

**«ГОРНЫЙ ИНСТИТУТ УРАЛЬСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК»**

филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Пермского федерального исследовательского центра
Уральского отделения Российской академии наук

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»

Диссертация
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
доктор технических наук,
профессор В.А. Асанов

Пермь – 2018

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭФФЕКТА КАЙЗЕРА ДЛЯ ОЦЕНКИ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД.....	11
1.1. Современное состояние методов измерения напряжений в массиве горных пород.....	11
1.1.1. Классификация методов измерения напряжений.....	12
1.1.2. Методы разрыва скважин.....	14
1.1.3. Методы полной разгрузки пород в скважинах.....	20
1.1.4. Методы оценки напряжений, основанные на изучении образцов керна горных пород.....	24
1.1.5. Измерение напряжений на основе эффекта Кайзера.....	29
1.2. Механизмы возникновения эффекта Кайзера в горных породах.....	31
1.2.1. Модель дискообразной трещины.....	31
1.2.2. Двухмерная модель "крылатой" трещины.....	34
1.2.3. Трехмерная модель "крылатой" трещины.....	38
1.2.4. Модель закрывающейся трещины.....	40
1.3. Методы измерения напряжений на основе эффекта Кайзера.....	42
1.3.1. Метод одноосного нагружения.....	42
1.3.2. Методы трехосного нагружения.....	45
1.3.3. Методы растяжения.....	48
1.3.4. Метод нагружения околоскважинной области массива.....	52
1.4. Выводы и постановка задач исследований.....	57
2. РАЗРАБОТКА СКВАЖИННОГО МЕТОДА ОЦЕНКИ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД.....	60
2.1. Разработка методического и аппаратного обеспечения метода.....	60
2.2. Натурные исследования проявления эффекта Кайзера в породах околоскважинного пространства.....	69
2.2.1. Результаты натурных экспериментов.....	69
2.2.2. Анализ особенностей проявления эффекта Кайзера в породах околоскважинного пространства.....	71
2.3. Стендовые эксперименты по измерению напряжений.....	77
2.3.1. Методика проведения стендовых экспериментов.....	77
2.3.2. Результаты стендовых экспериментов по измерению напряжений.....	81
2.3.3. Результаты построения полей деформаций блока при помощи оптической системы «VIC-3D».....	84
2.3.4. Анализ результатов стендовых экспериментов по измерению напряжений..	87
2.4. Выводы.....	89
3. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПОРОД ОКОЛОСКВАЖИННОЙ ОБЛАСТИ МАССИВА.....	90
3.1. Параметры модели и методика численного моделирования.....	90

3.2.	Результаты численного моделирования напряженного состояния пород околоскважинной области массива.....	94
3.2.1.	Распределение напряжений в околоскважинной области массива.....	94
3.2.2.	Анализ напряженно-деформированного состояния пород околоскважинного пространства.....	97
3.2.3.	Определение условий образования растягивающих напряжений на контуре скважины.....	100
3.2.4.	Анализ условий возникновения акустической эмиссии в породах околоскважинного пространства.....	104
3.3.	Выводы.....	108
4.	ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОСОБЕННОСТЕЙ ПРОЯВЛЕНИЯ ЭФФЕКТА КАЙЗЕРА В СОЛЯНЫХ ПОРОДАХ.....	110
4.1.	Методические аспекты физического моделирования напряженного состояния пород околоскважинной области массива.....	110
4.1.1.	Обоснование схем нагружения, моделирующих напряженное состояние пород околоскважинной области.....	110
4.1.2.	Механизмы трещинообразования в условиях трехосного нагружения соляных пород.....	113
4.1.3.	Аппаратура и методика проведения испытаний образцов соляных пород в камере трехосного сжатия.....	118
4.2.	Результаты экспериментальных исследований эффекта Кайзера при различных режимах трехосного нагружения.....	120
4.2.1.	Разгрузка и восстановление осевой компоненты поля напряжений образца после нагружения в режиме гидростатического сжатия ($\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$) в установочном цикле.....	120
4.2.2.	Разгрузка и восстановление осевой компоненты поля напряжений образца после нагружения по схеме Беккера ($\sigma_1 = \sigma_2 > \sigma_3$) в установочном цикле.....	122
4.2.3.	Разгрузка и восстановление осевой компоненты поля напряжений образца после нагружения по схеме Кармана ($\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$) в установочном цикле.....	123
4.2.4.	Разгрузка и восстановление боковой компоненты поля напряжений образца после нагружения по схеме Кармана ($\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$) в установочном цикле.....	124
4.3.	Выводы.....	126
5.	ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ СКВАЖИННОГО МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ В РАЗЛИЧНЫХ ГОРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ.....	128
5.1.	Оценка напряженного состояния соляных пород в массиве Верхнекамского месторождения калийных солей.....	128
5.1.1.	Результаты измерения напряжений в массиве соляных пород рудника БКПРУ-2 ПАО «Уралкалий».....	128
5.1.2.	Результаты измерения напряжений в массиве соляных пород рудника СКРУ-3 ПАО «Уралкалий».....	130
5.2.	Оценка напряженного состояния пород в массиве месторождения Жаман-Айбат.....	132
5.3.	Оценка напряженного состояния пород в массиве Сарбайского карьера.....	136

5.4. Оценка напряженного состояния соляных пород в массиве Гремячинского месторождения калийных солей.....	139
5.5. Выводы.....	143
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	145
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	148

ВВЕДЕНИЕ

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 ис-

пользовании 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.

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 око-

лоскважинной 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 натуральных 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; установлению закономерностей распределения напряжений в нетронутом 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 натурных 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 натурных 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. Екатерин-

бург, 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.

Автор выражает искреннюю благодарность сотрудникам лаборатории физических процессов освоения георесурсов «ГИ УрО РАН» (в особенности с.н.с. Токсарову В.Н.), сотрудникам кафедры разработки месторождений полезных ископаемых ПНИПУ и инженерно-техническим работникам рудников ПАО «Уралкалий» за сотрудничество и помощь в проведении исследований.

ГЛАВА 1. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭФФЕКТА КАЙЗЕРА ДЛЯ ОЦЕНКИ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД

1.1. Современное состояние методов измерения напряжений в массиве горных пород

Горные породы в нетронутом массиве находятся в условиях естественного напряженного состояния. В процессе ведения горных работ происходит перераспределение поля напряжений, в результате чего на контуре выработок возникает концентрация напряжений. Величина напряжений, действующих в приконтурном массиве, может достигать предела прочности пород, что приводит к таким негативным последствиям, как критические деформации контура, разрушение выработок, горные удары, внезапные выбросы породы и газа и т.д. В связи с истощением запасов действующих горных предприятий вовлечение в эксплуатацию новых участков месторождений зачастую сопряжено с увеличением глубины ведения горных работ. В таких условиях возрастает значимость проблемы предотвращения негативных проявлений горного давления и обеспечения устойчивости горных выработок, для решения которой необходима информация о естественном поле напряжений. Поэтому оценка напряженного состояния пород в массиве является актуальной задачей.

Основная проблема при определении напряжений в твердых телах заключается в том, что данную физическую величину невозможно измерить непосредственно. Оценить ее значение и направление действия с известной степенью точности можно по изменению других параметров, связанных с напряжением физическими законами. Поэтому большинство методов измерения напряжений в горных породах сводятся к нарушению естественных условий их залегания и измерению отклика пород, вызванного данным нарушением (в виде деформаций, перемещений или давления) [1].

1.1.1. Классификация методов измерения напряжений

Согласно [2] существующие методы измерения напряжений в горных породах по физическому принципу, лежащему в их основе, принято классифицировать на следующие группы.

1) Методы, в основе которых используется эффект разрушения пород вокруг скважины. Они включают в себя различные техники разрыва пласта, а также к этой группе можно отнести методы изучения разрушения стенок скважины.

2) Методы, основанные на измерении упругих деформаций горных пород при их разгрузке различными способами (щелевая разгрузка на контуре обнажения, разгрузка пород в скважинах, разгрузка пород на большой базе и др.). В одной из вариаций данного физического принципа используется восстановление исходного напряженного состояния с помощью нагрузочных устройств, т.н. методы компенсации напряженного состояния.

3) Изучение поврежденности керна, обусловленной разгрузкой пород при бурении. Данную группу методов можно разделить в соответствии со следующими физическими принципами: анализ деформаций восстановления керна, извлеченного из массива; анализ скоростей упругих волн; анализ параметров акустической эмиссии; визуальное изучение поврежденности керна, приобретенной при бурении.

4) Методы, использующие корреляционные связи напряжений и физических свойств горных пород (акустических, электрических и т.д.).

5) Группа методов, основанных на анализе существующих разломов в земной коре и связанной с этим сейсмической активностью. Объединяющей особенностью для данной группы является исследование объемов горных пород на уровне литосферных плит.

По условиям применения методы измерения напряжений разделяют на следующие основные группы (табл. 1.1): скважинные методы, изучение образцов керна, контроль напряжений на обнажениях горных пород, анализ крупномасштабных геологических структур. Необходимо отметить, что каждой группе

соответствует определенный масштабный уровень объема пород, вовлекаемого в процесс измерения.

Таблица 1.1

Классификация методов измерения напряжений по условиям применения

Категория	Наименование метода	Объем горной породы, м ³
Скважинные методы	Методы гидроразрыва скважин	0,5–50
	Скважинная разгрузка	10 ⁻³ –10 ⁻²
	Гидравлические испытания, существующей в массиве трещины (НТПФ)	1–10
	Анализ разрушения стенок скважины	10 ⁻² –100
Методы оценки напряжений, основанные на изучении образцов керна	Методы анализа деформаций восстановления керна (ASR, DSCA)	10 ⁻³
	Дискование керна	10 ⁻³
	Акустические методы (эффект Кайзера)	10 ⁻³
Методы контроля напряжений на обнажениях горных пород	Восстановление напряжений с помощью гидроразгрузки	0,5–2
	Щелевая разгрузка	1–2
Анализ крупномасштабных геологических структур	Анализ фокальных механизмов землетрясений	10 ⁹
	Анализ сдвиговых нарушений	10 ⁸
Другие	Разгрузка больших объемов горных пород	10 ² –10 ³

Наиболее широкое коммерческое применение получили два скважинных метода измерения напряжений: метод гидроразрыва скважин и метод полной разгрузки. Хотя базовые принципы данных методов не менялись в течение десятилетий, совершенствование техники их выполнения идет непрерывно, в результате чего удалось достигнуть высокой точности результатов. Более того, Международным бюро по механике горных пород (International Society for Rock Mechanics – ISRM) разработаны и утверждены стандарты выполнения измерений этими методами [3, 4], поэтому они считаются своеобразным "эталоном" среди других методов.

Тем не менее, высокая сложность и дороговизна их реализации обуславливают необходимость развития альтернативных способов определения напряжений, среди которых перспективной является группа методов оценки напряжений, основанных на изучении образцов керна горных пород.

1.1.2. Методы разрыва скважин

Классический метод гидроразрыва скважины является одним из самых популярных методов измерения напряжений. Был разработан в 1940-х годах как средство стимуляции производительности нефтяных и газовых скважин, пробуренных в пластах пород с низкой проницаемостью. В начале 1960-х годов было предложено извлекать из операций гидроразрыва информацию о напряженном состоянии пород. Классическая концепция интерпретации диаграмм "давление-время" была предложена Hubbert M.K. и Willis D.G. в 1957 г. [5]. В России наиболее значительный вклад в совершенствование теоретической и методической баз метода гидроразрыва внесли Курленя М.В., Леонтьев А.В., Попов С.Н. [6, 7, 8].

Процесс проведения гидроразрыва скважины предполагает следующую последовательность действий. Исследуемый интервал скважины изолируется двойным пакером, который затем подвергается нагружению путем нагнетания в межпакерное пространство жидкости (рис. 1.1) вплоть до достижения критических растягивающих напряжений на контуре скважины, приводящих к разрыву пород (появлению трещины разрыва).

В процессе проведения испытания интервала регистрируется давление в скважине. Далее по характерным точкам на диаграммах "давление-время" оцениваются величины напряжений, действующие в плоскости перпендикулярной оси скважины. При этом предполагается, что скважина пройдена в направлении одного из главных напряжений. К характерным точкам диаграммы "давление-время" относятся (рис. 1.2): P_b – предельное давление, при котором происходит гидроразрыв породы в 1-м цикле нагружения; P_s – давление необходимое для поддержания трещины в открытом состоянии, ниже которого происходит ее закрытие (давление запираения); P_r – давление раскрытия трещины при повторных нагружениях.

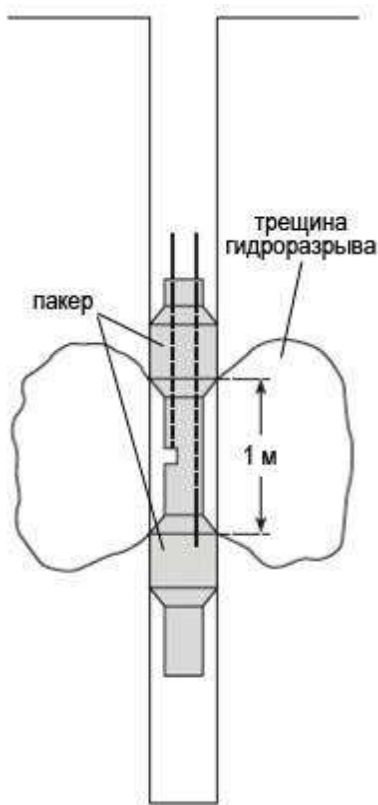


Рис. 1.1. Схематичное изображение скважинного оборудования для гидроразрыва [2]

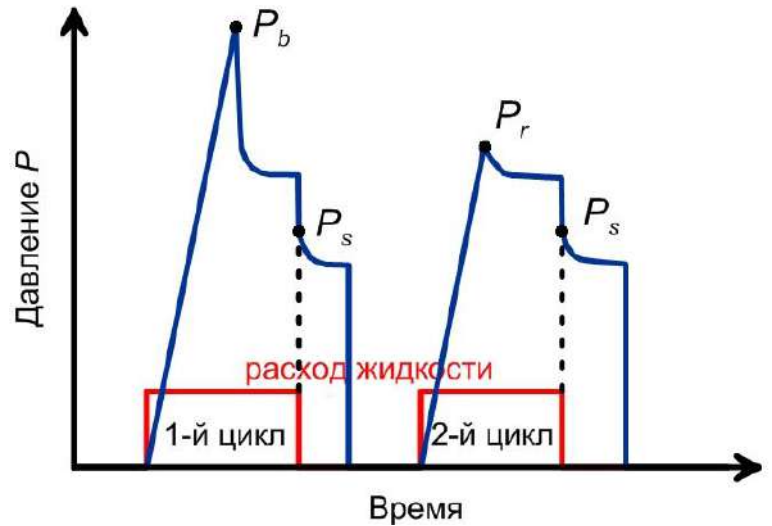


Рис. 1.2. Характерная диаграмма зависимости давления в скважине от времени при измерительном гидроразрыве

Величины максимального (S_H) и минимального (S_h) главных напряжений, действующие в плоскости перпендикулярной оси скважины, рассчитываются по следующим соотношениям:

$$S_h = P_s \quad (1.1)$$

$$S_H = 3S_h + T_0 - P_b \quad (1.2)$$

где T_0 – предел прочности породы на растяжение. Если прочность породы на растяжение не известна, то вместо формулы 1.2 используют выражение:

$$S_H = 3S_h - P_r \quad (1.3)$$

Установлено, что погрешность определения S_h в среднем составляет $\pm 5\%$. В свою очередь, погрешность в вычислении S_H может достигать $\pm 20\%$. Это связано с тем, что для расчета данной величины используется предположение о массиве как о непрерывной линейно-упругой однородной среде [9]. При определении значения давления повторного раскрытия трещины P_r также могут существовать неточности, связанные с наличием утечек жидкости в трещину до

ее истинного раскрытия, и с неполным закрытием трещины после первого цикла, из-за сильных разрушений ее берегов [10].

Для определения ориентации главных напряжений необходимо знать направление образовавшейся трещины гидроразрыва. Как правило, она распространяется перпендикулярно минимальному главному напряжению. Ориентацию трещины определяют в основном с помощью импрессионного пакера с компасом или другими способами [2].

Использование метода практически невозможно в пористых осадочных породах и высоко анизотропных или нарушенных породах из-за утечек рабочей жидкости в массив, и ошибками в определении давлений запираения и повторного открытия трещины [10]. Гидроразрыв должен осуществляться в ненарушенном интервале скважины, чтобы природные трещины не пересекались с образующейся трещиной разрыва, иначе трудно определить направление последней. Геологические особенности строения массива, такие как плоскости напластования, могут также существенно осложнить интерпретацию результатов измерений, поскольку они являются плоскостями ослабления и по ним может происходить развитие трещины гидроразрыва [9].

Метод гидравлического испытания природной трещины (Hydraulic Tests on Preexisting Fracture – НТРФ) впервые был предложен Cornet F.H. и Valette B. [11]. Данный метод является продолжением развития классической техники гидроразрыва скважины, поскольку используется то же самое оборудование и производятся измерения тех же параметров. Вместо образования новой трещины в ненарушенных породах НТРФ-метод основывается на открытии уже существующей в массиве природной трещины. Таким образом, определяют давление запираения P_s , которое эквивалентно нормальному напряжению σ_n , действующему перпендикулярно плоскости трещины (рис. 1.3). В зависимости от сделанных предположений относительно поля напряжений, метод НТРФ позволяет определять 2D- или 3D-напряженное состояние. 3D-напряженное состояние требует большего числа трещин, подлежащих испытанию.

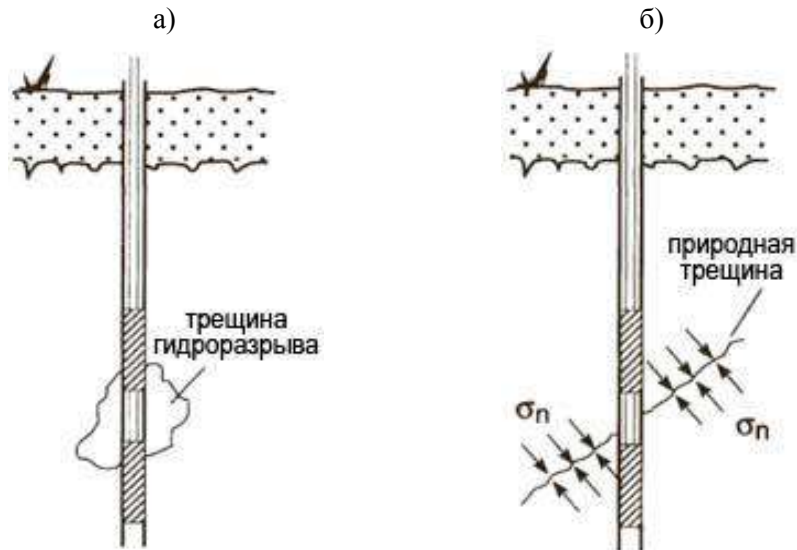


Рис. 1.3. Схематическое изображение различия испытания выделенного интервала скважины методом гидроразрыва пласта (а) от испытания НТРФ-методом (б) [1]

По сравнению с классическим гидроразрывом скважины наличие плоскостей ослабления в массиве не является препятствием для использования НТРФ-метода. Также не обязательно, чтобы ось скважины была параллельна одному из главных напряжений. С другой стороны НТРФ-метод требует больше времени для проведения испытаний, чем гидроразрыв скважины, так как испытательное оборудование должно быть точно расположено в местоположении каждой трещины. Недостатком также является то, что никакие предварительные результаты не могут быть получены, пока все полевые испытания не будут завершены. После проведения испытаний данные обрабатываются с помощью специальных компьютерных программ [9].

Техника сухого разрыва скважины заключается в создании трещины в ее стенке путем расширения рабочей камеры прессиометра высокой емкости. Метод впервые был предложен Stephansson O. [12, 13]. В этом случае, как и при гидроразрыве, разрыв происходит, когда давление в испытуемом интервале скважины достигает предела прочности породы на растяжение и трещина произрастает в направлении перпендикулярном минимальному главному напряжению. Но в отличие от классического гидроразрыва в массив не проникает жидкость. Давление образования трещины разрыва P_b соответствует точке на диа-

грамме "давление-объем", в которой наблюдается уменьшение жесткости породного массива (рис. 1.4, в). Минимальное главное напряжение S_h определяется как давление повторного раскрытия P_r образовавшейся трещины в последующих циклах нагружения и на графике характеризуется как точка перелома диаграммы (рис. 1.4, г). Направление разрыва определяется по следу на рабочей камере прессиометра. Для расчета максимальных горизонтальных напряжений S_H используется тот же математический аппарат, как и в случае классического гидроразрыва. Таким образом, горизонтальные напряжения определяются на основе выражений:

$$S_h = P_r \quad (1.5)$$

$$S_H = 3S_h + T_0 - P_b \quad (1.6)$$

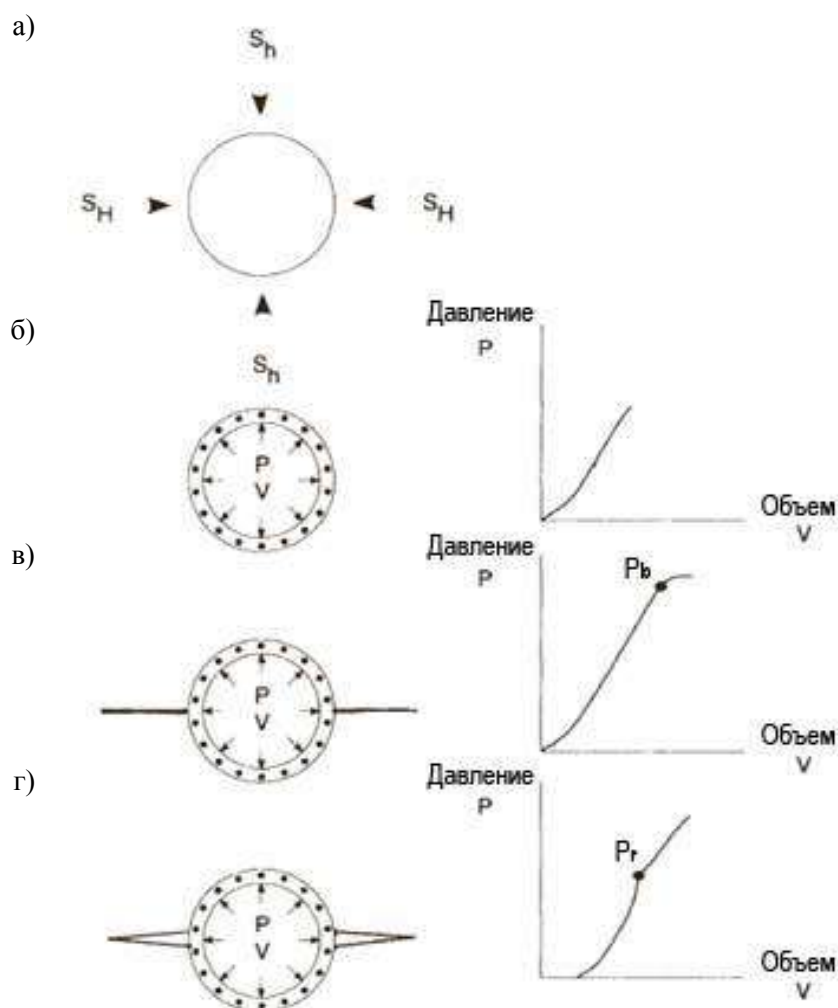


Рис. 1.4. Стадии испытания скважины при определении напряжений методом сухого разрыва [1]:
 а – исходное напряженное состояние массива; б – первоначальная стадия нагружения;
 в – образование трещины разрыва; г – повторный цикл нагружения стенок скважины

Serata S. и др. [14] разработали специальный инструмент Stressmeter (S-200) для проведения измерений напряжений в породах методом двойного сухого разрыва. В случае двойного сухого разрыва после первого цикла нагружения скважины, образования первого разрыва и разгрузки производится повторное нагнетание давления в камеру прессиометра, пока не произойдет второй разрыв породы. В процессе проведения испытаний деформация стенок скважины регистрируется 4-мя датчиками, расположенными под углом 45° друг относительно друга. Инициирование и повторное открытие первого и второго разрывов определяются по диаграммам "давление-деформация". Ориентация главных напряжений оценивается через построение эллипса деформации контура скважины. При этом предполагается, что первый разрыв образуется в направлении максимального горизонтального напряжения S_H , а второй разрыв перпендикулярно ему.

De la Cruz R.V. в работе [15] предложил использовать для измерительного разрыва стенок скважины гидродомкрат. Суть метода сухого разрыва скважинным гидродомкратом заключается в создании трещины заданной ориентации на стенке скважины и измерении давления ее открытия при повторном нагружении (рис. 1.5). Для определения момента повторного раскрытия трещины используется специальный датчик, установленный на гидродомкрате и измеряющий тангенциальную деформацию контура скважины. Как и в случае использования прессиометра, точка на диаграмме "давление-деформация" во втором цикле нагружения, в которой происходит уменьшение тангенса угла наклона, соответствует давлению повторного раскрытия трещины (рис. 1.4, г). Разработкой и теоретическим обоснованием данного метода занимались Yokooyama T., Sano O., Hirata A. [16, 17], Сердюков С.В., Павлов В.А., [10, 18, 19].

В работе [10] Павлов В.А. предложил комбинированный способ измерительного разрыва стенок скважины. На первом этапе осуществляют классический гидроразрыв скважины и затем с помощью импрессионного пакера определяют количество и направление созданных систем трещин. Если в результате гидроразрыва образовались две радиально-симметричные трещины, то их по-

вторное раскрытие осуществляют дилатометром. Если образовались три и более трещины, то повторное раскрытие каждой осуществляют скважинным гидродомкратом. Несомненным достоинством данной работы следует отметить разработанные алгоритмы интерпретации давления раскрытия трещин при использовании дилатометра и гидродомкрата.

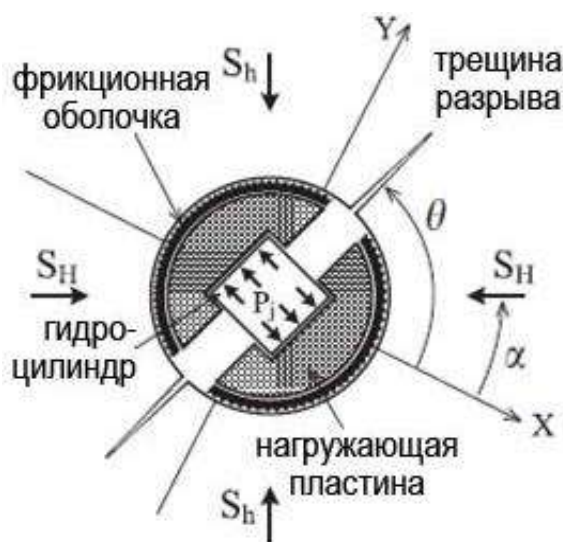


Рис. 1.5. Схематичное изображение метода разрыва скважины гидродомкратом [17]

Главное преимущество методов сухого разрыва заключается в том, что разрыв достигается без проникновения жидкости в микротрещины, дефекты и другие неоднородности породы в окрестности скважины. В этой связи становится возможным получение более резких и последовательных спадов давления на графиках "давление-объем" или "давление-деформация", что позволяет точнее определять характерные точки на диаграммах.

1.1.3. Методы полной разгрузки пород в скважинах

Различают два основных варианта скважинной разгрузки пород:

- разгрузка керна с центральной скважиной;
- разгрузка торца скважины.

Метод разгрузки керна с центральной скважиной заключается в соосном обурировании опережающей скважины меньшего диаметра (направляющей), где установлено приспособление, измеряющее деформации упругого восстано-

ния выбуриваемого керна (рис. 1.6). Переход от измеренных деформаций к напряжениям осуществляется по формулам теории упругости, при этом массив горных пород предполагается упругим и изотропным. Упругие свойства пород определяют по результатам лабораторных испытаний керна после измерений.

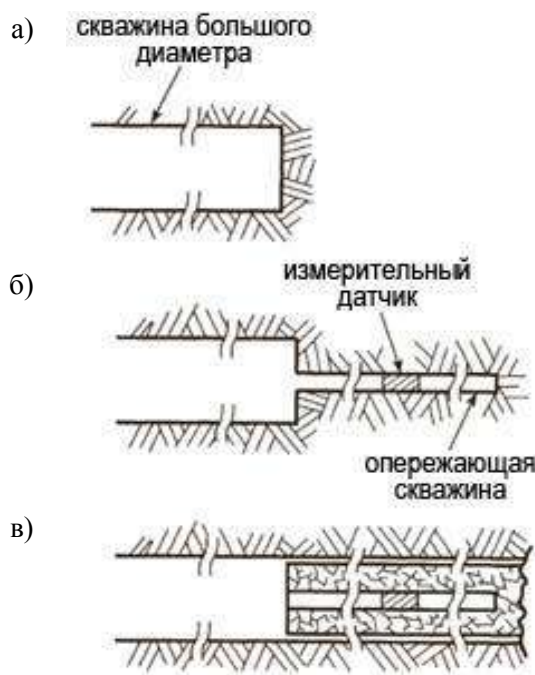


Рис. 1.6. Схематичное изображение основных стадий метода разгрузки керна с центральной скважиной [1]:

- a* – бурение скважины большого диаметра до заданной глубины измерения;
б – бурение опережающей скважины и размещение в ней измерительного устройства;
в – обуривание керна с измерительным устройством

В основном используются следующие типы измерительного устройства, расположенного в центральной скважине:

- измерительные элементы (CSIR, CSIRO, Vorre Probe и др.) – представляют собой цилиндр из эластичного или твердого материала, внутри которого расположены розетки из тензодатчиков [20, 21];
- розетки из тензодатчиков, которые приклеиваются непосредственно на стенку скважины – их количество и ориентация выбираются таким образом, чтобы оценить полный тензор деформаций обуриваемого керна;
- скважинные деформометры (USBM, Siga IST и др.) – регистрируют абсолютные смещения контура центральной скважины при разгрузке [22].

Так как керн должен быть достаточно длинным (30-60 см) и ненарушенным, высокие напряжения и наличие естественных трещин в массиве накладывают ограничение на использование схемы разгрузки керна с центральной скважиной. Главным преимуществом метода является возможность определения трехмерного напряженного состояния в точке измерения.

Данные ограничения нивелируются при измерениях методом разгрузки торца скважины [23]. Суть метода заключается в следующем. На плоский отполированный забой скважины приклеивается/цементируется измерительное устройство, обычно представляющее собой розетку из 3-х или 4-х тензодатчиков, и выполняется считывание начальных показаний (рис. 1.7). Затем производится разгрузка торца скважины путём его обурирования и повторно считываются показания измерительного устройства.

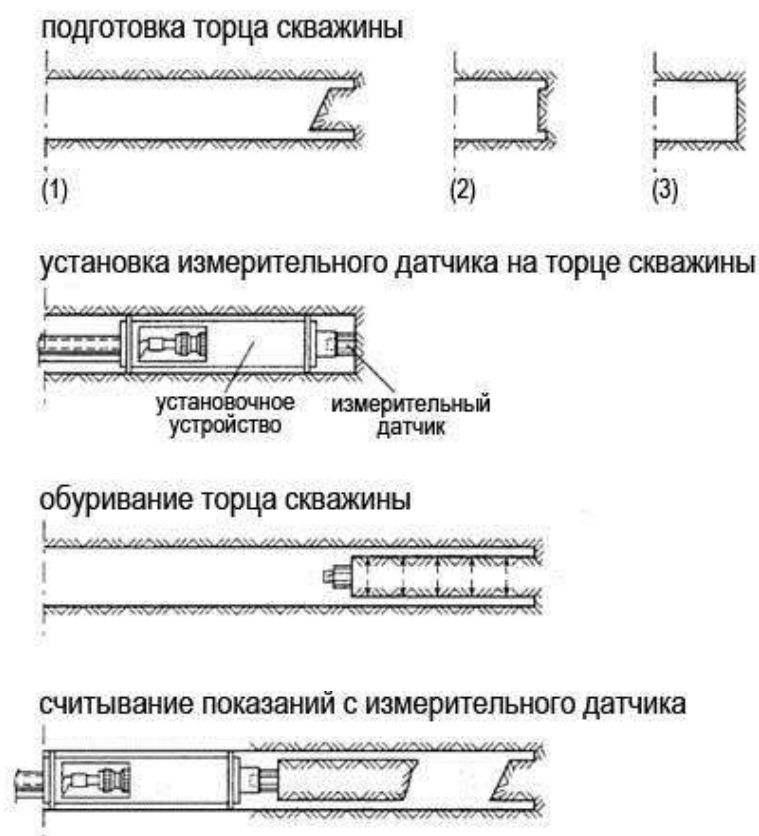


Рис. 1.7. Схематичное изображение основных стадий метода разгрузки торца скважины [1]

По сравнению с методом разгрузки с центральной скважиной в данном случае для выполнения измерений не требуется керн значительной длины –

обычно достаточно ненарушенного керна длиной 5 см. В связи с этим метод пригоден для выполнения измерений в относительно слабых или нарушенных породах, а также в регионах с высокими значениями напряжений. Необходимо отметить, что данный метод менее трудоемкий (2-3 измерения за рабочую смену).

Недостатки данной технологии заключаются в том, что торец скважины должен быть плоским, для чего требуются дополнительные операции по его полировке. В каждой точке измерений возможно определение только двух главных компонент поля напряжений, действующих в плоскости перпендикулярной оси скважины. Последний недостаток отсутствует при применении методов разгрузки торца скважины полусферической или конусообразной формы, предложенных Sugawara К. и Obara Y. [24, 25]. Использование таких форм забоя позволяет оценить полный тензор напряжений в массиве по результатам измерений в одной скважине.

В России разработкой и совершенствованием методов полной разгрузки пород в скважинах занимались исследователи из ВНИМИ и ИГД СО РАН: Слободов М.А., Барковский В.М., Турчанинов И.А., Курленя М.В., Леонтьев А.В. и др. [26-29]. Методы получили достаточно широкое распространение, в связи с чем, проведено множество исследований по оценке влияния различных факторов (температура, граничные напряжения и др.) и удалось достигнуть высокой точности результатов. Стоит отметить, что для их реализации не требуется предварительной информации о поле напряжений в массиве, как в случае метода гидроразрыва пласта.

Главный недостаток методов заключается в сложности измерения малых деформаций, т.к. все перечисленные измерительные устройства весьма чувствительны к анизотропии, неоднородности и размеру зерна горных пород [9]. К тому же по результатам определения напряжений на небольшой базе трудно оценить региональное поле напряжений. При реализации данных методов могут возникнуть проблемы с приклеиванием измерительных устройств к пыль-

ным или влажным стенкам/торцу скважин. В связи с этим в работе [30] сообщается, что вероятность успешного выполнения измерений составляет 50%.

1.1.4. Методы оценки напряжений, основанные на изучении образцов керна горных пород

Оценка напряженного состояния горных пород с помощью анализа неупругих деформаций восстановления керна (Anelastic strain recovery – ASR) основывается на принципе расширения керна после его разгрузки от напряжений, действующих в массиве. Причем такое расширение оказывается больше в направлении действия максимального напряжения ϵ_{max} и меньше в направлении минимального напряжения ϵ_{min} (рис. 1.8, а). Измеряя деформации восстановления керна, извлеченного из массива, можно оценить направление и величину главных напряжений. На рис. 1.9 представлена идеализированная кривая зависимости деформации разгруженного керна от времени. В ходе проведения ASR-измерений в интервале времени t_1-t_2 регистрируется лишь часть неупругих деформаций ($\Delta\epsilon$). Конечное значение деформации ϵ_∞ полностью разгруженного керна рассчитывается на основании принятой линейной вязкоупругой модели [31].

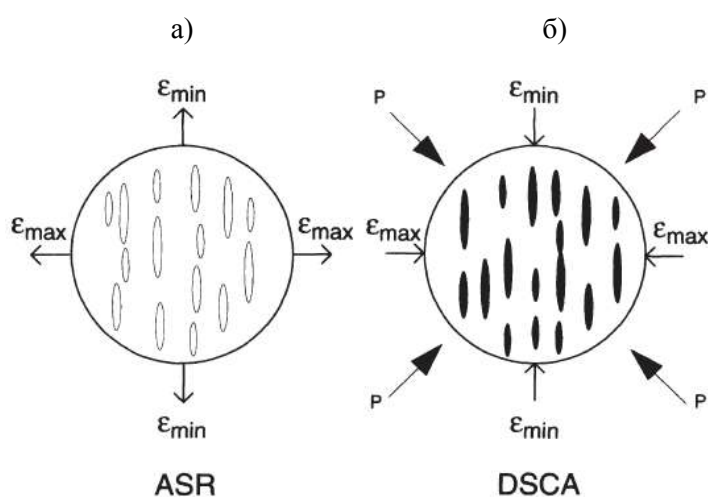


Рис. 1.8. Схематическое изображение отличий в принципах измерений напряжений ASR-методом (а) и DSCA-методом (б) [1]

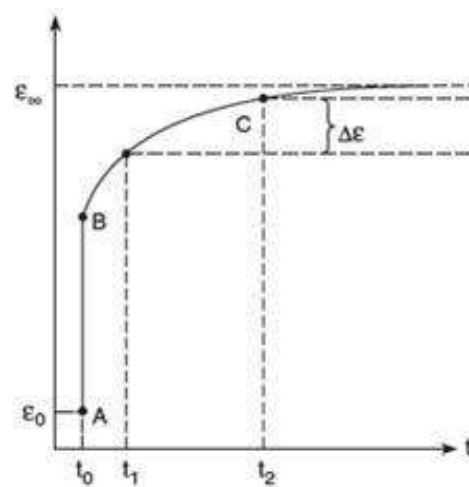


Рис. 1.9. Идеализированная кривая зависимости деформации керна от времени после извлечения из массива [2]

С физической точки зрения природу неупругих деформаций восстановления зерна породы, взятого с глубины, можно объяснить процессом образования и расширения трещин в ответ на освобождение от напряжений. Таким образом, в результате разгрузки порода приобретает микротрещиноватость, ориентированную в соответствии с направлениями главных напряжений. Необходимо отметить, что в анизотропной горной породе наведенная структура микротрещин может не соответствовать направлениям главных напряжений и их величине.

Teufel L.W. в работе [32] пришел к выводу, что на точность измерений напряжений методом ASR влияют следующие факторы: вариации температуры окружающей среды, высыхание образца зерна, ослабление порового давления, неоднородные деформации восстановления, анизотропия горных пород, проникновение бурового раствора в породу, остаточные напряжения, недостаточное время восстановления, точность операций по ориентации зерна. Основная проблема ASR-метода заключается в сложности проведения измерений очень малых деформаций с достаточной степенью точности.

Метод анализа разности деформаций (Differential Strain Curve Analysis – DSCA) базируется на концепции, что природное поле напряжений в массиве пород можно оценить по результатам анализа деформаций при повторном нагружении образца зерна в условиях равномерного всестороннего сжатия. Как и в ASR-методе предполагается, что при извлечении зерна из массива в породе образуется наведенная трещиноватость, ориентированная в соответствии с направлениями главных напряжений (рис. 1.8, б). Если поместить образец в условия гидростатического нагружения, то образовавшиеся в результате разгрузки зерна микротрещины будут закрываться. Измеряя деформации образца, обусловленные закрытием микротрещин, в различных направлениях можно оценить величину и направления действия главных напряжений в массиве.

В 1970-х Simmons G., Siegfried R.W. и Feves M.L. [33, 34] разработали метод оценки пористости горных пород, образованной микротрещинами, при различных запирающих давлениях (давление, при котором происходит закрытие микротрещин). Метод заключается в гидростатическом нагружении прямо-

угольной призмы горной породы с установленными на ней тензодатчиками. Затем точно таким же способом нагружается идентичный образец из кварцевого стекла. Анализируя разность деформаций образцов горной породы и кварцевого стекла получают тензор деформаций, обусловленных закрытием микротрещин, при различных давлениях. Эта процедура и легла в основу названия метода. В итоге с помощью полученного тензора деформаций можно оценить количество и ориентацию микротрещин в образце. В работе [35] Strickland E.G. и Ren N.-K. модифицировали метод анализа разности деформаций для определения напряжений в массиве.

DSCA-метод представляет собой экономически эффективную технику, которая не требует каких-либо предположений об ориентации напряжений в массиве по отношению к направлению скважины. Преимущество метода заключается в том, что он может использоваться для оценки напряжений на больших глубинах до тех пор, пока можно извлекать ненарушенный керн. Основной недостаток состоит в том, что необходимо осуществлять измерения очень малых деформаций на небольших объемах горной породы.

Yamamoto K. и др. [36-38] предложили метод оценки напряжений в массиве пород основываясь на анализе скорости деформирования образцов керна (Deformation Rate Analysis – DRA). Суть данного метода заключается в следующем.

Известно, что при нагружении горной породы наблюдаемая деформация имеет упругую и неупругую составляющие. Согласно Yamamoto пластический характер деформирования в основном обусловлен: во-первых трением, возникающим на берегах микротрещин, которые испытывают сдвиговые деформации при нагрузке-разгрузке породы; во-вторых, процессом роста и образования новых микротрещин. При нагружении породы в случае, когда отсутствует развитие микротрещин, пластическая деформация увеличивается почти с постоянной скоростью. Здесь стоит отметить, что термин *скорость пластической деформации* означает величину ее приращения на единицу напряжения. Такой характер деформирования объясняется тем, что сдвиговые деформации существующих

микротрещин почти пропорциональны величине приложенной нагрузки. Вследствие этого, увеличение скорости неупругой деформации будет означать рост существующих и образование новых микротрещин, что характерно при превышении нагрузкой максимальной величины, достигнутой в предыдущем цикле нагружения.

С целью определения изменения скорости деформации Yamamoto предложил функцию разности деформаций $\Delta\varepsilon_{i,j}(\sigma)$ между i -ым и j -ым последовательными циклами нагружения образца породы [36, 37]:

$$\Delta\varepsilon_{i,j}(\sigma) = \varepsilon_j(\sigma) - \varepsilon_i(\sigma), \quad j > i \quad (1.7)$$

Кроме описанных выше существуют и другие факторы, обуславливающие неупругое деформирование горных пород. Некоторые из этих компонент могут не изменяться от цикла к циклу и поэтому не учитываются в функции разности деформаций, также как и упругая составляющая. Таким образом, значение функции в основном представляет собой разницу в количестве неупругой деформации от приложенного напряжения между i -ым и j -ым циклами нагружения.

Характерное изменение функции разности деформаций изображено на рис. 1.10. Отрицательный наклон функции означает, что скорость пластической деформации в i -ом цикле больше по сравнению с j -ым. Согласно модели в [38] уровень предыдущей нагрузки можно оценить как величину приложенного осевого напряжения в точке, где производная функции разности деформаций меняет знак. Yamamoto предложил использовать данный эффект для оценки напряжений в массиве пород.

Как и у рассмотренных выше методов оценки напряжений на основе испытаний керн в лабораторных условиях преимущество DRA-метода заключается в низкой стоимости проводимых измерений и возможности использования на больших глубинах. Для определения напряжений DRA-методом также не требуется информации о направлении оси скважины относительно главных напряжений в массиве. Но в отличие от ASR- и DSCA-методов, чтобы оценить полный тензор поля напряжений требуется нагружение керн в шести различ-

ных направлениях. К недостаткам следует отнести проведение измерений на достаточно ограниченном объеме породы и влияние различных внешних факторов (влажность, температура и т.д.) на результаты измерений.

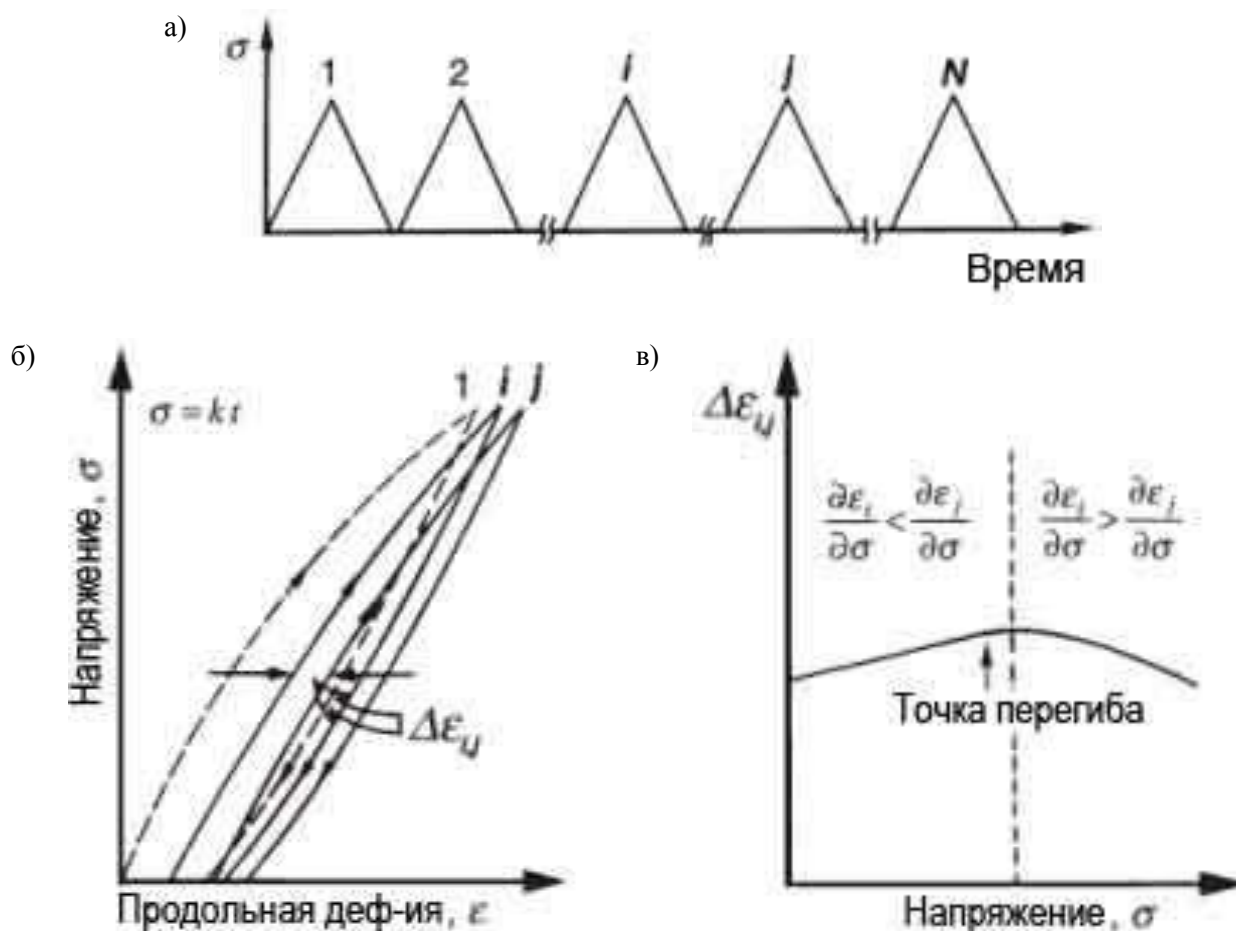


Рис. 1.10. Определение напряжений в массиве пород DRA-методом [38]:

a – изменение нагрузки от времени при циклическом нагружении образца керна, извлеченного из массива; *б* – зависимость напряжения от продольной деформации образца; *в* – зависимость функции разности деформаций от напряжения

Таким образом, несмотря на кажущуюся простоту методов оценки напряжений, основанных на изучении образцов керна, в связи с малой базой измерений и чувствительностью к различным помеховым факторам они не имеют явного преимущества перед эталонными скважинными техниками. Кроме того, образцы керна, взятого с небольшой глубины, во время релаксации после снятия природного поля напряжений имеют незначительные деформации, величина которых может находиться в пределах погрешности измерительных инструментов.

