощью сервогидравлического пресса «Zwick-ToniNorm 2030» производилось их нагружение в режиме одноосного сжатия (рис. 5, а). После выдержки блока под постоянной нагрузкой в течение 60 мин осуществлялось бурение скважины (рис. 5, б) и нагружение ее стенок гидродомкратом в направлении оси сжатия блока (рис. 5, в).

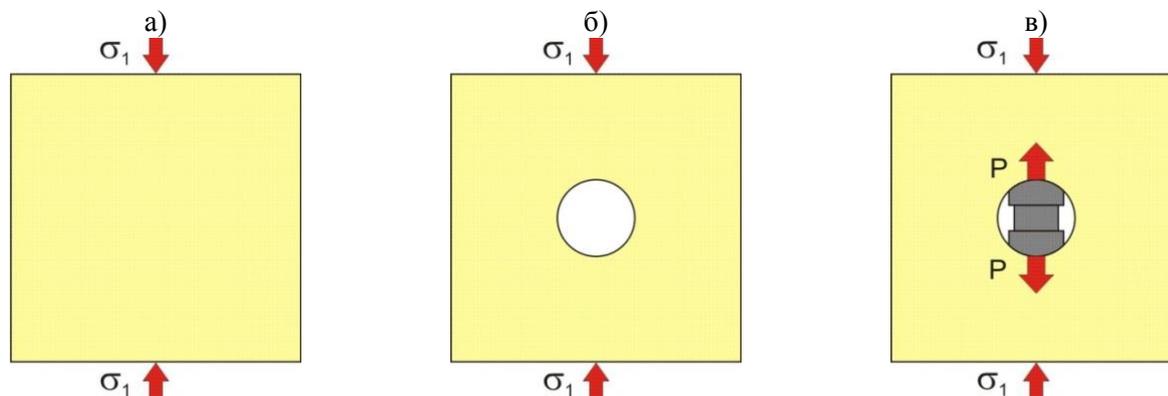


Рис. 5. Схема стадий выполнения стендовых экспериментов по измерению напряжений, действующих в одноосно нагруженном блоке горной породы: а – первоначальный цикл нагружения блока; б – локальная разгрузка некоторой области скважиной; в – нагружение околоскважинной области блока гидродомкратом

Стендовые эксперименты выполнялись при следующих величинах осевой нагрузки: блоки 1 и 3 – 10,0 МПа; блок 2 – 13,0 МПа; блок 4 – 8,0 МПа. По результатам экспериментов установлено, что в 3-х блоках из 4-х эффект Кайзера возникает, когда давление гидродомкрата достигает величины внешней нагрузки, действующей на блок.

В третьей главе представлены результаты численного моделирования напряжений вокруг скважины, выполненного методом конечных элементов с целью исследования характера изменения напряженно-деформированного состояния пород околоскважинного пространства в процессе нагружения гидродомкратом. Трехмерное моделирование проводилось для условий горизонтальной скважины, пробуренной в нетронутом массиве соляных пород. Вертикальное напряжение σ_1 составляло 8,0 МПа, в горизонтальных направлениях были заданы напряжения $\sigma_2 = \sigma_3 = 4,8$ МПа. Расчет напряжений вокруг скважины производился для трех случаев (рис. 6): 1) без нагружения стенок скважины; 2) при нагружении гидродомкратом в направлении максимального главного напряжения (σ_1); 3) при нагружении гидродомкратом в направлении минимального главного напряжения (σ_3). В двух последних случаях моделирование осуществлялось с учетом контактного взаимодействия нагружающих пластин гидродомкрата и стенок скважины. Результаты моделирования распределения напряжений в околоскважинной области представлены в цилиндрической системе координат (рис. 6, а), где σ_r – радиальное напряжение; σ_θ – тангенциальное напряжение; σ_z – осевое напряжение.

На рис. 7 в виде идеализированных диаграмм отображена история изменения напряженного состояния пород, расположенных вблизи контура скважины, при нагружении стенок гидродомкратом в направлении максимальных главных напряжений σ_1 и σ_3 . В ненарушенном массиве по направлению