1.1.5. Измерение напряжений на основе эффекта Кайзера

Процесс деформирования материала сопровождается возникновением и распространением упругих волн, связанных с локальной перестройкой его структуры. Данное явление называется акустической эмиссией (АЭ). Акустическая эмиссия характеризуется различными информативными параметрами: суммарное число импульсов с начала регистрации, активность акустической эмиссии (количество импульсов в единицу времени), амплитуда сигнала и др.

В 1953 г. Kaiser J. [39] осуществляя циклические испытания металлов обнаружил, что акустическая эмиссия отсутствует до тех пор, пока не превышен уровень нагрузки, достигнутой в предыдущем цикле. Эффект Кайзера выражается в сохранении активности АЭ на уровне фона при нагружении материала вплоть до максимального напряжения, действовавшего в прошлом, при достижении которого данный параметр скачкообразно увеличивается (рис. 1.11, а). Следствием этого является резкий перегиб кривой зависимости суммарного количества импульсов АЭ от нагрузки (рис. 1.11, б). Позднее данный эффект был обнаружен в других материалах, в том числе в горных породах [40]. Природу эффекта Кайзера в породах обычно связывают с особенностями процесса зарождения и распространения трещин.

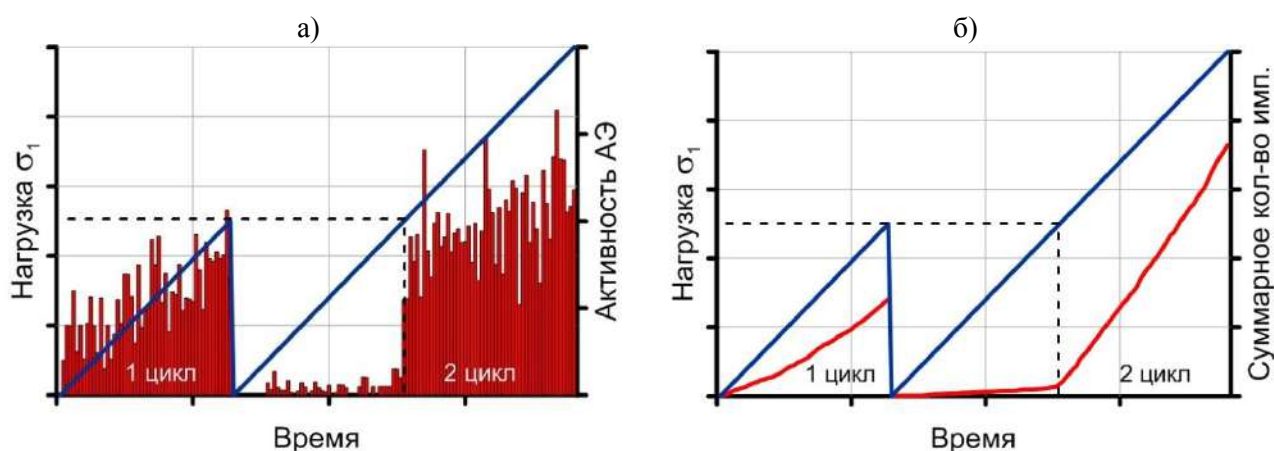


Рис. 1.11. Характерные графики зависимости активности АЭ (а) и суммарного количества импульсов (б) при нагружении горной породы

Первые попытки использования эффекта Кайзера для определения естественного поля напряжений в массиве горных пород были предприняты Kurita K. и Fujii N. [41]. В основе их метода лежит предположение, что воздействие природного поля напряжений на горную породу и последующее ее извлечение из недр является первоначальным циклом нагружения. Поэтому производя в лабораторных условиях повторное нагружение образцов керн в различных направлениях можно оценить нормальную компоненту поля напряжений, действующую в направлении нагружения.

Использование эффекта Кайзера в горных породах для определения напряжений осложняется такими факторами как: влияние времени между циклами нагружения, влажность, определение момента наступления эффекта Кайзера, скорость нагружения и т.д. Обстоятельное изучение влияния различных помеховых факторов на эффект Кайзера выполнено Шкуратником В.Л. и Лавровым А.В. в работах [42, 43].

Преимущество методов измерения напряжений, использующих эффект Кайзера, заключается в отсутствии сложных высокоточных измерений деформаций. Также для оценки компонент естественного поля напряжений не требуется применение аппарата теории упругости, что является серьезной проблемой в условиях массива квазипластичных соляных пород. Другим несомненным достоинством является возможность использования метода в широком интервале глубин. Минимальное значение глубины ограничено диапазоном нагрузок, при котором горные породы сохраняют упругие свойства. В работе [44], посвященной определению напряжений путем нагружения стенок скважины прессиомером, показано наличие эффекта Кайзера даже в грунтах. По сравнению со скважинными "эталонными" техниками метод можно использовать в условиях трещиноватого массива пород. К тому же он отличается простотой выполняемых операций и высокой скоростью получения результатов (в некоторых вариациях даже в режиме "on-line").

С другой стороны, недостаточная теоретическая изученность вопроса применения эффекта Кайзера для определения напряжений и тот факт, что до

настоящего времени не сформировано единого мнения касательно механизмов его возникновения, накладывают существенные ограничения на его использование.

Таким образом, несмотря на кажущуюся простоту и привлекательность данной концепции, метод находится все еще в стадии разработки и пока далек от самостоятельного применения [2]. С целью успешного использования эффекта Кайзера при оценке напряжений в массиве горных пород необходимо ясное понимание физических механизмов, обуславливающих данное явление.

1.2. Механизмы возникновения эффекта Кайзера в горных породах

1.2.1. Модель дискообразной трещины

Модель дискообразной трещины для описания механизма возникновения эффекта Кайзера предложил Costin L.S. в работе [45]. Согласно данной модели в поликристаллических средах, таких как горные породы, неравнокомпонентное напряженное состояние приводит к локальной концентрации напряжений на существующих в породе микродефектах. В результате концентрации напряжений образуются трещины растяжения, направление распространения которых совпадает с наибольшим главным сжимающим напряжением. Идеализированную форму трещин растяжения можно представить в виде плоского диска (рис. 1.12). С дальнейшим деформированием породы размер образовавшихся трещин увеличивается пропорционально уровню приложенной нагрузки. Процесс роста трещин растяжения сопровождается акустической эмиссией. При разгрузке породы происходит закрытие трещин. В случае повторного нагружения акустическая эмиссия отсутствует, пока трещины растяжения не раскроются до размера достигнутого ранее, что происходит при нагрузке равной максимальному напряжению предыдущего цикла. В этот момент наблюдается резкое увеличение активности АЭ. С приближением нагрузки к пределу прочности породы отдельные микротрещины растяжения сливаются в макротрещины и разломы.

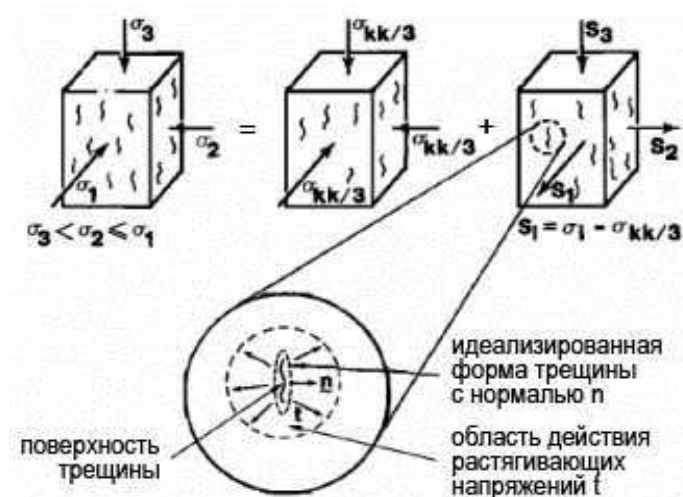


Рис. 1.12. Схематическое изображение модели дискообразной трещины [45]

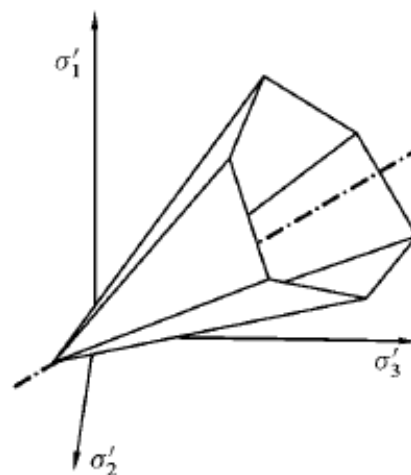


Рис. 1.13. Поверхность разрушения в пространстве главных напряжений

В работе [45] было получено соотношение между размером трещины растяжения и локальными напряжениями, действующими в ее области. Если порода испытала ранее напряженное состояние, при котором сформировались трещины некоторого размера, то с помощью данного выражения можно определить величины напряжений, приводящих к возобновлению их роста. Построив в координатах главных напряжений множество таких напряженных состояний, при которых условие выполняется хотя бы для одной трещины, получим геометрическое место точек образующих некоторую поверхность. Данная поверхность получила название *поверхности поврежденности*, по аналогии с *поверхностью разрушения* (рис. 1.13), и оконтуривает область в пространстве главных напряжений, соответствующую напряженным состояниям породы, при которых рост трещин и АЭ отсутствуют.

Holcomb D.J. в работе [46] использовал рассмотренный механизм трещинообразования для описания закономерностей возникновения эффекта Кайзера. Он предположил, что горные породы при извлечении из массива приобретают некоторую нарушенность, которая формирует первоначальную поверхность поврежденности. В случае одноосного нагружения породы вдоль одной из осей (например вдоль оси σ_{22} на рис. 1.14) трещины растяжения будут раскрываться, но не увеличиваться в размере, и акустическая эмиссия будет отсутствовать.

Как только величина нагрузки достигнет первоначальной поверхности, т.е. точки пересечения поверхности с данной осью, рост трещин и эмиссия акустических импульсов возобновятся. Дальнейшее увеличение нагрузки приведет к растягиванию поверхности вдоль оси нагружения. При разгрузке породы и ее повторном нагружении вдоль той же оси размер трещин не изменяется, и акустическая эмиссия отсутствует до тех пор, пока вновь не будет достигнута поверхность поврежденности, сформированная в предыдущем цикле.



Рис. 1.14. Проекция первоначальной поверхности поврежденности (сплошная линия) в случае изотропного распределения микротрещин, ее вид после одноосного нагружения (пунктирная линия) и после обобщенного растяжения (точечная линия) [46]

Основываясь на данной модели, Holcomb воспроизводил различные условия трехосного напряженного состояния породы в первом цикле нагружения с последующим одноосным сжатием во втором цикле вдоль осей главных напряжений. Основные полученные им экспериментальные результаты следующие:

1. В случае трехосного осесимметричного сжатия породы в первом цикле ($\sigma_1^I > \sigma_2^I = \sigma_3^I$) величина одноосной нагрузки, которую необходимо приложить во втором цикле вдоль оси σ_1 для обнаружения эффекта Кайзера, линейно зависит от величины бокового давления σ_3 . При одноосном нагружении породы во втором цикле в направлении осей σ_2 и σ_3 эффект Кайзера отсутствует, т.к. поверхность повреждения не изменяется вдоль данных осей в первом цикле нагружения.

2. В случае обобщенного растяжения породы в первом цикле (когда все главные напряжения сжимающие, причем $\sigma_1^I = \sigma_2^I > \sigma_3^I$), при одноосном сжатии вдоль осей σ_1 и σ_2 во втором цикле эффект Кайзера отсутствует, т.к. поверхность поврежденности также не изменяется вдоль данных осей в первом цикле нагружения (рис. 1.14).

В итоге Holcomb приходит к выводу, что если природа эффекта Кайзера, наблюдаемого в лабораторных условиях и в породах, извлеченных из массива, одинакова, то определить компоненты тензора поля напряжений, осуществляя одноосное нагружение керн в разных направлениях, невозможно [46]. В лучшем случае можно оценить линейную комбинацию главных напряжений, когда одноосное сжатие во втором цикле осуществляется точно в направлении наибольшего главного напряжения σ_1 первого цикла.

1.2.2. Двухмерная модель "крылатой" трещины

Для описания механизмов возникновения эффекта Кайзера в горных породах модель "крылатой" трещины, состоящей из наклонной сдвиговой трещины и двух трещин растяжения (рис. 1.15), применяли Holcomb D.J. (в ранних исследованиях) [47], Li С. и Nordlund E. [48], Шкуратник В.Л. и Лавров А.В. [42], Pestman В.Ј. и van Munster J.G. [49-51]. Согласно данной модели в породе в первоначальном состоянии всегда присутствует некоторое количество наклонных дефектов: микротрещины, границы между зернами, плоскости напластования и т.д. При нагружении породы на наклонных дефектах возникают касательные напряжения, которые приводят к взаимному сдвигу их берегов. В результате в краевых частях из-за концентрации растягивающих напряжений образуются трещины растяжения в виде крыльев. С увеличением нагрузки "крылья" трещины растут в направлении максимального главного напряжения σ_1 , генерируя при этом импульсы АЭ. При разгрузке за счет уменьшения касательных напряжений происходит восстановление первоначального состояния наклонной "материнской" трещины, что приводит к закрытию ее "крыльев". В случае повторного нагружения касательные напряжения опять приводят к сдви-

гу наклонной трещины и раскрытию ее крыльев, при этом акустическая эмиссия отсутствует. Как только величина касательных напряжений достигнет максимального значения предыдущего цикла, рост трещин растяжения и акустическая эмиссия возобновляются.

В работе [48] Li и Nordlund используя данную модель получили выражение, описывающее линейную зависимость осевой нагрузки, при которой проявляется эффект Кайзера, от величин главных напряжений предыдущего цикла. Т.е. было получено линейное уравнение для проекции поверхности поврежденности в координатах главных напряжений, которое хорошо согласуется с результатами исследований в работах [43, 46].

В работе [49] Pestman и van Munster на основе двухмерной модели "крылатой" трещины получили уравнения, описывающие условия роста трещин в зависимости от приложенной нагрузки. Они предположили, что развитие повреждения в породе (изменение поверхности поврежденности) при повторном нагружении наступает в двух случаях:

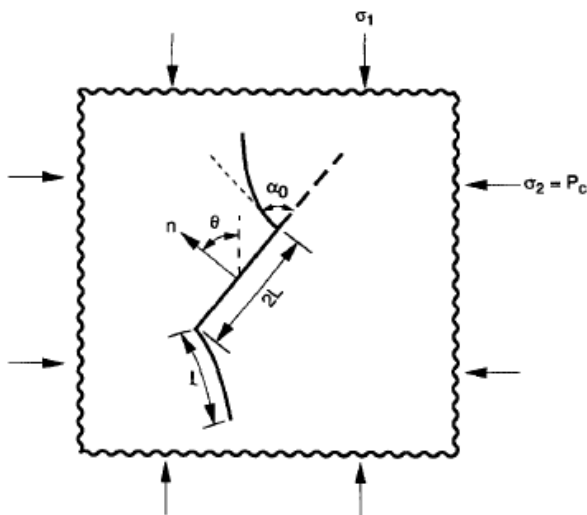


Рис. 1.15. Схематическое изображение двухмерной модели "крылатой" трещины, образовавшейся из первоначальной наклонной трещины [49]

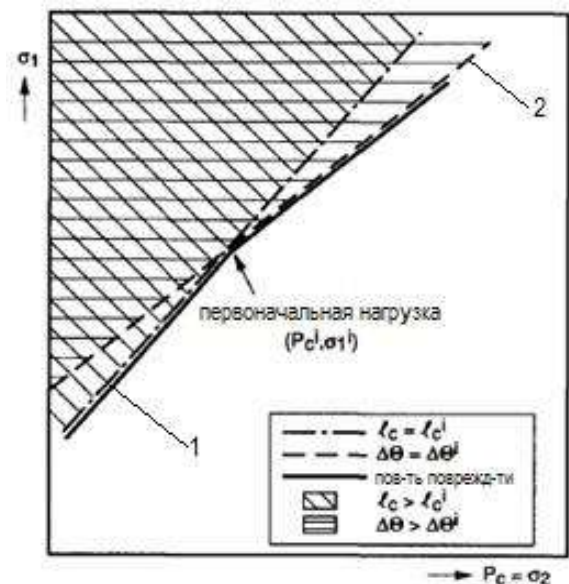


Рис. 1.16. Поверхность поврежденности, сформированная пересечением двух прямых характеризующих напряженные состояния, при которых: 1 – длина трещин l_c совпадает с длиной l_c^i , достигнутой в первоначальном цикле нагружения ($P_c^i; \sigma_1^i$); 2 – диапазон углов $\Delta\theta$ совпадает с диапазоном углов трещин $\Delta\theta^i$, активированных в первоначальном цикле нагружения [49]

1) когда возникает такое напряженное состояние, при котором возобновляется увеличение "крыльев" наиболее благоприятно ориентированных трещин, т.е. их длина l_c становится больше достигнутой l_c^i в предыдущем цикле (область 1 на рис. 1.16);

2) когда возникает такое напряженное состояние, при котором начинают активизироваться первоначальные наклонные трещины, ориентированные под менее благоприятными углами к максимальному главному напряжению, т.е. диапазон углов $\Delta\theta$ расширяется (область 2 на рис. 1.16).

Таким образом, напряженные состояния породы выше прямых 1 и 2 на рис. 1.16 (заштрихованные области) будут приводить к возникновению акустической эмиссии, а ниже, соответственно, нет. Данные прямые должны пересекаться в точке, соответствующей напряженному состоянию породы в первоначальном цикле нагружения $(P_c^i; \sigma_1^i)$. Поэтому огибающая напряженных состояний, которые не приводят к возникновению акустической эмиссии, т.е. поверхность поврежденности, будет выглядеть в виде ломаной прямой с переломом в данной точке. Этот вывод подтверждают результаты экспериментов по циклическому нагружению горных пород по схеме Кармана, представленные в работе [52].

Также в работе [49] Pestman и van Munster разработали методику обнаружения поверхности поврежденности, сформированной в результате трехосного нагружения горной породы. В первоначальном цикле осуществлялось формирование поверхности в условиях трехосного осесимметричного сжатия $\sigma_1^I > \sigma_2^I = \sigma_3^I$, после чего образец разгрузался. В последующих сериях циклических испытаний осуществлялось ее "сканирование" путем увеличения разности напряжений $(\sigma_1^i - \sigma_3^i)$ при различных уровнях боковой нагрузки σ_3^i (рис. 1.17). Причем, чтобы получить полный вид поверхности поврежденности, уровни боковой нагрузки σ_3^i выбирались, как меньше, так и больше нагрузки σ_3^I первого цикла. Как только напряженное состояние породы достигало условий, соответствующих возобновлению роста трещин (т.е. поверхности поврежденности), что сопровождалось резким увеличением активности акустической

эмиссии, образец разгружался путем уменьшения разности напряжений ($\sigma_1 - \sigma_3$) до некоторой величины. Далее боковое давление σ_3 увеличивалось до следующего уровня, при сохранении постоянного значения разности напряжений ($\sigma_1 - \sigma_3$), а затем производилось увеличение осевой нагрузки σ_1 до тех пор, пока вновь не будет достигнута поверхность поврежденности. Проведенные испытания образцов песчаника подтвердили гипотетическое существование точки перегиба проекции поверхности поврежденности на координатной плоскости " $\sigma_1 - \sigma_3$ ", соответствующей напряженному состоянию, испытанному породой в первом цикле нагружения.

Продолжая свои исследования Pestman, van Munster и др. в работе [50] получили полную поверхность поврежденности в трехмерном пространстве главных напряжений " $\sigma_1 - \sigma_2 - \sigma_3$ ", сформированную в условиях трехосного неравнокомпонентного сжатия установочного цикла ($\sigma_1^I > \sigma_2^I > \sigma_3^I$). Эксперименты заключались также в "сканировании" проекций поверхности поврежденности в плоскостях " $\sigma_2 - \sigma_3$ " и " $\sigma_1 - \sigma_3$ " методом, рассмотренным выше. Т.е. в тестовых циклах осуществлялось нагружение образца путем изменения величин двух главных напряжений, при постоянном значении третьего.

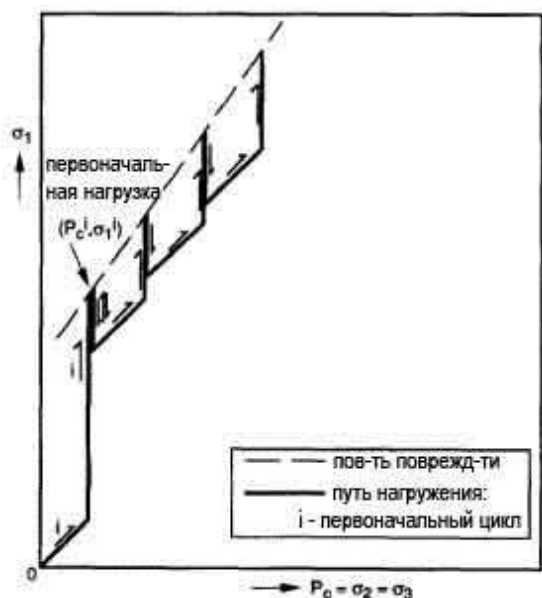


Рис. 1.17. Методика "сканирования" поверхности поврежденности в работе [49]

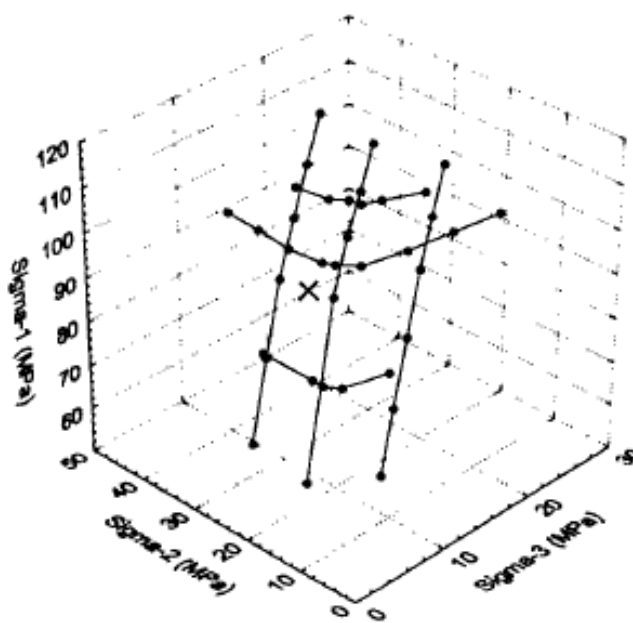


Рис. 1.18. Изображение поверхности поврежденности, сформированной при трехосном неравнокомпонентном напряженном состоянии [50]

На рис. 1.18 представлены результаты сканирования поверхности поврежденности в пространстве главных напряжений. Установлено, что наибольшую кривизну поверхность поврежденности претерпевает в области первоначального напряженного состояния, которое изображено крестом. Данная точка не располагается строго на поверхности в связи с ухудшением проявления эффекта Кайзера, обусловленным приобретенной в процессе нагружения нарушенностью породы, что также называется эффектом Фелисити (*Felicity effect*) [2, 43].

Важным следствием рассмотренных экспериментов является то, что по кривизне поверхности поврежденности можно оценить величины главных напряжений, действовавших на породу ранее в массиве (*метод Pestman'a-Kenter'a-van Munster'a или РКМ-метод*) [51].

1.2.3. Трехмерная модель "крылатой" трещины

Объяснения закономерностей проявления эффекта Кайзера с помощью *трехмерной модели "крылатой" трещины* представлены Шкуратником В.Л. и Лавровым А.В. в работах [42, 43]. Согласно данной модели горная порода до начала установочного цикла нагружения имеет наклонные трещины, каждая из которых представляет собой тонкий разрыв сплошности материала в форме диска (рис. 1.19, а). В целом, механизм трещинообразования в данном случае аналогичен двумерному варианту, рассмотренному выше: при нагружении породы за счет сдвига наклонной трещины на ее контуре образуются трещины растяжения (рис. 1.19, б), которые закрываются при разгрузке и возобновляют свой рост, когда величина нагрузки при повторном нагружении достигает максимального значения предыдущего цикла.

Несомненным достоинством работы [43] является то, что в ней получены условия возобновления роста трещин в трехмерном пространстве. Это позволило провести важный численный эксперимент по моделированию проявления эффекта Кайзера в случае трехосного неравнокомпонентного напряженного состояния породы в установочном цикле ($\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$). Также необходимо отметить, что в модели учитывается трение при сдвиге берегов наклонной трещины.

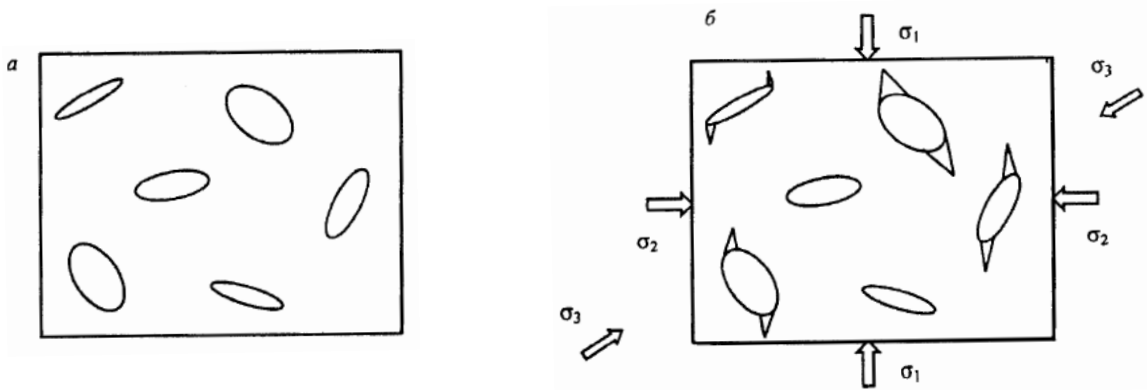


Рис. 1.19. Модель горной породы, содержащей хаотически ориентированные трещины: *a* – начальные дискообразные трещины до нагружения; *б* – порождаемые ими трещины растяжения в процессе первого цикла нагружения [43]

По результатам лабораторных экспериментов и численного моделирования эффекта Кайзера в образцах горных пород на основе трехмерной модели "крылатой" трещины в работе [43] установлены следующие важные закономерности:

1. В случае если в *I* цикле порода испытывает одноосное или трехосное напряженное состояние по схеме Кармана ($\sigma_1^I > \sigma_2^I = \sigma_3^I$), то при одноосном нагружении во *II* цикле в направлении σ_1^I эффект Кайзера имеет место при $\sigma_{1*}^{II} = \sigma_1^I$ или $\sigma_{1*}^{II} = \sigma_1^I - (k + 1)\sigma_3^I$, соответственно, для одноосного сжатия или схемы Кармана в *I* цикле, где *k* – коэффициент, зависящий от коэффициента трения μ между берегами трещин.

2. При трехосном неравнокомпонентном нагружении ($\sigma_1^I > \sigma_2^I > \sigma_3^I$) в установившемся цикле породы с хаотической трещиноватостью запоминают разность максимального и промежуточного главных напряжений $\sigma_1^I - \sigma_2^I$ (тестовый цикл – в направлении действия σ_1^I). В породах с анизотропной трещиноватостью величина напряжения, запоминаемого при трехосном неравнокомпонентном нагружении, зависит от ориентации системы трещин и находится в диапазоне значений $(\sigma_1^I - \sigma_2^I) \div (\sigma_1^I - \sigma_3^I)$.

3. Характер эффектов памяти зависит от степени совпадения направления сжатия в цикле *II* с направлением действия максимального сжимающего напряжения цикла *I*. Увеличение угла между указанными направлениями при-

водит к ухудшению или искажению эффекта памяти. Т.е. определение всех главных компонент поля напряжений установочного цикла методом одноосного нагружения в тестовом цикле в рамках данной модели принципиально невозможно.

1.2.4. Модель закрывающейся трещины

Разработанная Holcomb'ом и Costin'ым модель проявления эффекта Кайзера является стройной, логичной теорией, которая хорошо согласуется с проведенными лабораторными экспериментами (см. п. 1.2.1). Согласно данной модели подход использования эффекта при одноосном нагружении образцов кернa в различных направлениях не позволяет оценить компоненты естественного поля напряжений массива. Тем не менее, существуют работы [53-56], в которых показано обратное. В рассматриваемой модели в качестве основного механизма, отвечающего за формирование эффекта Кайзера, выступает возобновление роста трещин (увеличение размера). Тогда, чтобы объяснить результаты данных работ, Holcomb предположил, что существует другая причина резкого увеличения активности АЭ при одноосном нагружении в различных направлениях кернa, извлеченного из массива. В качестве объяснения проявления эффекта в данном случае может выступать механизм сжатия трещин и пустот в породе по аналогии с DSCA- (см. п. 1.1.4.) и DRA-методами [53, 57].

Суть предложенной альтернативной гипотезы проявления эффекта Кайзера в породах заключается в следующем. Известно, что при извлечении из массива кернa за счет всестороннего расширения в породе образуется система трещин, отражающая природное поле напряжений (рис. 1.20). В случае повторного сжатия породы в лабораторных условиях будет происходить закрытие образовавшихся трещин и пустот. В связи с этим Holcomb предположил [46], что при закрытии трещин акустическая эмиссия отсутствует до тех пор, пока их шероховатые поверхности в процессе сближения не начнут соприкасаться друг с другом. Когда нагрузка в тестовом цикле достигнет величины напряжения, действовавшего в массиве в направлении оси нагружения, трещины полностью

закроются и произойдет резкое увеличение акустической эмиссии за счет разрушения шероховатостей на их берегах при взаимном контакте, т.е. будет иметь место эффект Кайзера.

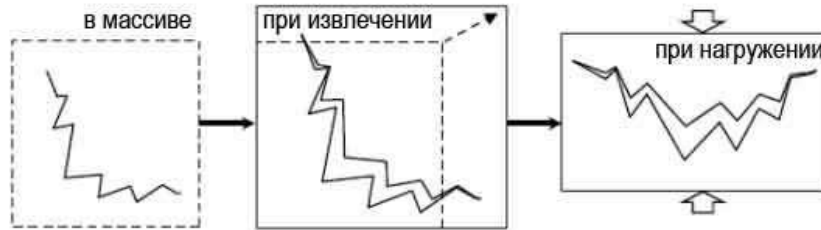


Рис. 1.20. Схематичное изображение состояний микротрещин при извлечении породы из массива и последующем ее нагружении [57]

На основании предположения о существовании альтернативного механизма Holcomb по отношению к горным породам предложил различать два вида эффекта Кайзера [46]. Первый вид возникает в результате циклического нагружения образцов горных пород, когда известно напряженное состояние предыдущего цикла. Такой искусственно наведенный эффект Кайзера Holcomb называет *лабораторным*. Основным механизмом формирования данного вида выступает зарождение и рост трещин растяжения. Второй вид можно наблюдать в первоначальном цикле нагружения извлеченного из массива керна, когда история об испытываемых породой напряжениях неизвестна, т.н. *природный эффект Кайзера*. Предполагается, что последний обусловлен закрытием трещин и микропустот, образовавшихся при релаксации горных пород от напряжений, действующих в массиве.

Таким образом, гипотеза Holcomb'a объединяет многие наблюдения эффекта Кайзера при одноосном нагружении керна в различных направлениях и теоретические исследования, подтвержденные результатами лабораторных испытаний на образцах пород. Также гипотеза объясняет существование эффекта в породах, извлеченных из массива, где напряженное состояние не достаточно для формирования существенной поврежденности [52].

Наряду с аналитическими подходами, использующими механику трещинообразования для описания механизмов возникновения эффекта Кайзера в

горных породах, применяют также и численные методы моделирования [43, 58-60]. Ясное понимание физических механизмов, обуславливающих проявление эффекта Кайзера в горных породах, необходимо для разработки методов определения напряжений и правильной интерпретации результатов, получаемых при использовании данного явления. Как видно из анализа рассмотренных выше моделей у исследователей в данной области до сих пор не сформировано единой концепции, описывающей механизм возникновения эффекта Кайзера в породах. В связи с этим существуют различные подходы в использовании эффекта для определения напряжений в массиве.

1.3. Методы измерения напряжений на основе эффекта Кайзера

1.3.1. Метод одноосного нагружения

Общим следствием для всех рассмотренных моделей проявления эффекта Кайзера, основанных на возобновлении роста ориентированных трещин при повторном нагружении породы, является заключение о невозможности оценки главных компонент поля напряжений методом одноосного нагружения керна в различных направлениях (Uniaxial Loading Method – ULM) [43, 46]. Тем не менее, существует ряд работ [53-56], в которых результаты определения напряжений с помощью такого подхода убедительно согласуются с данными, полученными другими методами. Здесь стоит отметить результаты Западно-Австралийской Школы Горного дела (Western Australian School of Mines – WASM) [61], т.к. этой организацией проведено огромное количество испытаний кернa различных литотипов пород, взятого с разных глубин и на разных континентах, а также проведен анализ результатов и сравнение с другими эталонными техниками измерения напряжений. На рис. 1.21 представлено сравнение результатов оценки величин главных напряжений в массиве пород шахты Perseverance (Австралия) методом WASM.

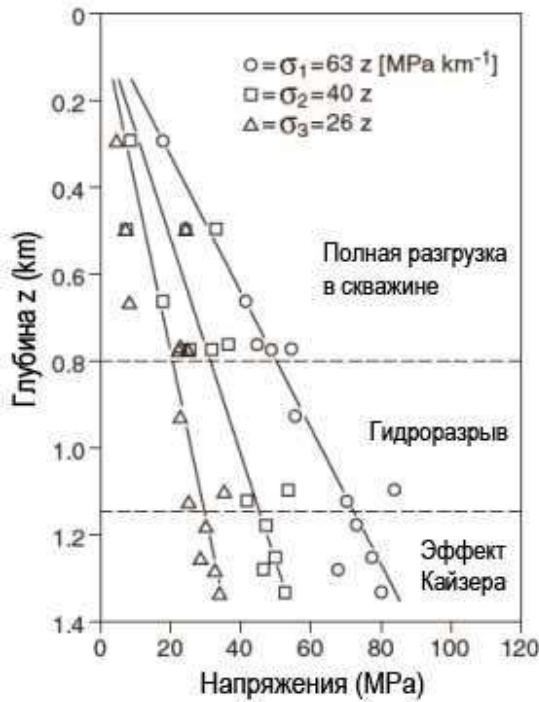


Рис. 1.21. Сравнение результатов оценки величин главных напряжений в массиве пород шахты Perseverance (Австралия), полученных различными методами [2]



Рис. 1.22. Схема выбуривания образцов из керна в 6-ти направлениях [34]

В работе [54] Villaescusa E. и др. представили комбинированный WASM-подход определения напряжений по керну пород, использующий DRA-метод (см. п. 1.1.4) и эффект Кайзера. Суть данной техники заключается в следующем. Из керна породы, взятого с определенной глубины из массива, в 6-ти различных направлениях выбуриваются образцы диаметром 20 мм (рис. 1.22). Затем производится циклическое одноосное нагружение образцов с установленными на них АЭ-преобразователями и датчиками деформаций. Как было показано выше, акустическая эмиссия обусловлена не только процессом роста трещин, но и их закрытием (см. п. 1.2.4), а также трением противоположных берегов трещин сдвига. В этой связи согласно [53, 54] в I цикле нагружения может наблюдаться значительная активность акустической эмиссии за счет закрытия трещин, которая осложняет обнаружение эффекта Кайзера. Однако эти "помехи" в I цикле можно уменьшить с помощью последующих циклов нагрузки-разгрузки при уровнях напряжений, превышающих ожидаемые величины напряжений в массиве, тем самым делая более выраженным увеличение активности АЭ, связанное с природным эффектом Кайзера. Большая часть нежела-

тельной АЭ-активности уменьшается во II цикле нагружения и становится возможным оценить напряжение, действующее в массиве. Таким образом, по методике WASM для определения напряжений обычно используется характер изменения активности АЭ во II цикле нагружения [54].

Несмотря на большое количество примеров успешного применения WASM-метода, его нельзя отнести к группе методов определения напряжений, использующих только эффект Кайзера, т.к. дополнительно применяется DRA-метод. Тем не менее, существуют результаты самостоятельного применения эффекта Кайзера при определении напряжений в массиве пород ULM-техники в I цикле нагружения [56].

Другой подход к использованию метода одноосного нагружения основывается на моделях проявления эффекта Кайзера за счет возобновления роста трещин [42, 43, 46, 48]. Важным следствием данных моделей является вывод, что определить главные компоненты поля напряжений в массиве, осуществляя одноосное нагружение керна в разных направлениях, невозможно. В лучшем случае по наиболее отчетливому проявлению эффекта Кайзера можно оценить направление действия максимального главного напряжения σ_1 [43], а также линейную комбинацию главных напряжений, когда одноосное сжатие в тестовом цикле осуществляется точно в направлении наибольшего главного напряжения σ_1 .

На основе данного утверждения Токсаровым В.Н. и Асановым В.А. [62] проводилась оценка горизонтальных напряжений в массиве соляных пород Верхнекамского месторождения калийных солей (ВКМКС) по результатам испытаний керна вертикальных скважин с использованием эффекта Кайзера. Одноосное нагружение осуществлялось в направлении вертикальной компоненты σ_1 поля напряжений в массиве, величина которой принималась равной весу толщи вышележащих пород. При этом было введено предположение, что горизонтальные компоненты равны ($\sigma_2 = \sigma_3$) и эффект Кайзера в тестовом цикле возникает при достижении нагрузкой разности $\sigma_1 - \sigma_3$. Установлено, что результаты определения горизонтальных напряжений достаточно хорошо согла-

суются с данными, полученными методом щелевой разгрузки, а среднее значение коэффициента бокового распора λ_{cp} составляет 0,71 (рис. 1.23).

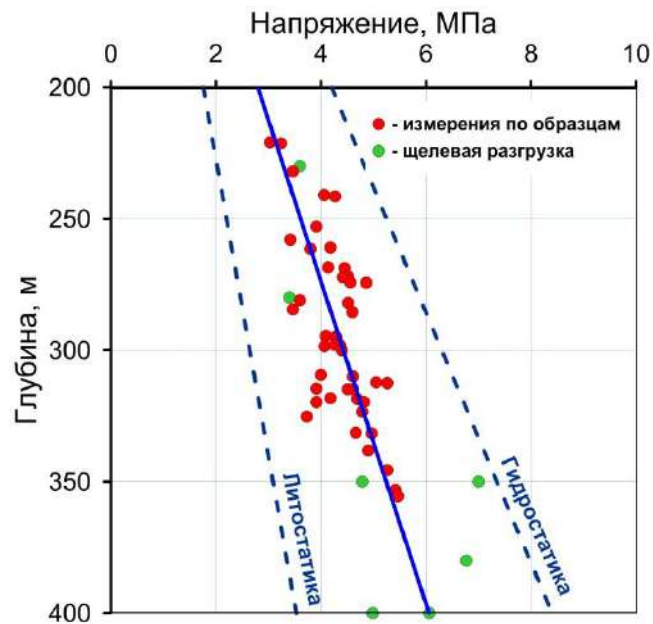


Рис. 1.23. Сравнение результатов оценки горизонтальных напряжений в массиве ВКМКС, полученных с использованием эффекта Кайзера на образцах и методом щелевой разгрузки [62]

1.3.2. Методы трехосного нагружения

Один из вариантов методов трехосного нагружения образцов керна для оценки компонент естественного поля напряжений использовали Pestman В.Ж., Kenter С.Ж. и van Munster J.G. (РКМ-метод) в работе [51]. Их подход основан на разработанной в [49] модели трещинообразования, в которой рост "крылатых" трещин считается основным механизмом возникновения эффекта Кайзера в породах (см. п. 1.2.2). Важным следствием модели является то, что форма поверхности поврежденности имеет максимальную кривизну в области точки, характеризующей природное напряженное состояние пород в массиве. Данное предположение было экспериментально доказано в работе [50].

При выбуривании керна вертикальной скважины из массива в горной породе в дополнение к уже существующей природной трещиноватости, обусловленной естественным полем напряжений, формируется наведенная трещиноватость за счет концентрации напряжений, возникающей в процессе бурения. Второе наведенное поле напряжений является более поздним по отношению к

естественному полю напряжений, действующему на настоящий момент в массиве, и к полю напряжений, действовавшему в геологическом прошлом (палеонапряжения). Величина концентрации напряжений, определяющих наведенное при бурении поле, достаточна для формирования в породе нарушенности даже на небольших глубинах, как полагают Pestman, Kenter и van Munster. В связи с этим они приходят к выводу, что эффект Кайзера в породах обусловлен именно полем напряжений, наведенным в процессе бурения керна [51].

Суть РКМ-метода заключается в испытании керна, извлеченного из массива при бурении вертикальной скважины, в направлении одного из главных напряжений. Испытание образца осуществляется в установке реализующей трехосное неравнокомпонентное сжатие ($\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$) так, чтобы все три оси нагружения совпадали с направлениями главных напряжений в массиве. При постоянном значении вертикального напряжения σ_V , равного величине давления бурового раствора на глубине отбора керна, производится изменение горизонтальных напряжений σ_H и σ_h по схеме, представленной на рис. 1.24, т.е. выполняется сканирование формы поверхности поврежденности (см. п. 1.2.2). Величины максимального σ_H и минимального σ_h горизонтальных напряжений соответствуют координатам точки максимальной кривизны поверхности поврежденности на плоскости $\sigma_H - \sigma_h$, скорректированной с учетом эффекта Фелисити. Измеренные методом РКМ величины горизонтальных напряжений уверенно согласуются с результатами, полученными другими методами (рис. 1.25).

Несмотря на то, что методом РКМ можно определить величины только горизонтальных напряжений, причем для этого необходимо знать ориентацию всех трех главных напряжений в массиве, в ряде случаев его применение может оказаться целесообразным. Направления горизонтальных напряжений можно оценить менее трудозатратными и дорогостоящими методами, например, по разрушению стенок скважины, а величина вертикального напряжения редко превышает вес вышележащей толщи пород. К недостаткам метода можно отнести использование дорогостоящей установки трехосного неравнокомпонентного сжатия ($\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$) и сложную процедуру испытаний.

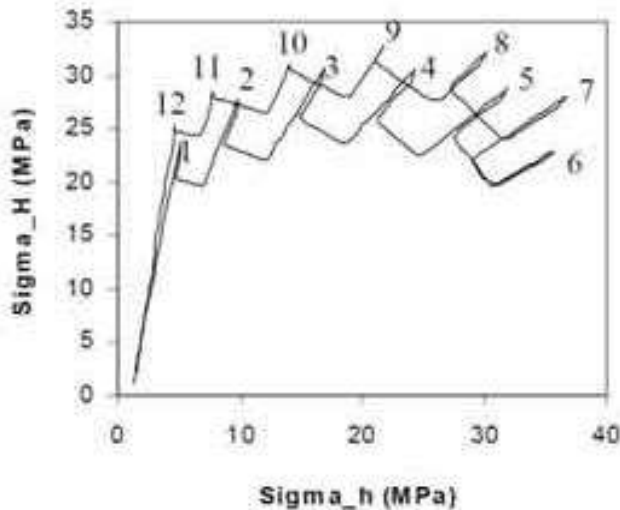


Рис. 1.24. Схема нагружения образца при "сканировании" поверхности поврежденности [51]

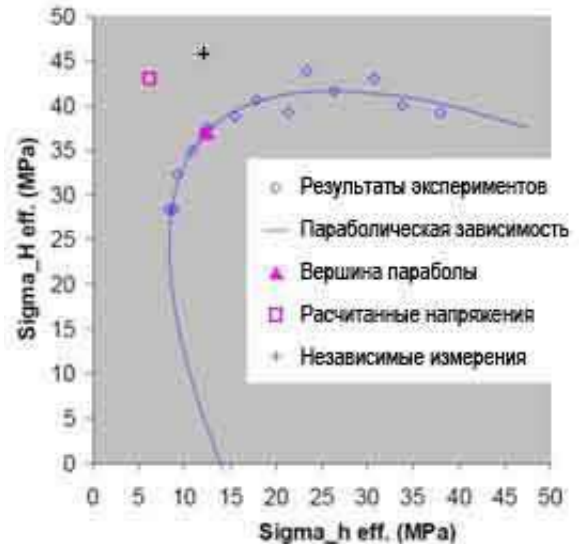


Рис. 1.25. Результаты определения горизонтальных напряжений σ_H и σ_h [51]

Другие варианты подхода трехосного нагружения керна предложили Шкуратник В.Л. и Лавров А.В. в работе [43]. Согласно следствиям разработанной ими модели (см. п. 1.2.3) эффект Кайзера может использоваться для получения информации о природном поле напряжений в следующих случаях:

1. Определение направлений действия минимального σ_3 и промежуточного σ_2 главных напряжений в массиве. Если направление максимального главного напряжения σ_1 определено ранее и напряженное состояние в массиве является неравнокомпонентным ($\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$), то для определения направления σ_3 необходимо изготовить образцы, ориентированные в плоскости перпендикулярной оси σ_1 с определенным шагом, и произвести их нагружение в режиме обобщенного растяжения по схеме Беккера (увеличение $\sigma_1 = \sigma_2$, при $\sigma_3 = 0$, которое действует в направлении оси образца). Образец, в котором наиболее ярко проявляется эффект Кайзера, соответствует направлению напряжения σ_3 . Направление промежуточного главного напряжения σ_2 определяется путем построения перпендикуляра к направлениям σ_1 и σ_3 .

2. Определение типа трехосного напряженного состояния при известном направлении максимального главного напряжения σ_1 в массиве. Если в процессе испытаний образцов по схеме Беккера, рассмотренной в предыдущем пункте,

эффект Кайзера имеет место во всех образцах независимо от ориентации, причем при одних и тех же значениях $\sigma_1 = \sigma_2$, напряженное состояние массива является осесимметричным (схема Кармана $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$).

3. Определение величины максимального главного напряжения σ_1 при осесимметричном напряженном состоянии массива и известном значении $\sigma_2 = \sigma_3$. В данном случае σ_1 можно определить одним из двух способов. В первом способе необходимо выполнить испытание по схеме Кармана образца, ориентированного в направлении σ_1 , при постоянном боковом давлении, соответствующем величине $\sigma_2 = \sigma_3$ в массиве. Эффект Кайзера будет иметь место при достижении нагрузкой $\sigma_{1ЭК}^I$ величины максимального главного напряжения σ_1 . Второй способ заключается в одноосном нагружении образца, ориентированного в направлении σ_1 , и определении напряжения $\sigma_{1ЭК}^I$, при котором будет эффект Кайзера. Тогда напряжение σ_1 можно определить по формуле: $\sigma_1^I = \sigma_{1ЭК}^I + (k + 1)\sigma_3^I$. Если значение коэффициента k не известно для данной породы, то необходимо проведение дополнительных испытаний.

4. Определение неизвестных величин двух главных напряжений (σ_1, σ_3) при осесимметричном напряженном состоянии массива. Необходимо изготовить серию образцов, ориентированных в направлении действия σ_1 в массиве. Далее каждый образец испытывается в камере трехосного сжатия в режиме пропорционального осесимметричного нагружения, т.е. при постоянстве соотношения σ_1/σ_3 в процессе нагружения. Величина соотношения σ_1/σ_3 задается различной для разных образцов. Далее необходимо выбрать тот образец серии, в котором эффект Кайзера проявляется наиболее отчетливо. Значения σ_1 и σ_3 , при которых имеет место эффект в образце, равны главным напряжениям σ_1 и σ_3 в массиве.

1.3.3. Методы растяжения

В большинстве методов измерения напряжений на основе эффекта Кайзера в качестве основного механизма его проявления в породах выступает процесс возобновления роста трещин. При таком подходе необходимо учитывать

условия нагружения в установочном и тестовом циклах, т.к. направление распространения трещин зависит от напряженного состояния породы. Поэтому, по мнению некоторых исследователей [43, 46, 48], метод одноосного нагружения породы не пригоден для активизации ориентированной трещиноватости, образованной в условиях трехосного неравнокомпонентного напряженного состояния. Для пояснения данного утверждения воспользуемся методом графического изображения различных систем трещин, предложенным Holcomb'ом в работе [63].

Так как Holcomb представлял идеализированную форму трещины в виде тонкого диска, то для ее описания в пространстве удобно использовать вектор, направление которого совпадает с нормалью к плоскости диска, а модуль вектора соответствует радиусу диска. Если первоначальную хаотичную трещиноватость породы представить в виде множества таких векторов, имеющих начало в общей точке, то поверхность их описывающая будет иметь форму близкую к шару (рис. 1.26, а). Как известно, при одноосном сжатии породы трещины произрастают вдоль максимального главного напряжения, а трещины, ориентированные перпендикулярно оси нагружения, закрываются. В результате этого шар будет принимать дискообразную форму (рис. 1.26, а). В случае одноосного или обобщенного ($\sigma_3 < \sigma_1 = \sigma_2$) растяжения вдоль одной из осей (например, оси Z на рис. 1.26, б) трещины распространяются перпендикулярно оси растяжения, т.е. шар примет сигарообразную форму. Таким образом, показано, что по сравнению с одноосным сжатием режим растяжения является более избирательным и приводит к росту только тех трещин, которые ориентированы в определенном направлении, ортогональном оси растяжения.

В результате численного эксперимента по моделированию формы поверхности поврежденности Holcomb пришел к выводам, что с помощью метода растяжения можно оценить направления главных напряжений, а также дивергент тензора напряжений. Однако определить данным методом абсолютные величины главных компонент поля напряжений не представляется возможным [46].

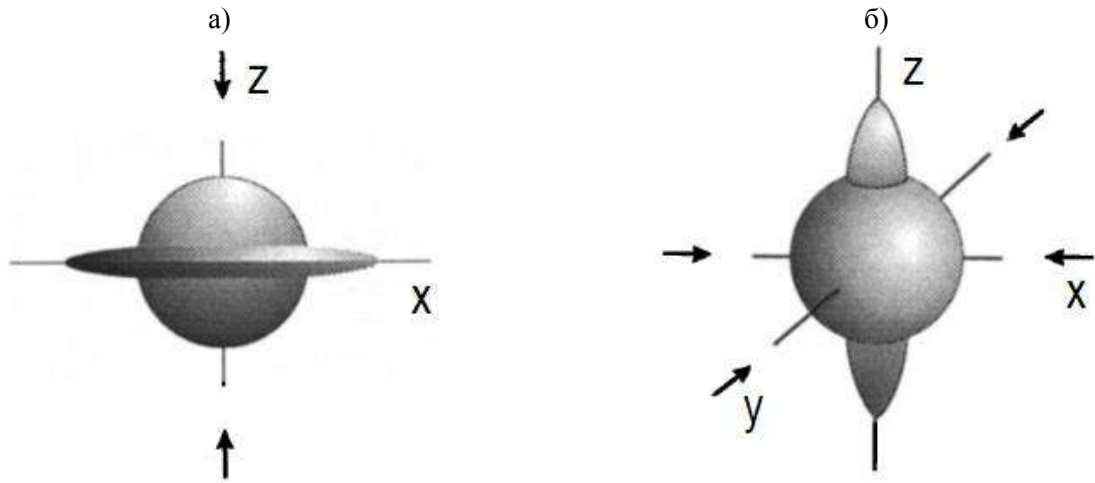


Рис. 1.26. Схематичное изображение эволюции хаотичной трещиноватости [63]:
a – после одноосного сжатия вдоль оси *Z*; *б* – после растяжения вдоль оси *Z*

Чувствительность к отклонению оси нагружения в тестовом цикле от направления максимального главного напряжения σ_1 установочного цикла является важным свойством при использовании эффекта Кайзера для определения напряжений. Данную особенность изучали Шкуратник В.Л. и Лавров А.В. в работах [43, 64], где выполнялись эксперименты по циклическому нагружению образцов пород бразильским методом с поворотом осей нагружения между циклами, а также численное моделирование эффекта Кайзера при данных режимах нагружения (рис. 1.27). По результатам исследований было установлено, что при углах отклонения более 15° между осями нагружения в двух последовательных циклах эффект Кайзера полностью исчезает.

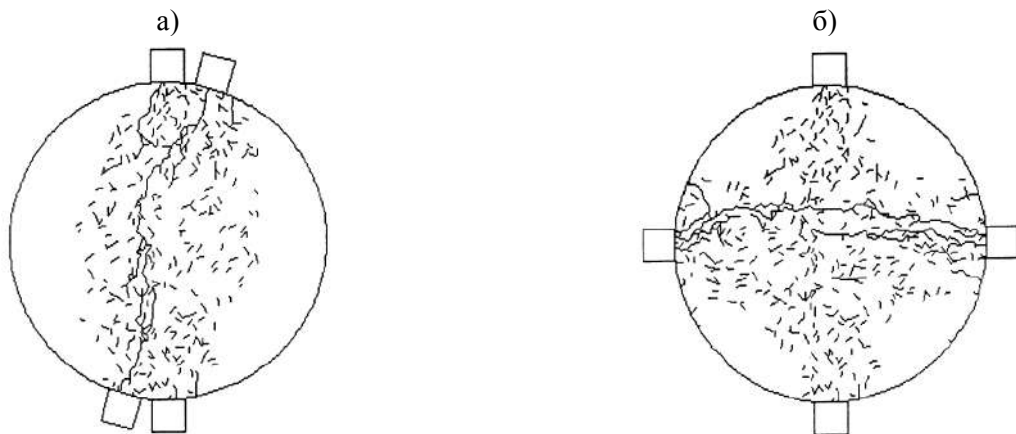


Рис. 1.27. Схематичное изображение развития трещиноватости при нагружении горных пород бразильским методом с поворотом угла между циклами [64]: *a* – 16° ; *б* – 90°

Установленную закономерность использовал Николенко П.В. в работе [65] при разработке метода определения величины и направления максимального главного напряжения, действующего в плоскости ортогональной оси измерительного шпура, суть которого заключается в следующем. В контролируемой области массива вдоль одного из главных напряжений бурится шпур, в котором на заданной глубине размещается эластичная капсула, заполненная эпоксидной смолой с отвердителем и наполнителем в жидком состоянии (рис. 1.28, а). После полной полимеризации смолы сформированный композиционный цилиндр начинает воспринимать нагрузку, вызываемую деформацией стенок шпура, в результате чего в указанном цилиндре формируется эффект Кайзера.

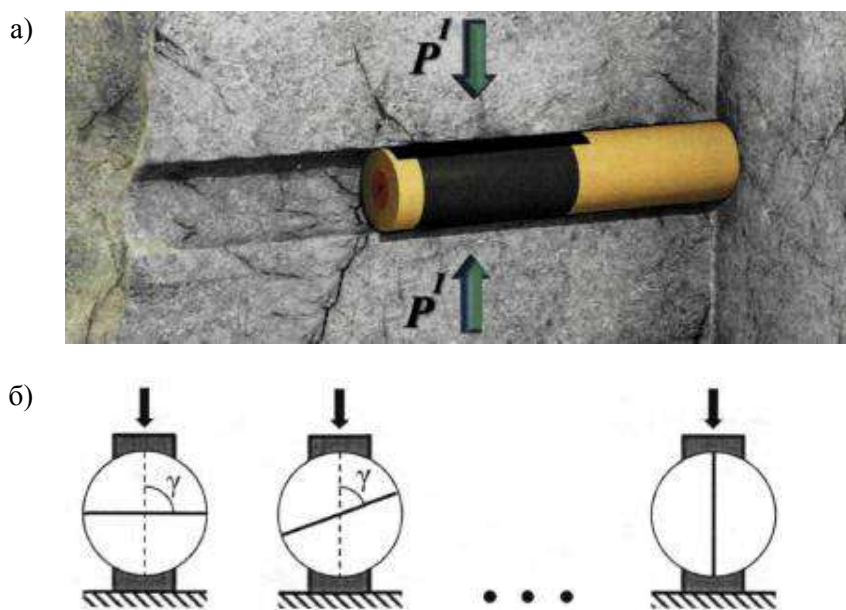


Рис. 1.28. Схема метода определения величины и направления максимального главного напряжения в массиве, представленного в работе [65]:
а – установка капсулы с полимерной смолой в массиве;
б – испытание дисков, изготовленных из извлеченной капсулы

По истечении времени, необходимого для полимеризации смолы и завершения деформационных процессов вокруг шпура, капсула извлекается из массива при помощи обуривания её кольцевой коронкой. Извлеченный из шпура цилиндр разрезается перпендикулярно оси на несколько одинаковых по толщине дисков. Полученные диски нагружают вдоль диаметра с использова-

нием стальных пуансонов, каждый под разными углами. Схема нагружения образцов представлена на рисунке 1.28, б. По ориентации диска, в котором эффект Кайзера выражен наиболее ярко, судят о направлении действия максимального главного напряжения, а значение осевой нагрузки, при которой он наблюдается, соответствует величине напряжения, действующего в массиве [65].

Преимущество использования композиционных материалов для запоминания поля напряжений заключается в том, что по сравнению с горными породами данные материалы легко поддаются механообработке и имеют более однородную структуру. Поэтому проявление эффекта Кайзера в таких материалах носит более стабильный характер, что повышает точность определения направления и величины максимального главного напряжения.

1.3.4. Метод нагружения околоскважинной области массива

Метод нагружения околоскважинной области массива заключается в локальной разгрузке некоторой области массива посредством бурения скважины и последующем нагружении ее стенок прессиометром или гидродомкратом с одновременной регистрацией импульсов АЭ (рис. 1.29). О восстановлении породами околоскважинного пространства естественного напряженного состояния судят по скачкообразному увеличению параметров АЭ.

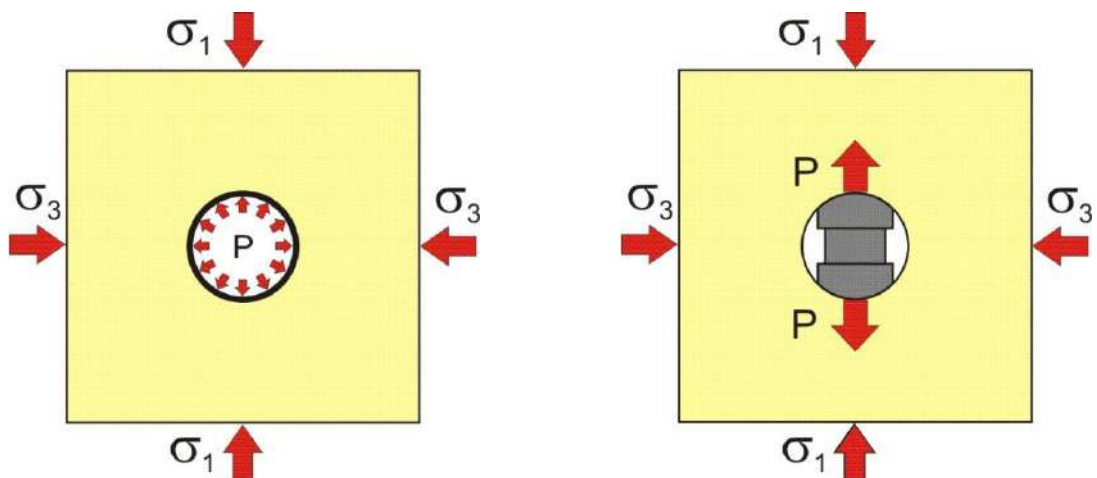


Рис. 1.29. Схематическое изображение нагружения стенок скважины прессиометром (а) и гидродомкратом (б)

Важным преимуществом такого подхода перед лабораторными испытаниями керна является то, что производится разгрузка и повторное восстановление только одной компоненты поля напряжений. Данное обстоятельство нивелирует проблему несоответствия условий нагружения в установочном и тестовом циклах, и связанное с этим различие в механизмах трещинообразования, что является фундаментальным вопросом при разработке методов измерения напряжений на основе эффекта Кайзера.

В работе [66] Лыковым К.Г. представлены результаты нагружения прессиометром стенок горизонтального шпура, пробуренного в соляном массиве. Измерения проводились в условиях Верхнекамского месторождения калийных солей (ВКМКС) в междукамерном целике пласта КрII рудника БКПРУ-2. Нагружение околошпуровой области массива осуществлялось на разном удалении от контура выработки. Установлено, что на графиках зависимостей суммарного количества импульсов АЭ от давления в гидросистеме наблюдается отчетливый эффект Кайзера (рис. 1.30).

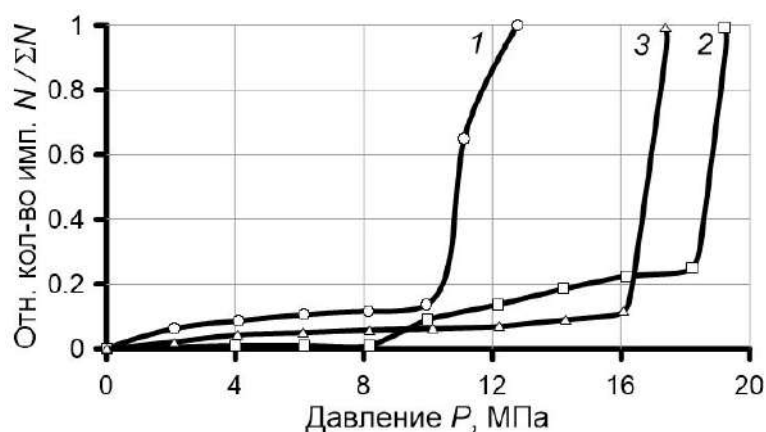


Рис. 1.30. Нормированные зависимости суммарного количества импульсов АЭ от давления в гидросистеме на различных расстояниях от контура выработки [66]: 1 – 0,4 м; 2 – 0,7 м; 3 – 1,0 м

В работе [42] Шкуратник В.Л. и Лавров А.В. выполняли исследование закономерностей проявления эффектов памяти в породах околоскважинного пространства путем постановки соответствующего численного моделирования с использованием двухмерной модели "крылатой" трещины. Околоскважинная область представляла собой цилиндр со сквозным отверстием вдоль его оси

(рис. 1.31). Трещины равномерно распределены по области случайным образом, а плоскости трещин параллельны оси скважины. Моделировали случаи как хаотической, так и ориентированной трещиноватости массива. Рассматривались три типа напряженного состояния массива: 1) одноосное $\sigma_x > 0, \sigma_y = 0$; 2) равнокомпонентное $\sigma_x = \sigma_y > 0$; 3) неравнокомпонентное (общий случай) $\sigma_x > \sigma_y > 0$. Процесс роста трещин состоял из трех последовательных этапов механического воздействия на околоскважинную область.

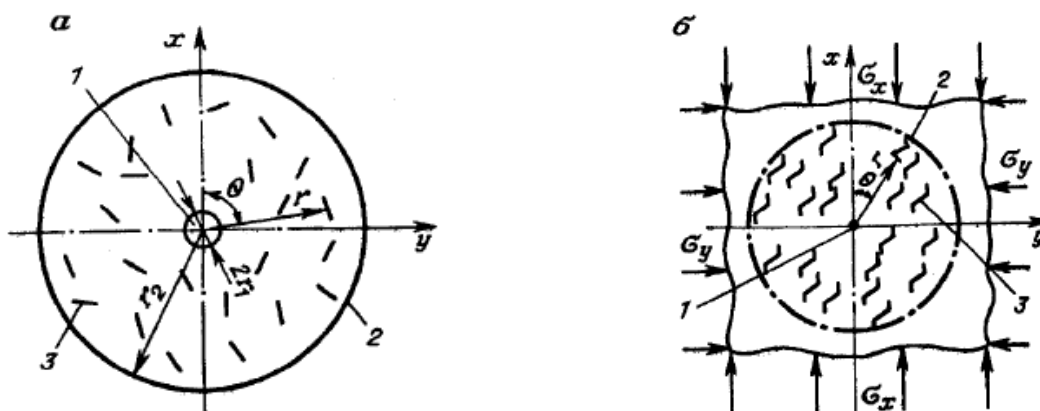


Рис. 1.31. Модель околоскважинного пространства с различной ориентацией трещин в работе [42]: а – хаотическая трещиноватость; б – ориентированная; 1 – измерительная скважина; 2 – граница околоскважинного пространства; 3 – трещина

На первом этапе осуществляли нагружение области горным давлением (напряжениями σ_x, σ_y) и рассчитывали длину и направления ответвившихся трещин растяжения. На втором этапе производилась разгрузка области измерительной скважины и также выполнялся расчет длин и направлений трещин растяжения. На третьем этапе производилось ступенчатое нагружение стенок скважины прессиометром. Для каждой ступени рассчитывали суммарное число растущих трещин.

По результатам моделирования установлено, что в случае неравнокомпонентного напряженного состояния ($\sigma_x > \sigma_y > 0$) и хаотической ориентации трещин эффект Кайзера отсутствует. При анизотропной трещиноватости массива в диапазоне углов $15^\circ \leq \varphi \leq 80^\circ$ эффект Кайзера наступает при значении давления на стенки скважины в пределах $\sigma_y \leq P_{\text{ЭК}} \leq \sigma_x$, приближаясь к вели-

чине меньшего главного напряжения в массиве σ_y . Моделирование циклического нагружения стенок скважины показало, что независимо от типов трещиноватости и напряженного состояния массива эффект памяти проявляется при достижении давлением в скважине максимальной величины предыдущего цикла.

Натурные эксперименты по нагружению околоскважинного пространства прессиометром с одновременной регистрацией акустической эмиссии выполнялись Токсаровым В.Н. и др. в условиях массива соляных пород ВКМКС [62, 67-69]. Эксперименты проводились с целью оценки напряженного состояния пород в междукамерных целиках. Предполагалось, что давление прессиометра, при котором возникает эффект Кайзера ($P_{ЭК}$), соответствует средним напряжениям, действующим перпендикулярно оси скважины:

$$\sigma_{ср} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} = \frac{P_{ЭК}}{k}, \quad (1.8)$$

где σ_1 и σ_2 – соответственно, вертикальная и горизонтальная (вдоль оси целика) компоненты напряжений; k – коэффициент передачи давления.

В результате выполненных экспериментов установлено, что в центральной части целиков измеренные значения средних напряжений $\sigma_{ср}$ согласуются с расчетной величиной $\sigma_{ср}^p$ (рис. 1.32). Ближе к краевым частям наблюдаются повышенные значения напряжений, а приконтурные области почти полностью разгружены.

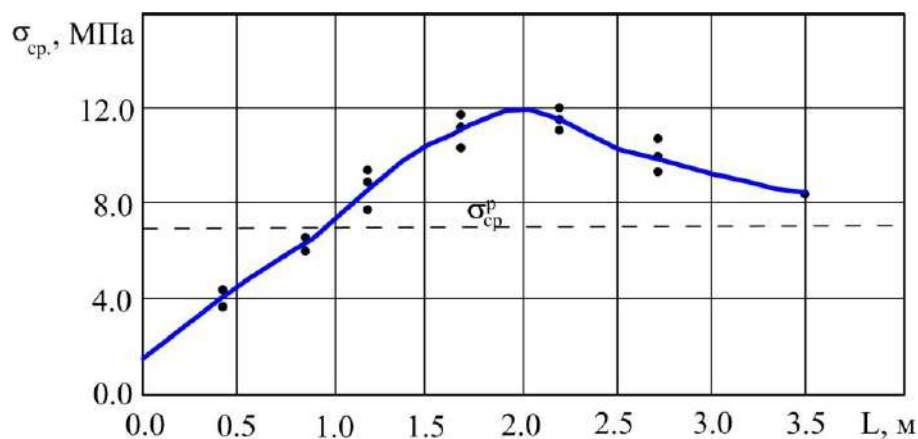


Рис. 1.32. Распределение средних напряжений по поперечному сечению междукамерного целика, установленное по результатам нагружения околошпурового пространства прессиометром [62]

По результатам численного моделирования [42] и натуральных экспериментов [62, 66-69] было показано, что в случае использования прессиометра величина давления эффекта Кайзера соответствует некоторой комбинации значений главных напряжений, действующих в плоскости, перпендикулярной оси скважины. Данное обстоятельство обусловлено тем, что поле напряжений, индуцируемое прессиометром, который осуществляет всестороннее равномерное нагружение стенок скважины, существенно отличается от поля напряжений нетронутого массива. В связи с этим использование гидродомкрата, совершающего приложение нагрузки к стенкам скважины в одной плоскости (рис. 1.29, б), является более предпочтительным, т.к. позволяет независимо оценить главные компоненты поля напряжений в массиве.

В литературе одни из первых упоминаний об использовании гидродомкрата для определения напряжений методом на основе эффекта Кайзера встречаются у исследователей Lord A.E. и Koerner R.M. [70, 71]. Натурные эксперименты выполнялись ими в карьере и заключались в циклическом нагружении гидродомкратом Гудмана стенок скважин, пробуренных в 5-ти блоках скальных пород объемом 2,8-28,0 м³. Для приема импульсов акустической эмиссии из околоскважинного пространства на конце гидродомкрата было установлено специальное устройство с пневмоцилиндром, прижимающим АЭ-преобразователь с резонансной частотой 30 кГц к стенке скважины. По результатам испытаний в 3-х блоках из 4-х обнаружено увеличение скорости нарастания активности АЭ, когда эффективное давление гидродомкрата на околоскважинный массив достигает 3,0-4,0 МПа [71]. Полученные значения соответствовали ожидаемому уровню напряжений в массиве.

В работе [72] Watters R.J. и Soltani A.M. представили результаты натуральных экспериментов по нагружению стенок вертикальных поверхностных скважин гидродомкратом с одновременной регистрацией импульсов акустической эмиссии в условиях трещиноватого массива скальных пород. Для приема АЭ-импульсов преобразователи размещали в скважинах, пробуренных параллельно

измерительной скважине, в которой был установлен гидродомкрат. По результатам экспериментов установлен различный характер проявления активности акустической эмиссии в зависимости от азимута нагружения, обусловленный ориентацией горизонтальных напряжений. Также сделан вывод, что более отчетливое проявление эффекта Кайзера наблюдается в породах с минимальной трещиноватостью. В сильно нарушенных скальных породах обнаружение эффекта затруднительно [72].

Токсаров В.Н. и др. в исследовании [73] использовали гидродомкрат Гудмана при изучении проявления эффекта Кайзера в околоскважинном пространстве массива соляных пород ВКМКС. По результатам циклического нагружения стенок горизонтальной скважины в вертикальном и горизонтальном направлениях в первом цикле установлено резкое изменение параметров АЭ, обусловленное, по-видимому, достижением нагрузкой величины напряжений, действующих в массиве до разгрузки. В последующих циклах нагружения эффект Кайзера проявляется, когда давление на стенки скважины соответствует максимальному значению предыдущего цикла.

Таким образом, анализ предшествующих работ, посвященных использованию гидродомкрата для нагружения стенок скважины, показал, что их основной целью являлось установление самого факта наличия эффекта Кайзера в породах околоскважинной области массива. Поэтому исследования причин его возникновения, интерпретации и сравнения результатов с другими методами определения напряжений, как правило, не проводилось.

1.4. Выводы и постановка задач исследований

По результатам анализа современного состояния методов измерения напряжений можно сделать следующие выводы:

1. Трудоемкость и высокая стоимость реализации традиционных скважинных методов измерения напряжений обуславливают развитие альтернатив-

ных способов, в том числе основанных на изучении образцов керна горных пород.

2. В связи с малой базой измерения деформаций и чувствительностью к различным помеховым факторам методы измерения напряжений, основанные на изучении керна, не имеют явного преимущества перед "эталонными" скважинными техниками.

3. Использование скважинных методов и методов, основанных на изучении керна, затруднено в сложных геологических условиях, где наблюдаются анизотропия, крупнозернистая структура, ярко выраженная ползучесть пород, а также сильная нарушенность массива трещинами.

4. Методы измерения напряжений на основе эффекта Кайзера имеют преимущество перед остальными методами, которое заключается в простоте выполняемых операций и высокой скоростью получения результатов. При их реализации не требуется проведения сложных высокоточных измерений деформаций, а также отсутствует необходимость модельного перехода к напряжениям. По сравнению со скважинными "эталонными" техниками метод пригоден для использования в сложных геологических условиях.

5. Среди методов измерения напряжений на основе эффекта Кайзера наиболее перспективным является нагружение околоскважинного пространства гидродомкратом. При данном подходе нивелируется проблема несоответствия условий нагружения породы в установочном и тестовом циклах. Также использование гидродомкрата позволяет независимо оценить компоненты поля напряжений в массиве.

В связи с этим, для **разработки и обоснования скважинного метода определения главных компонент поля напряжений в массиве горных пород на основе эффекта Кайзера** необходимо решить следующие задачи:

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.

ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА СКВАЖИННОГО МЕТОДА ОЦЕНКИ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД

2.1. Разработка методического и аппаратного обеспечения метода

Суть предлагаемого скважинного метода измерения компонент поля напряжений заключается в разгрузке некоторой области массива пород бурением скважины и повторном нагружении ее стенок гидродомкратом Гудмана. При этом эффект Кайзера используется в качестве индикатора восстановления породами околоскважинного пространства компоненты поля напряжений, действующей в направлении нагружения.

Для определения напряженного состояния массива горных пород по изменению параметров акустической эмиссии нагружаемой области необходимо обеспечить прием сигналов АЭ непосредственно из околоскважинного пространства. С этой целью на одной из нагружающих пластин гидродомкрата установлен пьезоэлектрический преобразователь с резонансной частотой 165 кГц. Также в состав комплекса входит портативный прибор регистрации акустической эмиссии, позволяющий осуществлять синхронную запись АЭ-сигнала и давления в гидросистеме. Таким образом, скважинный комплекс аппаратуры для измерения напряжений в массиве горных пород состоит из следующего оборудования (рис. 2.1):

- 1) скважинный гидродомкрат Гудмана, с установленным преобразователем акустической эмиссии;
- 2) портативный 2-х канальный прибор регистрации акустической эмиссии и параметрических сигналов «Uniscop»;
- 3) электронный индикатор деформаций стенок скважины, обрабатывающий сигнал с 2-х LVDT-датчиков перемещений нагружающих пластин гидродомкрата;
- 4) электронный манометр;
- 5) предусилитель сигнала преобразователя акустической эмиссии;

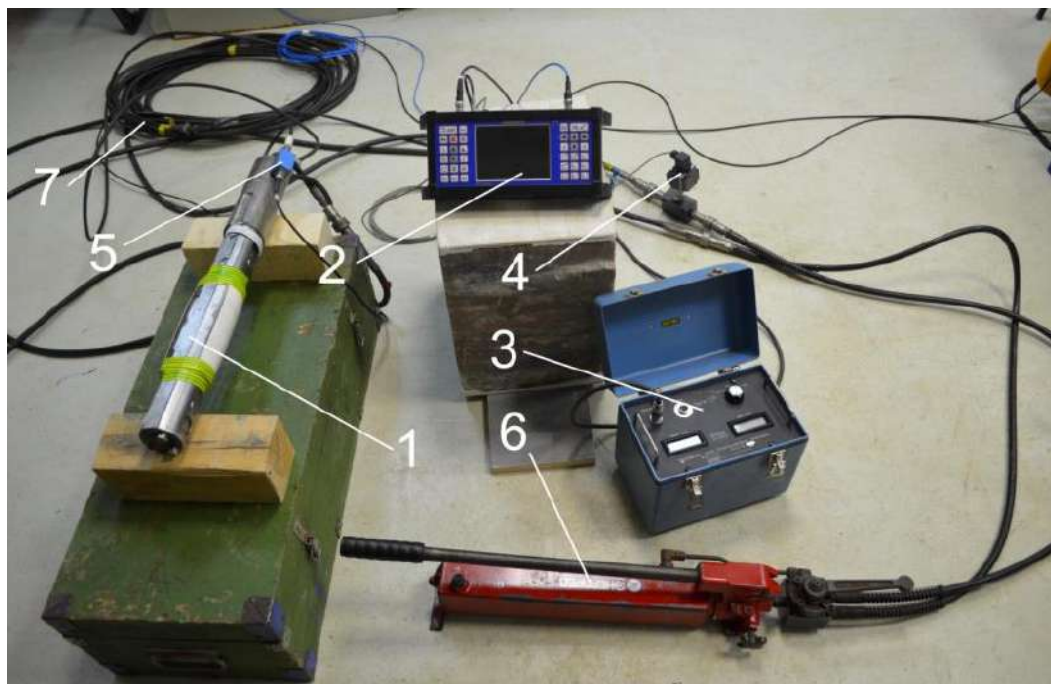


Рис. 2.1. Скважинный комплекс для измерения напряжений в массиве горных пород: 1 – гидродомкрат Гудмана; 2 – прибор регистрации АЭ; 3 – индикатор деформации; 4 – электронный манометр; 5 – предусилитель сигналов АЭ; 6 – гидравлический насос; 7 – высоконапорные рукава

- б) ручной гидравлический насос;
- 7) гидравлические высоконапорные рукава.

С целью обоснования выбора рабочей частоты преобразователя для регистрации импульсов акустической эмиссии выполнен анализ работ [74-78]. В данных работах представлены результаты измерений напряжений методом гидроразрыва горизонтальных скважин, пробуренных в стенках горных выработок, в условиях массивов соляных и скальных пород. Определение пространственного положения трещины гидроразрыва выполнялось методом акустической эмиссии. Для этого вокруг измерительной скважины, где производился гидроразрыв, на расстоянии 1-5 м осуществлялось бурение 3-4 параллельных скважин, в которых размещались АЭ-преобразователи с полосой пропускания 1-100 кГц. Также в исследовании [72] сообщается об использовании преобразователей с резонансной частотой 30 кГц для регистрации импульсов АЭ из параллельной скважины при нагружении стенок измерительной скважины гидродомкратом. Таким образом, данные работы убедительно доказывают, что рассматриваемый диапазон частот может быть признан подходящим для регистра-

ции АЭ-импульсов из параллельной скважины в условиях массивов соляных и скальных пород.

В свою очередь, в предлагаемом методе объем деформируемого околоскважинного пространства при нагружении гидродомкратом составляет около $0,13 \text{ м}^3$ [79]. Тогда максимальное расстояние от источника импульсов до преобразователя, установленного на одной из пластин гидродомкрата, гораздо меньше, чем в анализируемых работах [72, 74-78], где расстояние между скважинами составляет, как правило, более пяти их диаметров. В связи с этим можно сделать вывод, что пьезоэлектрический преобразователь с резонансной частотой 165 кГц вполне пригоден для регистрации АЭ-импульсов в условиях массивов соляных и скальных пород. Данное заключение подтверждает исследование [66], в котором регистрация импульсов при нагружении околоскважинного пространства массива соляных пород осуществлялась с помощью преобразователя с собственной частотой колебаний 100 кГц, установленного непосредственно на прессиометр.

Гидродомкрат Гудмана (рис. 2.2) фирмы «Durham Geo Slope Indicator» представляет собой каротажный зонд, предназначенный для измерения деформаций стенок скважины под действием приложенной нагрузки. Особенностью конструкции данного гидродомкрата является возможность приложения нагрузки к породам околоскважинного пространства в одной плоскости посредством двух стальных подвижных полукруглых пластин, что позволяет оценить величины компонент поля напряжений в различных направлениях.

Зонд спроектирован для применения в скважинах диаметром 76 мм. Максимальное гидравлическое давление, развиваемое домкратом, составляет 68,95 МПа. Благодаря использованию гидроцилиндров специальной формы коэффициент передачи давления на породу составляет 0,93. Два датчика перемещений, принцип работы которых основан на линейно-регулируемом дифференциальном трансформаторе (LVDT), установлены внутри устройства ближе к краям пластин. Максимальный диапазон измерения смещений LVDT-датчиков $\pm 3,81 \text{ мм}$.

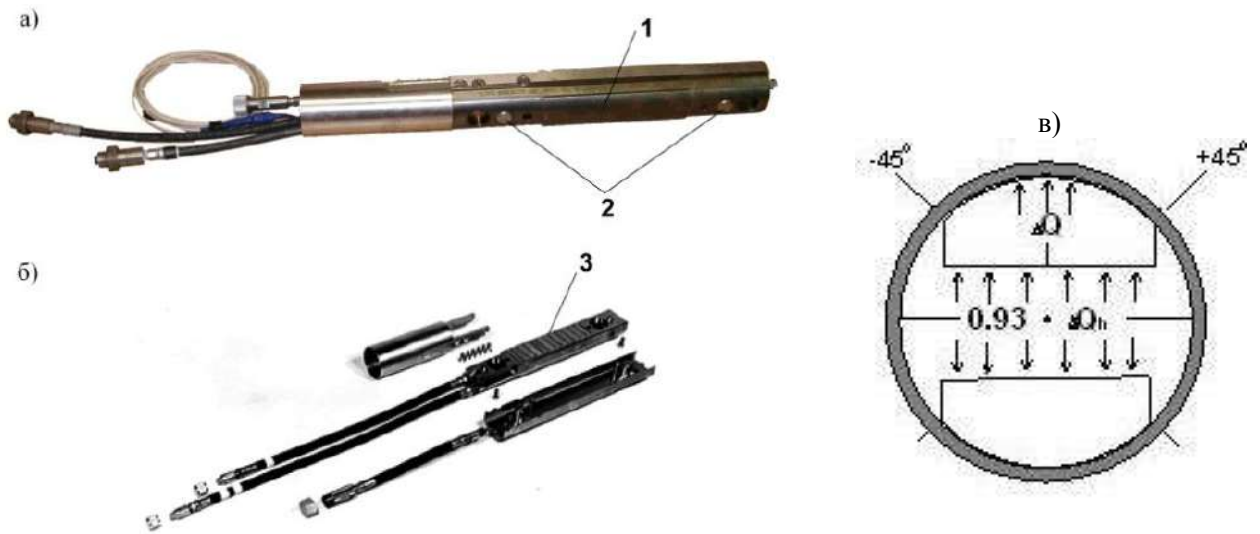


Рис. 2.2. Сквaziнный гидродомкрат Гудмана:
 а) общий вид в сборе; б) в разобранном состоянии; в) схема нагружения стенок скважины;
 1 – нагружающая пластина; 2 – датчики деформаций; 3 – гидроцилиндры

Переносной прибор для измерения деформации контура скважины работает от внешней перезаряжаемой батареи или от встроенного аккумулятора. Смещение нажимной пластины отображается двумя цифровыми дисплеями – по одному на каждый датчик. Они показывают отклонение пластины от номинального диаметра скважины в 76,2 мм с точностью 0,01 мм. Знак полярности указывает направление отклонения в большую или меньшую сторону от первоначального диаметра. Общее смещение или предел расширения гидродомкрата составляет 11,3 мм. При полностью сжатых нажимных пластинах (устройство полностью закрыто), диаметр зонда равен 69,9 мм. Когда устройство полностью открыто, диаметр – 81,2 мм.

Гидравлический ручной насос «Энерпред Р-84» создает максимальное выходное давление 70,0 МПа. Давление в гидросистеме измеряется с помощью электронного манометра. К домкрату прикреплены два гидравлических рукава: короткий – линия для подачи давления при расширении устройства; длинный – для отводящей линии (сброс давления и закрытие устройства). Гидравлические рукава, манометр, Т-коннектор и насос имеют самоуплотняющиеся муфты с

пылезащитным колпачком. Эти компоненты остаются заполненными маслом после их разъединения.

Для доставки гидродомкрата в точку проведения измерений изготовлен комплект досылочных штанг диаметром 56 мм и толщиной стенки 3 мм, ориентирующее устройство и переходник для крепления гидродомкрата (рис. 2.3).

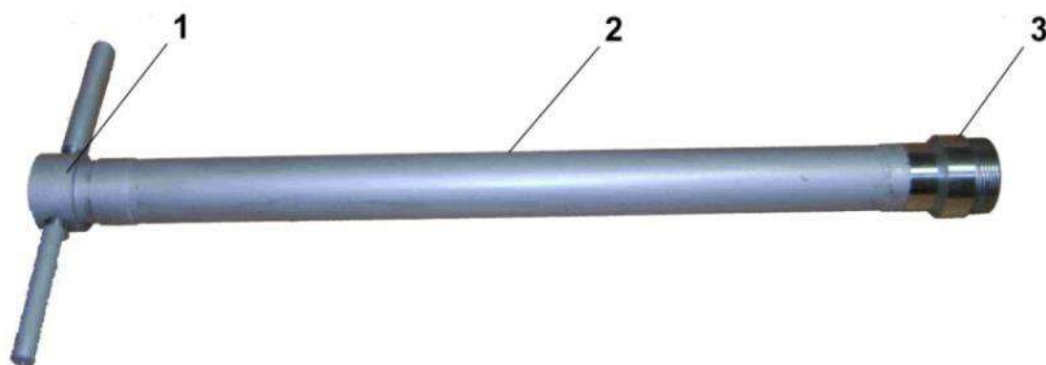


Рис. 2.3. Конструкция досылочной штанги:
1 – ориентирующая насадка; 2 – досылочная труба;
3 – переходная муфта для крепления гидродомкрата

Испытания скважины гидродомкратом выполняются согласно стандарту [80]. В процессе проведения экспериментов на первом этапе в стенке горной выработки осуществляется бурение горизонтальной скважины диаметром 76 мм (рис. 2.4). Глубина скважины определяется задачами исследований и обычно превышает ширину зоны опорного давления. Затем в скважину помещается гидродомкрат на испытательную глубину. Далее с помощью ручного насоса производится равномерное повышение давления в гидроцилиндрах устройства до значений, превышающих ожидаемые величины напряжений в районе исследований. На следующем этапе процедура проводится в обратном порядке, давление уменьшается путем плавного приоткрывания клапана сброса давления на насосе. В каждой измерительной точке обычно проводится 2-3 цикла нагружения. Для исключения взаимного влияния замерные точки в скважине располагаются на расстоянии 300 мм друг от друга.

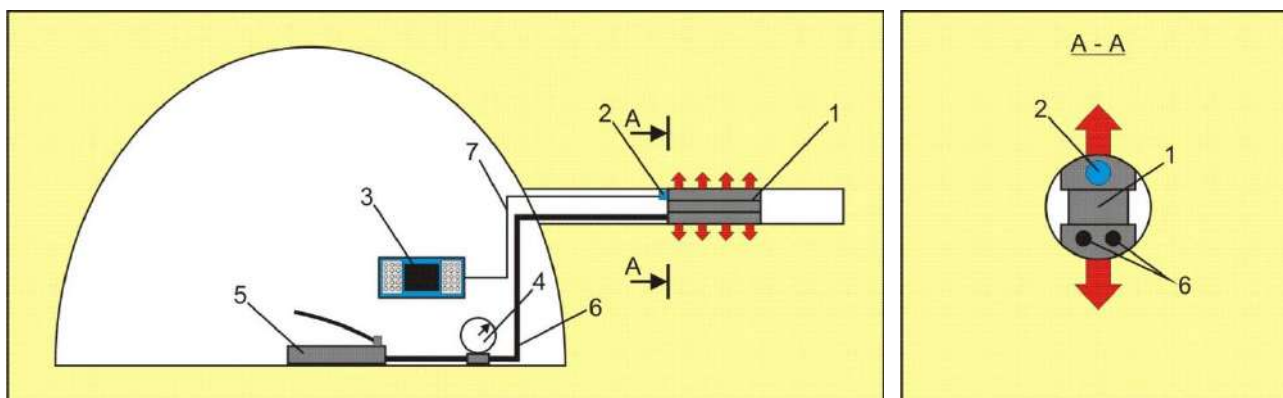


Рис. 2.4. Схема измерения компонент поля напряжений гидродомкратом в горизонтальной скважине: 1 – гидродомкрат; 2 – преобразователь АЭ (резон. част. 165 кГц); 3 – прибор регистрации АЭ; 4 – манометр; 5 – ручной насос; 6 – высоконапорные рукава; 7 – коаксиальный кабель

По результатам экспериментов строятся графики зависимости давления гидродомкрата на стенки скважины от времени и относительного изменения ее диаметра (рис. 2.5). Величина давления гидродомкрата представляет собой давление в гидросистеме P_h с учетом коэффициента передачи давления на стенки скважины k ($P = k \cdot P_h$) [80]. Коэффициент k в случае гидродомкрата конструкции Гудмана составляет 0,93 (рис. 2.2, в). На диаграммах деформирования можно выделить несколько характерных стадий (рис. 2.5, б). На первой стадии (участок 1-2) в процессе нагружения происходит раздавливание домкратом неровностей стенок скважины и остатков бурового штыба, уплотнение околоскважинного массива пород. Участок 2-3 соответствует полному контакту нажимных пластин со стенками скважины. На стадии 3-4 осуществляется плавное снижение нагрузки действующей на стенки скважины путем сброса давления в гидросистеме домкрата специальным клапаном на ручном насосе. Далее производится второй цикл нагружения, на начальной стадии которого можно опять выделить участок уплотнения горных пород (4-5). Затем следует линейно-упругое деформирование околоскважинного массива (5-6), плавно переходящее в стадию упругопластического (6-7).

По диаграммам деформирования стенок скважины можно оценить деформационные свойства пород. Модуль деформации D определяется на квазилинейном участке нагружения первого цикла диаграммы деформирования

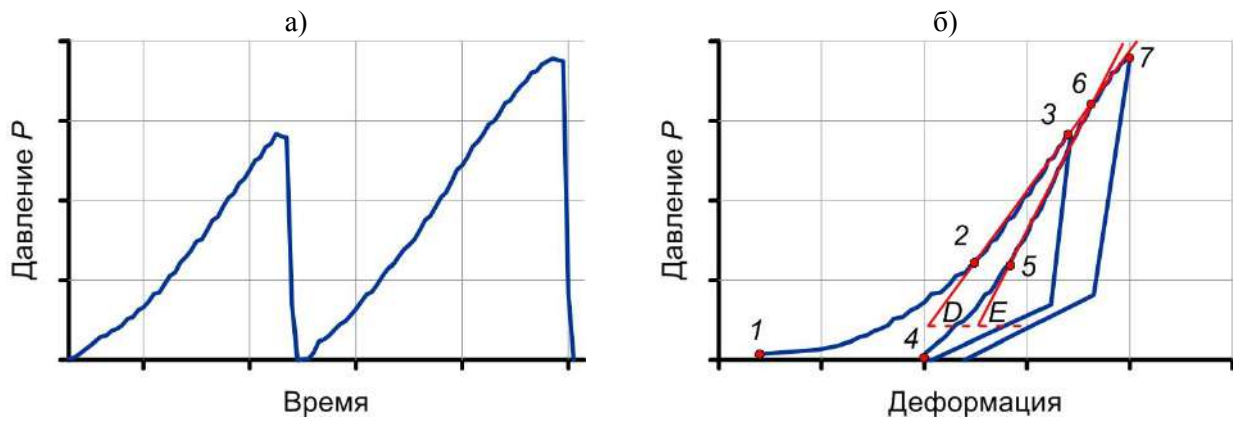


Рис. 2.5. Характерные зависимости давления (а) и относительной деформации (б) от времени при испытании стенок скважины гидродомкратом

(участок 2-3 на рис. 2.5, б). Модуль упругости E – на линейно-упругом участке нагружения 2-го цикла (участок 5-6 на рис. 2.5, б).

Оценка компоненты поля напряжений, действующей в направлении нагружения гидродомкратом, осуществляется по результатам анализа графиков изменения параметров акустической эмиссии от времени или давления [73]. За величину компоненты принимают значение давления гидродомкрата на стенки скважины ($P_{ЭК}$), при котором происходит резкое увеличение АЭ-параметров (рис. 2.6): активности АЭ – количества импульсов в единицу времени; или суммарного количества импульсов, накопленных с момента начала регистрации.