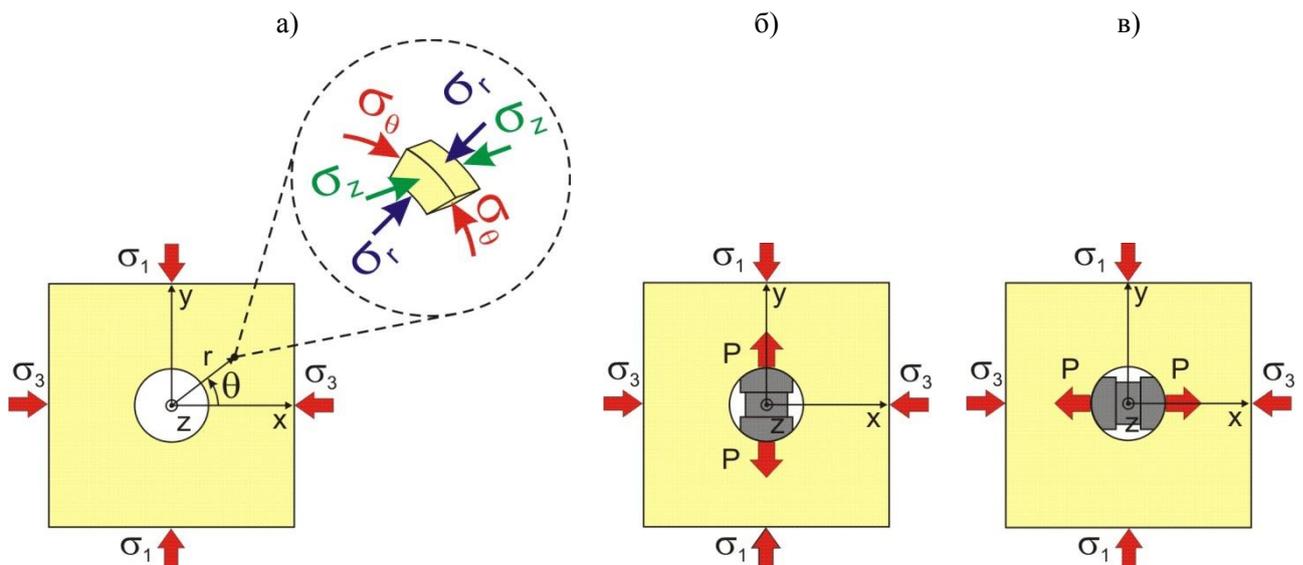


Рис. 6. Схема приложения нагрузок к массиву ($\sigma_1 = 8,0$ МПа; $\sigma_2 = \sigma_3 = 4,8$ МПа, напряжение σ_2 действует вдоль оси скважины): а – без нагружения стенок скважины ($P = 0,0$ МПа); б – при нагружении гидродомкратом в направлении σ_1 ($P = 8,0$ МПа); в – при нагружении гидродомкратом в направлении σ_3 ($P = 4,8$ МПа)

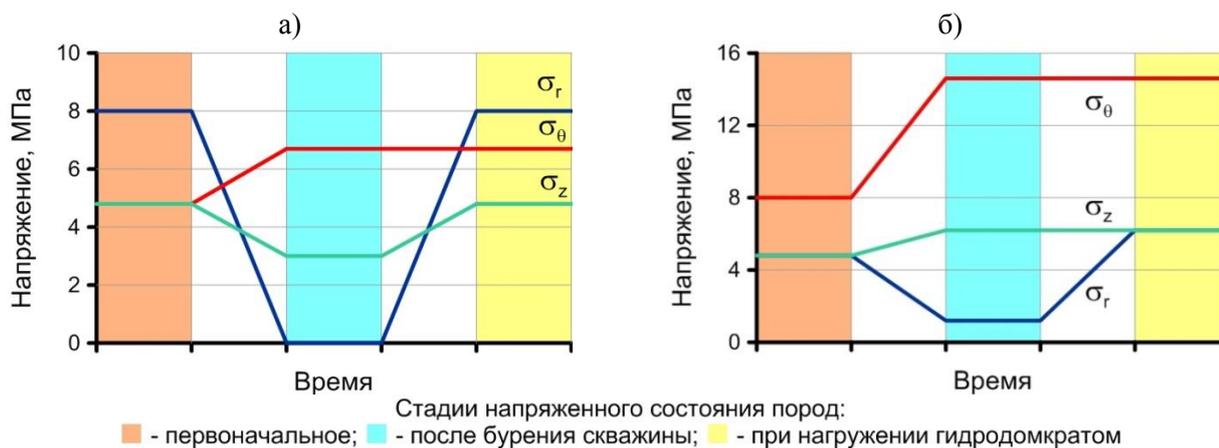


Рис. 7. Идеализированные графики изменения компонент поля напряжений от времени в породах, расположенных вблизи контура скважины, в направлении:
a – максимального главного напряжения σ_1 ; *б* – минимального главного напряжения σ_3

главного напряжения σ_1 максимальной является радиальная компонента σ_r , компоненты σ_θ и σ_z равны между собой и принимают минимальные значения (рис. 7, а). В ненарушенном массиве в направлении главного напряжения σ_3 максимальной является тангенциальная компонента σ_θ , компоненты σ_r и σ_z равны между собой и принимают минимальные значения (рис. 7, б). После бурения скважины радиальная компонента напряжений σ_r на контуре разгружается во всех направлениях, а тангенциальная σ_θ – увеличивается. Причем наибольшая концентрация тангенциальных напряжений возникает со стороны главного напряжения σ_3 , наименьшая – со стороны главного напряжения σ_1 . Осевая компонента σ_z , которая действует вдоль оси скважины, частично разгружается в направлении напряжения σ_1 и увеличивается в направлении σ_3 . С удалением от контура скважины все компоненты стремятся к значениям, соответствующим первоначальному полю напряжений. При нагружении гидродомкратом в направлении σ_1 радиальная σ_r и осевая σ_z компоненты напряжений восстанавливают свои значения, тогда как концентрация тангенциальной компоненты σ_θ сохраняется (рис. 7, а). В случае нагружения в направлении σ_3 радиальная компонента σ_r восстанавливается, а концентрации компонент σ_θ и σ_z остаются неизменными (рис. 7, б).