Одной из проблем при использовании эффекта Кайзера для оценки величин напряжений, действовавших на породу в прошлом, является определение

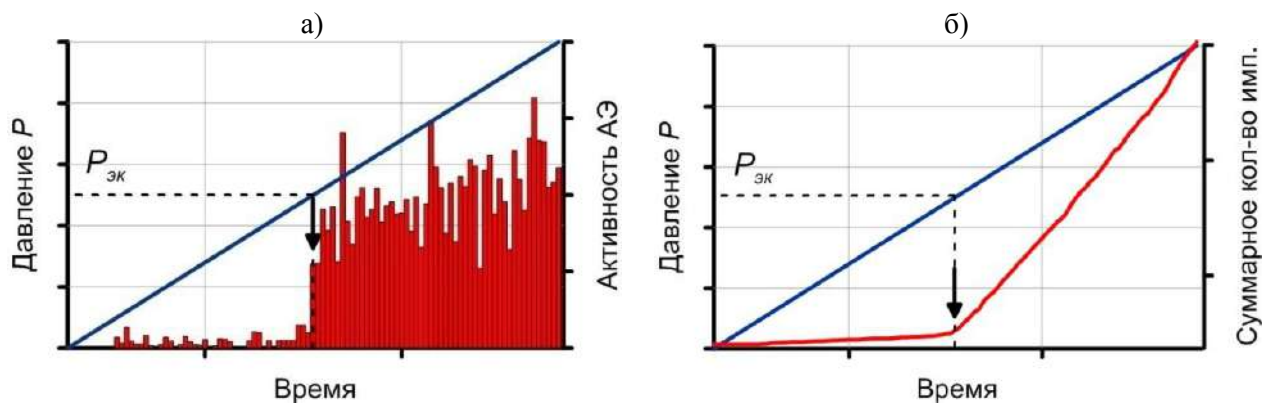


Рис. 2.6. Идеализированные зависимости АЭ-параметров и давления гидродомкрата от времени в первом цикле нагружения стенок скважины: а – количество импульсов в единицу времени; б – суммарное количество импульсов (стрелками показан момент проявления эффекта Кайзера)

момента его возникновения. Нередко активность АЭ при повторном нагружении, когда достигается величина предыдущей нагрузки, увеличивается не скачкообразно, а плавно, и визуально обнаружить эффект бывает достаточно сложно. Это может быть связано с сильной нарушенностью пород, влиянием помеховых факторов (влажность, температура, время и т.д.) или несоответствием условий нагружения в тестовом и повторном циклах [43]. В таких случаях исследователями разработано несколько способов определения эффекта Кайзера:

- по изменению производных 1-го или 2-го порядков кривых зависимости активности АЭ от нагрузки;
- методом пересечения касательных, построенных на линейных участках до и после начала интенсивного увеличения активности АЭ (рис. 2.7, а);
- по оценке разности активности АЭ между двумя последовательными циклами нагружения (рис. 2.7, б) [81];
- по определению точки максимальной кривизны зависимости активности АЭ от нагрузки (рис. 2.7, в) [56].

Из перечисленных выше методов обнаружения эффекта Кайзера в породах интерес представляет последний способ. Точка максимальной кривизны определяется по максимуму зависимости параметра K от нагрузки (рис. 2.7, в). Данный параметр характеризует скорость нарастания активности АЭ и выражается из следующих соотношений [56]:

$$Q = \arctan\left(\frac{\dot{N}(t)}{\sigma(t)}\right), \quad K = \frac{\partial Q}{\partial \sigma} \quad (2.1, 2.2)$$

где $\dot{N}(t)$ – зависимость активности АЭ от времени; $\sigma(t)$ – зависимость нагрузки от времени.

Преимущество такого способа заключается в том, что критерий возникновения эффекта Кайзера можно представить в виде определенных математических выражений. Это позволяет применять автоматические алгоритмы обработки результатов измерений, что значительно ускоряет процесс и уменьшает ошибки, связанные с влиянием субъективного фактора.

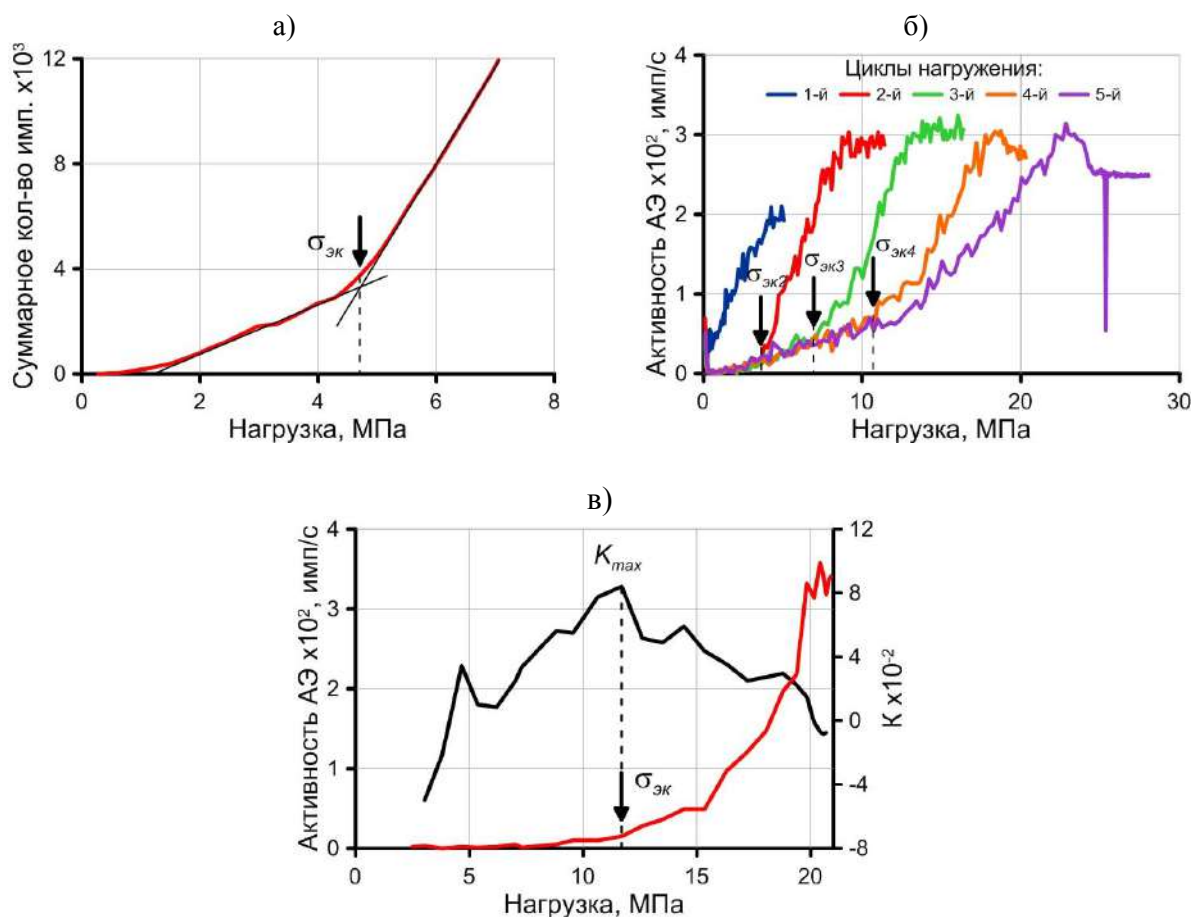


Рис. 2.7. Методы определения эффекта Кайзера:

a – метод касательных; *б* – по оценке разности активности АЭ между *i* и *i*+1 циклами нагружения; *в* – по определению точки максимальной кривизны зависимости активности АЭ от нагрузки

Также еще одной сложностью при измерениях напряжений в массиве пород предлагаемым скважинным методом является помеховая активность АЭ, возникающая за счет разрушения частиц породы бурового штыба и неровностей стенок скважины при нагружении гидродомкратом. Если с первым явлением можно справиться путем очистки стенок скважины, например продувкой сжатым воздухом или механическим путем, то во втором случае целесообразно использовать прокладки из эластичного материала. К тому же использование прокладок обеспечит более равномерную передачу давления на стенки скважины при несовпадении ее поверхности с нагружающими пластинами гидродомкрата. Однако данные меры могут привести к ухудшению акустического контакта между пластиной и стенкой скважины. В свою очередь, данную проблему можно решить применением материала прокладок с низким коэффициентом затухания и добавлением акустической смазки между ней и пластиной.

2.2. **Натурные исследования проявления эффекта Кайзера в породах околоскважинного пространства**

2.2.1. *Результаты натурных экспериментов*

На следующем этапе была выполнена апробация разработанной методики измерения напряжений в условиях нетронутого массива соляных пород Верхнекамского месторождения калийных солей [73, 82, 83]. В процессе экспериментальных исследований проводилось циклическое нагружение гидродомкратом стенок горизонтальной скважины в вертикальном направлении за зоной опорного давления. Характерные графики изменения активности акустической эмиссии и давления гидродомкрата представлены на рис. 2.8, а.

По результатам натурных экспериментов 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. 2.8, 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. [73].

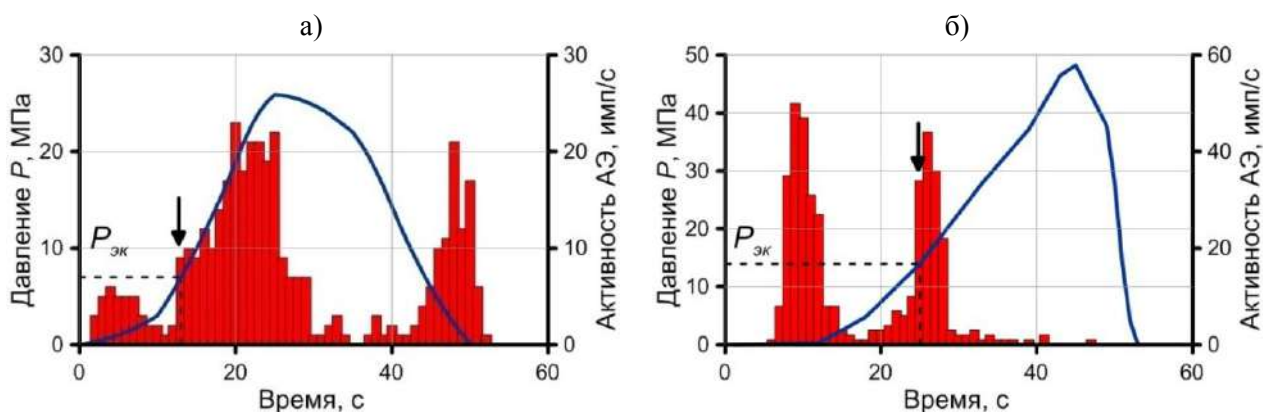


Рис. 2.8. Характерные графики изменения активности АЭ и давления гидродомкрата от времени в первом цикле нагружения стенок скважины в массиве:
а – соляных пород; *б* – трещиноватых скальных пород

После этого были выполнены натурные эксперименты по нагружению стенок горизонтальной скважины в вертикальном направлении в условиях нетронутого массива месторождения медистых песчаников Жаман-Айбат (Казахстан) [84]. На экспериментальном участке породный массив представлен в основном сероцветными песчаниками, реже алевролитами и аргиллитами, и в структурном отношении характеризуется значительной нарушенностью (рис. 2.9). Характерные графики изменения активности АЭ и давления гидродомкрата от времени в первом цикле нагружения представлены на рис. 2.8, б.



Рис. 2.9. Фотография трещиноватого массива скальных пород месторождения Жаман-Айбат (Казахстан)

По результатам натуральных экспериментов в условиях трещиноватого массива скальных пород 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 снижается до уровня фона и вновь резко увеличивается, когда давление достигает значения, соответствующего величине γH для данного района (рис. 2.8, 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.

2.2.2. Анализ особенностей проявления эффекта Кайзера в породах околоскважинного пространства

В горных породах выделяют несколько основных групп источников акустической эмиссии при их деформировании [85]: 1) пластическая деформация составляющих породу минеральных зерен, вызванная движением дислокаций в их кристаллической решетке; 2) скольжение по поверхностям существующих в породе трещин или нарушений, а также границам зерен; 3) образование и рост трещин. С другой стороны, данные процессы обуславливают пластический характер деформирования пород.

В монолитных ненарушенных скальных породах упругая стадия деформирования может достигать 80-90% от предела прочности, а акустическая эмиссия и, соответственно, эффект Кайзера на данном интервале нагрузок отсутствуют (рис. 2.10).

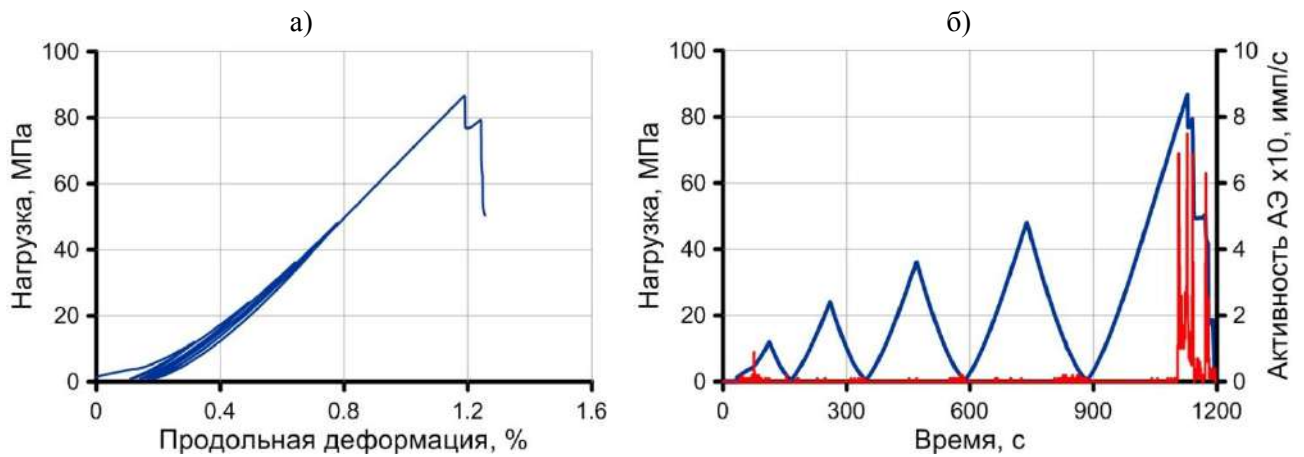


Рис. 2.10. Характерная диаграмма деформирования скальной породы при одноосном сжатии (а) и графики изменения нагрузки и активности АЭ от времени (б)

В свою очередь, соляные породы имеют поликристаллическую структуру с размером кристаллов от нескольких миллиметров до сантиметров. Отдельные кристаллы галита и сильвина проявляют упругие свойства в достаточно широком диапазоне нагрузок. Однако, как сообщается в работе [86], скольжение по границам кристаллов в режиме одноосного сжатия может возникать при нагрузке менее 2 МПа, а дилатансия (явление разуплотнения связанных между собой кристаллов) – при нагрузке менее 4 МПа. В связи с этим, деформирование соляных пород носит пластический характер за счет процессов скольжения и дилатансии по границам кристаллов и поверхностям существующих трещин или нарушений (например, глинистых прослоев) и сопровождается акустической эмиссией (рис. 2.11) [87]. Поэтому эффект Кайзера в соляных породах наблюдается почти на всем диапазоне нагрузок (рис. 2.12) и даже на запредельной стадии [43].

В работах [89-91] представлены результаты исследований деформирования соляных пород в условиях трехосного напряженного состояния, согласно которым явление дилатансии возникает при определенных соотношениях величин главных напряжений. Также в работе [38] обосновывается предположение, что в условиях нетронутого массива концентрации напряжений на дефектах породы частично или полностью срелаксированы. В связи с этим можно сделать вывод, что в нетронутом массиве соляных пород отсутствует ориентиро-

ванная трещиноватость, отражающая естественное поле напряжений. Тогда предложим следующую модель трещинообразования, описывающую проявление эффекта Кайзера в околоскважинной области.

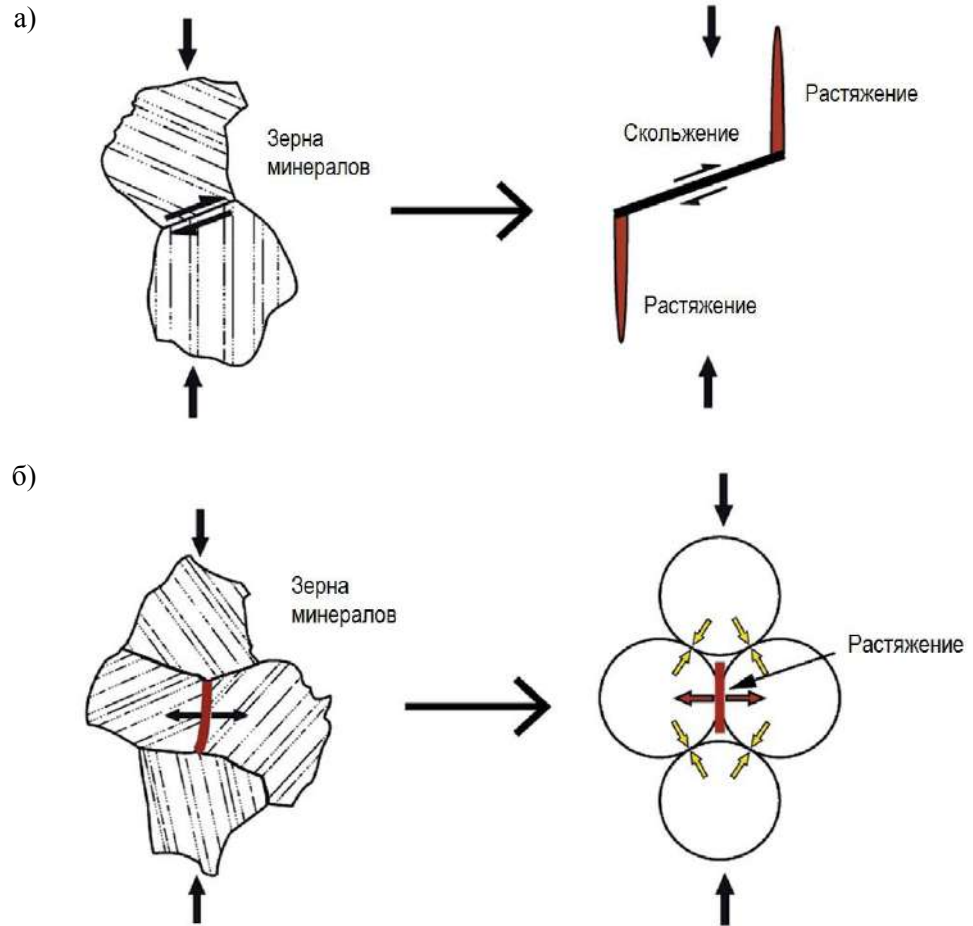


Рис. 2.11. Схематическое изображение процессов скольжения (а) и дилатансии (б) по границам зерен породы и модели их описывающие [88]

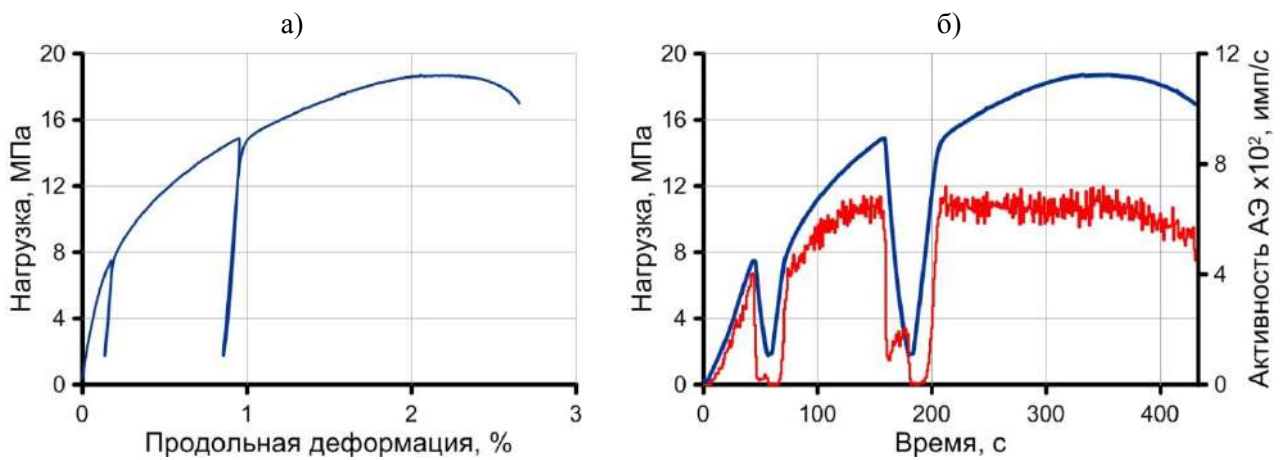


Рис. 2.12. Характерная диаграмма деформирования соляной породы при одноосном сжатии (а) и графики изменения нагрузки и активности АЭ от времени (б)

Допустим, что в условиях нетронутого массива соляные породы имеют хаотически ориентированные дефекты, представленные границами между зернами и глинистыми прослоями (рис. 2.13, а). При бурении скважины за счет деформирования пород в сторону пустого пространства на наклонных дефектах возникают сдвиговые смещения, которые приводят к концентрации напряжений на их краях и образованию трещин отрыва (рис. 2.13, б). В связи с тем, что плоскости образовавшихся трещин квазиперпендикулярны радиальному направлению, то условно будем считать их концентрическими (окружными).

В случае нагружения стенок скважины гидродомкратом вектора сдвиговых смещений на начальных дефектах поменяют направление в противоположную сторону и концентрические трещины в областях сжатия начнут закрываться (рис. 2.13, в), а акустическая эмиссия будет отсутствовать или на уровне фона. Предположим, что поперечные трещины закроются полностью тогда, когда давление гидродомкрата достигнет величины компоненты поля напряжений, действующей в направлении нагружения. При этом увеличение активности АЭ может возникнуть за счет разрушения неровностей на поверхностях трещин [46]. Дальнейшее повышение давления приведет к другой форме концентрации напряжений на дефектах и образованию новых трещин, ориентированных вдоль оси нагружения (рис. 2.13, г). Рост продольных трещин, в свою очередь, будет сопровождаться акустической эмиссией. Когда давление гидродомкрата достигнет величины ($P_{кр}$), необходимой для возникновения тангенциальных растягивающих напряжений на контуре скважины, в направлении перпендикулярном оси нагружения, могут зарождаться и распространяться трещины разрыва, которые также являются источником АЭ (рис. 2.13, д).

В случае разгрузки и повторного нагружения стенок скважины акустическая эмиссия будет отсутствовать до тех пор, пока рост трещин не возобновится, что произойдет при достижении давлением максимального значения предыдущего цикла.

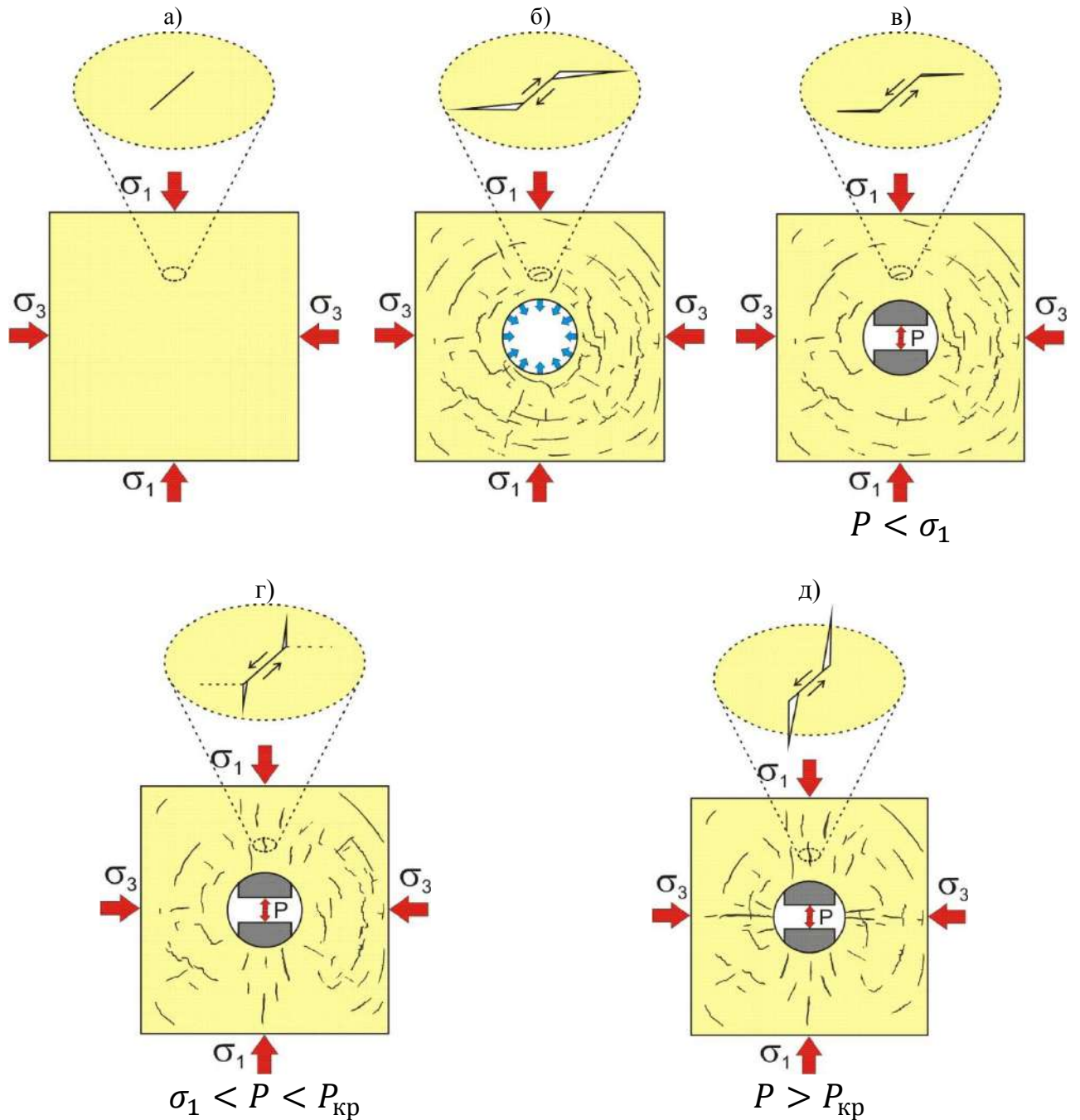


Рис. 2.13. Модель формирования эффекта Кайзера в околоскважинном пространстве массива соляных пород на различных стадиях:
a – начальное состояние соляных пород в массиве; *б* – образование concentрических трещин;
в – закрытие concentрических трещин; *г* – образование продольных трещин;
д – образование трещин разрыва

Особенность предлагаемой модели заключается в том, что в ней не используется предположение о существовании в нетронутом массиве соляных пород ориентированной трещиноватости, отражающей естественное поле напряжений. Поэтому с ее помощью можно объяснить наличие эффекта Кайзера при нагружении стенок скважины в любых радиальных направлениях.

В трещиноватом массиве скальных пород, характеризующимся блочным строением (рис. 2.14, а), бурение скважины приведет к раскрытию трещин между отдельными блоками (рис. 2.14, б).

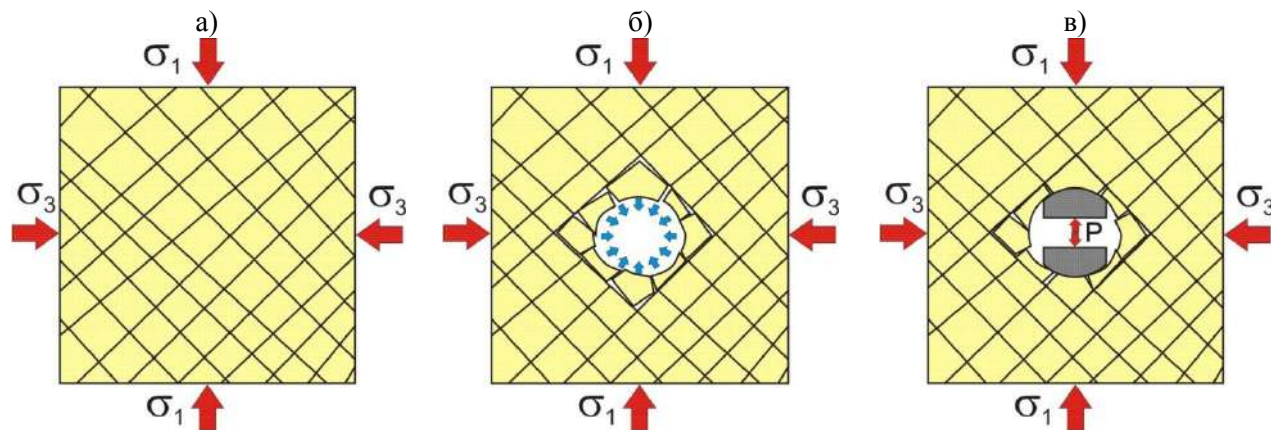


Рис. 2.14. Модель формирования эффекта Кайзера в околоскважинном пространстве трещиноватого массива скальных пород:
 а – начальное состояние трещиноватого массива; б – раскрытие трещин между блоками;
 в – закрытие трещин при нагружении стенок скважины гидродомкратом

В случае нагружения гидродомкратом стенок скважины раскрытые трещины, поверхности которых квазиперпендикулярны направлению нагружения, начнут закрываться. При этом акустическая эмиссия будет на уровне фона или отсутствовать вообще. Когда давление гидродомкрата достигнет величины компоненты поля напряжений, действующей в направлении нагружения, трещины полностью закроются (рис. 2.14, в) и произойдет кратковременное резкое увеличение активности АЭ за счет разрушения неровностей на их берегах [46]. Следующее за этим повышение давления не будет сопровождаться акустической эмиссией, т.к. деформирование уплотненных блоков, расположенных в области сжатия, носит упругий характер.

Как уже обсуждалось выше, переход крепких скальных пород в стадию пластического деформирования происходит при значениях нагрузки 80-90% от предела прочности. Учитывая, что породы околоскважинного пространства в областях сжатия находятся в условиях трехосного напряженного состояния, то для начала процесса трещинообразования в них, связанного с дилатансией, потребовалось бы колоссальное давление в гидросистеме домкрата.

При достижении давлением величины ($P_{кр}$), необходимой для возникновения растягивающих тангенциальных напряжений, в областях околоскважинного пространства, расположенных перпендикулярно оси нагружения, начнут раскрываться трещины между блоками. Значительной акустической эмиссии при этом не будет. Однако, если в данных областях природные трещины отсутствуют, то растяжение пород околоскважинного пространства на пластической стадии деформирования будет сопровождаться акустической эмиссией в связи с образованием трещин разрыва.

В случае повторного нагружения, если в предыдущем цикле деформирование пород околоскважинного пространства происходило в упругой зоне, то акустическая эмиссия будет отсутствовать. В противном случае акустическая эмиссия и рост трещин возобновятся, когда давление гидродомкрата достигнет максимального значения предыдущего цикла.

2.3. Стендовые эксперименты по измерению напряжений

2.3.1. Методика проведения стендовых экспериментов

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. Эксперименты заключались в нагружении блока в режиме одноосного сжатия до некоторой величины (рис. 2.15). После выдержки блока под постоянной нагрузкой производилось бурение скважины, и затем осуществлялось нагружение ее стенок гидродомкратом с одновременной регистрацией импульсов АЭ.

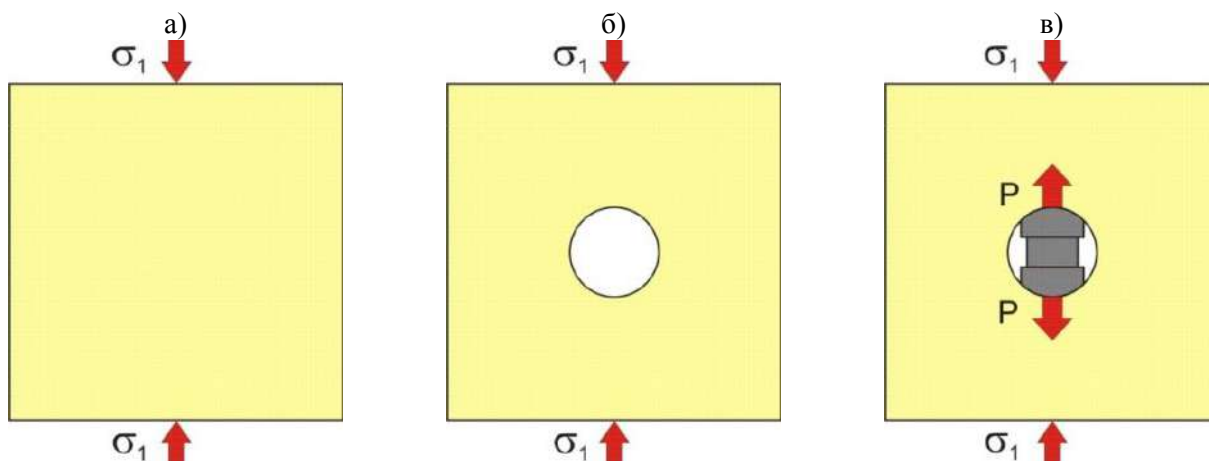


Рис. 2.15. Схематичное изображение стадий стендовых экспериментов по измерению напряжения, действующего в одноосно нагруженном блоке горной породы:
a – первоначальный цикл нагружения блока; *б* – локальная разгрузка некоторой области скважиной; *в* – нагружение околоскважинной области гидродомкратом

Для проведения экспериментов с шахтных полей Верхнекамского месторождения калийных солей были отобраны монолиты соляных пород, из которых изготовлены 4 блока размером 40x40x30 см (рис. 2.16). С помощью сервогидравлического пресса «Zwick-Toni Norm 2030», развивающего предельное усилие на сжатие 500 т, производилось одноосное нагружение блока. Для равномерной передачи нагрузки грани блока, контактирующие непосредственно с плитами пресса, выравнивались с помощью магнезиального цемента. Стендовые эксперименты выполнялись при следующих значениях напряжений: 8,0; 10,0 и 13,0 МПа. Под воздействием осевой нагрузки постоянной величины блоки выдерживались в течение 60 мин, после чего выполнялось бурение скважины диаметром 76 мм. Сразу же после бурения осуществлялось нагружение стенок скважины гидродомкратом вдоль оси блока.

Регистрация импульсов акустической эмиссии осуществлялась с помощью 8-канального комплекса «Vallen AMSY-6» и портативного 2-х канального прибора «Uniscor», а также четырех пьезоэлектрических преобразователей: три были установлены непосредственно на блоке и один на гидродомкрате. Использовались два широкополосных преобразователя с рабочим диапазоном частот 100-500 кГц и два с резонансной частотой 165 кГц.

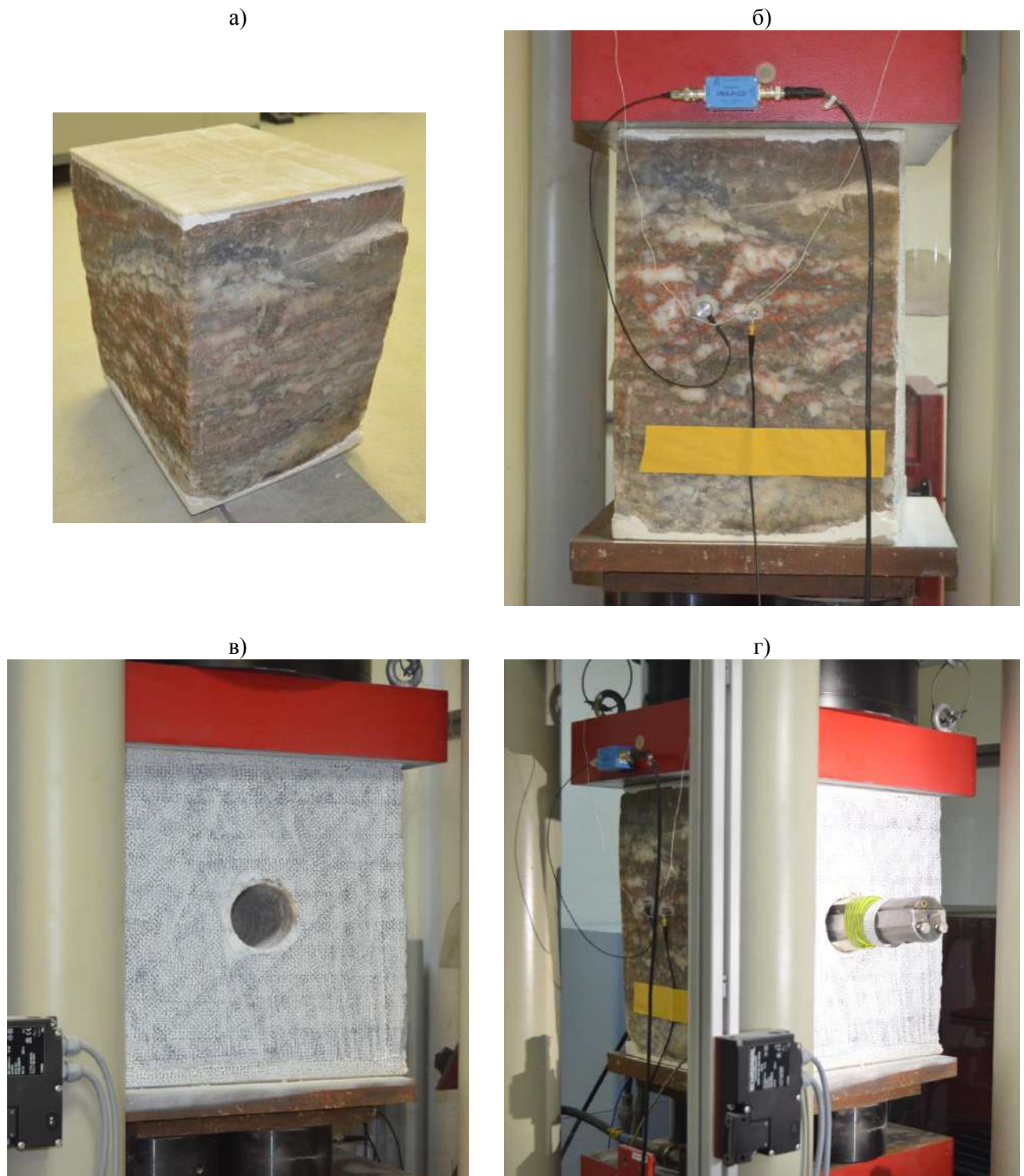


Рис. 2.16. Стадии стендовых экспериментов по измерению гидродомкратом напряжений, действующих в блоке соляных пород: *а* – подготовка блока; *б* – нагружение блока на сервогидравлическом прессе; *в* – бурение скважины в нагруженном блоке; *г* – нагружение стенок скважины гидродомкратом

С целью обеспечения более равномерной передачи давления гидродомкрата на стенки скважины и снижения помеховой активности АЭ от разрушения шероховатостей и неровностей на нагружающих пластинах были установлены прокладки из полистирола толщиной 2 мм (рис. 2.1). Для улучшения

акустического контакта между прокладкой и пластиной гидродомкрата был добавлен тонкий слой литола.

Исследование полей деформации блоков соляных пород осуществлялось на основе использования бесконтактной трехмерной оптической системы Vic-3D фирмы «Correlated Solutions» (рис. 2.17). Видеосистема предназначена для измерения полей перемещений и деформаций на поверхности объектов и конструкций различной формы и размеров на стадиях упругопластического и закритического деформирования. Метод корреляции цифровых изображений позволяет восстанавливать поле векторов перемещений на поверхности исследуемых образцов путем сопоставления опорного изображения (фотографии объекта в исходном состоянии) с изображениями, снятыми в процессе нагружения. Изображение образца разбивается на сектора и анализируется перемещение рисунка поверхности (нанесенного с помощью красителя) в пределах каждого такого элементарного окна. Алгоритм построения векторов смещения основывается на процессе установки соответствия между двумя элементарными участками, путем вычисления коэффициента соответствия и поиске его минимума [92].



Рис. 2.17. Бесконтактная трехмерная оптическая система «Vic-3D, Correlated Solutions»

В состав оптической системы входят две цифровые черно-белые камеры с разрешением до 5,0 Мп и соответствующей ему максимальной скоростью съемки 20 кадров в секунду; комплекты сменных объективов к камерам с различным фокусным расстоянием; специализированное программное обеспечение, с помощью которого осуществляется управление процессом съемки («Vic-Snap») и постобработка зарегистрированных фотографий («Vic-3D»); система подсветки поверхности образца; блок синхронизации видеосистемы с испытательной машиной; набор калибровочных таблиц и штатив с трехкоординатной регулируемой головкой. Методика проведения испытаний с использованием видео системы подробно описана в работе.

2.3.2. Результаты стендовых экспериментов по измерению напряжений

В ходе выполнения экспериментов было испытано 4 блока при следующих нагрузках: блоки 1 и 3 – 10,0 МПа; блок 2 – 13,0 МПа; блок 4 – 8,0 МПа. Результаты экспериментов представлены в табл. 2.1. Графики изменения параметров АЭ и давления гидродомкрата от времени при нагружении в направлении оси сжатия блока представлены на рис. 2.18-2.21. Необходимо отметить, что представленные результаты получены путем обработки данных, регистрируемых с преобразователя, установленного на одной из нагружающих пластин гидродомкрата. Порог регистрации для данного преобразователя составлял 50,0 дБ.

Таблица 2.1

Результаты стендовых экспериментов по измерению напряжений

№ блока	Нагрузка σ_1 , МПа	Давление эффекта Кайзера $P_{ЭК}$, МПа
1	10,0	6,3
2	13,0	12,6
3	10,0	10,3
4	8,0	8,9

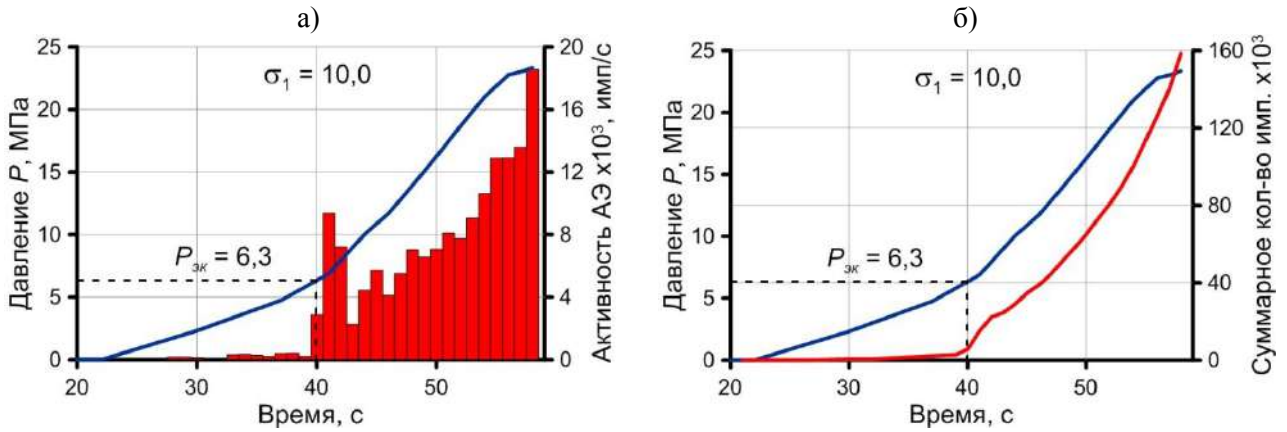


Рис. 2.18. Графики зависимости активности АЭ (а), суммарного количества импульсов (б) и давления гидродомкрата P от времени при нагружении стенок скважины в блоке 1

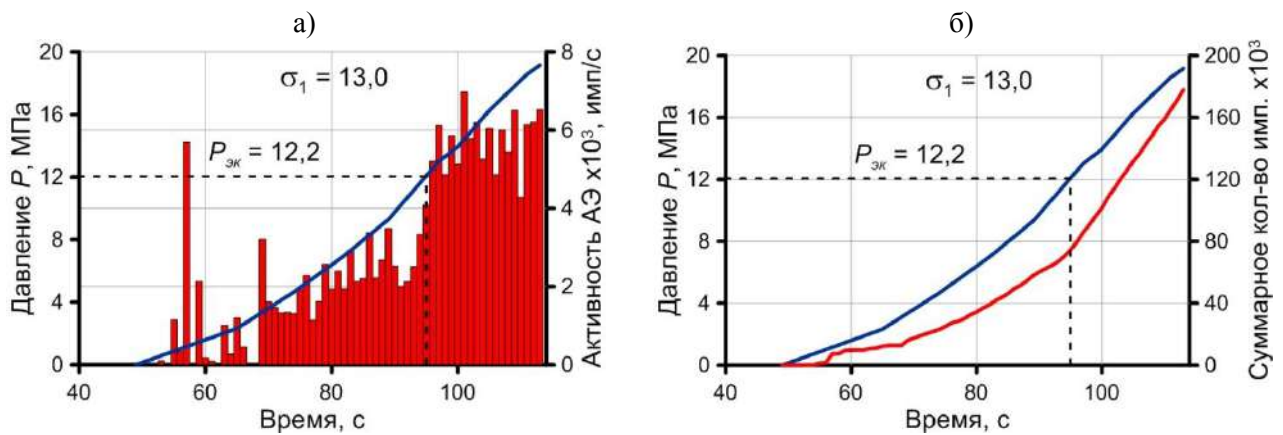


Рис. 2.19. Графики зависимости активности АЭ (а), суммарного количества импульсов (б) и давления гидродомкрата P от времени при нагружении стенок скважины в блоке 2

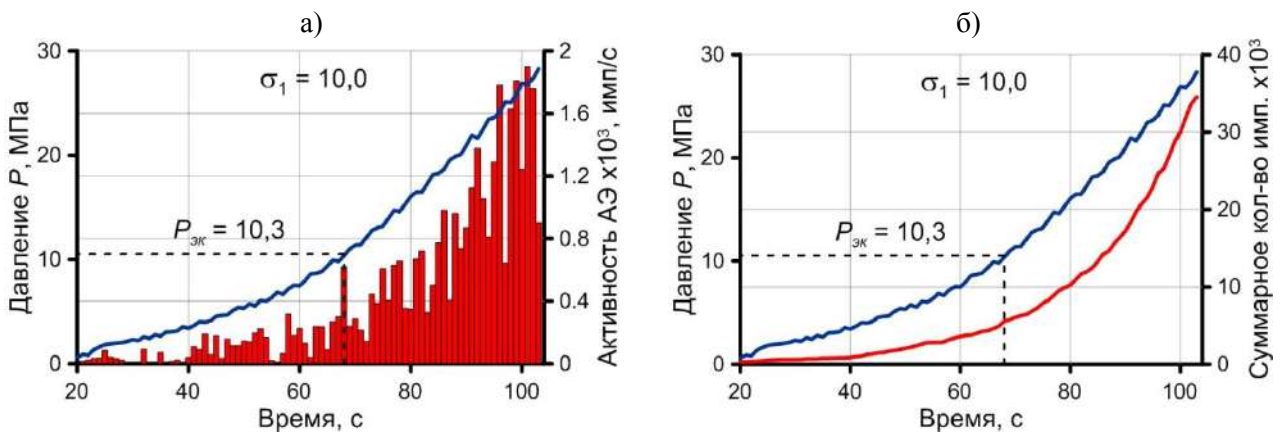


Рис. 2.20. Графики зависимости активности АЭ (а), суммарного количества импульсов (б) и давления гидродомкрата P от времени при нагружении стенок скважины в блоке 3

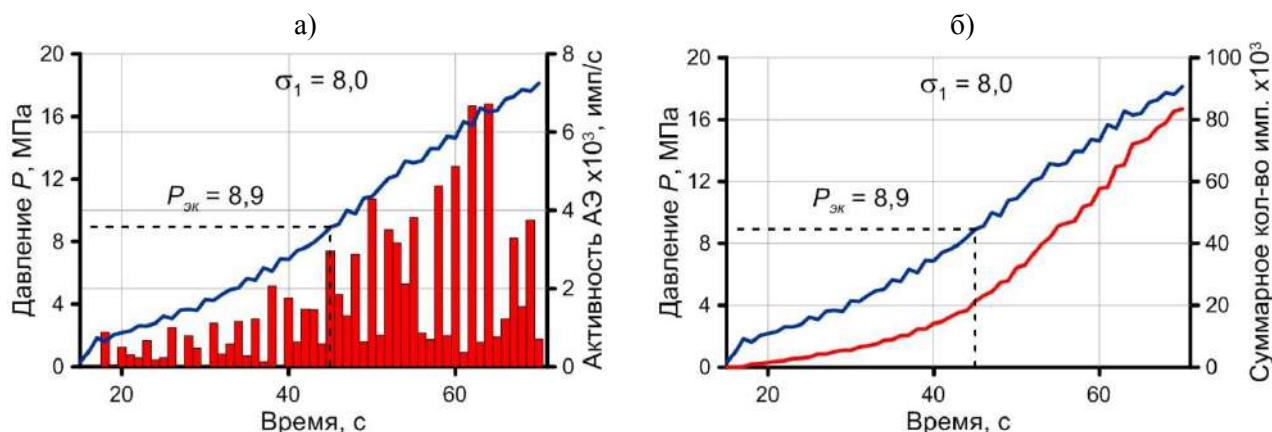


Рис. 2.21. Графики зависимости активности АЭ (а), суммарного количества импульсов (б) и давления гидродомкрата P от времени при нагружении стенок скважины в блоке 4

По результатам нагружения стенок скважины в блоке 1, при действующей нагрузке 10,0 МПа, установлено резкое увеличение активности АЭ, когда давление гидродомкрата достигло значения 6,3 МПа. На рис. 2.18 заметно, что с дальнейшим повышением давления значения активности АЭ снижаются и более плавное повторное увеличение наблюдается после 10,0 МПа. Данное кратковременное увеличение активности АЭ закрывает вступление эффекта Кайзера и может быть связано с разрушением неровностей на стенках скважины.