Анализ результатов моделирования показал, что в процессе нагружения стенок скважины гидродомкратом в областях околоскважинного пространства, расположенных перпендикулярно направлению нагружения, тангенциальная компонента σ_θ уменьшается и принимает отрицательные значения. В свою очередь деформирование соляных пород в режиме растяжения также обладает пластическим характером и сопровождается акустической эмиссией. Таким образом, при нагружении гидродомкратом околоскважинного пространства в соляном массиве имеют место два фактора, обуславливающие увеличение активности АЭ. Первый связан с активизацией микротрещин в областях сжатия, когда давление на стенки скважины достигает величины компоненты поля напряжений, действующей в направлении нагружения (т.е. собственно эффект Кайзера). Второй – с образованием микротрещин разрыва при достижении давлением

критической величины $P_{кр}$, необходимой для возникновения растягивающих тангенциальных напряжений на контуре скважины.

С помощью численных экспериментов установлено, что величина критического давления гидродомкрата $P_{кр}$ зависит от направления нагружения и линейной комбинации главных напряжений:

$$P_{кр} = 0,85 \cdot [3\sigma_3 - \sigma_1 - 4(\sigma_3 - \sigma_1)\sin^2(\theta - \alpha - \pi/2)], \quad (1)$$

где θ – угловая координата точки на контуре скважины, в которой $\sigma_\theta = 0$; α – угол между осью нагружения и направлением главного напряжения σ_3 .

Учитывая форму нагружающих пластин гидродомкрата на основе выражения (1) получена зависимость минимальной величины давления $P_{кр}$ в зависимости от направления нагружения (рис. 8). В связи с тем, что эффект Кайзера в областях сжатия околоскважинного пространства возникает, когда давление гидродомкрата достигает значения радиальной компоненты поля напряжений, изобразим на рис. 8 график изменения последней от угловой координаты. Совместный анализ данных кривых показал, что в случае нагружения гидродомкратом в направлениях близких к главным напряжениям σ_1 и σ_3 давление $P_{эк}$, необходимое для восстановления радиальной компоненты, меньше, чем давление образования микротрещин разрыва ($P_{эк} < P_{кр}$). При ориентации оси нагружения под углами $18 \div 65^\circ$ к максимальному главному напряжению σ_1 давление восстановления радиальной компоненты больше давления образования микротрещин разрыва ($P_{эк} > P_{кр}$), и в таком случае увеличение активности АЭ будет связано со вторым механизмом. Если не учитывать акустическую эмиссию от разрушения неровностей на стенках скважины, трения и других помеховых факторов, то огибающая снизу двух кривых на рис. 8 представляет собой зависимость давления гидродомкрата $P_{АЭ}$, при котором возникает акустическая эмиссия, от направления нагружения. Необходимо отметить, что данная зависимость получена для рассматриваемых условий напряженного состояния соляных пород в нетронутном массиве ($\sigma_1 = 8,0$ МПа и $\sigma_3 = 4,8$ МПа) и в случае иной комбинации главных напряжений примет другой вид.

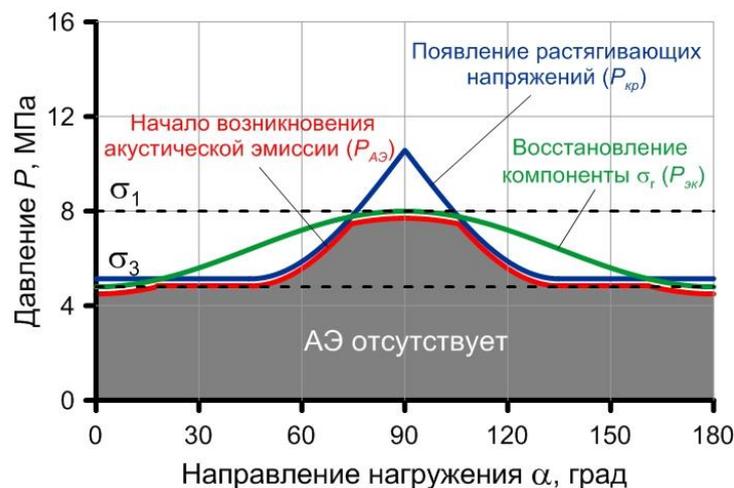


Рис. 8. Диаграмма, характеризующая условия возникновения АЭ в процессе нагружения стенок скважины гидродомкратом при значениях главных напряжений $\sigma_1 = 8,0$ МПа и $\sigma_3 = 4,8$ МПа

Четвертая глава посвящена лабораторным исследованиям проявления эффекта Кайзера и механизмов трещинообразования в соляных породах при условиях, моделирующих историю изменения напряжений, представленную на рис. 7. Физическое моделирование производилось в камере трехосного сжатия «MTS-815» на цилиндрических образцах соляных пород диаметром 100 мм и высотой 200 мм. При этом вертикальная нагрузка, действующая на образец, представляла собой радиальную компоненту поля напряжений в окрестности скважины ($\sigma_{\text{верт}} = \sigma_r$), а боковое давление – среднее значение между тангенциальной и осевой σ_z компонентами ($\sigma_{\text{бок}} = (\sigma_\theta + \sigma_z)/2$). Таким образом, диаграммы на рис. 7 преобразуются в две принципиальные схемы нагружения образцов, представленные на рис. 9 и 11. В случае моделирования изменения напряженного состояния пород, расположенных со стороны главного напряжения σ_3 , были рассмотрены два варианта: с увеличением и без увеличения бокового давления между циклами нагружения (рис. 11).

Испытания образцов по первой схеме заключались в следующем. В первом цикле производилось нагружение образца в режиме Кармана: вертикальная нагрузка составляла 8,0 МПа, боковое давление – 4,8 МПа. Через 20 мин производилась разгрузка напряжения $\sigma_{\text{верт}}$ до величины 1,0 МПа, после чего следовало восстановление первоначальных значений. Установлено, что начало интенсивного увеличения активности АЭ возникает при значениях вертикальной нагрузки несколько меньших, чем в первом цикле (рис. 9). Однако максимальный уровень активности наблюдается, когда напряжение $\sigma_{\text{верт}}$ достигает величины первого цикла. Данный характер изменения активности АЭ соответствует проявлению эффекта Кайзера при циклическом нагружении квазипластичных соляных пород с небольшим временем выдержки между циклами и обусловлен возобновлением роста продольных трещин, образовавшихся в первом цикле (рис. 10, а).

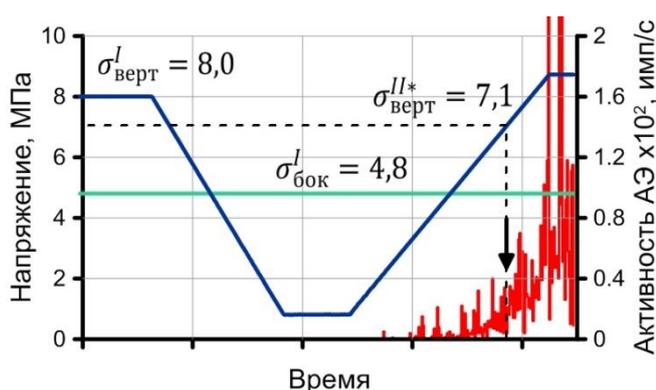


Рис. 9. Пример результатов испытаний образца в камере трехосного сжатия по схеме, моделирующей напряженное состояние пород, расположенных вблизи контура скважины со стороны напряжения σ_1

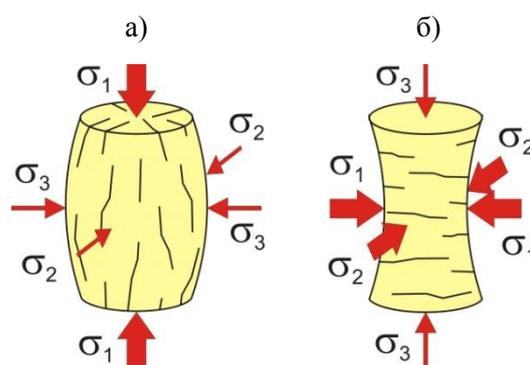


Рис. 10. Схематичное изображение трещин, образующихся при режимах нагружения:
а – $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$; б – $\sigma_1 = \sigma_2 > \sigma_3$;

В случае испытаний образцов по второй схеме в первом цикле производилось нагружение образца в режиме Беккера: вертикальная нагрузка составляла 4,8 МПа, боковое давление – 6,4 МПа. Через 20 мин производилась разгрузка

напряжения $\sigma_{\text{верт}}$ до величины 1,0 МПа, после чего следовало его восстановление. При этом было рассмотрено два варианта: без изменения бокового давления и с увеличением бокового давления до 10,4 МПа между циклами нагружения. Экспериментами установлено, что в первом варианте эффект Кайзера проявляется при достижении вертикальной нагрузкой значений первого цикла (рис. 11, а). В варианте с увеличением бокового давления эффект установлен при более высоких значениях компоненты $\sigma_{\text{верт}}$, чем первоначальные (рис. 11, б). Увеличение активности АЭ при данных схемах нагружения обусловлено закрытием поперечных трещин, образовавшихся в первом цикле (рис. 10, б).