Нагрузка, действующая на блок 2, составляла 13,0 МПа. С началом нагружения стенок скважины гидродомкратом значения активности АЭ варьируются в некотором диапазоне (рис. 2.19). При достижении давлением величины 12,2 МПа отмечается скачкообразное увеличение активности АЭ, т.е. имеет место эффект Кайзера.

Характер изменения активности АЭ при нагружении стенок скважины в блоках 3 и 4 одинаковый. Тренд на увеличение активности наблюдается с самого начала нагружения (рис. 2.20, 2.21). После достижения давлением величины эффекта Кайзера, что составляет 10,3 и 8,9 для блоков 3 и 4 соответственно, угол наклона тренда к горизонтальной оси становится более крутым. Данный характер изменения активности АЭ выражается в наличии точки с максимальной кривизной на кривой "суммарное количество импульсов-давление гидродомкрата P ", соответствующей эффекту Кайзера.

Таким образом, по результатам проведенных экспериментов в 3-х блоках из 4-х эффект Кайзера установлен, когда давление гидродомкрата достигает значения компоненты поля напряжений, действующей в направлении нагружения.

2.3.3. Результаты построения полей деформаций блока при помощи оптической системы «VIC-3D»

На рис. 2.22 представлены результаты построения полей деформаций околоскважинного пространства блока 3, нагруженного одноосной нагрузкой величиной 10,0 МПа. На рис. 2.23 изображены кривые изменения деформации от времени, построенные по результатам измерений виртуальными экстензометрами.

По результатам экспериментов установлено, что после бурения скважины на поверхности блока наблюдаются несколько областей локализации деформаций (рис. 2.22, а). В одной из них образовалась трещина в радиальном направлении от контура скважины до нижней грани блока. Необходимо отметить, что вблизи контура отсутствуют характерные участки, соответствующие зонам концентрации напряжений. Возможно, данное обстоятельство связано с недостаточной чувствительностью оптической системы или с разгрузкой напряжений из-за образовавшейся радиальной трещины.

Измерения тангенциальной компоненты ε_{θ} поля деформаций виртуальным экстензометром E_2 показали, что образовавшаяся трещина начинает раскрываться, когда давление гидродомкрата достигает значения 10,0 МПа (рис. 2.23, а). Также установлено, что при нагружении на диаметрально противоположной стороне контура скважины, в верхней части, возникает другая область растягивающих тангенциальных деформаций (рис. 2.22, в). Экстензометр E_0 на рис. 2.23, а показывает, что интенсивное увеличение деформации ε_{θ} в данной зоне наблюдается, когда давление превышает величину 10,0 МПа. Дальнейшее нагружение стенок скважины приводит к расширению этой области (рис. 2.22, г). Тангенциальные деформации на контуре скважины в направ-

лении, перпендикулярном оси нагружения, отсутствуют (экстензометр E_1 на рис. 2.23, а).

При разгрузке и последующем нагружении стенок скважины величина тангенциальных деформаций в областях растяжения не изменяется, пока давление гидродомкрата не достигнет максимального значения предыдущего

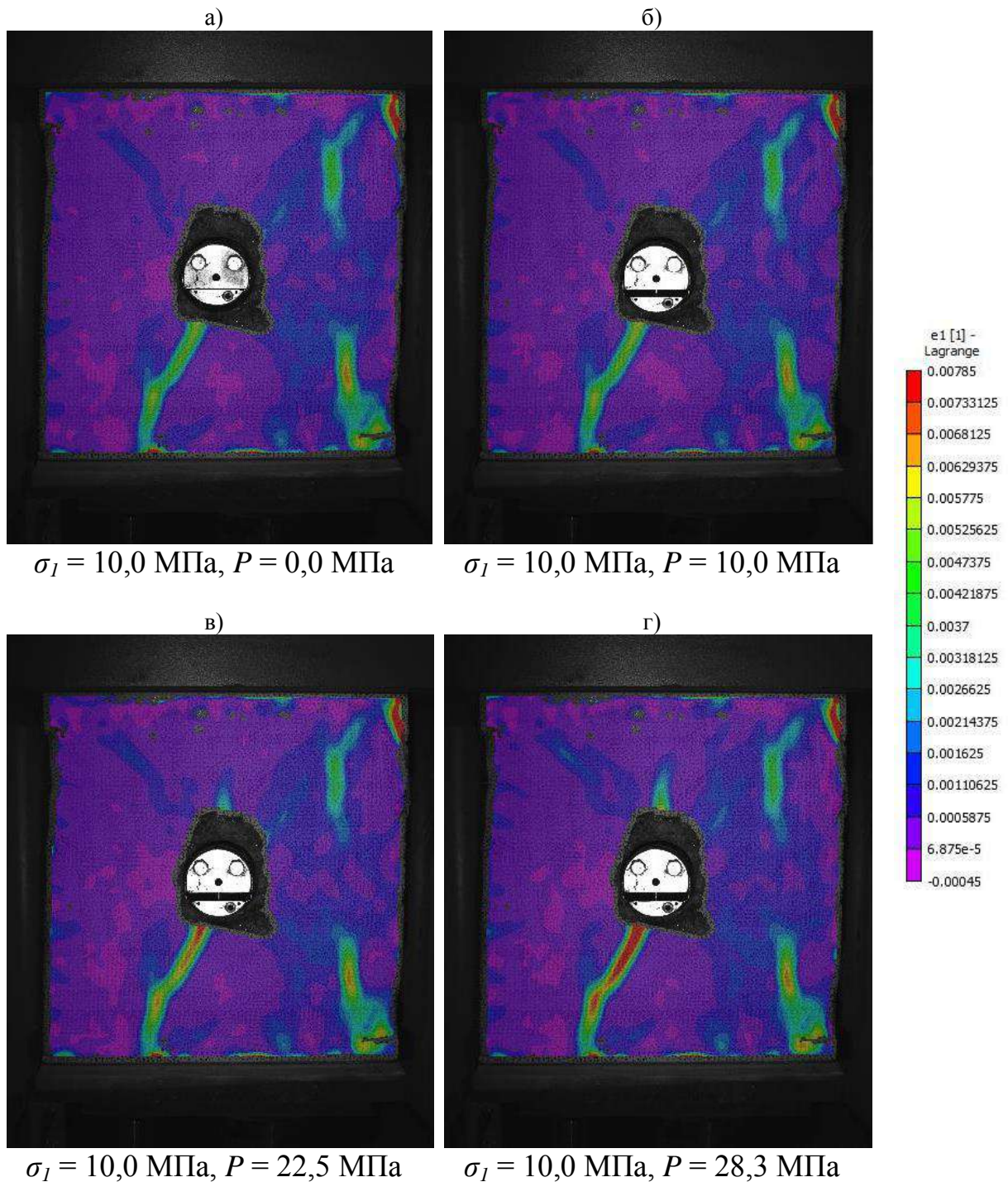


Рис. 2.22. Изменение поля максимальной главной компоненты деформаций ε_1 блока 3 от величины давления гидродомкрата P

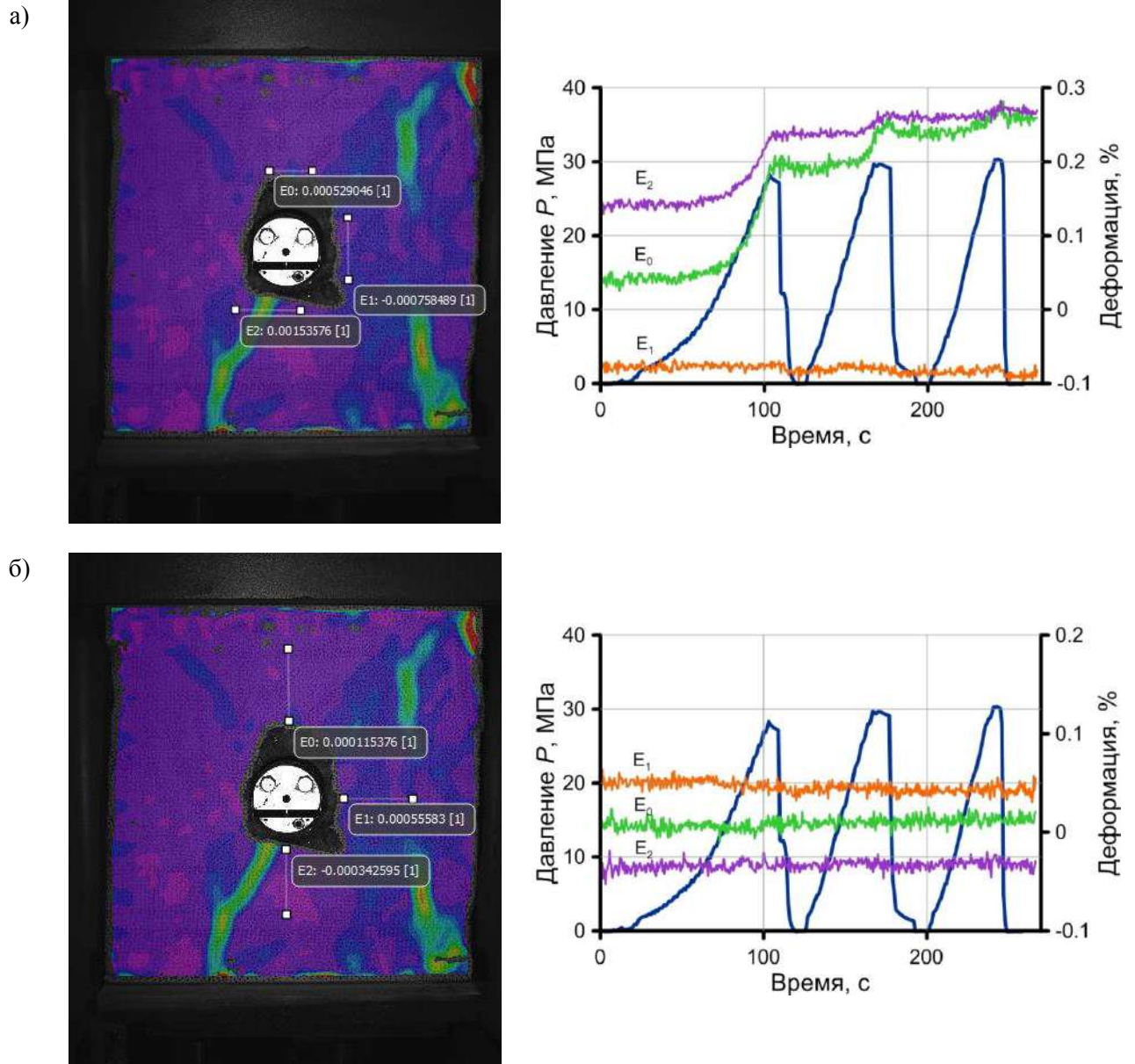


Рис. 2.23. Кривые изменения деформации и давления гидродомкрата от времени, построенные по результатам измерения виртуальными экстензометрами E_0 , E_1 и E_2 :
 а – тангенциальная ориентация; б – радиальная ориентация

цикла (рис. 2.23, а). Это говорит о необратимом пластическом характере деформирования пород в данных зонах за счет роста радиальных трещин.

По результатам измерения виртуальными экстензометрами, ориентированными в радиальном направлении (рис. 2.23, б), изменения компоненты ε_r поля деформаций не обнаружено.

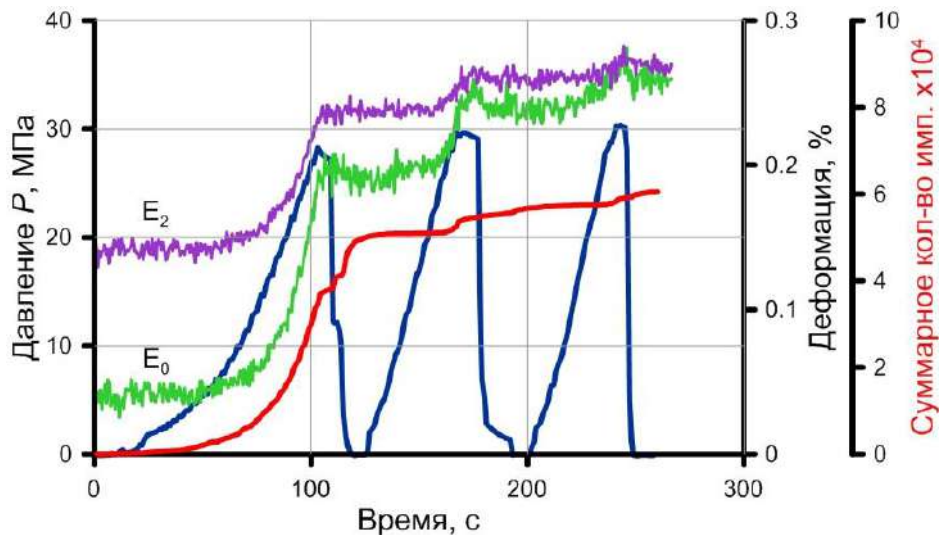


Рис. 2.24. Характер изменения суммарного количества импульсов АЭ и компоненты ε_{θ} поля деформаций, измеренной виртуальными экстензометрами E_0 и E_2 , от времени

Таким образом, увеличение активности АЭ при нагружении стенок скважины гидродомкратом в большей степени обусловлено ростом радиальных трещин в двух областях на контуре, где наблюдается локализация растягивающих тангенциальных деформаций. На рис. 2.24 представлен характер изменения суммарного количества импульсов АЭ и деформаций ε_{θ} в данных областях от времени, на котором наблюдается хорошая корреляция данных величин.

2.3.4. Анализ результатов стендовых экспериментов по измерению напряжений

По результатам стендовых экспериментов установлено, что эффект Кайзера в породах околоскважинного пространства возникает, когда давление гидродомкрата достигает величины компоненты поля напряжений в направлении нагружения. Необходимо отметить, что данное утверждение справедливо для случая однокомпонентного поля напряжений, характерного, например, для междукламерных столбчатых целиков. В нетронутом массиве, где естественное поле напряжений определяется тремя главными компонентами, характер изменения напряженного состояния пород околоскважинного пространства и, следовательно, механизм трещинообразования отличаются от данных условий.

Известно, что в однородной линейно-упругой среде, где действует однокомпонентное поле напряжений, на контуре круглого отверстия по направлению главного напряжения возникают растягивающие тангенциальные напряжения. Это объясняет образование радиальных трещин в блоке на контуре скважины сразу же после бурения (рис. 2.25, а), установленное в п. 2.3.3. Как было показано выше, при нагружении стенок скважины гидродомкратом вдоль оси блока рост образовавшихся радиальных трещин и акустическая эмиссия возобновляются, когда давление достигает величины внешней нагрузки.

В условиях нетронутого массива, когда главные напряжения σ_1 и σ_3 действуют перпендикулярно оси скважины, в приконтурной области наоборот возникает концентрация сжимающих тангенциальных напряжений [93]. Это обуславливает деформирование пород в радиальном направлении и, как следствие, возможность образования концентрических трещин (рис. 2.25, б). Поэтому в данном случае в качестве механизма трещинообразования в породах околоскважинного пространства может выступать модель, предложенная в п. 2.2.2.

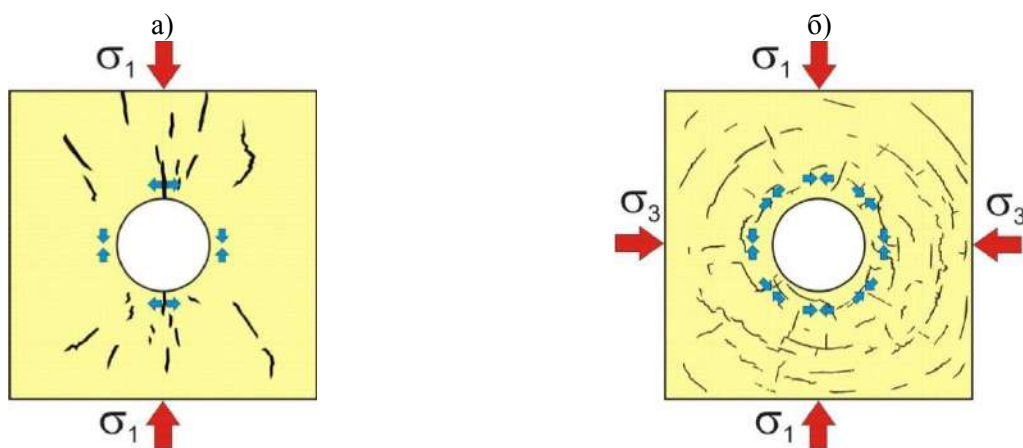


Рис. 2.25. Различие в механизмах трещинообразования пород на контуре скважины в условиях:
а – одноосного напряженного состояния; *б* – трехосного напряженного состояния
 (синими стрелками показано направление тангенциальных деформаций)

Таким образом, с целью обоснования предлагаемого метода следует исследовать закономерности проявления эффекта Кайзера при напряженных состояниях, свойственных породам околоскважинного пространства нетронутого массива. Кроме того, если при нагружении стенок скважины гидродомкратом

концентрация тангенциальных напряжений сохраняется, то данное обстоятельство может оказать влияние на величину давления, при которой возникает эффект. Поэтому важно знать характер изменения поля напряжений в породах вокруг скважины при нагружении гидродомкратом.

2.4. Выводы

В ходе выполнения комплекса исследований по разработке скважинного метода оценки компонент поля напряжений в массиве горных пород на основе использования эффекта Кайзера получены следующие выводы:

1. Разработан комплект аппаратуры для измерения напряжений в скважинах диаметром 76 мм, включающий: гидродомкрат с установленным на нем преобразователем акустической эмиссии, прибор регистрации акустической эмиссии и прочее вспомогательное оборудование.

2. В результате проведения натуральных испытаний горизонтальной скважины гидродомкратом в вертикальном направлении установлено, что в первом цикле эффект Кайзера возникает, когда давление на стенки скважины достигает величины, соответствующей расчетным значениям вертикальных напряжений нетронутого массива.

3. 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, объясняющая данные особенности для рассматриваемых геологических условий.

4. Проведены стендовые эксперименты по измерению напряжений гидродомкратом в одноосно нагруженном блоке соляной породы. По результатам экспериментов доказано, что эффект Кайзера возникает, когда давление на стенки скважины достигает величины напряжения, действующего в направлении нагружения.

ГЛАВА 3. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПОРОД ОКОЛОСКВАЖИННОЙ ОБЛАСТИ МАССИВА

3.1. Параметры модели и методика численного моделирования

С целью исследования напряженно-деформированного состояния пород околоскважинного пространства в процессе нагружения гидродомкратом стенок скважины было выполнено численное моделирование напряжений методом конечных элементов. Моделирование выполнялось в пакете «Ansys Workbench 18.0» для условий горизонтальной скважины, пробуренной в нетронутом массиве пород Верхнекамского месторождения калийных солей (ВКМКС). Использовалась трехмерная нелинейная упругая модель с параметрами, зависящими от величины действующих напряжений. Это означает, что диаграмма деформирования соляных пород при одноосном сжатии представляет собой трехзвенную кусочно-линейную зависимость (рис. 3.1). Начальный модуль упругости E_1 составляет 2,5 ГПа, коэффициент Пуассона принимался равным 0,3 [94].

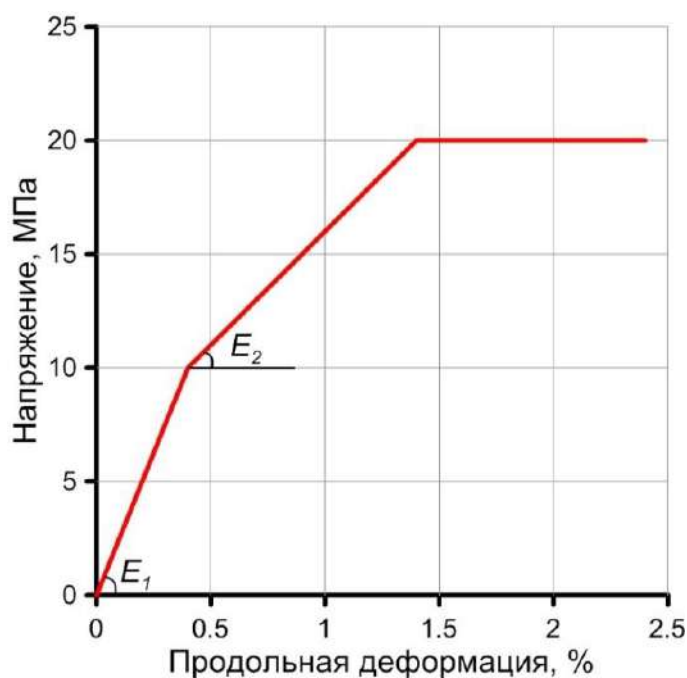


Рис. 3.1. Кусочно-линейная аппроксимация диаграммы деформирования соляных пород
 $E_1 = 2,5$ ГПа, $E_2 = 1,0$ ГПа

Геометрическая модель массива представляет собой параллелепипед размером $0,8 \times 0,8 \times 0,2$ м, а горизонтальная скважина – сквозное цилиндрическое отверстие диаметром 76 мм в центре параллелепипеда (рис. 3.2). Таким образом, расстояние от отверстия до ближайших ребер параллелепипеда больше диаметра примерно в 5 раз. Ось Z прямоугольной системы координат совпадает с осью скважины, а начало отсчета находится в плоскости симметрии модели. Естественное напряженное состояние пород в массиве моделировалось путем приложения нормальных напряжений к 5-ти граням параллелепипеда. Перемещение шестой нижней грани было ограничено в направлении оси Y . Вертикальное напряжение σ_1 составляло 8,0 МПа, что примерно соответствует средней плотности пород 2200 кг/м^3 и глубине 370 м. Коэффициент бокового распора в соляном массиве на данной глубине по результатам натурных исследований [69] равен 0,6. В связи с этим в горизонтальных направлениях были заданы напряжения $\sigma_2 = \sigma_3 = 4,8$ МПа.

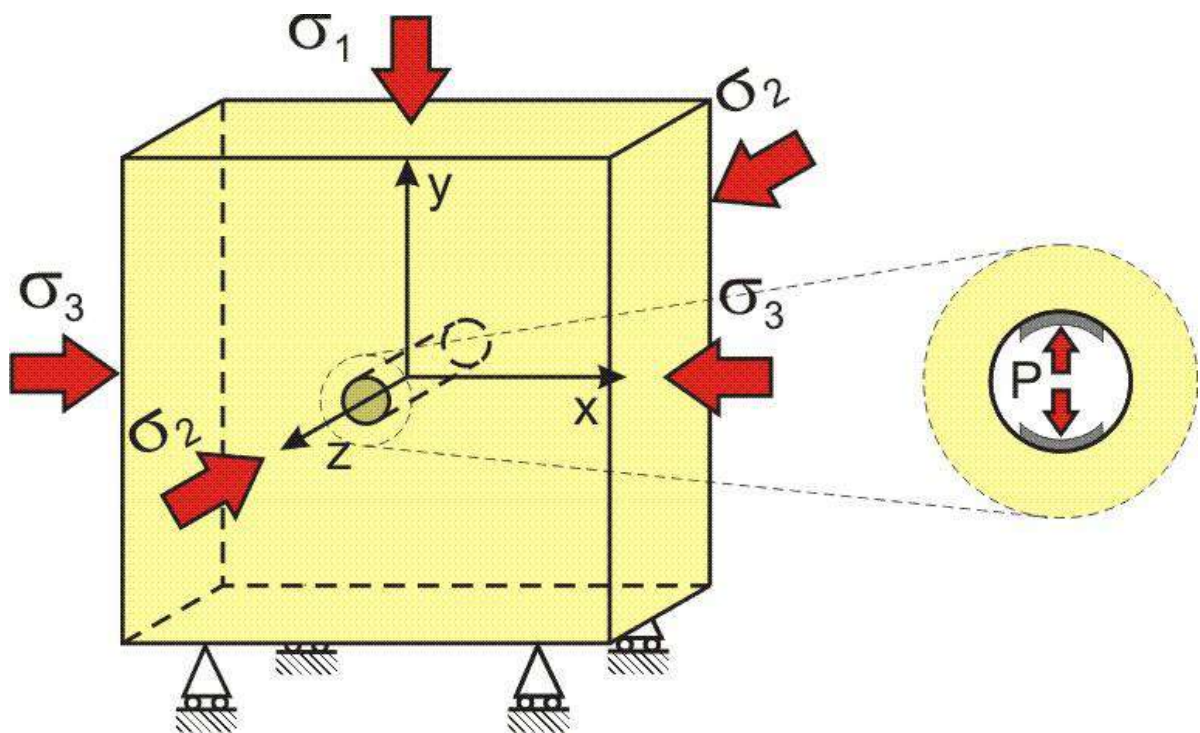


Рис. 3.2. Геометрическая модель, представляющая условия нагружения стенок горизонтальной скважины гидродомкратом в массиве соляных пород

Нагрузочные плиты гидродомкрата смоделированы в виде двух тонких пластин толщиной 1,5 мм и длиной 0,2 м, ориентированных внутри скважины так, чтобы приложение нагрузки осуществлялось по направлению действия главных напряжений σ_1 или σ_3 . Модуль упругости E пластин составлял 1,1 ГПа, а коэффициент Пуассона $\nu = 0,42$. Коэффициент трения μ между пластинами и стенкой скважины принимался равным 0,1. К внутренним поверхностям пластин прикладывалось напряжение P величиной 8,0 или 4,8 МПа в направлении, соответственно, оси X или Y , представляющее собой давление рабочей жидкости в гидросистеме. Приложение нагрузок к параллелепипеду и пластинам осуществлялось одновременно. Моделирование напряженного состояния пород околоскважинной области выполнялось для трех случаев (рис. 3.3): 1) без нагружения стенок скважины; 2) при нагружении гидродомкратом в направлении σ_1 ; 3) при нагружении гидродомкратом в направлении σ_3 .

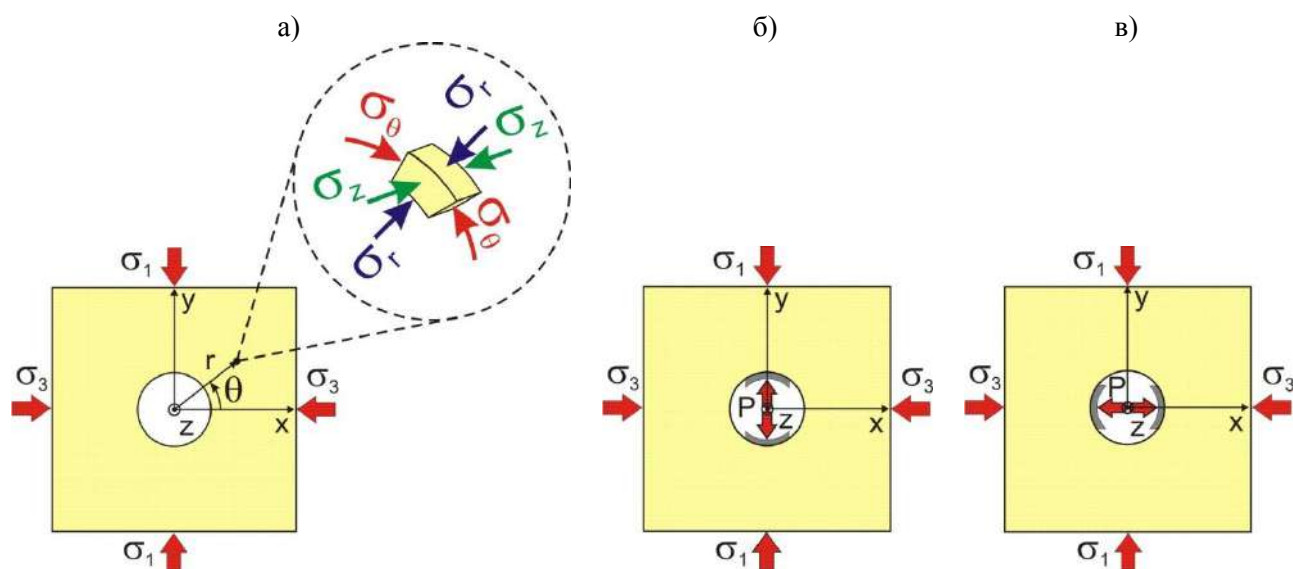


Рис. 3.3. Схема приложения нагрузок к массиву
 ($\sigma_1 = 8,0$ МПа; $\sigma_2 = \sigma_3 = 4,8$ МПа, напряжение σ_2 действует вдоль оси скважины):
 а – без нагружения стенок скважины ($P = 0,0$ МПа);
 б – при нагружении гидродомкратом в направлении σ_1 ($P = 8,0$ МПа);
 в – при нагружении гидродомкратом в направлении σ_3 ($P = 4,8$ МПа)

Результаты моделирования распределения напряжений в околоскважинной области массива представлялись в цилиндрической системе координат (рис. 3.3, а), начало отсчета которой находится на оси скважины на глубине

0,1 м (в плоскости симметрии модели). Положительные значения угла θ отсчитываются от оси X декартовой системы координат против часовой стрелки. Оси Z цилиндрической и декартовой систем совпадают.

На рис. 3.4 представлены характерные результаты численного моделирования методом конечных элементов в виде распределения нормальных радиальных σ_r и тангенциальных σ_θ напряжений в плоскости, ортогональной оси скважины и расположенной на глубине 0,1 м.

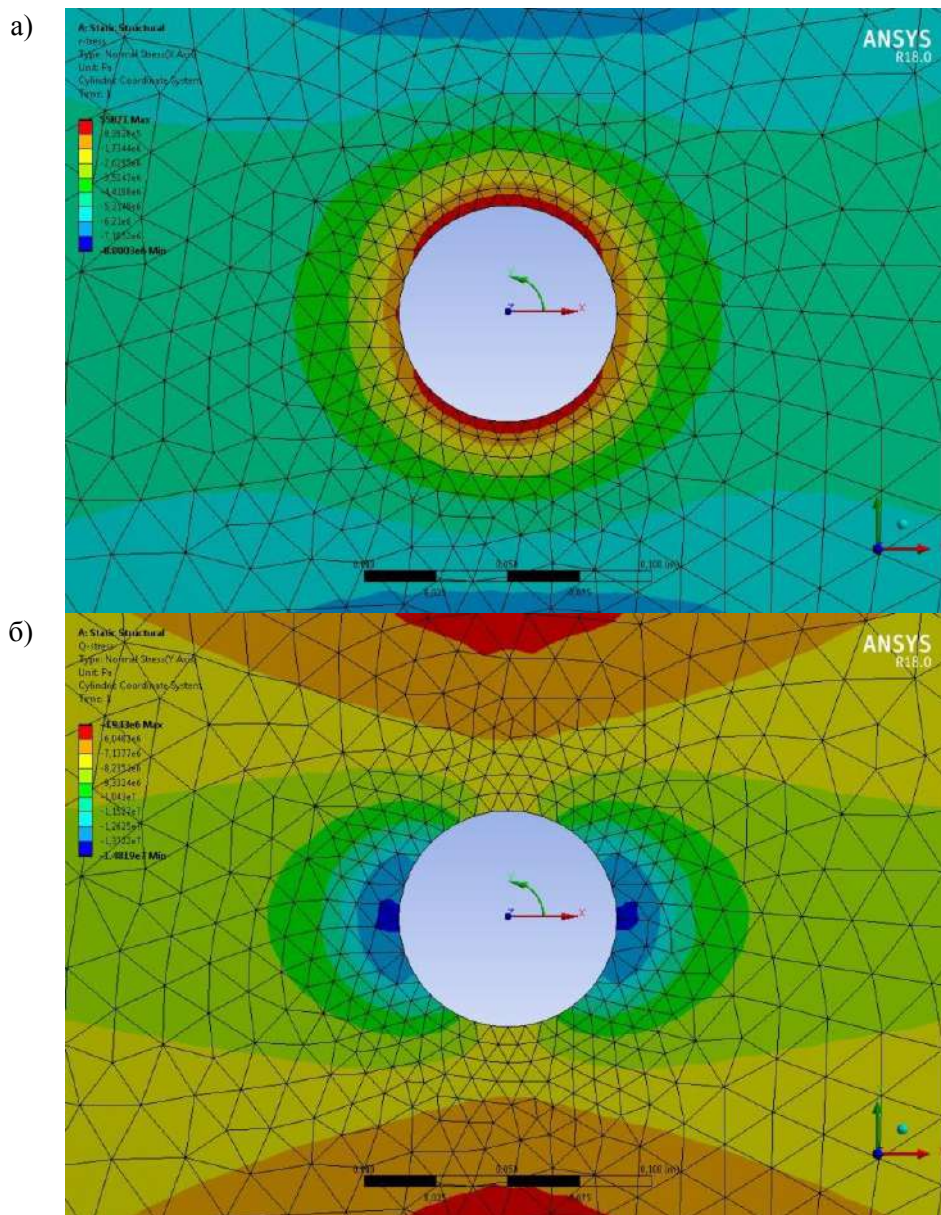


Рис. 3.4. Поля распределений радиальных σ_r (а) и тангенциальных σ_θ (б) напряжений в плоскости, ортогональной оси скважины: $\sigma_y = 8,0$ МПа; $\sigma_x = \sigma_z = 4,8$ МПа; $P = 0,0$ МПа

3.2. Результаты численного моделирования напряженного состояния пород околоскважинной области массива

3.2.1. Распределение напряжений в околоскважинной области массива

На первом этапе осуществлялось моделирование распределения напряжений вокруг скважины в соляном массиве без воздействия на ее стенки гидродомкратом. На рис. 3.5 показаны графики распределения радиальных σ_r , тангенциальных σ_θ и осевых σ_z напряжений с удалением от контура скважины в направлении максимального σ_1 и минимального σ_3 главных напряжений.

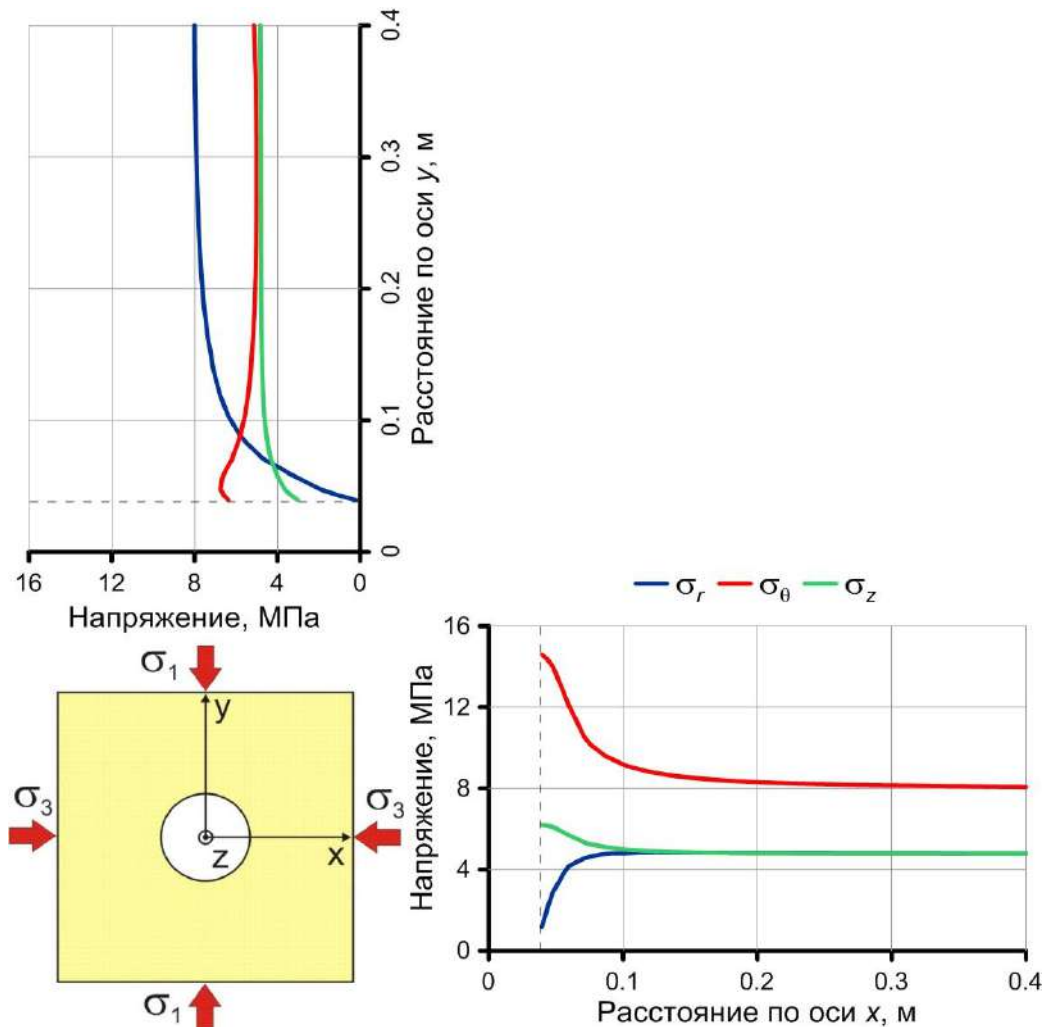


Рис. 3.5. Графики распределения значений компонент поля напряжений с удалением от контура скважины при отсутствии давления на ее стенки:
 $\sigma_1 = 8,0$ МПа; $\sigma_2 = \sigma_3 = 4,8$ МПа; $P = 0,0$ МПа

Установлено, что радиальная компонента σ_r поля напряжений после бурения скважины почти полностью разгружается на контуре во всех направлениях (рис. 3.5). Тангенциальная компонента σ_θ увеличивается на контуре скважины во всех направлениях. Наибольшая концентрация (14,6 МПа) наблюдается со стороны минимального главного напряжения σ_3 , а наименьшая (6,7 МПа) – со стороны максимального главного напряжения σ_1 . Наименьшее значение осевой компоненты ($\sigma_z = 3,0$ МПа) на контуре скважины отмечается со стороны напряжения σ_1 , а наибольшее (6,2 МПа) со стороны напряжения σ_3 . С удалением от контура скважины все компоненты восстанавливаются до значений, соответствующих ненарушенному полю напряжений.

На рис. 3.6 представлен характер распределения компонент поля напряжений при нагружении гидродомкратом в направлении максимального главного напряжения σ_1 . Анализ графиков показал, что при нагрузке P , равной 8,0 МПа, действующей на пластины гидродомкрата, в породах околоскважинного массива, располагающихся со стороны напряжения σ_1 , наблюдается восстановление радиальной σ_r и осевой σ_z компонент поля напряжений, тогда как распределение компоненты σ_θ практически не изменяется. В свою очередь, в породах, располагающихся со стороны напряжения σ_3 , наблюдается снижение концентраций компонент σ_θ и σ_z , при этом радиальная компонента σ_r остается разгруженной. Необходимо отметить, что дальнейшее увеличение давления гидродомкрата P приводит к переходу компоненты σ_θ на контуре скважины в область отрицательных значений, т.е. к возникновению растягивающих тангенциальных напряжений.

На рис. 3.7 представлен характер распределения компонент поля напряжений с удалением от контура скважины при нагружении гидродомкратом в направлении минимального главного напряжения σ_3 .

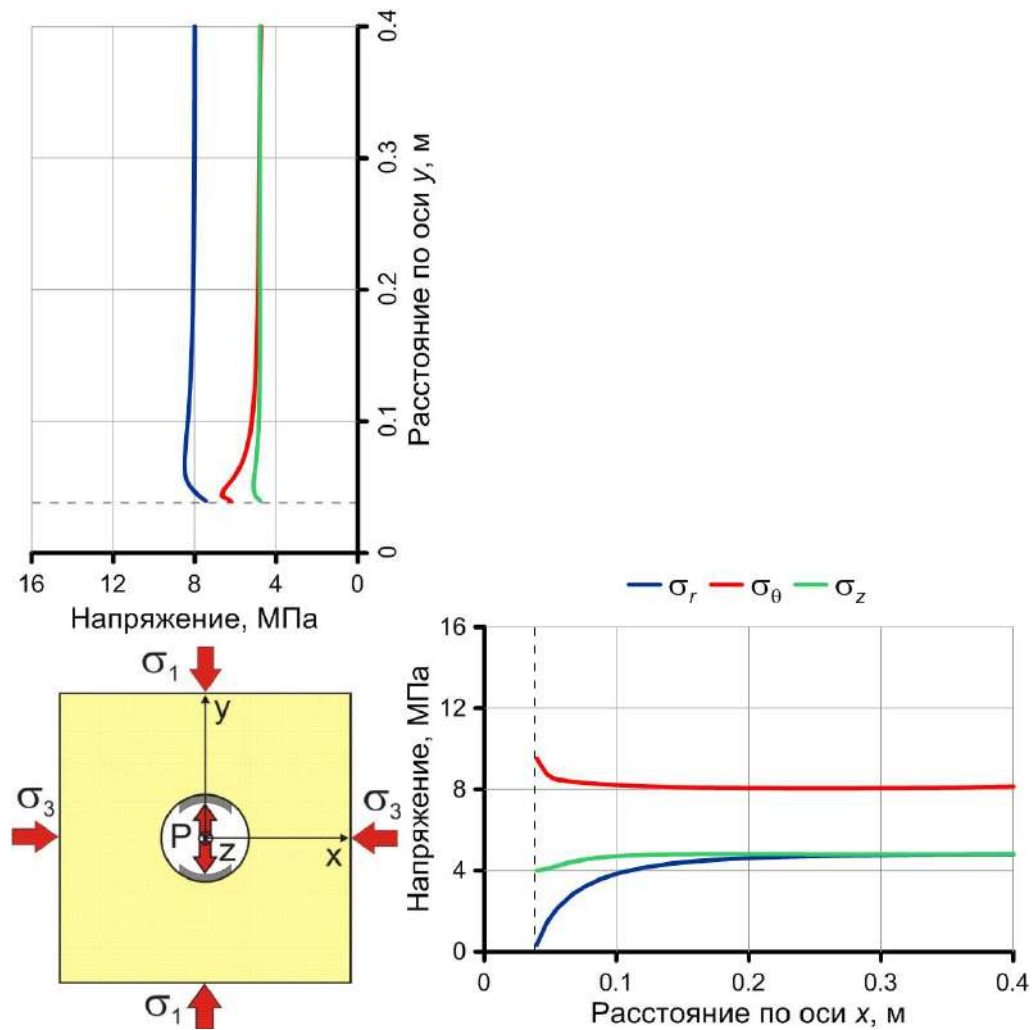


Рис. 3.6. Графики распределения значений компонент поля напряжений с удалением от контура скважины при нагружении гидродомкратом в направлении σ_1 :
 $\sigma_1 = 8,0$ МПа; $\sigma_2 = \sigma_3 = 4,8$ МПа; $P = 8,0$ МПа

По результатам анализа графиков распределения напряжений установлено, что при величине нагрузки 4,8 МПа, действующей на пластины гидродомкрата, в породах околоскважинного массива, располагающихся со стороны напряжения σ_3 , наблюдается восстановление радиальной компоненты σ_r поля напряжений, тогда как концентрация тангенциальной σ_θ и осевой σ_z компонент сохраняется. В породах, располагающихся по направлению напряжения σ_1 , радиальная компонента σ_r остается разгруженной, тангенциальная σ_θ и осевая σ_z компоненты также практически полностью разгружаются. Дальнейшее увеличение давления гидродомкрата P приводит к возникновению растягивающих тангенциальных напряжений σ_θ в данном направлении.

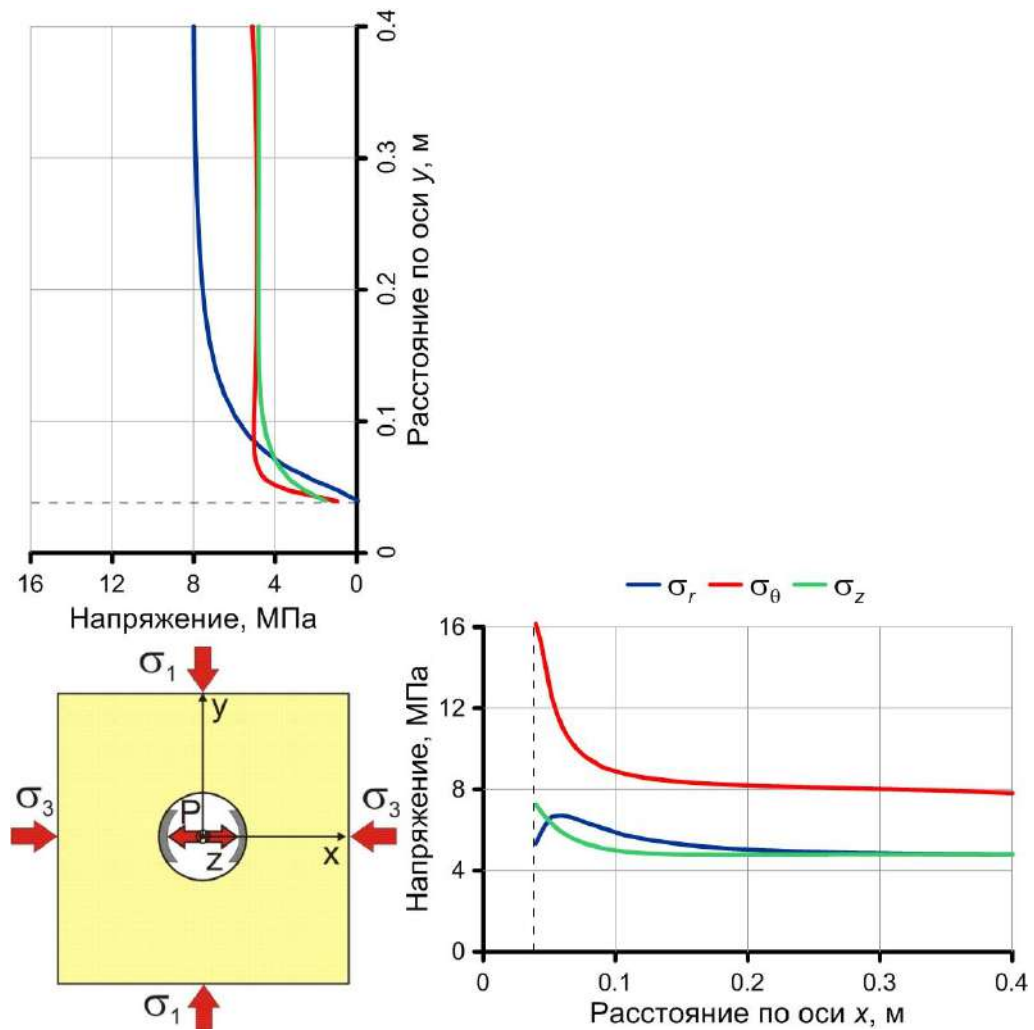


Рис. 3.7. Графики распределения значений компонент поля напряжений с удалением от контура скважины при нагружении гидродомкратом в направлении σ_3 :
 $\sigma_1 = 8,0$ МПа; $\sigma_2 = \sigma_3 = 4,8$ МПа; $P = 4,8$ МПа

3.2.2. Анализ напряженно-деформированного состояния пород околоскважинного пространства

С целью исследования особенностей проявления эффекта Кайзера и механизмов трещинообразования в соляных породах результаты численного моделирования напряжений были обобщены в виде идеализированных диаграмм (рис. 3.8). Данные диаграммы отображают "историю" изменения напряженно-деформированного состояния пород, расположенных в непосредственной близости от контура скважины со стороны действия главных напряжений σ_1 и σ_3 , на стадиях первоначального состояния, после бурения скважины и при нагружении гидродомкратом следующим образом.

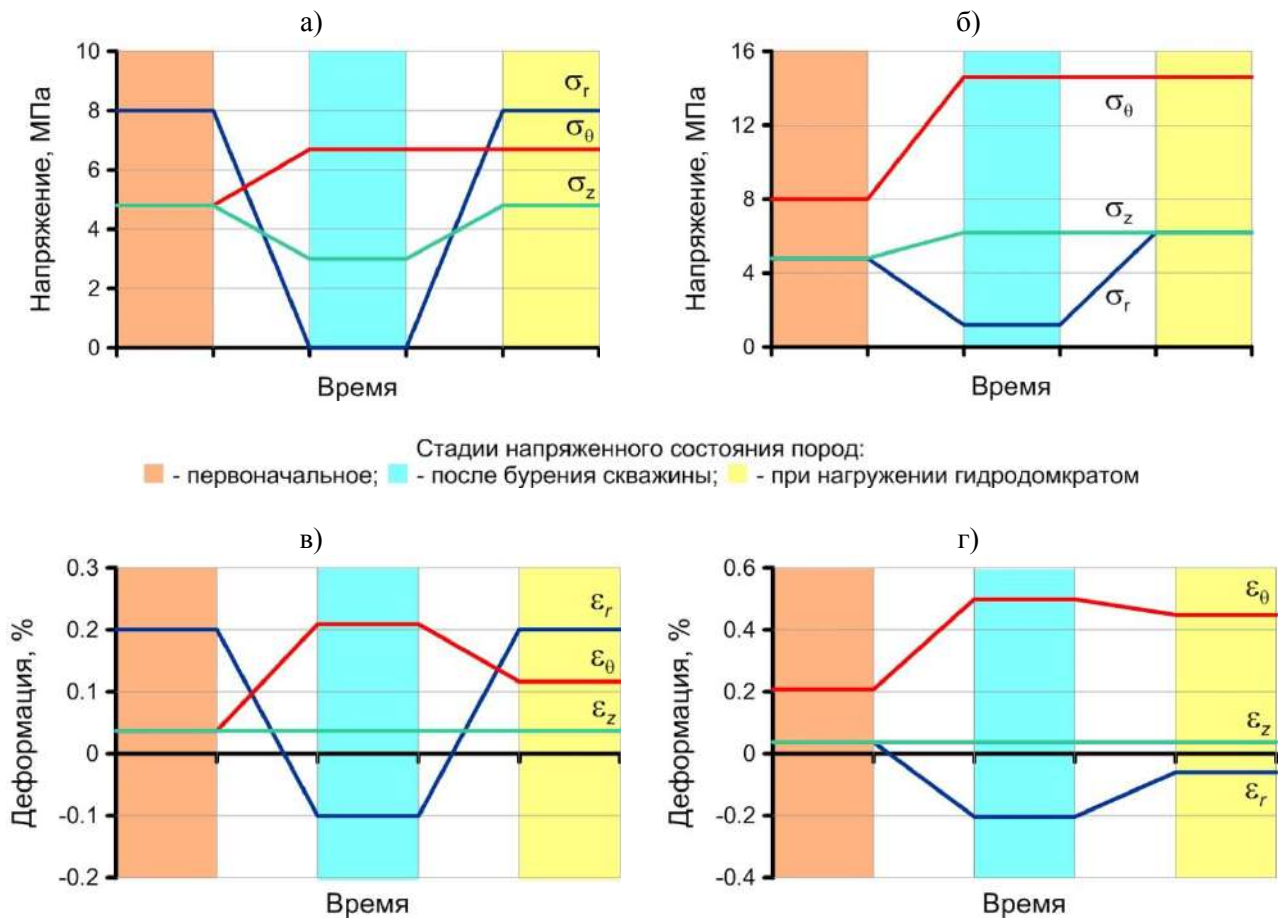


Рис. 3.8. Идеализированные графики изменения компонент поля напряжений (а, б) и деформаций (в, г) на контуре скважины во времени при нагружении стенок гидродомкратом:
 а, в – в направлении максимального главного напряжения σ_1 ;
 б, г – в направлении минимального главного напряжения σ_3

На первой стадии компоненты поля напряжений ненарушенного массива в цилиндрической системе координат принимают следующие значения: со стороны действия максимального главного напряжения – $\sigma_r = 8,0$ МПа, $\sigma_\theta = \sigma_z = 4,8$ МПа; со стороны действия минимального главного напряжения – $\sigma_\theta = 8,0$ МПа, $\sigma_r = \sigma_z = 4,8$ МПа. После бурения скважины (вторая стадия) радиальная компонента напряжений σ_r на контуре разгружается во всех направлениях, а тангенциальная σ_θ – увеличивается (см. п. 3.2.1). При этом максимальная концентрация σ_θ (14,6 МПа) возникает со стороны главного напряжения σ_3 , а минимальная (6,7 МПа) – в направлении σ_1 . Осевая компонента σ_z , которая действует вдоль оси скважины, уменьшается со стороны σ_1 до 3,0 МПа и увеличивается со стороны σ_3 до 6,2 МПа.

На третьей стадии 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. 3.8, а). В случае нагружения в направлении σ_3 радиальная компонента σ_r восстанавливается, а концентрации компонент σ_θ и σ_z остаются неизменными (рис. 3.8, б).

В результате анализа поля деформаций пород околоскважинного пространства установлено, что в первоначальном состоянии главные компоненты положительны, т.е. имеют сжимающий характер (рис. 3.8, в, г). После бурения скважины радиальная компонента ε_r меняет знак и приобретает характер растяжения, тогда как тангенциальная ε_θ и осевая ε_z компоненты остаются положительными.

При нагружении околоскважинного массива гидродомкратом в направлении σ_1 деформация ε_r опять приобретает сжимающий характер (рис. 3.8, в). В случае нагружения в направлении σ_3 данная компонента сохраняет характер растяжения (рис. 3.8, г), т.к. после бурения скважины образовалась концентрация сжимающих тангенциальной и осевой компонент поля напряжений. Поэтому для того, чтобы восстановить исходные значения ε_r в этом направлении необходимо приложить нагрузку к гидродомкрату больше, чем величина напряжения σ_3 .

Таким образом, после бурения скважины породы околоскважинного пространства переходят в режим растяжения в радиальном направлении, тогда как остальные компоненты поля деформаций имеют сжимающий характер. В свою очередь, растяжение пород в этом направлении может приводить к образованию концентрических трещин отрыва, плоскости которых квазиперпендикулярны радиусу скважины. Данный вывод подтверждает механизм формирования эффекта Кайзера в околоскважинном пространстве массива соляных пород, предложенный в п. 2.2.2.

3.2.3. Определение условий образования растягивающих напряжений на контуре скважины

Как уже было отмечено выше, при достижении давлением гидродомкрата некоторой критической величины, зависящей от ориентации оси нагружения относительно направления главных напряжений, на контуре скважины возникают тангенциальные растягивающие напряжения σ_θ . Это, в свою очередь, может приводить к образованию и распространению трещин разрыва, которые являются источником акустической эмиссии. В связи с тем, что преобразователь АЭ, установленный непосредственно на пластины гидродомкрата, регистрирует импульсы, исходящие из довольно большого объема пород вокруг скважины, то необходимо выполнить анализ условий возникновения растягивающих тангенциальных напряжений на контуре.

На рис. 3.9 представлено поле распределения напряжений σ_θ при величине давления гидродомкрата 16,2 МПа, действующей на стенки скважины в направлении σ_1 . На контуре скважины в диапазоне значений углов $-45^\circ \leq \theta \leq 45^\circ$ и $180^\circ - 45^\circ \leq \theta \leq 180^\circ + 45^\circ$ хорошо выделяются две области, в которых напряжения σ_θ принимают отрицательные значения.

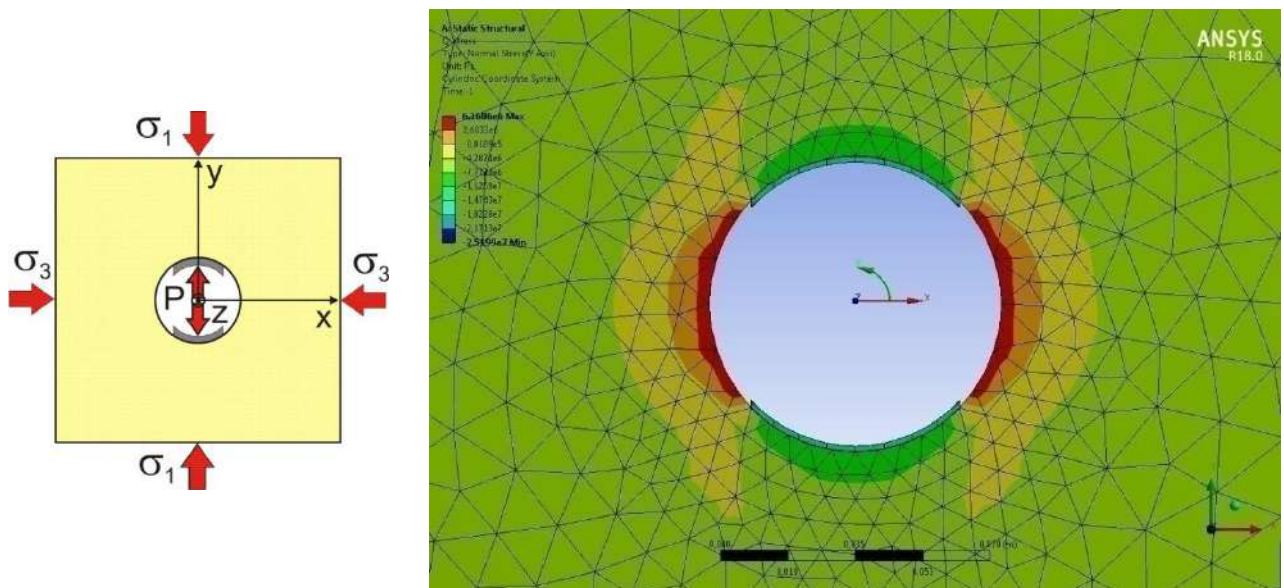


Рис. 3.9. Поле распределения тангенциальных напряжений σ_θ при нагружении гидродомкратом в направлении максимального главного напряжения σ_1 :

$$\sigma_1 = 8,0 \text{ МПа}; \sigma_2 = \sigma_3 = 4,8 \text{ МПа}; P = 16,2 \text{ МПа}$$

По результатам анализа поля распределения тангенциальных напряжений в случае нагружения гидродомкратом в направлении напряжения σ_3 на контуре скважины также установлены области, в которых компонента σ_θ принимает отрицательные значения (рис. 3.10). Данные области возникают, когда давление гидродомкрата достигает величины 5,4 МПа, и расположены по направлению максимального главного напряжения σ_1 ($\theta = 90^\circ$ и $\theta = -90^\circ$). Дальнейшее увеличение давления P приводит к снижению величины напряжений σ_θ и расширению границ этих областей.

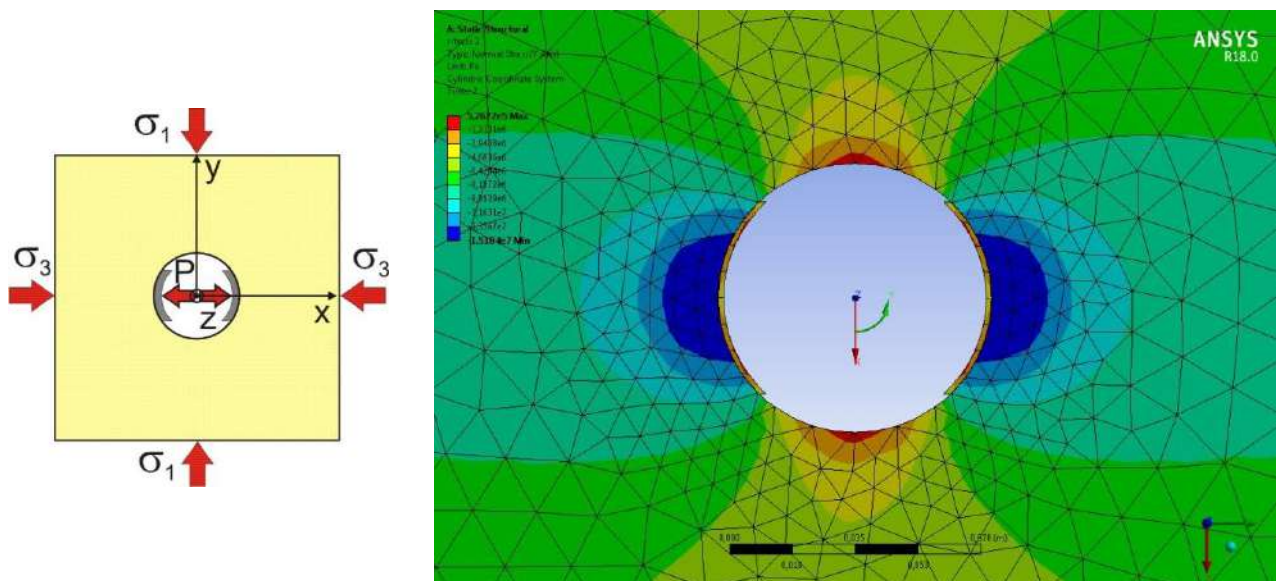


Рис. 3.10. Поле распределения тангенциальных напряжений σ_θ при нагружении гидродомкратом в направлении минимального главного напряжения σ_3 :
 $\sigma_1 = 8,0$ МПа; $\sigma_2 = \sigma_3 = 4,8$ МПа; $P = 5,4$ МПа

Для поиска наиболее общей закономерности, описывающей величину критического давления $P_{кр}$, при которой на контуре скважины возникают растягивающие тангенциальные напряжения, было выполнено моделирование случая нагружения стенок под углом 30° к направлению действия главного напряжения σ_1 . По результатам расчетов на контуре скважины установлены две области ($\theta = 105^\circ$ и $\theta = -75^\circ$), в которых тангенциальные напряжения принимают отрицательные значения начиная с величины $P_{кр} = 6,1$ МПа (рис. 3.11).

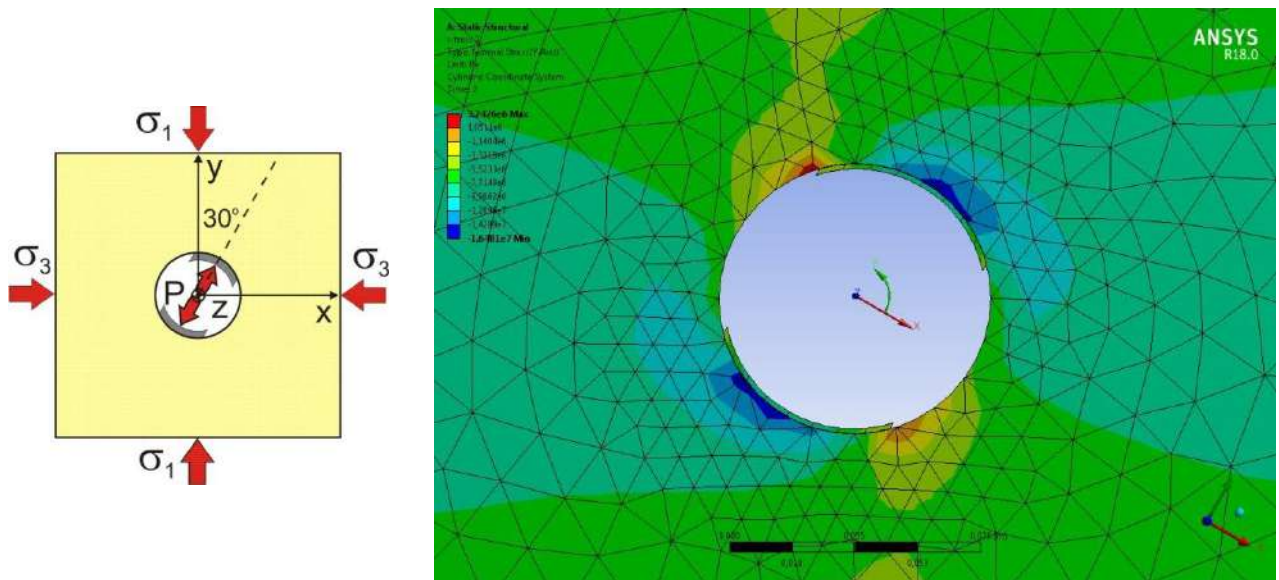


Рис. 3.11. Поле распределения тангенциальных напряжений σ_θ при нагружении гидродомкратом под углом 30° к направлению максимального главного напряжения σ_1 :
 $\sigma_1 = 8,0$ МПа; $\sigma_2 = \sigma_3 = 4,8$ МПа; $P = 6,1$ МПа

С целью исследования влияния естественного поля напряжений на значение критического давления $P_{кр}$ были проведены численные эксперименты по моделированию нагружения стенок скважины в условиях различных комбинаций величин главных напряжений. По результатам экспериментов установлено, что величина критического давления $P_{кр}$ зависит от направления нагружения и величин главных напряжений σ_1 и σ_3 , в соответствии с аналитическим выражением из работы [17]:

$$P_{кр} = 0,85 \cdot [3\sigma_3 - \sigma_1 - 4(\sigma_3 - \sigma_1)\sin^2(\theta - \alpha - \pi/2)], \quad (3.1)$$

где θ – угловая координата точки на контуре скважины, в которой $\sigma_\theta = 0$; α – угол между осью нагружения и направлением главного напряжения σ_3 . Общий множитель 0,85 скорее всего связан с особенностями используемой нелинейной упругой модели. Также было обнаружено, что на величину критического давления не оказывает влияния промежуточное главное напряжение σ_2 , которое направлено вдоль оси скважины.

Исходя из формы нагружающих пластин гидродомкрата Гудмана, которая представляет собой два сектора, ограниченных центральным углом 90° , для области околоскважинного пространства, где могут возникнуть растягивающие напряжения, должно выполняться условие $45^\circ < |\theta - \alpha| < 90^\circ$ (рис. 3.12, а).

Соответственно, чем больше центральный угол, определяющий форму пластин, тем меньше диапазон угловой координаты θ . В случае использования гидродомкратов, которые применяются для измерения напряжений методом разрыва стенок скважины, необходимо задавать точное направление распространения трещины разрыва [16, 17]. Поэтому форма нагружающих пластин данных гидродомкратов полукруглая и растягивающие напряжения возникают в очень узком диапазоне значений θ , а разность между углами θ и α составляет почти 90° (рис. 3.12, б).

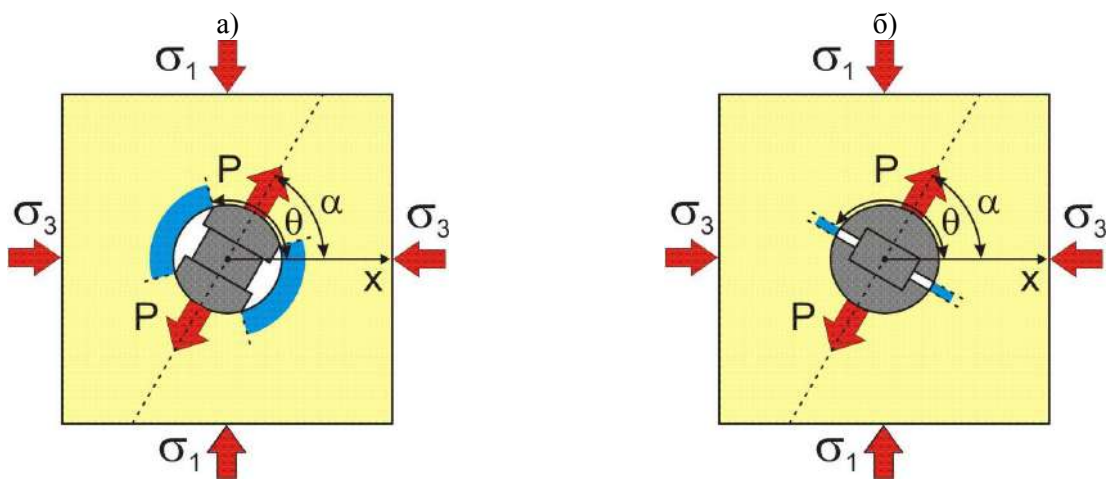


Рис. 3.12. Зависимость размера области, в которой возникают растягивающие напряжения (синим цветом), от формы нагружающих пластин гидродомкрата, ограниченной центральным углом: $a - 90^\circ$; $б - 180^\circ$

Изобразим графически семейство зависимостей критического давления гидродомкрата от направления нагружения (формула 3.1) для условий $\sigma_1 = 8,0$ МПа, $\sigma_3 = 4,8$ МПа и $45^\circ < |\theta - \alpha| < 90^\circ$ (рис. 3.13, а). Тогда огибающая снизу семейства кривых будет представлять собой минимальную величину критического давления, необходимого для возникновения растягивающих напряжений, при различных углах ориентации оси нагружения. Установленные аналитические закономерности удовлетворительно согласуются с результатами представленных выше численных экспериментов (точки зеленого цвета на рис. 3.13, а). Для сравнения на рис. 3.13, б представлена зависимость критического давления от направления нагружения гидродомкратом, имеющего полукруглую форму нагружающих пластин.

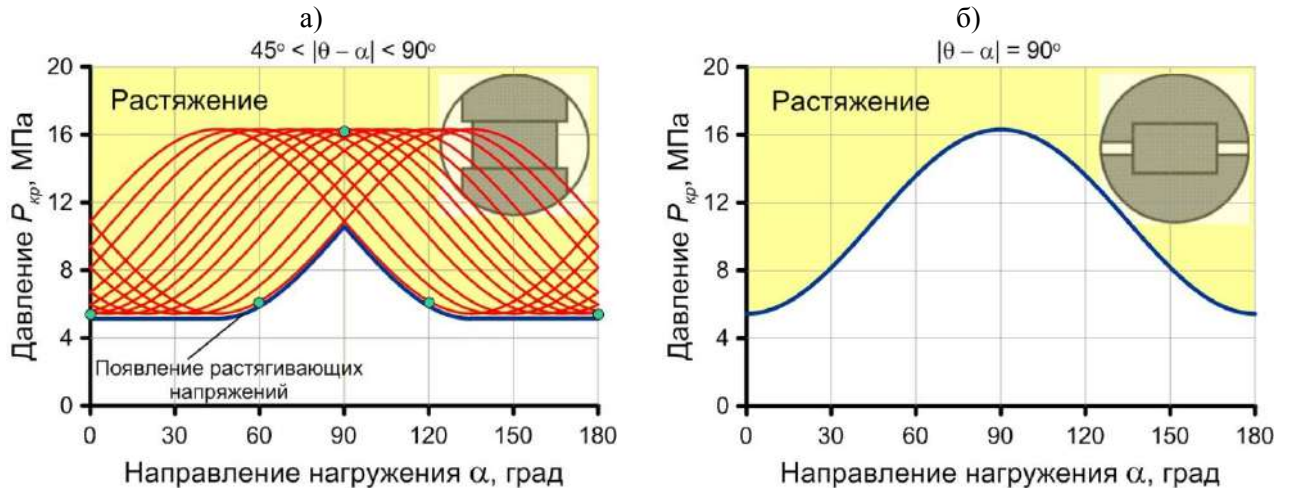


Рис. 3.13. Аналитические зависимости давления гидродомкрата, при котором на контуре скважины возникают тангенциальные растягивающие напряжения, от направления нагружения для условий $\sigma_1 = 8,0$ МПа, $\sigma_3 = 4,8$ МПа и формы нагружающих пластин гидродомкрата, ограниченной центральным углом: $a - 90^\circ$; $b - 180^\circ$

3.2.4. Анализ условий возникновения акустической эмиссии в породах околоскважинного пространства

Выше было показано, что при нагружении гидродомкратом пород околоскважинного пространства кроме областей сжатия существуют области растяжения, расположенные перпендикулярно оси нагружения (рис. 3.14). В связи с тем, что соляные породы обладают ярко выраженными пластическими свойствами, то их деформирование в режиме растяжения также сопровождается акустической эмиссией. Таким образом, при нагружении гидродомкратом стенок скважины в условиях массива соляных пород имеют место два фактора, обуславливающие акустическую эмиссию в породах околоскважинного пространства. 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.

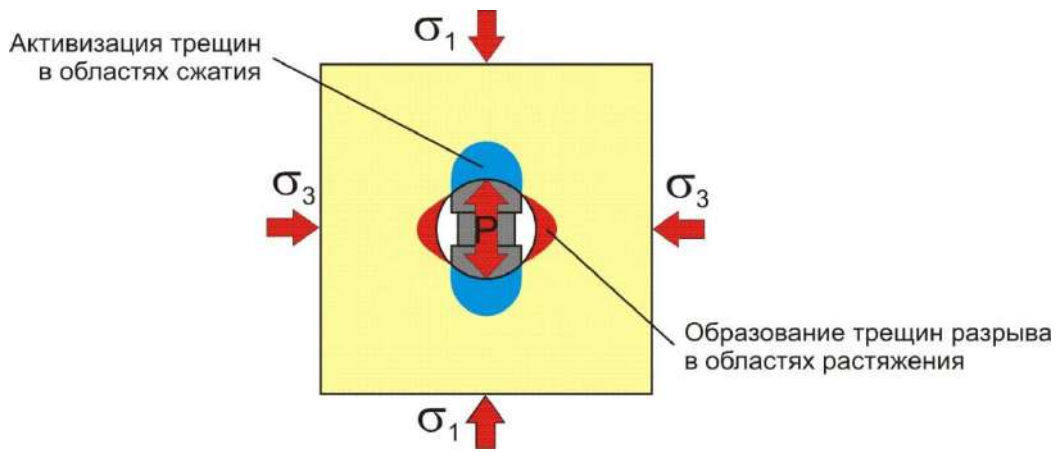


Рис. 3.14. Схематичное изображение областей сжатия и растяжения в околоскважинном пространстве при нагружении гидродомкратом

На основании исследований, выполненных в п. 2.3 и 3.2.1, можно предполагать, что эффект Кайзера в областях сжатия околоскважинного пространства возникает, когда давление гидродомкрата достигает величины радиальной компоненты поля напряжений, которая в зависимости от направления определяется согласно аналитическому выражению [95]:

$$\sigma_r = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos(2\theta - \pi) = P_{\text{ЭК}}. \quad (3.2)$$

На рис. 3.15 показан график зависимости радиальной компоненты σ_r от угловой координаты θ совместно с полученной в п. 3.2.3 кривой изменения критического давления гидродомкрата $P_{\text{кр}}$, при котором на контуре скважины возникают растягивающие напряжения. В результате анализа данных зависимостей установлено, что в случае нагружения гидродомкратом в направлениях близких к главным напряжениям σ_1 и σ_3 давление необходимое для восстановления радиальной компоненты меньше, чем давление образования микротрещин разрыва ($P_{\text{ЭК}} < P_{\text{кр}}$). 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 ($P_{\text{ЭК}} > P_{\text{кр}}$), и в таком случае увеличение активности АЭ будет связано со вторым механизмом.

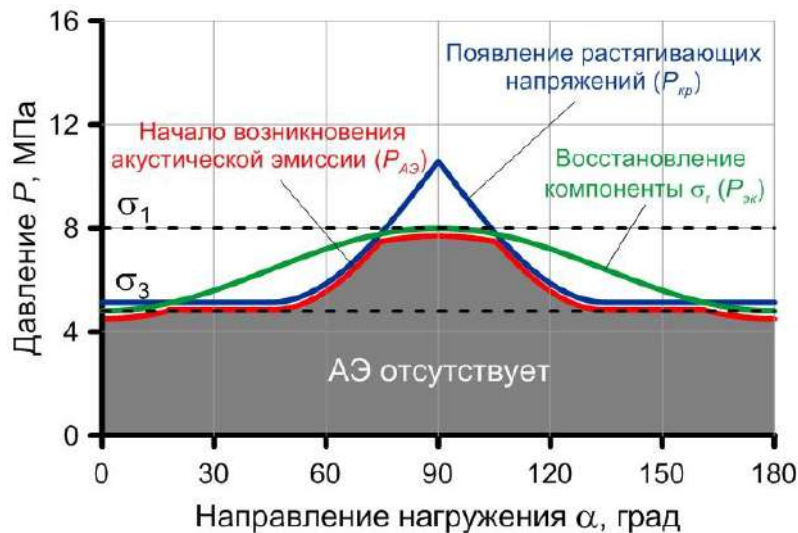


Рис. 3.15. Диаграмма, характеризующая условия возникновения акустической эмиссии в процессе нагружения стенок скважины гидродомкратом при значениях главных напряжений $\sigma_1 = 8,0$ МПа и $\sigma_3 = 4,8$ МПа

Если не учитывать акустическую эмиссию от разрушения неровностей на стенках скважины, трения и других помеховых факторов, то огибающая снизу двух кривых на рис. 3.15 представляет собой зависимость давления гидродомкрата, при котором возникает акустическая эмиссия, от направления нагружения. Необходимо отметить, что данная зависимость получена для рассматриваемых условий напряженного состояния соляных пород в нетронутым массиве ($\sigma_1 = 8,0$ МПа и $\sigma_2 = \sigma_3 = 4,8$ МПа) и в случае иной комбинации главных напряжений примет другой вид. Для примера на основе расчетов уравнений 3.1 и 3.2 на рис. 3.16 представлены два крайних случая.

В первом случае разность значений между главными напряжениями σ_1 и σ_3 небольшая, т.е. напряженное состояние пород в нетронутым массиве близко к гидростатическому. Данный вид напряженного состояния наблюдается в породах, залегающих на больших глубинах, либо обладающих ярко выраженными пластическими свойствами [93]. Тогда, независимо от направления нагружения гидродомкратом, начало возникновения акустической эмиссии будет связано только с эффектом Кайзера, т.е. когда давление достигает величины радиальной компоненты σ_r поля напряжений (рис. 3.16, а).

Во втором случае, в условиях высокой разности между главными напряжениями σ_1 и σ_3 , акустическая эмиссия на начальной стадии нагружения будет

отсутствовать при ориентации оси гидродомкрата под углами менее 30° к напряжению σ_1 , а начало ее возникновения обусловлено только растяжением пород околоскважинного пространства (рис. 3.16, б). Такой вид напряженного состояния пород, как правило, наблюдается в условиях действия высоких тектонических напряжений в массиве [93], либо в междукламерных столбчатых целиках. В данном случае после бурения скважины на ее контуре, по направлению действия максимального напряжения σ_1 , возникают растягивающие тангенциальные напряжения, которые обуславливают образование радиальных трещин разрыва (см. п. 2.3.4). Поэтому нагружение гидродомкратом стенок скважины под углами $0 \div 60^\circ$ к направлению минимального главного напряжения σ_3 будет приводить к увеличению размеров образовавшихся трещин и, следовательно, к акустической эмиссии, что может осложнить проявление эффекта Кайзера.

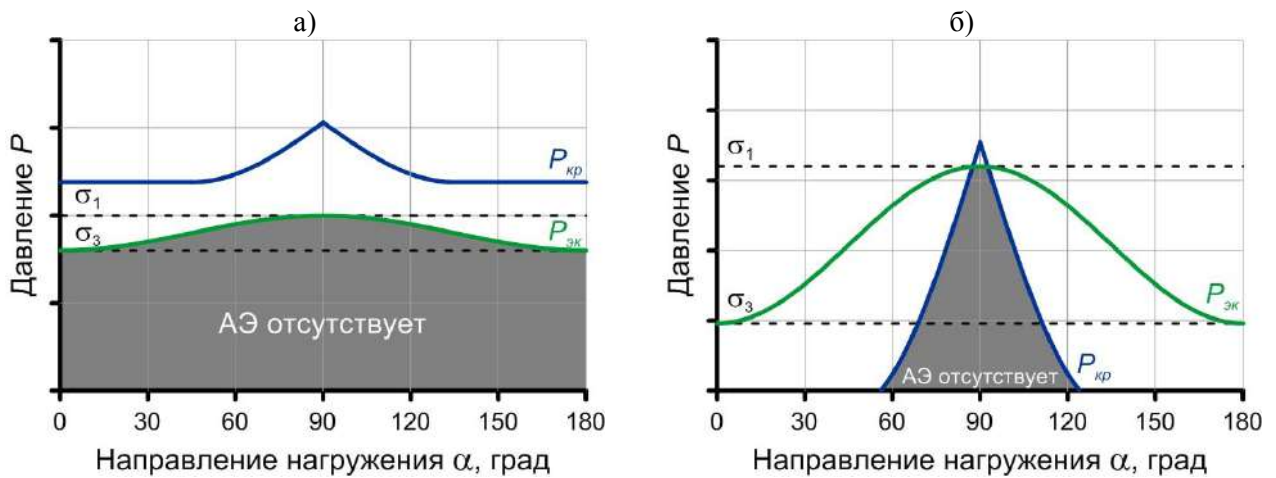


Рис. 3.16. Диаграммы, характеризующие условия возникновения акустической эмиссии в процессе нагружения стенок скважины гидродомкратом под различными углами к главному напряжению σ_3 , при соотношениях главных напряжений σ_1 и σ_3 :

$$a - \sigma_1 \geq \sigma_3 \geq 0,68\sigma_1; \quad b - \sigma_3 \leq 0,33\sigma_1$$

Таким образом, по форме зависимости давления, при котором возникает акустическая эмиссия, от направления нагружения можно оценить величины и ориентацию главных напряжений, действующих перпендикулярно оси скважины. Однако при интерпретации результатов необходимо учитывать оба фактора, обуславливающих акустическую эмиссию в породах околоскважинного

пространства. В связи с эмиссией, возникающей от растяжения пород гидродомкратом, в некоторых случаях точно определить величину давления, при которой проявляется эффект Кайзера, затруднительно. С другой стороны, использование данной особенности в качестве индикатора зарождения трещины разрыва при измерении напряжений методом разрыва стенок скважины гидродомкратом представляется весьма перспективным.

3.3. Выводы

По результатам численного моделирования напряженно-деформированного состояния пород околоскважинного массива установлено следующее:

1. Разработана математическая модель для расчета напряжений в околоскважинной области массива пород при нагружении гидродомкратом с учетом контактного взаимодействия нагружающих пластин и стенок скважины.

2. Для условий массива соляных пород ВКМКС установлен характер изменения напряженно-деформированного состояния пород околоскважинного пространства в процессе нагружения гидродомкратом в направлении главных напряжений σ_1 и σ_3 .

3. Предложена и обоснована гипотеза, согласно которой в условиях массива квазипластичных пород возникновение акустической эмиссии в зависимости от направления нагружения стенок скважины гидродомкратом 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.

4. 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.

ГЛАВА 4. ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОСОБЕННОСТЕЙ ПРОЯВЛЕНИЯ ЭФФЕКТА КАЙЗЕРА В СОЛЯНЫХ ПОРОДАХ

4.1. Методические аспекты физического моделирования напряженного состояния пород околоскважинной области массива

4.1.1. Обоснование схем нагружения, моделирующих напряженное состояние пород околоскважинной области

С целью изучения особенностей проявления эффекта Кайзера в породах околоскважинного пространства, расположенных в областях сжатия, при нагружении гидродомкратом стенок скважины, были выполнены эксперименты по моделированию данных условий на образцах соляных пород. Физическое моделирование производилось с помощью камеры трехосного сжатия, которая позволяет осуществлять нагружение цилиндрических образцов в двух режимах: при величине осевой нагрузки больше бокового давления ($\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$ – схема Кармана) или меньше ($\sigma_1 = \sigma_2 > \sigma_3$ – схема Беккера). Известно, что в случае нагружения по схеме Беккера происходит растяжение образца вдоль своей оси, тогда как главные напряжения являются сжимающими. В п. 3.2.2 было показано, что после бурения скважины радиальная деформация ε_r пород околоскважинного пространства также переходит в режим растяжения, а затем восстанавливается при нагружении гидродомкратом. Таким образом, историю изменения напряженно-деформированного состояния пород околоскважинной области можно реализовать на образцах в камере трехосного сжатия, если радиальную компоненту напряжений в массиве аппроксимировать вертикальной нагрузкой $\sigma_{\text{верт}} = \sigma_r$, а среднее значение двух других компонент – боковым давлением $\sigma_{\text{бок}} = (\sigma_\theta + \sigma_z)/2$ (рис. 4.1). Тогда диаграммы на рис. 3.8 преобразуются в схемы нагружения образцов, представленные на рис. 4.2.

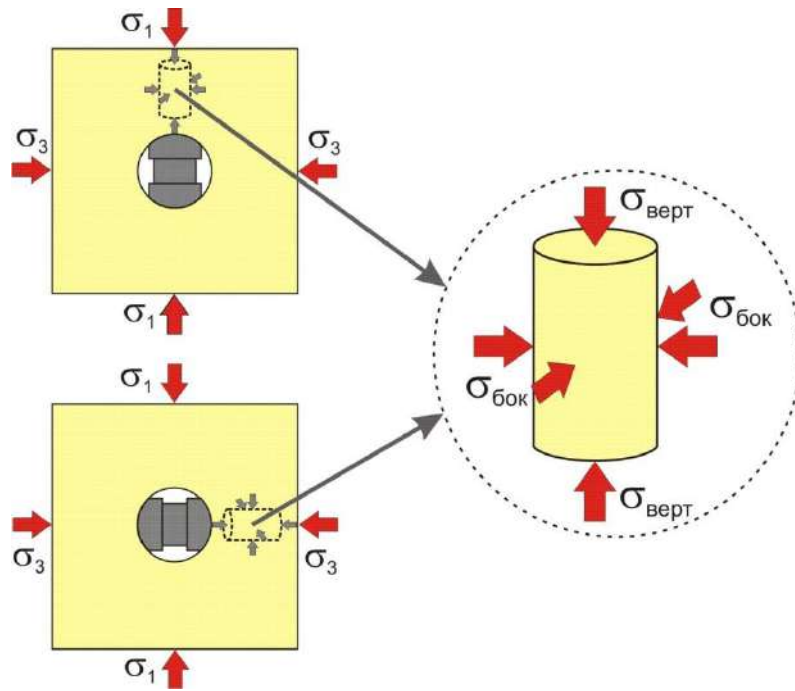


Рис. 4.1. Схема физического моделирования напряженного состояния пород околоскважинного пространства в камере трехосного нагружения

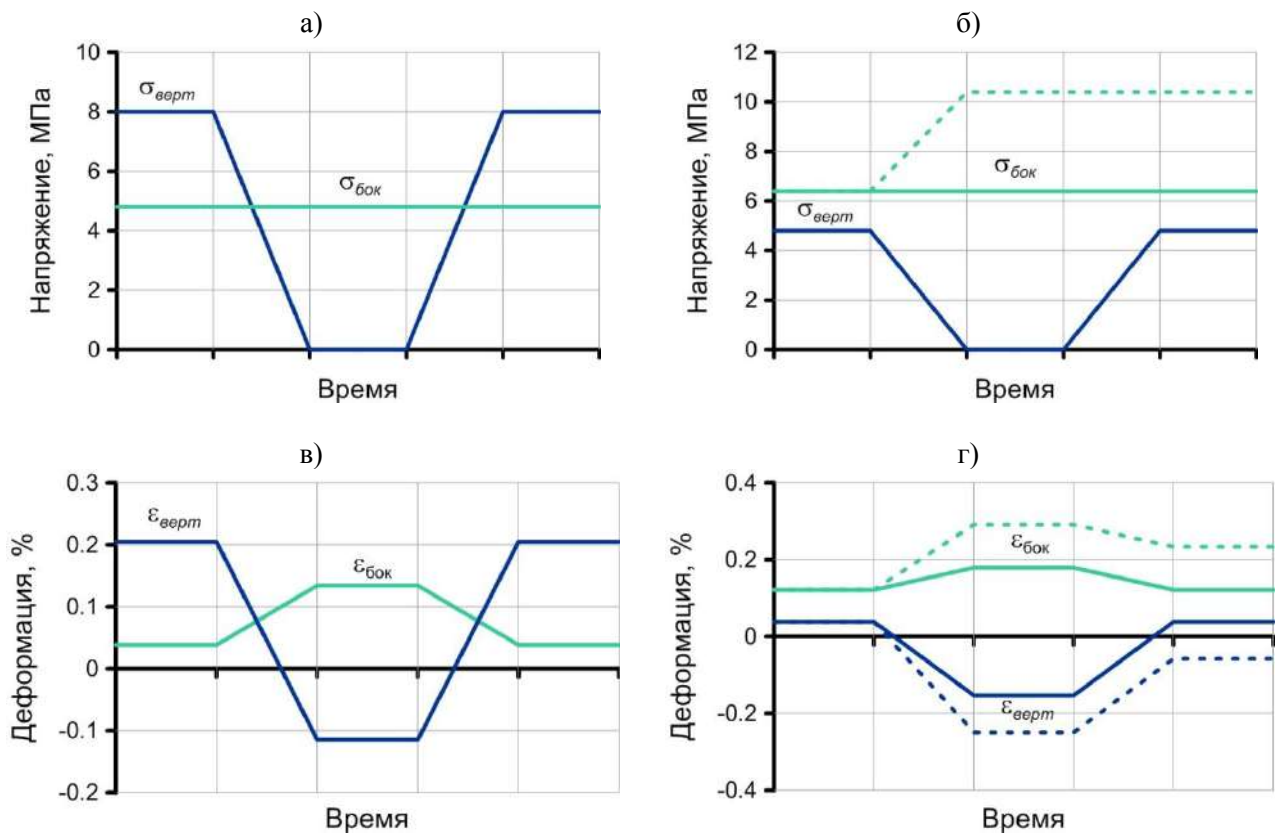


Рис. 4.2. Идеализированные графики изменения компонент поля напряжений (а, б) и деформаций (в, г) во времени при трехосном нагружении образцов, моделирующем условия напряженно-деформированного состояния пород околоскважинного пространства:

а, в — в направлении максимального главного напряжения σ_1 ;

б, г — в направлении минимального главного напряжения σ_3

Необходимо отметить, что при напряженных состояниях, испытываемых породами в условиях околоскважинного пространства, тангенциальная σ_θ и осевая σ_z компоненты не одинаковы, поэтому аппроксимация их в камере трехосного сжатия боковым давлением может показаться достаточно условной. Тем не менее, в связи с отличиями в фундаментальных предпосылках, используемых в различных моделях механизмов проявления эффекта Кайзера, до настоящего времени нет единого мнения о том, как влияет промежуточное главное напряжение на его проявление. В этой связи, введем допущение, что влияние промежуточной осевой компоненты σ_z на проявление эффекта Кайзера в породах околоскважинного пространства минимально.