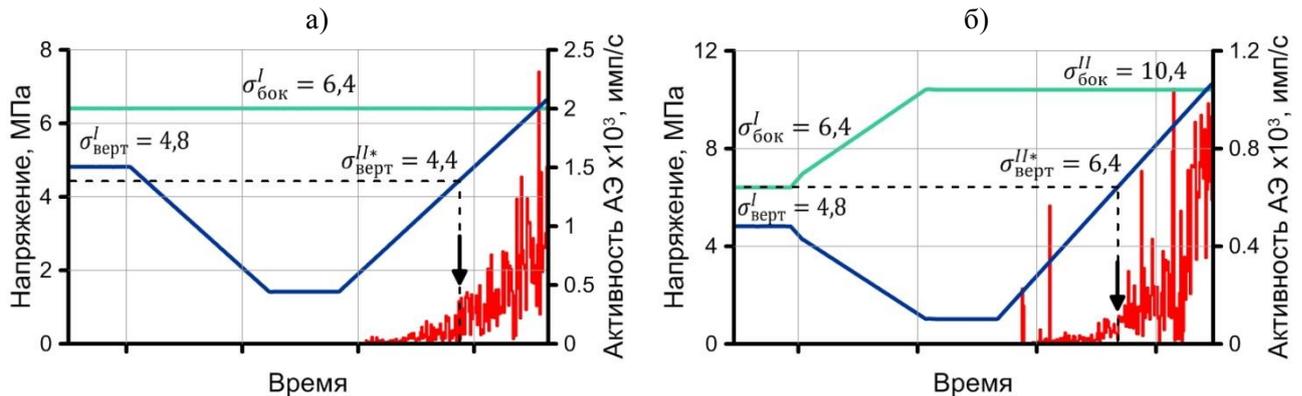


Рис. 11. Примеры результатов испытаний образцов в камере трехосного сжатия по схемам, моделирующим напряженное состояние пород, расположенных вблизи контура скважины со стороны напряжения σ_3 : а – без изменения бокового давления; б – с увеличением бокового давления

Таким образом, по результатам лабораторных экспериментов в камере трехосного сжатия доказано, что в условиях напряженного состояния, испытываемого породами околоскважинного пространства при нагружении гидродомкратом, существует эффект Кайзера. Установлено, что в качестве одного из механизмов формирования эффекта в породах может выступать процесс закрытия трещин, ориентированных перпендикулярно оси нагружения.

В пятой главе представлены результаты определения напряжений разработанным методом в различных горно-геологических условиях. Измерения вертикальной и горизонтальных компонент поля напряжений в нетронутом соляном массиве выполнялись на 10-й западной панели рудника БКПРУ-2, отрабатывающем Верхнекамское месторождение калийных солей (ВКМКС). Эксперименты проводились в двух взаимно-перпендикулярных выработках, находящихся за зоной влияния очистных работ (замерные станции № 1 и 2). Установлено, что ширина зоны опорного давления вблизи контура выработок составляет в среднем 1,2 м, а максимальные значения вертикальной компоненты поля напряжений в ней достигают 14-16 МПа (рис. 12). За зоной опорного давления среднее значение вертикального напряжения около 8,5 МПа. Величина \mathcal{N} для данного района работ составляет 7,5 МПа. Характер распределения горизонтальных напряжений, измеренных в двух взаимно-перпендикулярных

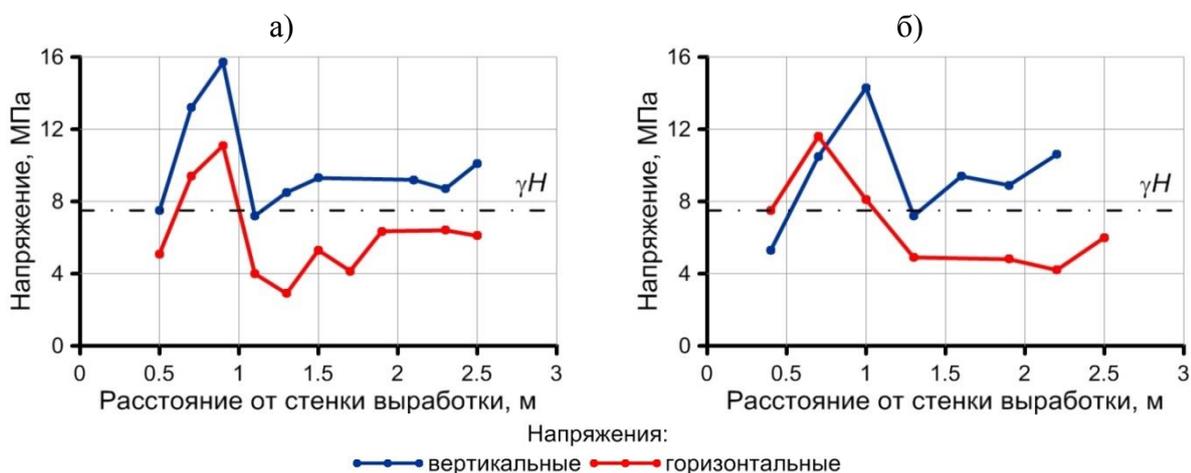


Рис. 12. Распределение вертикальной и горизонтальных компонент поля напряжений в горизонтальных скважинах, пробуренных в нетронутом массиве 10-й западной панели рудника БКПРУ-2: *а* – замерная станция № 1; *б* – замерная станция № 2

направлениях, качественно повторяет установленную для вертикальной компоненты закономерность. Среднее значение коэффициента бокового распора равно 0,6.

По результатам измерений в междукammerном целике (замерная станция № 3) установлено, что максимальная величина вертикальных напряжений в зоне опорного давления достигает 18,0 МПа, а ее ширина несколько больше, чем в нетронутом массиве, и составляет 1,5 м (рис. 13). В центральной части целика уровень вертикальных напряжений в среднем около 10-11 МПа, что на 30-45 % больше веса толщи вышележащих пород.

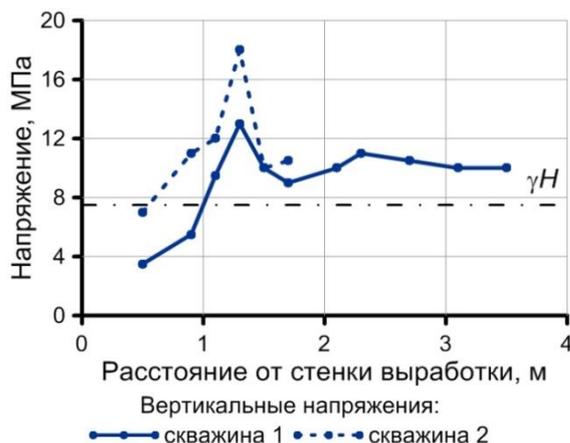


Рис. 13. Распределение вертикальных напряжений в горизонтальных скважинах, пробуренных в междукammerном целике на 10-й западной панели рудника БКПРУ-2

Также выполнены измерения вертикальных напряжений в целиках рудника «Жомарт», обрабатывающего месторождение медистых песчаников Жаман-Айбат. Разработка запасов на руднике ведется панельно-столбовой системой. Измерения проводились на двух экспериментальных участках, расположенных в пределах панели 47. Всего было пробурено 6 горизонтальных скважин глубиной 6,0 м: три скважины – в барьерном целике, три скважины – в

междукамерном целике № 120. По результатам измерений установлено, что распределение осредненных вертикальных напряжений по сечению барьерного целика имеет волнообразный характер, при этом диапазон разброса минимальных и максимальных значений составляет, соответственно, 15-20 и 30-35 МПа (рис. 14, а).

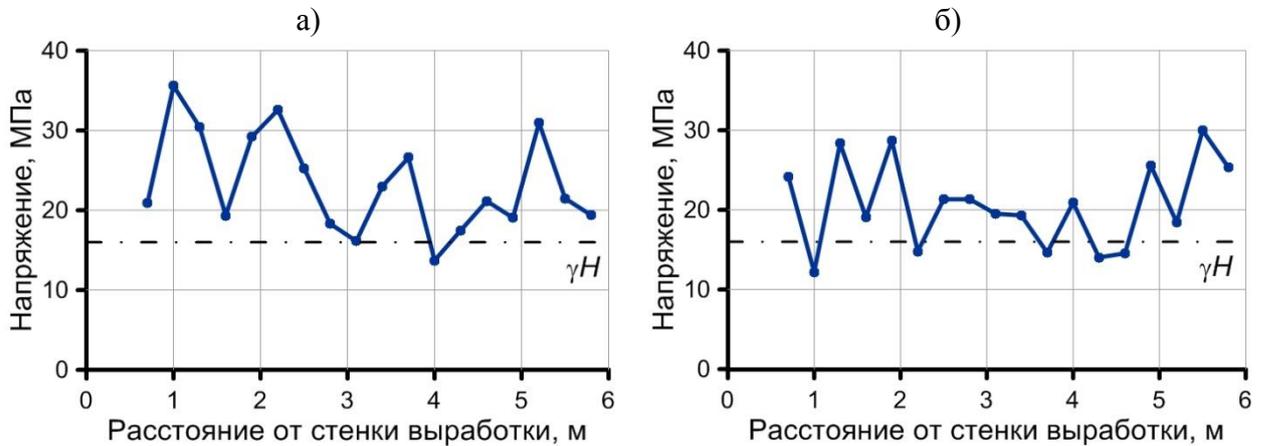


Рис. 14. Распределение средних значений вертикальных напряжений в горизонтальных скважинах, пробуренных в целиках панели 47 рудника «Жомарт»: а – барьерный целик; б – междукамерный целик