При физическом моделировании напряженного состояния пород околоскважинной области, расположенных со стороны минимального главного напряжения σ_3 (рис. 4.2, б), было принято решение рассмотреть два случая: 1) без изменения бокового давления между циклами нагружения; 2) с увеличением бокового давления. Вторая схема обусловлена возникновением концентраций напряжений σ_θ и σ_z на контуре скважины после бурения, поэтому в большей степени соответствует реальной истории нагружения и требует более тщательного изучения.

С целью анализа деформаций образца при его нагружении в камере трехосного сжатия по схемам, показанным на рис. 4.1, а и б, выполнено численное моделирование с использованием трехмерной нелинейной упругой модели, представленной в п. 3.1. Установлено, что в случае испытания образцов по схеме, имитирующей напряженное состояние пород околоскважинного пространства, расположенных со стороны напряжения σ_1 , в первоначальном цикле нагружения главные напряжения и деформации по всем трем осям являются сжимающими (рис. 4.1, в). Когда вертикальная компонента полностью разгружается, продольная деформация образца $\varepsilon_{\text{верт}}$ переходит в режим растяжения, тогда как поперечная деформация $\varepsilon_{\text{бок}}$ остается сжимающей. При восстановлении вертикальной компоненты во втором цикле нагружения деформация $\varepsilon_{\text{верт}}$ вновь приобретает характер сжатия.

В случае испытания образцов по схеме, моделирующей напряженное состояние пород околоскважинного пространства, расположенных со стороны напряжения σ_3 , поперечная деформация образца $\varepsilon_{\text{бок}}$ на всех этапах нагружения сжимающая (рис. 4.1, г). Продольная деформация $\varepsilon_{\text{верт}}$ в исходном цикле сжимающая, а затем при разгрузке вертикального напряжения переходит в режим растяжения. Если на данном этапе боковое давление увеличивается, то при повторном нагружении продольная деформация восстанавливает не полностью свои значения и остается в отрицательной области. Если боковое давление не изменялось между циклами нагружения, то при восстановлении осевого напряжения первоначальные значения продольной деформации $\varepsilon_{\text{верт}}$ также восстанавливаются.

Таким образом, характер изменения компонент поля деформаций образца в случае предложенных режимов трехосного осесимметричного нагружения (рис. 4.2) соответствует характеру изменения компонент поля деформаций в условиях околоскважинного пространства (рис. 3.8).

4.1.2. Механизмы трещинообразования в условиях трехосного нагружения соляных пород

В предыдущем пункте было показано, что напряженное состояние пород околоскважинного пространства в областях со стороны главных напряжений массива можно реализовать на образцах в камере трехосного сжатия. Однако перед тем как ответить на вопрос, будет ли иметь место эффект Кайзера в данных условиях, необходимо разобраться в механизме трещинообразования при соответствующих режимах нагружения соляных пород.

В работах [89, 90] Schulze, Popp и Kern исследовали изменение поврежденности и проницаемости при деформировании соляных пород в камере трехосного сжатия. Образцы диаметром 98 мм и высотой 200 мм нагружали в режимах сжатия-растяжения и в процессе эксперимента регистрировали изменение скоростей упругих волн и проницаемости вдоль оси образца. Также после испытаний образец разрезался на плоские пластинки вдоль и поперек своей

оси, которые после шлифовки обследовались на микроскопе. По результатам исследований авторы установили, что в режиме трехосного сжатия по схеме Кармана на начальной стадии нагружения скорости продольных и поперечных волн увеличиваются, тогда как проницаемость очень мала и находится ниже предела измерений прибора (рис. 4.3, а). С началом дилатансии скорости продольных волн уменьшаются, причем скорость уменьшения поперечных волн выше, чем продольных, а проницаемость образца увеличивается.

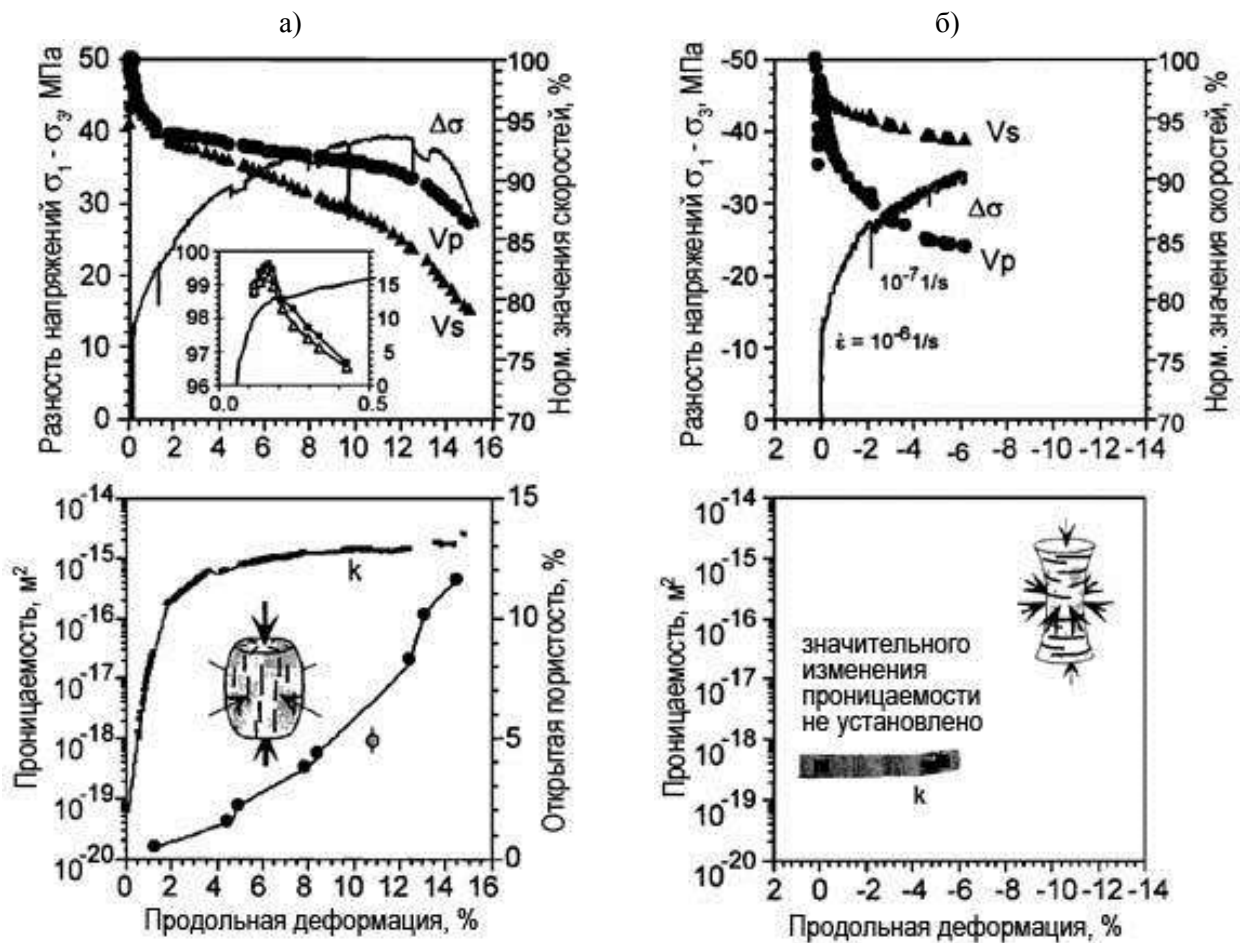


Рис. 4.3. Результаты измерения скоростей продольных волн и проницаемости при деформировании образца соляных пород в режиме трехосного сжатия (а) и растяжения (б) [90]

В режиме растяжения по схеме Беккера на начальной стадии нагружения, когда осуществляется гидростатическое сжатие образца, скорости упругих волн увеличиваются (рис. 4.3, б). Затем величина вертикальной нагрузки поддерживалась постоянной, а боковое давление увеличивалось, при этом наблюдалось уменьшение скоростей упругих волн. В данном случае скорость уменьшения

продольных волн выше, чем поперечных. Значительного изменения проницаемости вдоль оси образца при деформировании соляных пород в режиме растяжения не обнаружено. Также было установлено, что данный характер изменения физико-механических свойств наблюдается во всем исследуемом диапазоне бокового давления от 2 до 20 МПа.

Хотя главной целью исследований являлось определение условий начала дилатансии по изменению скорости упругих волн и проницаемости, данная работа интересна тем, что авторы обосновали следующий механизм трещинообразования в соляных породах. В режиме сжатия по схеме Кармана, т.е. когда осевая нагрузка больше бокового давления $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$, на начальной стадии нагружения происходит закрытие пор и микротрещин, ориентированных перпендикулярно напряжению σ_1 . С началом процесса дилатансии в образце зарождаются и произрастают продольные трещины (рис. 4.4, а). Так как измерение проницаемости осуществлялось вдоль оси образца, именно такая ориентация трещин обуславливает увеличение проницаемости при данном режиме нагружения. В случае растяжения, т.е. когда осевая нагрузка меньше бокового давления $\sigma_1 = \sigma_2 > \sigma_3$, образуются поперечные трещины растяжения, плоскости которых перпендикулярны осевому напряжению σ_3 (рис. 4.4, б), что не приводит к значительным изменениям проницаемости в продольном направлении.

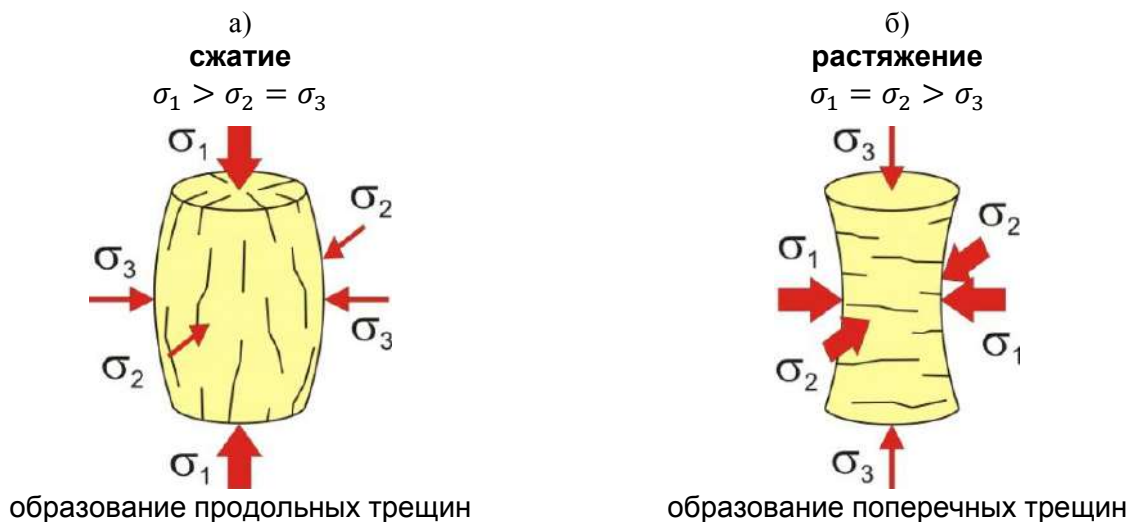


Рис. 4.4. Ориентация трещин в образце при режимах трехосного сжатия (а) и растяжения (б)

На основе рассмотренного процесса трещинообразования в соляных породах выполним анализ механизмов проявления эффекта Кайзера при режимах нагружения в камере трехосного сжатия, моделирующих напряженное состояние пород околоскважинной области массива. В случае первой схемы нагружения (рис. 4.5, а), когда образец в исходном состоянии находится в условиях трехосного осесимметричного сжатия ($\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$), в нем образовались трещины, ориентированные параллельно оси образца. Здесь необходимо отметить, что соотношение между осевой нагрузкой и боковым давлением должно быть таким, чтобы образец находился в стадии дилатансии, иначе продольные трещины в образце могут отсутствовать. При разгрузке напряжения $\sigma_{\text{верт}}$ образовавшиеся продольные трещины будут закрываться. С уменьшением осевой нагрузки ниже величины бокового давления образец перейдет в режим растяжения ($\sigma_1 = \sigma_2 > \sigma_3$) и начнется образование поперечных трещин, что будет сопровождаться акустической эмиссией.

Во втором цикле нагружения образца поперечные трещины начнут закрываться, при этом активность АЭ будет на уровне фоновых значений или отсутствовать вообще. Когда вертикальная нагрузка превысит величину бокового давления, начнут раскрываться продольные трещины. При достижении нагрузкой $\sigma_{\text{верт}}$ максимального значения предыдущего цикла продольные трещины раскроются до размера, достигнутого ранее. Дальнейшее увеличение напряжения $\sigma_{\text{верт}}$ приведет к возобновлению роста продольных трещин и акустической эмиссии, т.е. будет наблюдаться эффект Кайзера.

В случае второй схемы нагружения (рис. 4.5, б) в исходном напряженном состоянии образец находится в условиях растяжения ($\sigma_1 = \sigma_2 > \sigma_3$) и в нем образовались поперечные трещины. С разгрузкой осевого напряжения $\sigma_{\text{верт}}$ трещины начнут увеличиваться в размере, что будет сопровождаться акустической эмиссией. Необходимо отметить, что если при этом происходит одновременное увеличение бокового давления $\sigma_{\text{бок}}$, то размер поперечных трещин будет больше по сравнению с вариантом без увеличения $\sigma_{\text{бок}}$.

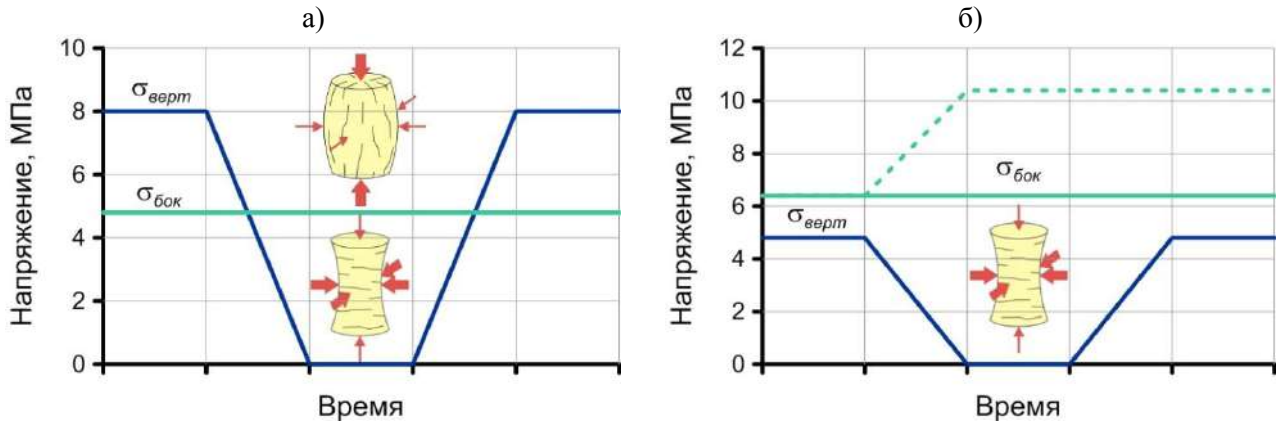


Рис. 4.5. Механизмы трещинообразования при режимах нагружения образцов, моделирующих условия напряженного состояния пород околоскважинного массива:

a – в направлении максимального главного напряжения σ_1 ;

б – в направлении минимального главного напряжения σ_3

При восстановлении значений напряжением $\sigma_{\text{верт}}$ во втором цикле нагружения поперечные трещины начнут закрываться. В связи с этим, возникает вопрос: при какой величине осевого напряжения $\sigma_{\text{верт}}$ будет иметь место эффект Кайзера – при максимальном значении установочного цикла или при значении соответствующем боковому давлению $\sigma_{\text{бок}}$? В последнем случае образец окажется в условиях гидростатического напряженного состояния ($\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$) и, согласно рассмотренному механизму трещинообразования, поперечные трещины полностью закроются. При этом увеличение активности АЭ может быть обусловлено разрушением неровностей на поверхностях поперечных трещин (см. п. 1.2.4).

Если эффект Кайзера при трехосном нагружении пород в режиме Кармана достаточно хорошо изучен в литературе (см. п. 1.2.1-1.2.3), то информации о его проявлении в случае сжатия пород перпендикулярно направлению ориентированной трещиноватости довольно мало. До настоящего времени было выдвинуто только предположение о существовании эффекта Кайзера при закрытии трещин [46, 57] без экспериментального подтверждения. Согласно модели *закрывающейся трещины* Holcomb'a [46] резкое увеличение активности акустической эмиссии по сравнению с фоновыми значениями при закрытии трещин может быть обусловлено разрушением неровностей на их берегах, ко-

гда они начинают соприкасаться друг с другом. Вне зависимости от того, что является или нет данное утверждение справедливым по отношению к соляным породам, резкое увеличение активности АЭ при превышении осевой нагрузкой величины бокового давления может быть связано с зарождением и распространением продольных трещин, которые до этого отсутствовали в образце.

Таким образом, с целью исследования проявления эффекта Кайзера при напряженных состояниях, испытываемых породами околоскважинного пространства, были выполнены эксперименты по физическому моделированию данных условий на образцах в камере трехосного сжатия. Особенностью деформирования соляных пород при рассматриваемых режимах является образование ориентированной трещиноватости после установочного цикла и последующее нагружение в тестовом цикле перпендикулярно направлению трещин.

4.1.3. Аппаратура и методика проведения испытаний образцов соляных пород в камере трехосного сжатия

Испытания образцов соляных пород в условиях трехосного осесимметричного нагружения выполнялись с помощью сервогидравлического испытательного комплекса «MTS-815», представляющем собой жесткую нагружающую раму (максимальное осевое усилие на сжатие – 1500 кН) и собственно камеру объемного нагружения (рис. 4.6, а), развивающую максимальное боковое давление – 80 МПа, которое создается с помощью гидравлической жидкости. Комплекс позволяет испытывать цилиндрические образцы пород диаметром до 100 мм и высотой до 200 мм по схемам нагружения Кармана ($\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$) и Беккера ($\sigma_1 = \sigma_2 > \sigma_3$). Также комплекс оснащен универсальным программным обеспечением «MultiPurpose TestWare», позволяющем изменять режимы и условия эксперимента в широком диапазоне скоростей приложения нагрузок. Результаты эксперимента фиксируются в автоматическом режиме в памяти персонального компьютера.

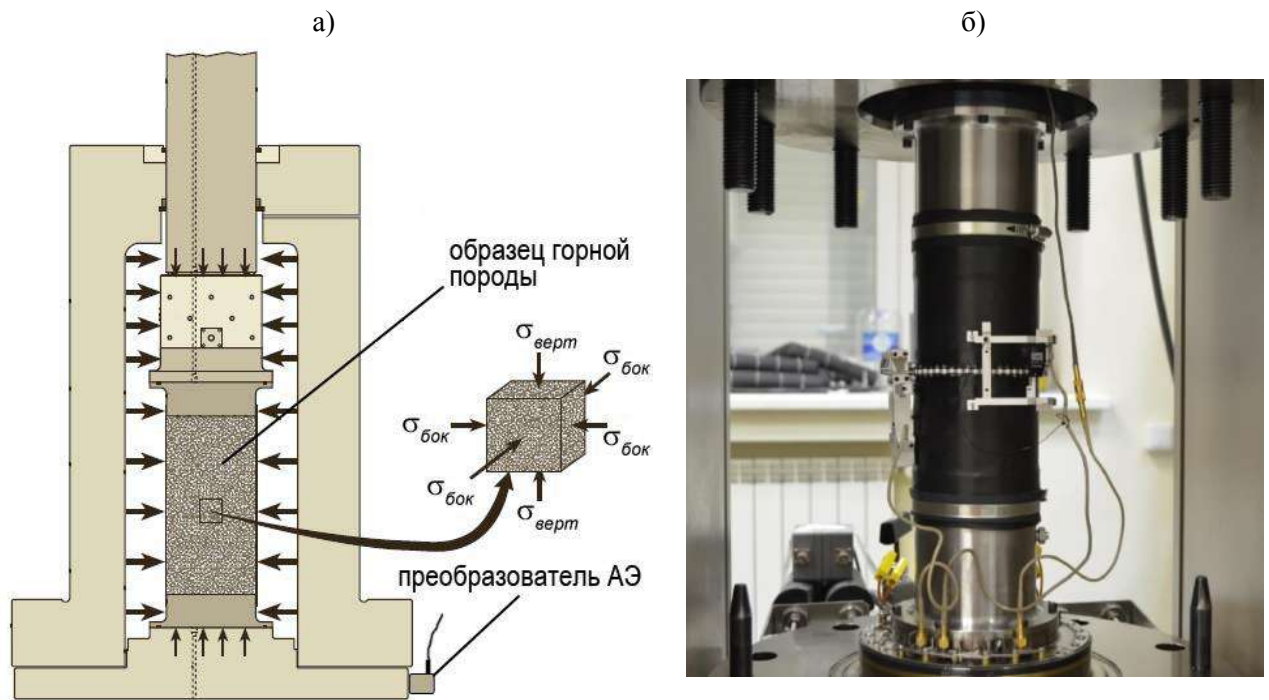


Рис. 4.6. Схематичное изображение камеры трехосного сжатия «MTS-815» (а) и подготовленный к испытаниям образец с продольным и поперечным экстензометрами (б)

Для испытаний были изготовлены 10 шт цилиндрических образцов соляных пород, взятых с шахтных полей рудников ВКМКС, диаметром 100 мм и высотой 200 мм.

В процессе выполнения экспериментов по физическому моделированию осуществляется следующий порядок работ. Перед испытанием каждый образец помещается в специальную манжету из термоусадочной трубки, защищающую его от контакта с гидравлической жидкостью при нагружении боковым давлением (рис. 4.6, б). Трубка надевается таким образом, что перекрывает края двух металлических цилиндров, расположенных с торцов образца. В свою очередь цилиндры через уплотнение болтами прикручиваются к металлическому штоку и нижней части камеры трехосного нагружения. Это делается для того, чтобы избежать воздействия гидравлического давления на горизонтальные поверхности образца. Контроль продольных и поперечных деформаций образца осуществляется с помощью специальных экстензометров, которые предназначены для работы в средах с высоким гидростатическим давлением.

После установки подготовленного образца в камеру объёмного сжатия, она заполняется рабочей жидкостью и производится его нагружение равносторонним боковым давлением ($\sigma_{\text{верт}} = \sigma_{\text{бок}}$) до заданного значения. Далее осуществляется нагружение образца осевой нагрузкой $\sigma_{\text{верт}}$ со скоростью деформирования $0,001 \text{ мин}^{-1}$ согласно схемам, рассмотренным в п. 4.1.1. Выдержка образца в установочном цикле составляла не менее 20 мин. Время между циклами разгрузки и повторным нагружением было менее 1 мин.

Регистрация импульсов акустической эмиссии осуществлялась с помощью двух пьезоэлектрических преобразователей, установленных с внешней стороны камеры на ее нижней части (рис. 4.6, а), и регистрирующей аппаратуры «Vallen AMSY-6», синхронизированной с сигналами испытательного комплекса «MTS-815». Рабочий диапазон частот АЭ-преобразователей составляет 100-500 кГц, порог регистрации АЭ-импульсов – 48 и 50 дБ на первом и втором каналах соответственно.

4.2. Результаты экспериментальных исследований эффекта Кайзера при различных режимах трехосного нагружения

4.2.1. Разгрузка и восстановление осевой компоненты поля напряжений образца после нагружения в режиме гидростатического сжатия ($\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$) в установочном цикле

Перед тем как приступить к реализации схем нагружения, рассмотренных в п. 4.1.1, выполнены испытания соляных пород, которые заключались в следующем. В первоначальном цикле осуществлялось нагружение образца равномерным гидростатическим давлением до величины 4,8 МПа. В таком напряженном состоянии образец находился 20 мин, после чего производилось циклическое изменение вертикальной компоненты поля напряжений $\sigma_{\text{верт}}$ при постоянной величине бокового давления $\sigma_{\text{бок}}$ (рис. 4.7). Проведение данных испытаний было необходимо для изучения более общих закономерностей прояв-

ления эффекта Кайзера в соляных породах в случае разгрузки и восстановления компоненты поля напряжений.

По результатам испытаний установлено, что в первом цикле при снижении вертикального напряжения возникает акустическая эмиссия. В последующих циклах акустическая эмиссия при разгрузке отсутствует до тех пор, пока величина компоненты $\sigma_{\text{верт}}$ не уменьшится до минимального значения предыдущего цикла (рис. 4.7). Таким образом, в данном случае эффект Кайзера возникает за счет возобновления роста поперечных трещин растяжения в образце.

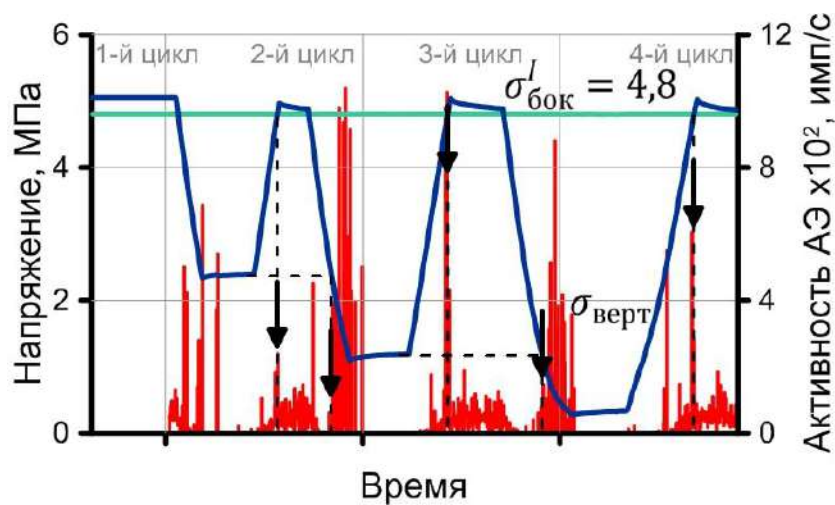


Рис. 4.7. Графики изменения напряжений в образце и активности АЭ от времени в случае циклического изменения осевой компоненты $\sigma_{\text{верт}}$ после его нагружения в режиме гидростатического сжатия ($\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$) в установочном цикле

Также обнаружено, что на стадиях нагружения образца наблюдается скачкообразное увеличение активности АЭ, когда компонента $\sigma_{\text{верт}}$ достигает первоначальных максимальных значений. Скорее всего данный эффект обусловлен закрытием поперечных трещин в условиях, близких к гидростатическому напряженному состоянию установочного цикла, что подтверждает гипотезу, выдвинутую ранее.

4.2.2. Разгрузка и восстановление осевой компоненты поля напряжений образца после нагружения по схеме Беккера ($\sigma_1 = \sigma_2 > \sigma_3$) в установочном цикле

Схема с разгрузкой и восстановлением осевой компоненты поля напряжений образца после нагружения его по схеме Беккера ($\sigma_1 = \sigma_2 > \sigma_3$) в первом цикле имитирует условия, в которых находятся породы околоскважинного пространства со стороны главного напряжения σ_3 . В установочном цикле образец нагружался гидростатическим давлением до 4,8 МПа, после чего боковое давление $\sigma_{бок}$ увеличивалась до 6,4 МПа при постоянном значении вертикального напряжения $\sigma_{верт} = 4,8$ МПа. В таком напряженном состоянии образец находился 20 мин. Далее вертикальная компонента разгружалась до значений 1-1,4 МПа и через 1 мин осуществлялось ее повторное нагружение до величины $\sigma_{бок}$. При этом было рассмотрено два варианта: без изменения бокового давления (рис. 4.8, а) и с увеличением бокового давления до 10,4 МПа (рис. 4.8, б) между циклами нагружения.

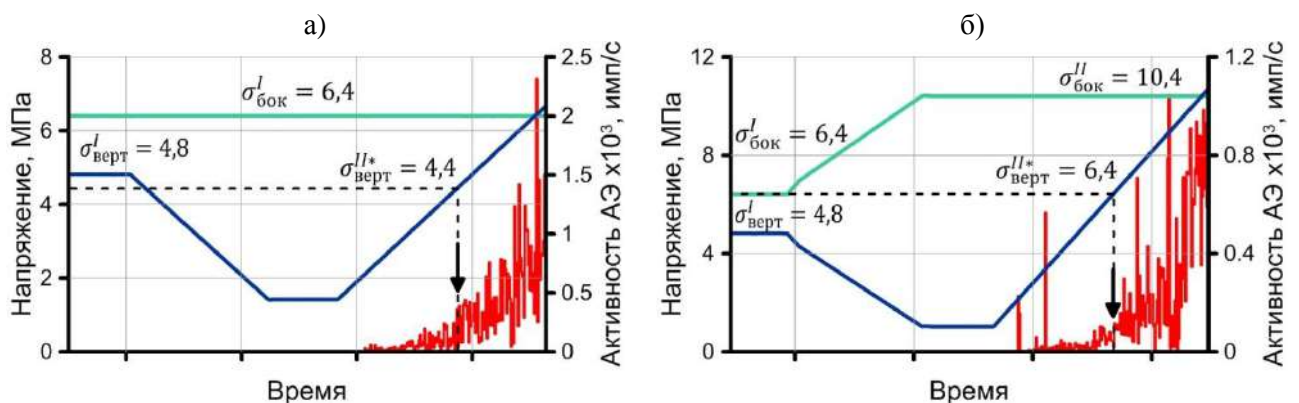


Рис. 4.8. Графики изменения напряжений в образце и активности АЭ от времени в случае разгрузки и восстановления осевой компоненты $\sigma_{верт}$ после его нагружения по схеме Беккера ($\sigma_1 = \sigma_2 > \sigma_3$) в установочном цикле:
а – без изменения бокового давления; б – с увеличением бокового давления

Экспериментами установлено, что в первом варианте эффект Кайзера проявляется при восстановлении вертикальной нагрузкой $\sigma_{верт}$ максимального значения установочного цикла (рис. 4.8, а). В варианте с увеличением бокового давления данный эффект выявлен при значениях компоненты $\sigma_{верт}$ больше, чем

первоначальные (рис. 4.8, б). Также обнаружено, что при достижении напряжением $\sigma_{\text{верт}}$ величины бокового давления, т.е. когда напряженное состояние образца близко к гидростатическому ($\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$), величина активности АЭ является максимальной. Увеличение активности АЭ при данных режимах нагружения, скорее всего, обусловлено закрытием поперечных трещин.

4.2.3. Разгрузка и восстановление осевой компоненты поля напряжений образца после нагружения по схеме Кармана ($\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$) в установочном цикле

Схема с разгрузкой и восстановлением осевой компоненты после нагружения образца по схеме Кармана ($\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$) в первом цикле моделирует условия, в которых находятся породы околоскважинного пространства со стороны максимального главного напряжения σ_1 . В установочном цикле осуществлялось нагружение образца гидростатическим давлением до 4,8 МПа, после чего при постоянной величине бокового давления $\sigma_{\text{бок}}$ вертикальное напряжение увеличивалось до 8,0 МПа. В данном напряженном состоянии образец находился 20 мин. Далее производилась разгрузка осевой компоненты $\sigma_{\text{верт}}$ до 0,8-1,0 МПа и повторное нагружение до значений установочного цикла, боковое давление при этом не изменялось (рис. 4.9).

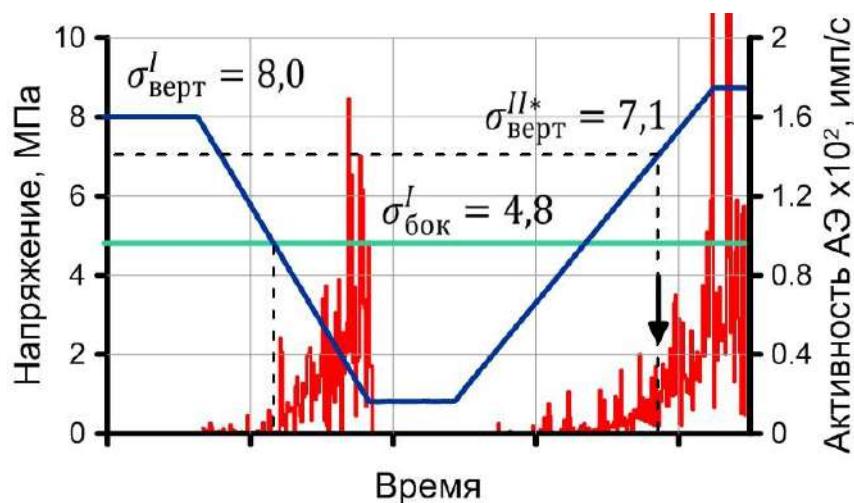


Рис. 4.9. Графики изменения напряжений в образце и активности АЭ от времени в случае разгрузки и восстановления осевой компоненты $\sigma_{\text{верт}}$ после его нагружения по схеме Кармана ($\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$) в установочном цикле

Установлено, что при снижении значений напряжения $\sigma_{\text{верт}}$ ниже величины бокового давления 4,8 МПа возникает акустическая эмиссия за счет образования поперечных трещин в условиях растяжения образца вдоль своей оси (рис. 4.9). В случае восстановления осевой компоненты интенсивное увеличение активности АЭ начинается при значениях меньших, чем значение $\sigma_{\text{верт}}$ установочного цикла. Ухудшение проявления эффекта Кайзера возможно связано с появлением акустической эмиссии в процессе закрытия поперечных трещин, образовавшихся при разгрузке вертикального напряжения. Максимальный уровень активности АЭ наблюдается, когда напряжение $\sigma_{\text{верт}}$ превышает величину установочного цикла. Данный характер изменения активности АЭ в целом соответствует проявлению эффекта Кайзера при циклическом нагружении квазипластичных соляных пород и обусловлен возобновлением роста продольных трещин, образовавшихся в первом цикле (см. п. 2.2.2).

4.2.4. Разгрузка и восстановление боковой компоненты поля напряжений образца после нагружения по схеме Кармана ($\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$) в установочном цикле

С целью поиска более общих закономерностей проявления эффекта Кайзера в соляных породах были выполнены испытания образцов, заключающиеся в разгрузке и повторном восстановлении боковой компоненты поля напряжений образца при постоянном значении осевой. Если рассмотреть исходное напряженное состояние образца по схеме Кармана ($\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$) в установочном цикле, то, согласно рассмотренному в п. 4.1.2 механизму трещинообразования, в нем возникают продольные трещины. Разгрузка бокового давления при постоянном осевом напряжении $\sigma_{\text{верт}}$ приведет к увеличению размеров продольных трещин. В связи с тем, что направление роста продольных трещин перпендикулярно боковой компоненте $\sigma_{\text{бок}}$, то при восстановлении последней во втором цикле продольные трещины будут закрываться (рис. 4.4, а). В свою очередь, закрытие трещин может привести к увеличению активности АЭ, как и

в случае разгрузки и восстановления осевой компоненты поля напряжений образца после нагружения по схеме Беккера в установочном цикле (см. п. 4.2.2). Поэтому с точки зрения исследования проявления эффекта Кайзера данный режим нагружения также представляет интерес.

Согласно рассмотренной схеме в установочном цикле осуществлялось нагружение образца гидростатическим давлением до 4,8 МПа, после чего при постоянной величине бокового давления $\sigma_{\text{бок}}^I$ вертикальное напряжение увеличивалось до 8,0 МПа. В данных условиях образец находился 20 мин. Далее производилась разгрузка бокового давления до 0 МПа и через 1 мин осуществлялось повторное нагружение до величины осевой компоненты $\sigma_{\text{верт}}$, т.е. до гидростатического напряженного состояния (рис. 4.10).

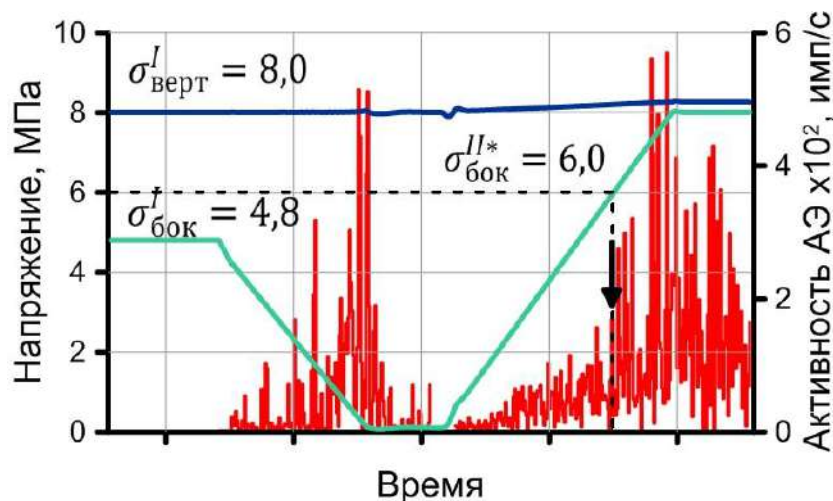


Рис. 4.10. Графики изменения напряжений в образце и активности АЭ от времени в случае разгрузки и восстановления боковой компоненты $\sigma_{\text{бок}}$ после его нагружения по схеме Кармана ($\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$) в установочном цикле

Экспериментами установлено, что при разгрузке бокового давления возникает акустическая эмиссия, обусловленная ростом продольных трещин, образовавшихся в исходном напряженном состоянии (рис. 4.10). При нагружении образца во втором цикле скачкообразное увеличение активности АЭ наблюдается при боковом давлении 6,0 МПа, что больше величины установочного цикла. Когда компонента $\sigma_{\text{бок}}$ достигает значений осевого напряжения $\sigma_{\text{верт}}$, т.е. напряженное состояние образца близко к гидростатическому, активность АЭ

принимает максимальные значения. Данный характер изменения активности АЭ аналогичен случаю, представленному в п. 4.2.2, особенностью которого также является процесс закрытия трещин в тестовом цикле нагружения.

4.3. Выводы

В ходе выполнения лабораторных исследований особенностей проявления эффекта Кайзера в образцах соляных пород получены следующие основные результаты:

1. Выполнен анализ трещинообразования в образцах соляных пород при различных режимах трехосного нагружения, по результатам которого введено предположение о том, что в качестве одного из механизмов проявления эффекта Кайзера может выступать увеличение акустической эмиссии в процессе уплотнения соляных пород.

2. По результатам испытаний образцов соляных пород в режиме растяжения по схеме Беккера ($\sigma_1 = \sigma_2 > \sigma_3$) установлено проявление эффекта Кайзера, которое заключается в невозпроизводимости параметров акустической эмиссии при циклическом изменении минимальной главной компоненты σ_3 до тех пор, пока ее величина не будет ниже значения предыдущего цикла ($\sigma_{3эк}^i = \sigma_3^{i-1}$).

3. Если образец в установочном цикле нагружения находился в условиях равномерного гидростатического сжатия ($\sigma_1^I = \sigma_2^I = \sigma_3^I$), то при разгрузке и последующем восстановлении главной компоненты σ_3 в тестовом цикле увеличение активности АЭ возникает, когда ее величина достигает первоначальных значений ($\sigma_{3эк}^{II} = \sigma_3^I$).

4. В случае нагружения образца по схеме Кармана ($\sigma_1^I > \sigma_2^I = \sigma_3^I$) в установочном цикле разгрузка и восстановление двух главных минимальных компонент σ_2 и σ_3 приводит к интенсивному увеличению активности АЭ в тестовом цикле, когда значения данных компонент находятся в диапазоне $\sigma_1^I > \sigma_{2эк}^{II} = \sigma_{3эк}^{II} > \sigma_2^I = \sigma_3^I$.

5. Установлено, что при восстановлении максимальной главной компоненты σ_1 поля напряжений образца после разгрузки от исходного напряженного состояния по схеме Кармана в установочном цикле ($\sigma_1^I > \sigma_2^I = \sigma_3^I$) эффект Кайзера возникает, когда данная компонента достигает значений близких к первоначальному ($\sigma_{1эк}^{II} \approx \sigma_1^I$). Обнаруженная закономерность позволяет использовать эффект в качестве индикатора восстановления максимального главного напряжения σ_1 в околоскважинном пространстве массива соляных пород при нагружении гидродомкратом.

6. В случае восстановления минимальной главной компоненты σ_3 поля напряжений образца, разгруженной после напряженного состояния по схеме Беккера ($\sigma_1^I = \sigma_2^I > \sigma_3^I$) в установочном цикле, увеличение активности АЭ наблюдается, когда напряжение σ_3 достигает первоначальных значений ($\sigma_{3эк}^{II} = \sigma_3^I$). Если между циклами производилось увеличение главных компонент σ_1 и σ_2 , то эффект Кайзера в тестовом цикле возникает при значениях компоненты σ_3 в диапазоне $\sigma_1^I = \sigma_2^I > \sigma_{3эк}^{II} > \sigma_3^I$. На основании последней закономерности можно сделать вывод, что использование эффекта Кайзера в качестве индикатора восстановления минимальной компоненты σ_3 поля напряжений массива при нагружении стенок скважины гидродомкратом даст несколько завышенные результаты. Однако, как было показано в главе 3, в данных условиях резкое увеличение активности АЭ в породах околоскважинного пространства может быть обусловлено возникновением растягивающих напряжений и образованием трещин разрыва. Данный эффект также может использоваться для оценки напряженного состояния пород в массиве.

ГЛАВА 5. ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ СКВАЖИННОГО МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ В РАЗЛИЧНЫХ ГОРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

5.1. Оценка напряженного состояния соляных пород в массиве Верхнекамского месторождения калийных солей

5.1.1. Результаты измерения напряжений в массиве соляных пород рудника БКПРУ-2 ПАО «Уралкалий»

В рамках апробации разработанного метода были проведены эксперименты по измерению напряжений в различных горно-геологических условиях. Натурные исследования выполнялись согласно методике, представленной в главе 2, и состояли из следующих этапов: 1) бурение горизонтальной скважины; 2) установка гидродомкрата в скважине на заданной глубине; 3) циклическое нагружение ее стенок с регистрацией давления и импульсов АЭ.

Экспериментальные работы по измерению напряжений в массиве пород ВКМКС производились на 10-й западной панели рудника БКПРУ-2 [82, 83]. Отработка пласта соляных пород КрII на данном участке ведется камерной системой разработки с оставлением междукамерных ленточных целиков шириной 6,4 м, ширина камер – 6,0 м. Глубина ведения горных работ на экспериментальном участке 350 м. Измерения напряжений в вертикальном и горизонтальном направлениях осуществлялись в нетронутом массиве. В междукамерном целике выполнялось определение только вертикальных напряжений (рис. 5.1).

По результатам измерений в нетронутом массиве (замерные станции № 1 и 2) вблизи контура выработок выявлена зона опорного давления шириной 1,2 м, где максимальные значения вертикальной компоненты поля напряжений достигают 14-16 МПа (рис. 5.2). За зоной опорного давления вертикальные напряжения стремятся к значению 8,5 МПа, что примерно соответствует величине μH , которая составляет 7,7 МПа для данного района работ. Характер распределения горизонтальных напряжений, измеренных в двух взаимно перпен-

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

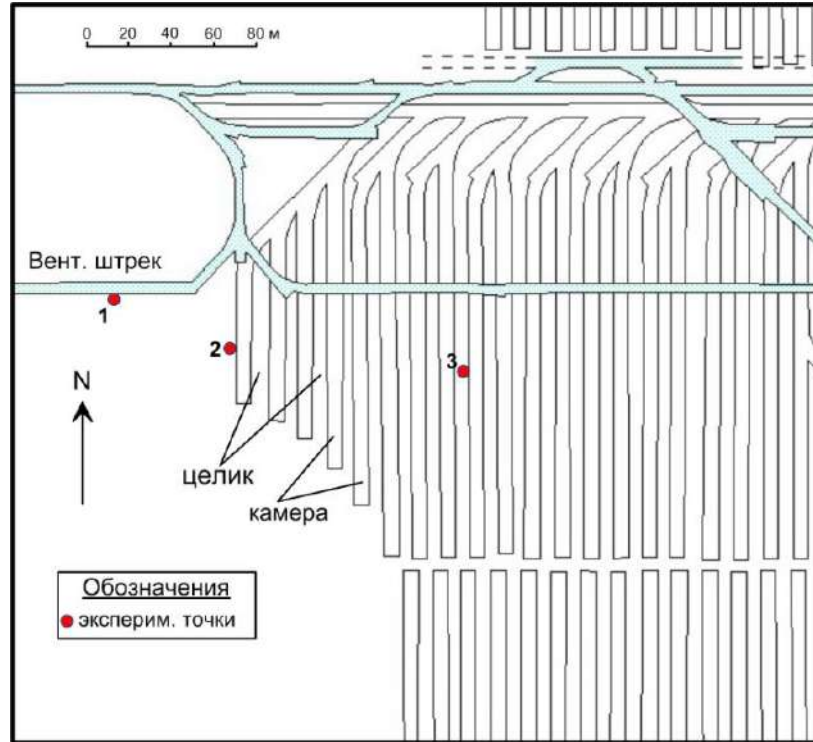


Рис. 5.1. Схема расположения экспериментальных участков на плане горных выработок по пласту КрII (10 ЗП, рудник БКПРУ-2 ПАО «Уралкалий»)

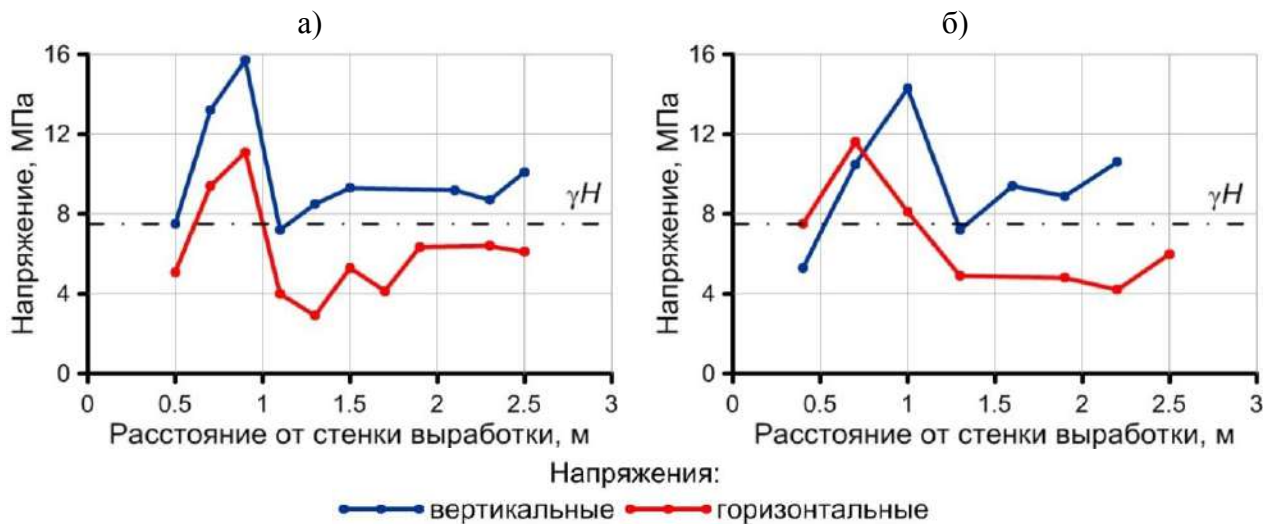


Рис. 5.2. Распределение вертикальной и горизонтальной компонент поля напряжений в горизонтальных скважинах, пробуренных в нетронутом массиве 10-й западной панели рудника БКПРУ-2: а – замерная станция № 1; б – замерная станция № 2

В междукамерном целике (замерная станция № 3) максимальная величина вертикальных напряжений в зоне опорного давления достигает 18,0 МПа, а ее ширина несколько больше, чем в нетронutom массиве, и составляет порядка 1,5 м (рис. 5.3). В центральной части целика уровень вертикальных напряжений в среднем около 10-11 МПа, что на 30-35 % больше веса толщи вышележащих пород.