Скачкообразный характер изменения вертикальных напряжений установлен и в междукамерном целике, что также можно объяснить блочным строением массива (рис. 14, б). Вертикальные напряжения изменяются в диапазоне от 12 до 30 МПа, при этом максимальный разброс значений наблюдается в краевой части целика. С удалением от контура, начиная с глубины 4,5 м, отмечается тренд на увеличение напряжений. Ярко выраженная зона опорного давления отсутствует. Таким образом, в барьерном целике вертикальные напряжения выше, чем в междукамерном, и несколько больше величины γH , которая составляет около 16 МПа для данного района.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе на основе выполненных автором теоретических и экспериментальных исследований проявления эффекта Кайзера в породах решена актуальная задача разработки и обоснования скважинного метода измерения компонент поля напряжений, что обеспечит получение объективной информации о действующих в массиве напряжениях для прогноза опасных проявлений горного давления и параметрического обеспечения геомеханических расчетов.

Основные научные и практические результаты работы заключаются в следующем:

1. Разработан и обоснован скважинный метод измерения напряжений, основанный на использовании эффекта Кайзера в породах нагружаемого околоскважинного пространства, позволяющий оценить величину и направление ком-

понент поля напряжений в условиях массивов квазипластичных и трещиноватых скальных пород.

2. Установлены особенности проявления эффекта Кайзера при нагружении стенок скважины гидродомкратом в трещиноватом массиве скальных пород и массиве квазипластичных пород. Предложена гипотеза формирования акустоэмиссионного эффекта памяти в породах нагружаемого околоскважинного пространства для рассматриваемых геологических условий.

3. В результате численного моделирования напряжений вокруг скважины при нагружении ее стенок гидродомкратом для массива квазипластичных пород установлены условия возникновения акустической эмиссии в зависимости от направления нагружения и величин главных компонент естественного поля напряжений, действующих перпендикулярно оси скважины.

4. По результатам физического моделирования на образцах соляных пород установлено наличие эффекта Кайзера при условиях нагружения, моделирующих историю изменения напряженного состояния пород околоскважинного пространства. Предложена гипотеза, согласно которой в качестве одного из механизмов формирования эффекта в соляных породах является процесс закрытия трещин, ориентированных перпендикулярно оси нагружения в тестовом цикле.

5. По результатам измерения напряжений предлагаемым методом в нетронутом массиве соляных пород ВКМКС установлено, что ширина зоны опорного давления вблизи контура одиночной выработки составляет в среднем 1,2 м, где вертикальная компонента поля напряжений достигает максимальных значений 14-16 МПа. За зоной опорного давления вертикальные напряжения стремятся к значению 8,5 МПа, что примерно соответствует величине веса вышележащих пород. Среднее значение коэффициента бокового распора равно 0,6.

6. Получены распределения вертикальных напряжений в барьерном и междукамерном целиках рудника «Жомарт», которые в связи с блочным строением массива характеризуются высоким разбросом значений. Ярко выраженная зона опорного давления отсутствует. В барьерном целике в среднем вертикальные напряжения выше, чем в междукамерном, и несколько больше величины $\gamma H = 16$ МПа.

7. Измерения горизонтальных напряжений в бортах Сарбайского железорудного карьера показали, что вблизи стенки борта на расстоянии до 2,0 м отмечаются повышенные значения горизонтальных напряжений, которые достигают 12 МПа. С удалением от стенки вглубь борта величина горизонтальных напряжений снижается и стабилизируется. На первом экспериментальном участке (гор. -240 м) средняя величина горизонтальных напряжений за зоной опорного давления составляет примерно 4 МПа, на втором (гор. -280 м) – 5-6 МПа, на третьем (гор. -340 м) – 8-8,5 МПа.

8. Выполнена оценка поля напряжений в нетронутом массиве соляных пород Гремячинского месторождения калийных солей. Вблизи контура одиночной выработки установлена зона пониженных значений вертикальных и горизонтальных напряжений. В среднем ширина зоны влияния выработки не превышает 2,1 м, а концентрация напряжений в ней не более 25% по сравнению со

средними значениями в нетронутом массиве. За данной зоной вертикальная компонента соответствует величине γH , которая составляет 24 МПа для района экспериментальных работ. Коэффициент бокового распора λ принимает значения от 0,9 до 1,0 в зависимости от направления измерений.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

В изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России

1. Асанов В.А. Опыт изучения акустоэмиссионных эффектов в соляных породах с использованием скважинного гидродомкрата Гудмана / В.А. Асанов, А.В. Евсеев, В.Н. Токсаров, **Н.Л. Бельтюков** // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2010. – №10. – С. 144-148.

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

3. Асанов В.А. Инструментальный метод контроля напряженно-деформированного состояния приконтурного массива соляных пород / В.А. Асанов, А.В. Евсеев, В.Н. Токсаров, В.В. Аникин, **Н.Л. Бельтюков** // Горный журнал. – 2013. – № 6. – С. 40-44.

4. Асанов В.А. Оценка напряженно-деформированного состояния нетронутого массива на месторождении Жаман-Айбат / В.А. Асанов, В.Н. Токсаров, Н.А. Самоделкина, **Н.Л. Бельтюков**, А.А. Ударцев // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2014. – Т. 13, № 12. – С. 56-66.

5. Асанов В.А. Натурные исследования напряженного состояния пород приконтурного массива / В.А. Асанов, В.Н. Токсаров, А.В. Евсеев, **Н.Л. Бельтюков** // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2016. – Т. 15, № 20. – С. 270-276.

6. Toksarov V.N. Sedimentary Rock Stress Determination In Boreholes Using Kaiser Effect / V.N. Toksarov, V.A. Asanov, A.V. Evseev, **N.L. Beltukov**, A.A. Udartsev // 7th International Symposium on In-Situ Rock Stress. – Tampere, 2016. – P. 501-508.

В прочих изданиях

7. Асанов В.А. Скважинный метод контроля напряжений в соляном массиве / В.А. Асанов, В.Н. Токсаров, **Н.Л. Бельтюков** // Научные исследования и инновации. – Пермь: ПГТУ, 2011. – Т. 5, № 4. – С. 53-55.

8. Токсаров В.Н. Результаты экспериментального определения напряжений в нетронутом массиве соляных пород / В.Н. Токсаров, **Н.Л. Бельтюков** // Материалы II Всероссийской междисциплинарной молодежной научной конференции «Информационная школа молодого ученого», Екатеринбург, 27-31 августа 2012 г. – Екатеринбург, 2012. – С. 325-329.

9. Бельтюков Н.Л. Исследование напряжений в приконтурном массиве соляных пород в зоне влияния геологической аномалии / **Н.Л. Бельтюков** // Стратегия и процессы освоения георесурсов [Сб. науч. тр.]. – Пермь: ГИ УрО РАН, 2013. – Вып. 11. – С. 100-102.

10. Токсаров В.Н. Контроль напряженного состояния и механических свойств соляных пород в натуральных условиях / В.Н. Токсаров, В.А. Асанов, А.В. Евсеев, **Н.Л. Бельтюков**, В.В. Аникин // Материалы научно-практической конференции «Проблемы безопасности и эффективности освоения георесурсов в современных условиях», Пермь, 5-7 июня 2013 г. – Пермь: ГИ УрО РАН, 2014. – С. 337-341.

11. Асанов В.А. Контроль состояния пород приконтурного массива в зоне влияния геологической аномалии / В.А. Асанов, В.Н. Токсаров, **Н.Л. Бельтюков** // Доклады Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Геомеханика в горном деле», Екатеринбург, 4-5 июня 2014 г. – Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 2014. – С. 187-194.

12. Токсаров В.Н. Использование акустического эффекта памяти для оценки напряженного состояния трещиноватых скальных пород / В.Н. Токсаров, В.А. Асанов, Л.С. Шамганова, **Н.Л. Бельтюков**, А.А. Ударцев // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. – Новосибирск: ИГД СО РАН, 2015. – № 2. – С. 353-357.

13. Бельтюков Н.Л. О механизме проявления эффекта Кайзера в осадочных горных породах / **Н.Л. Бельтюков** // Стратегия и процессы освоения георесурсов [Сб. науч. тр.]. – Пермь: ГИ УрО РАН, 2015. – Вып. 13. – С. 102-104.

14. Асанов В.А. Опыт использования гидродомкрата Гудмана при натуральных исследованиях деформационных свойств и напряженного состояния пород приконтурного массива / В.А. Асанов, В.Н. Токсаров, **Н.Л. Бельтюков** // Материалы XIV Международной конференции «Ресурсовоспроизводящие, малоотходные и природоохранные технологии освоения недр», Москва-Бишкек, 14-20 сентября 2015 г. – М.: РУДН, 2015. – С.143-144.

15. Токсаров В.Н. Экспериментальное определение напряжений в массиве горных пород Сарбайского карьера / В.Н. Токсаров, Л.С. Шамганова, **Н.Л. Бельтюков**, А.А. Ударцев, С.А. Съедина // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. – Новосибирск: ИГД СО РАН, 2017. – Т. 4, № 2. – С. 286-289.