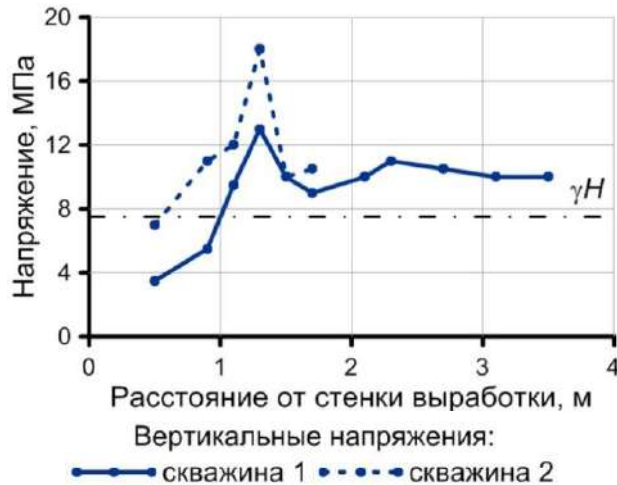


Рис. 5.3. Распределение вертикальных напряжений в горизонтальных скважинах, пробуренных в междукамерном целике на 10-й западной панели рудника БКПРУ-2

5.1.2. Результаты измерения напряжений в массиве соляных пород рудника СКРУ-3 ПАО «Уралкалий»

Натурные эксперименты по измерению напряжений в нетронutom массиве соляных пород пласта КрII производились на 12-й панели рудника СКРУ-3 [96, 97]. Измерения напряжений осуществлялись в вертикальном и горизонтальном направлениях на двух экспериментальных участках. На каждом участке были пробурены по 3 горизонтальных скважины глубиной 3,0 м (рис. 5.4). Первый экспериментальный участок находится в зоне влияния геологической аномалии I-й группы, приуроченной к району открытой трещиноватости соляных пород пласта АБ. Второй экспериментальный участок расположен в южной части панели 12 и находится вне влияния геологических аномалий.



Рис. 5.4. Схема расположения экспериментальных участков на плане горных выработок по пласту КрII панели № 12 (рудник СКРУ-3 ПАО «Уралкалий»)

На рис. 5.5 представлены графики распределения вертикальных и горизонтальных напряжений, действующих в нетронутом массиве соляных пород пласта КрII на экспериментальных участках № 1 и 2.

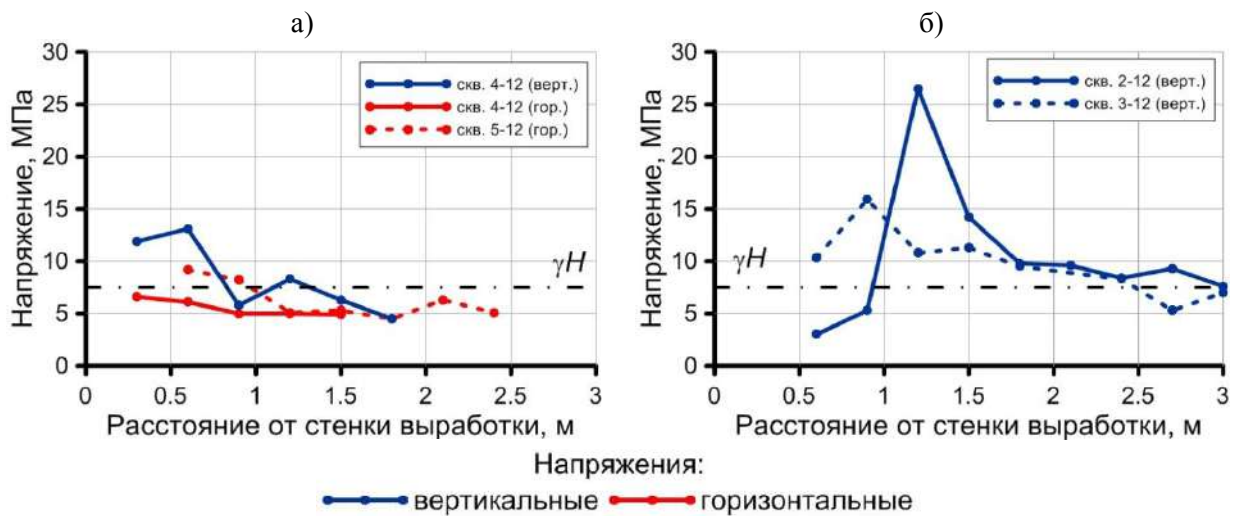


Рис. 5.5. Распределение вертикальной и горизонтальной компонент поля напряжений в горизонтальных скважинах, пробуренных в нетронутом массиве 12-й панели рудника СКРУ-3: а – экспериментальный участок № 1; б – экспериментальный участок № 2

По результатам измерений установлено, что на экспериментальном участке №1 вертикальные напряжения изменяются в диапазоне от 4,5 до 13,1 МПа (рис. 5.5, а). Максимум опорного давления зафиксирован на глубине 0,6 м. С увеличением расстояния от контура выработки вертикальные напряжения уменьшаются до 6-8 МПа. Горизонтальные напряжения на данном участке принимают значения от 4,5 до 9,2 МПа. Максимальное значение зафиксировано в скв. 5-12 на глубине 0,6 м. В скв. 4-12 максимум горизонтальных напряжений находится на глубине 0,3 м и составляет 6,6 МПа. С отдалением от контура выработки вглубь массива значения горизонтальных напряжений стабилизируются на уровне 5,0 МПа.

На экспериментальном участке №2, расположенном вне зоны влияния аномалии, в непосредственной близости от контура выработки вертикальные напряжения в скв. 2-12 принимают пониженные значения от 3,0 до 5,3 МПа (рис. 5.5, б). Максимумы опорного давления 26,5 МПа (скв. 2-12) и 15,9 МПа (скв. 3-12) находятся на глубине 1,2 м и 0,9 м соответственно. С удалением от области действия опорного давления вглубь массива значения вертикальных напряжений стабилизируются и составляют в среднем 8,3-8,9 МПа, что примерно соответствует величине γH , которая составляет 7,5 МПа для данного района работ.

Установленные закономерности распределения напряжений в нетронутом массиве ВКМКС и междукамерных целиках в целом совпадают с результатами измерения напряжений, которые представлены в работе [67].

5.2. Оценка напряженного состояния пород в массиве месторождения Жаман-Айбат

Месторождение медистых песчаников Жаман-Айбат расположено в Жана-Аркинском районе Карагандинской области Республики Казахстан в 130 км к юго-востоку от г. Жезказган. На данный момент отработка месторождения ведется рудником «Жомарт» буровзрывным способом с применением панель-

но-столбовой системы разработки. По проекту отработка месторождения предусматривается в две стадии: I стадия – отработка камерных запасов панельно-столбовой системой под защитой барьерных целиков от центра к флангам рудной залежи; II стадия – погашение пустот и выемка целиков в отступающем порядке. Коэффициент крепости руд по шкале М.М. Протодьяконова, определенный методом дробления проб, варьируется в диапазоне от 6,1 до 13,3, составляя в среднем – 8,9.

Измерение вертикальных напряжений в целиках проводилось на 2-х экспериментальных участках, расположенных в пределах панели 47 [84]. На каждом экспериментальном участке было пробурено по 3 горизонтальных скважины длиной 6,0 м (рис. 5.6). Оработка панели ведется камерно-столбовой системой разработки с оставлением междукамерных целиков, находящихся под

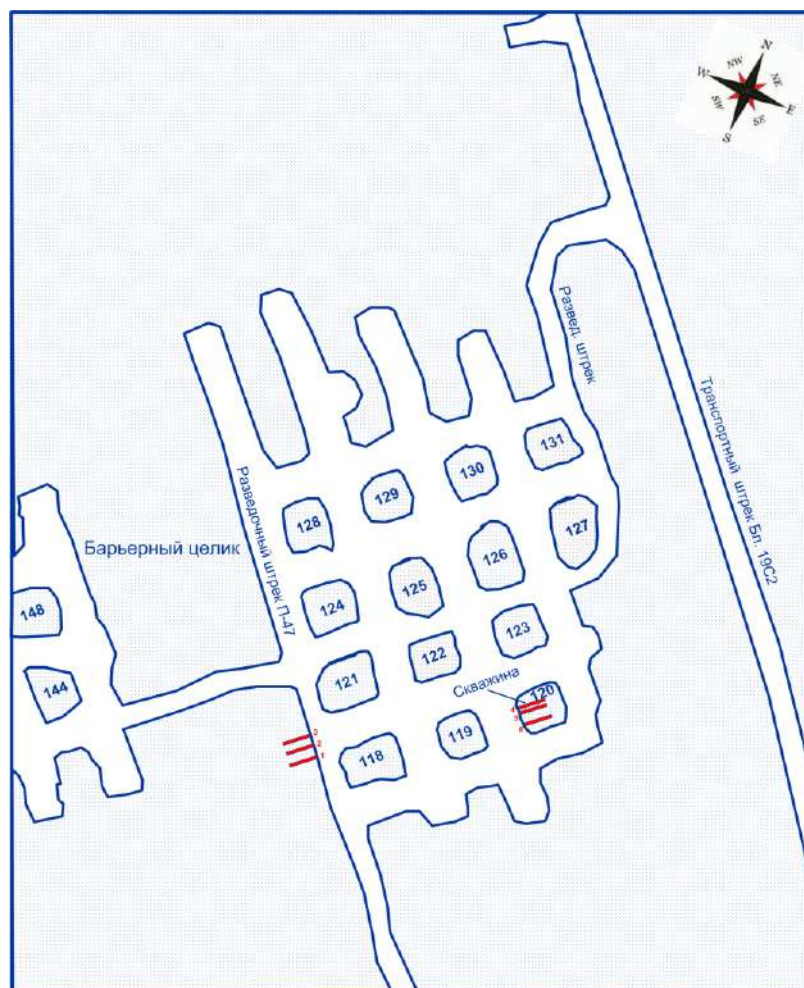


Рис. 5.6. План расположения экспериментальных участков в пределах панели 47 рудника «Жомарт»

защитой барьерных целиков. Расстояние между осями барьерных целиков – 128 м. Ширина барьерных целиков – 40 м, через каждые 38 м пройдены прорезки. Сетка расположения междукамерных целиков 19х19 м. Размеры междукамерных целиков 10×10 м, при мощности отработки до 13 м. Глубина разработки на панели составляет 605-610 м, мощность рудного тела колеблется от 0,7 до 13,2 м. Измерительные скважины № 1-3 были пробурены в барьерном целике, скважины № 4-6 – в междукамерном целике № 120.

На рис. 5.7 в качестве примера представлены зависимости давления гидродомкрата на стенки скважины и активности акустической эмиссии от времени, полученные при измерении вертикальных напряжений в междукамерном целике. На данных графиках хорошо заметен типичный характер проявления эффекта Кайзера в трещиноватых скальных породах, который выражается в резком увеличении активности АЭ, когда давление гидродомкрата достигает величины вертикальной компоненты поля напряжений в целике, и последующем снижении значений при дальнейшем повышении давления.

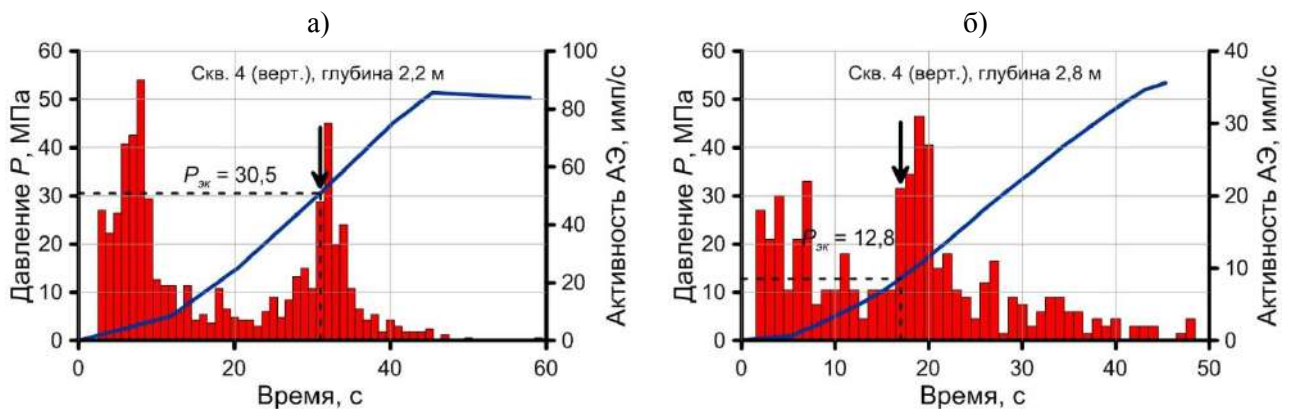


Рис. 5.7. Характерные графики изменения давления гидродомкрата и активности АЭ от времени при нагружении в вертикальном направлении стенок скважины в междукамерном целике панели 47 рудника «Жомарт»

По результатам измерения напряжений на экспериментальных участках панели № 47 установлено, что распределение осредненных вертикальных напряжений по сечению барьерного целика имеет волнообразный характер (рис. 5.8, а). Величина вертикальных напряжений колеблется в диапазоне от 15-20 до 30-35 МПа. Расстояние между как максимумами, так и минимумами

напряжений на графике составляет порядка 1,0-1,5 м. Волнообразный характер распределения напряжений свидетельствует о делении краевой части барьерного целика на отдельные блоки со стороной ребра 1,0-1,5 м. В данном случае, по видимому, имеет место эффект зональной дезинтеграции горных пород под действием напряжений, близких к пределу прочности породного массива [98]. Согласно [99] прочность массива руды в междукламерных целиках рудника «Жомарт» на глубине 550 м составляет около 32 МПа.

Скачкообразный характер изменения вертикальных напряжений установлен и в междукламерном целике, что также можно объяснить блочным строением массива (рис. 5.8, б). Размер отдельностей, которые формируются в МКЦ под действием напряжений, несколько ниже, чем в барьерном целике и составляет порядка 0,3-0,4 м. 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 значений напряжений. Ярко выраженная зона опорного давления отсутствует.

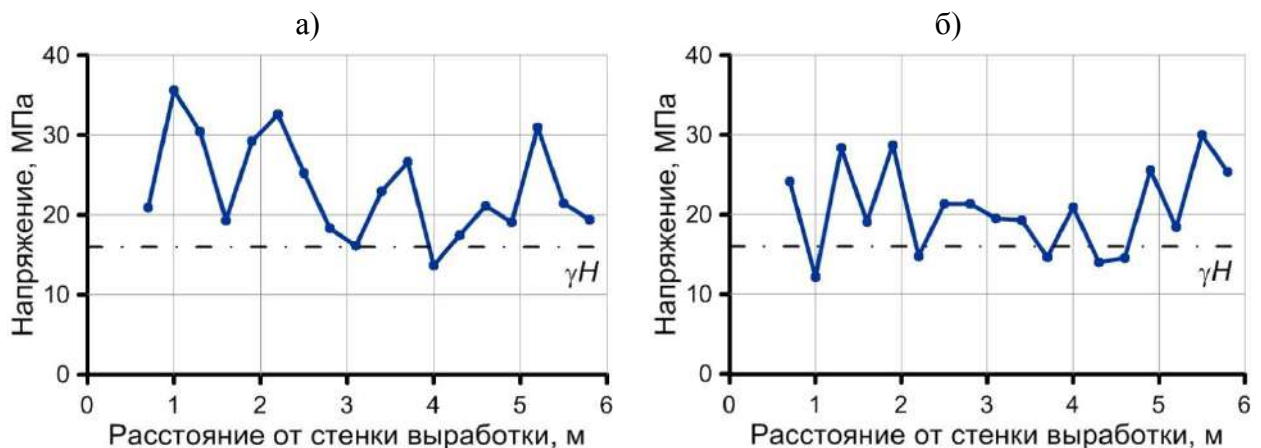


Рис. 5.8. Распределение средних значений вертикальных напряжений в горизонтальных скважинах, пробуренных в целиках панели 47 рудника «Жомарт»:
а – барьерный целик; *б* – междукламерный целик

Таким образом, в барьерном целике вертикальные напряжения выше, чем в междукамерном, и несколько больше величины γH , которая составляет около 16 МПа для данного района. Полученные результаты экспериментов по измерению напряжений скважинным методом достаточно хорошо согласуются с результатами исследований, выполненных на рудниках Жезказгана другими методами [100, 101].

5.3. Оценка напряженного состояния пород в массиве Сарбайского карьера

Сарбайское месторождение магнетитовых руд расположено в нескольких километрах к северо-западу от г. Рудный Костанайской области Республики Казахстан. Месторождение разрабатывается открытым способом с 1957 г. и в настоящее время запасы Сарбайского карьера почти полностью истощены, в связи с чем планируется его углубление и ввод в эксплуатацию нового участка месторождения.

С целью уточнения геомеханической модели карьера были выполнены исследования по оценке напряженно-деформированного состояния пород в бортах карьера [102]. Натурные исследования проводились на трех экспериментальных участках (рис. 5.9). Первый экспериментальный участок располагается в западной части карьера (гор. -240 м), второй и третий участки располагаются в северо-восточной части карьера (гор. -280 м и гор. -340 м соответственно). Каждый экспериментальный участок включает три замерные станции по три скважины. Измерения горизонтальных напряжений, действующих вдоль борта карьера, выполнялись в горизонтальных скважинах диаметром 76 мм, пробуренных в стенках уступов. Всего на 9 замерных станциях испытано 27 скважин длиной 6-8 м.



Рис. 5.9. Расположение экспериментальных участков на Сарбайском карьере

На рис. 5.10 в качестве примера представлены характерные графики распределения горизонтальных напряжений с удалением от стенки уступа на замерных станциях 5 и 6 экспериментального участка № 2. На данном участке породы представлены в основном туфами темно-серого цвета с прослоями туффитов андезитового состава. Структура пород мелкозернистая пористая, текстура – массивная. По всему интервалу скважин отмечен магнетит в виде вкраплений.

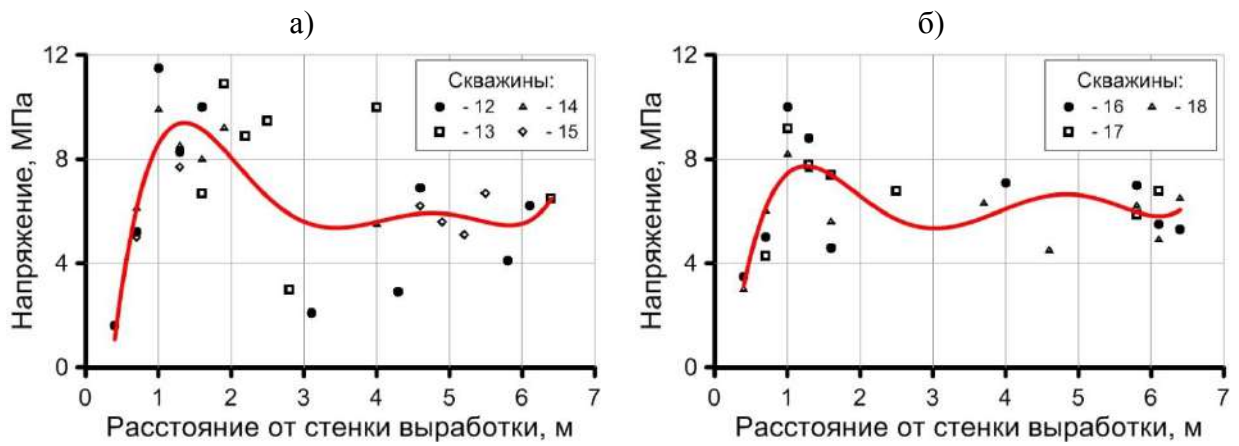


Рис. 5.10. Распределение средних значений горизонтальных напряжений с удалением от стенки уступа на экспериментальном участке №2 Сарбайского карьера:
 а – замерная станция № 5; б – замерная станция № 6

По результатам измерений на экспериментальном участке № 2 установлено, что наименьшие значения горизонтальные напряжения принимают вблизи стенки уступа (рис. 5.10). Далее с отдалением от стенки в глубь массива напряжения увеличиваются и достигают максимальных значений 7-12 МПа на



Рис. 5.11. Результаты измерения горизонтальных напряжений в бортах Сарбайского карьера

глубине 1,0-2,0 м, после чего следует их уменьшение. За зоной влияния опорного давления характер распределения горизонтальных напряжений стабилизируется, а их среднее значение составляет около 5-6 МПа. Также необходимо отметить значительный разброс значений, что характерно для блочного строения массива скальных пород.

На рис. 5.11 представлены обобщенные результаты определения горизонтальных напряжений действующих вдоль бортов карьера. Исследованиями установлено, что на первом экспериментальном участке средняя величина горизонтальных напряжений составляет примерно 4 МПа, на втором – 5-6 МПа, на третьем – 8-8,5 МПа. С увеличением глубины расположения борта отмечается рост относительного коэффициента бокового распора: от 0,34 – на глубине 440 м до 0,58 – на глубине 540 м.

5.4. Оценка напряженного состояния соляных пород в массиве Гремячинского месторождения калийных солей

Гремячинское месторождение калийных солей находится в пределах Котельниковского района Волгоградской области в 150 км к юго-западу от г. Волгограда и в 20 км от районного центра г. Котельниково, и разрабатывается рудником ООО «ЕвроХим-ВолгаКалий». На месторождении предполагается вынимать сильвинитовый пласт с изменяемой мощностью 2-20 м и расположенный на глубине 1100-1300 м. Непосредственно над вынимаемым промышленным пластом залегает толща ангидрит-доломитовых пород мощностью 25-30 м и прочностью 60-150 МПа. Со стороны почвы на небольшом расстоянии располагается пласт карналлита пониженной прочности (2-14 МПа). На текущий момент на руднике осуществляется проходка капитальных выработок.

Эксперименты по измерению напряжений в массиве соляных пород производились в проходческом транспортном штреке №1, пройденном на глубине 1100 м комбайном «Урал-20Р» в один ход (ширина – 6,0 м, высота – 3,7 м). В

стенке выработки было пробурено 8 горизонтальных скважин глубиной 8,0 м. Схема расположения скважин изображена на рис. 5.12. Измерения напряжений выполнялись в вертикальном направлении (скв. 9, 15) и в горизонтальной плоскости в направлениях: $A = 90^\circ$ (скв. 10, 11), $A = 120^\circ$ (скв. 8, 14), $A = 150^\circ$ (скв. 12, 13).

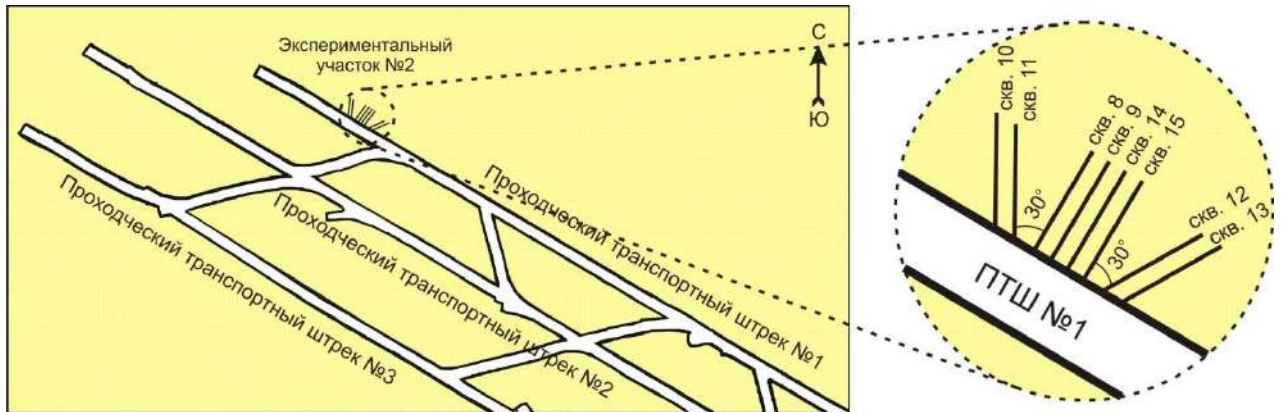


Рис. 5.12. План расположения экспериментального участка на шахтном поле рудника ООО «ЕвроХим-ВолгаКалий»

На рис. 5.13 представлены характерные зависимости давления гидродомкрата на стенки скважины и активности акустической эмиссии от времени, полученные при измерении напряжений за зоной влияния выработки в соляном массиве Гремячинского месторождения. За значение компоненты поля напряжений, действующей в направлении нагружения, принимается величина давления, при которой начинается устойчивое увеличение активности АЭ.

По результатам измерений в вертикальном направлении вблизи контура выработки установлена зона пониженных значений напряжений шириной около 0,6 м (рис. 5.14, а). С отдалением от стенки выработки показания увеличиваются, достигая максимальных значений 27-30 МПа на глубине 0,9-1,8 м. Начиная с глубины 2,1 м значения вертикальных напряжений стабилизируются и в среднем составляют 23,4 МПа.

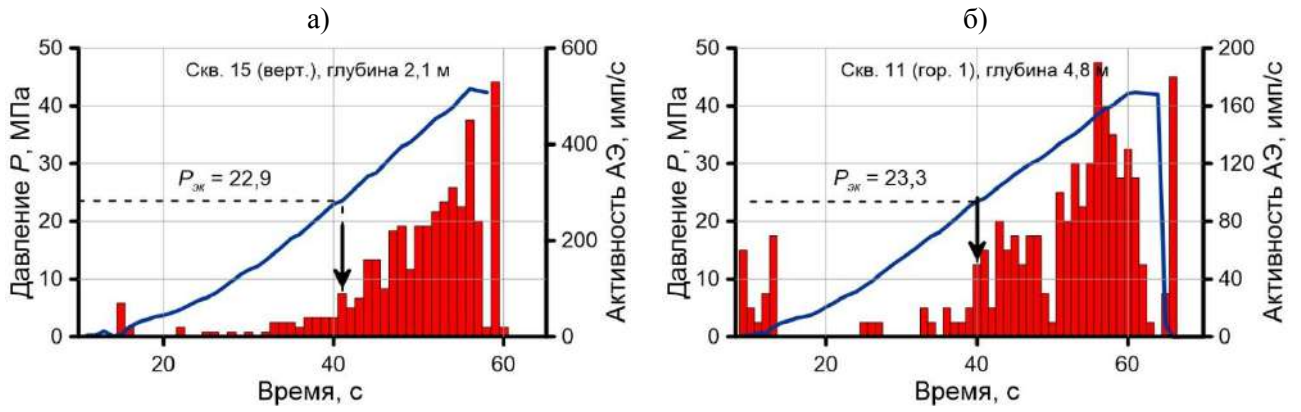


Рис. 5.13. Характерные графики изменения давления гидродомкрата и активности АЭ от времени при нагружении стенок скважины в массиве соляных пород Гремячинского месторождения в направлениях: *а* – вертикальном; *б* – горизонтальном 1 ($A = 90^\circ$)

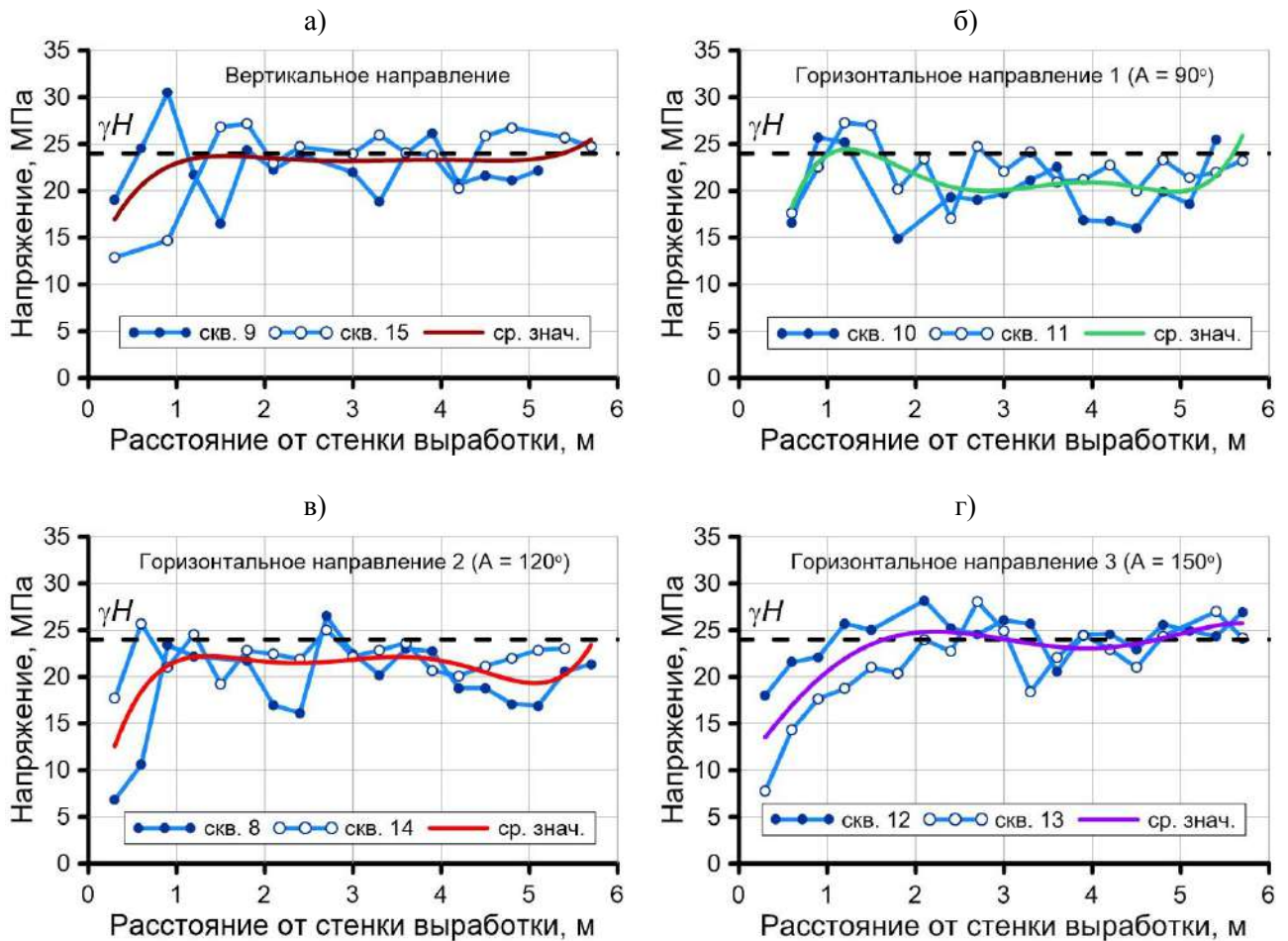


Рис. 5.14. Распределение напряжений в нетронутым массиве соляных пород рудника ООО «ЕвроХим-ВолгаКалий» по результатам измерений в направлениях: *а* – вертикальном; *б* – горизонтальном 1 ($A = 90^\circ$); *в* – горизонтальном 2 ($A = 120^\circ$); *г* – горизонтальном 3 ($A = 150^\circ$)

Характер распределения горизонтальных напряжений качественно повторяет полученные для вертикальной компоненты закономерности (рис. 5.14, б-г). Вблизи выработки также отмечаются пониженные значения напряжений, величина которых затем стабилизируется на расстоянии 1,2-2,4 м от стенки. В основном концентрация горизонтальных напряжений на контуре минимальна и не превышает 25% от средних значений нетронутого массива (рис. 5.14, б) или отсутствует вообще (рис. 5.14, в и 5.14, г). Минимальная ширина зоны влияния выработки (1,2 м) установлена при измерениях горизонтальных напряжений в направлении $A = 120^\circ$, а максимальная (2,4 м) – в направлении $A = 150^\circ$. Средние значения горизонтальных компонент поля напряжений нетронутого соляного массива составляют в направлениях: $A = 90^\circ$ – 20,9 МПа, $A = 120^\circ$ – 21,2 МПа, $A = 150^\circ$ – 24,3 МПа.

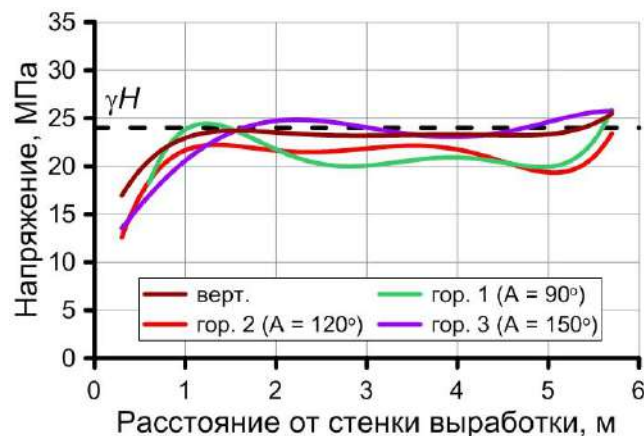


Рис. 5.15. Распределение средних значений напряжений в нетронутом массиве соляных пород рудника ООО «ЕвроХим-ВолгаКалий»

Анализ закономерностей изменения средних значений напряжений показал, что вертикальная компонента за зоной влияния выработки примерно соответствует величине γH , которая составляет 24 МПа для данного района (рис. 5.15). Горизонтальные напряжения чуть ниже или равны данной величине в зависимости от направления. Таким образом, коэффициент бокового распора λ принимает значения в диапазоне от 0,9 до 1,0. Напряженное состояние соляных пород в нетронутом массиве Гремячинского месторождения близко к гидростатическому.

5.5. Выводы

При выполнении натуральных экспериментов по измерению напряжений в различных горно-геологических условиях разработанным скважинным методом получены следующие основные результаты:

1. По результатам измерения напряжений 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. В приконтурной области междукамерного целика величина опорного давления больше, чем в нетронутом массиве, при этом зона его влияния шире. В средней части целика вертикальные напряжения на 30-35 % больше величины γH .

2. Получены распределения вертикальных напряжений в барьерном и междукамерном целиках рудника «Жомарт», которые характеризуются высоким разбросом значений в связи с блочным строением массива. 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.

3. 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.

4. 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.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе на основе выполненных автором теоретических и экспериментальных исследований проявления эффекта Кайзера в породах решена актуальная задача обоснования и разработки скважинного метода измерения напряжений в массиве, что обеспечит получение объективной информации о природном поле напряжений 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 компонент 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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Amadei B. Rock Stress and its Measurement / B. Amadei, O. Stephansson. – Springer, 1997. – 490 p.
2. Zang A. Stress Field of the Earth's Crust / A. Zang, O. Stephansson. – Springer, 2010. – 322 p.
3. Sjöberg J., Christiansson R., Hudson J.A. ISRM Suggested Methods for rock stress estimation – Part 2: overcoring methods / R. Ulusay, J.A. Hudson (Eds.) // The Complete ISRM Suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 1974 – 2006. – ISRM, 2007.
4. Haimson B.C., Cornet F.H. ISRM Suggested Methods for rock stress estimation – Part 3: Hydraulic fracturing (HF) and/or hydraulic testing of pre-existing fractures (HTPF) / R. Ulusay, J.A. Hudson (Eds.) // The Complete ISRM Suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 1974–2006. – ISRM, 2007.
5. Hubbert, M.K. Mechanics of Hydraulic Fracturing / M.K. Hubbert, D.G. Willis // Transactions of Society of Petroleum Engineers of AIME. – 1957. – V. 210. – P. 153-163.
6. Курленя М.В. Развитие метода гидроразрыва для исследования напряженного состояния массива горных пород / М.В. Курленя, А.В. Леонтьев, С.Н. Попов // ФТПРПИ. – 1994. – № 1. – С. 3-20.
7. Леонтьев А.В. Опыт практического применения измерительного гидроразрыва / А.В. Леонтьев, С.Н. Попов // Горный журнал. – 2003. – № 3. – С. 37-43.
8. Леонтьев А.В. Измерительно-вычислительный комплекс «Гидроразрыв» / А.В. Леонтьев [и др.] // ФТПРПИ. – 2010. – № 1. – С. 104-110.
9. Ljunggren C. An overview of rock stress measurement methods / C. Ljunggren [et al.] // Int. J. Rock. Mech. Min. Sci. – 2003. – V. 40. – P. 975-989.

10. Павлов В.А. Обоснование способа оценки компонентов напряженного состояния массива горных пород по деформациям системы «скважина-трещина гидроразрыва»: автореф. дисс. на соиск. уч. ст. канд. техн. наук / Павлов Валерий Анатольевич. – Кемерово, 2014. – 22 с.

11. Cornet F.H. In situ stress determination from hydraulic injection test data / F.H. Cornet, B. Valette // *J. Geophys. Res.* – 1984. – V. 89. – P. 11527-11537.

12. Stephansson O. Rock stress measurement by sleeve fracturing / O. Stephansson // *Proc. 5th Cong. Int. Soc. Rock Mech. (ISRM), Melbourne.* – Rotterdam: Balkema, 1983. – P. 129-137.

13. Stephansson O. Sleeve fracturing for rock stress measurement in boreholes / O. Stephansson // *Proc. Int. Symp. Essais en Place, In Situ Testing, Paris.* – Paris, 1983. – V. 2. – P. 571-578.

14. Serata S. Double fracture method of in situ stress measurement in brittle rock / S. Serata [et al.] // *Rock Mech. Rock Eng.* – 1992. – V. 25. – P. 89-108.

15. De la Cruz R.V. Jack fracturing technique of stress measurement / R.V. de la Cruz // *Rock Mechanics.* – 1977. – V. 9. – P. 27-42.

16. Yokoyama T. A proposal of geostress measurement technique by plate fracturing / T. Yokoyama, A. Nakanishi // *Proceedings of the international symposium on rock stress, Kumamoto.* – Kumamoto, 1997. – P. 143–148.

17. Yokoyama T. Development of borehole-jack fracturing technique for in situ stress measurement / T. Yokoyama [et al.] // *Int. J. Rock. Mech. Min. Sci.* – 2014. – V. 67. – P. 9-19.

18. Павлов В.А. Использование направленного – одноосного нагружения в скважине для оценки напряженного состояния массива горных пород / В.А. Павлов, С.В. Сердюков // *Горный информационно-аналитический бюллетень.* – М.: МГГУ, 2013. – № 12. – С. 71-79.

19. Мартынюк П.А. Метод оценки напряженного состояния массива горных пород по деформационной характеристике прискважинной зоны, содержащей трещину гидроразрыва / П.А. Мартынюк, В.А. Павлов, С.В. Сердюков // *ФТПРПИ.* – 2011. – № 3. – С. 28-35.

20. Leeman E.R. A technique for determining the complete state of stress in rock using a single borehole / E.R. Leeman, D.J. Hayes // Proc. 1st Cong. Int. Soc. Rock Mech. (ISRM), Lisbon. – Lisbon: Lab. Nac. de Eng. Civil, 1966. – V. 2. – P. 17-24.

21. Worotnicki G. Triaxial hollow inclusion gauges for determination of rock stresses in-situ / G. Worotnicki, R.J. Walton // Supplement to Proc. ISRM Symposium on Investigation of Stress in Rock, Advances in Stress Measurement, Sydney, Australia. – Sydney: The Institution of Engineers, 1976. – P. 1-8.

22. Merrill R.H. Three component borehole deformation gage for determining the stress in rock / R.H. Merrill // US Bureau of Mines, Report of Investigation, RI 7015. – 1967.

23. Leeman E.R. The CSIR "Doorstopper" and triaxial rock stress measuring instruments / E.R. Leeman // Rock Mechanics. – 1971. – V. 3. – P. 25-50.

24. Sugawara K. Measurement of in-situ rock stress by hemispherical-ended borehole technique / K. Sugawara, Y. Obara // Mining Science and Technology. – Amsterdam: Elsevier, 1986. – V. 3. – P. 287-300.

25. Sakaguchi K. Rock stress measurement by means of the compact overcoring method / K. Sakaguchi [et al.] // Shigen-no-Sozai. – 1994. – V. 110. – P. 331-336.

26. Кузнецов Г.Н. Определение методом разгрузки напряжений, действующих в междукammerных целиках каменной соли Артемовских рудников / Г.Н. Кузнецов, М.А. Слободов // Труды ВНИМИ. – 1950. – Вып. 22. – С. 151-174.

27. Турчанинов И.А. Сравнительные испытания прецизионной тензометрической шахтной аппаратуры / И.А. Турчанинов, В. Сибек // Уникальные приборы. – 1972. – № 10. – С. 127-128.

28. Нестеренко Г.Т. Методические указания по применению метода разгрузки для измерения напряжений в массивах горных пород / Г.Т. Нестеренко [и др.]. – Л.: ВНИМИ. – 1972. – 37 с.

29. Курленя М.В. Техника экспериментального определения напряжений в осадочных породах / М.В. Курленя [и др.]. – Новосибирск: «Наука». – 1975. – 150 с.

30. Herget G. Rock stresses and rock stress monitoring in Canada / G. Herget // *Comprehensive Rock Engineering* (ed. J.A. Hudson). – Oxford: Pergamon Press, 1993. – V. 3, Chapter 19. – P. 473-496.

31. Voight B. Determination of the virgin state of stress in the vicinity of a borehole from measurements of a partial anelastic strain tensor in drill cores / B. Voight // *Felsmechanik und Ingenieurgeologie*. – 1968. – V. 6. – P. 201-215.

32. Teufel L.W. Determination of in situ stress from partial anelastic strain recovery measurements of oriented cores from deep boreholes / L.W. Teufel // *Lecture notes of the short course in modern in situ stress measurement methods at the 34th US symposium of rock mechanics, Madison Wisconsin*. – Madison, 1993. – 19 p.

33. Simmons G. Differential strain analysis: a new method for examining cracks in rocks / G. Simmons, R.W. Siegfried, M.L. Feves // *J. Geophys. Res.* – 1974. – V. 79. – P. 4383-4385.

34. Siegfried R.W. Characterization of oriented cracks with differential strain analysis / R.W. Siegfried, G. Simmons // *J. Geophys. Res.* – 1978. – V. 83. – P. 1269-1278.

35. Strickland E.G. Use of differential strain curve analysis in predicting the in-situ stress state for deep wells / E.G. Strickland, N.-K. Ren // *Proc. 21st US Symp. Rock Mech.* – Rolla: University of Missouri Publ., 1980. – P. 523-532.

36. Yamamoto K. Discrimination of previously applied stress by the deformation rate analysis: Application of the method to estimation of in-situ stress / K. Yamamoto, Y. Kuwahara, T. Hirasawa // *Progr. Abstr. Seismol. Soc. Jpn.* (Abstract in Japanese). – 1983. – V. 2. – P. 104.

37. Yamamoto K. Deformation rate analysis: A new method for in situ stress estimation from inelastic deformation of rock samples under uni-axial

compressions / K. Yamamoto [et al.] // *Tohoku Geophys. J. (Sci. Rep. Tohoku Univ., Ser. 5)*. – Tohoku, 1990. – V. 33. – P. 127-147.

38. Yamamoto K. A theory of rock core-based methods for in-situ stress measurement / K. Yamamoto // *Earth Planets Space*. – 2009. – V. 61. – P. 1143–1161.

39. Kaiser J. Erkenntnisse und Folgerungen aus der Messung von Geräuschen bei Zugbeanspruchung von metallischen Werkstoffen / J. Kaiser // *Archiv für das Eisenhüttenwesen*. – 1953. – V. 24. – P. 43-45.

40. Goodman R.E. Subaudible noise during compression of rocks / R.E. Goodman // *Geol. Soc. Am. Bull.* – 1963. – V. 74. – P. 487-490.

41. Kurita K. Stress memory of crystalline rocks in acoustic emission / K. Kurita, N. Fujii // *Geophys. Res. Lett.* – 1979. – V. 6. – P. 9-12.

42. Шкуратник В.Л. Эффекты памяти в горных породах. Физические закономерности, теоретические модели / В.Л. Шкуратник, А.В. Лавров. – М.: Издательство Академии горных наук, 1997. – 159 с.

43. Лавров А.В. Акустоэмиссионный эффект памяти в горных породах / А.В. Лавров, В.Л. Шкуратник, Ю.Л. Филимонов. – М.: МГГУ, 2004. – 456 с.

44. Lord A.E. Field determination of prestress (existing stress) in soil and rock masses using acoustic emission / A.E. Lord, R.M. Koerner // *Journal of Acoustic Emission*. – 1985. – V. 4. – № 2/3. – P. 11-16.

45. Costin L.S. A microcrack model for the deformation and failure of brittle rock / L.S. Costin // *J. Geoph. Res.* – 1983. – V. 88, № B11. – P. 9485-9492.

46. Holcomb D.J. General theory of the Kaiser effect / D.J. Holcomb // *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.* – 1993. – V. 30, № 7. – P. 929-935.

47. Stevens J.L. A theoretical investigation of the sliding crack model of dilatancy / J.L. Stevens, D.J. Holcomb // *J. Geoph. Res.* – 1980. – V. 85. – P. 7091–7100.

48. Li C. Experimental verification of the Kaiser effect in rocks / C. Li, E. Nordlund // *Rock Mech. Rock Engng.* – 1993. – V. 26, № 4. – P. 333-351.

49. Pestman B.J. An acoustic emission study of damage development and stress-memory effects in sandstone / B.J. Pestman, J.G. van Munster // *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech.* – 1996. – V. 33, № 6. – P. 585-593.

50. Pestman B.J. Estimation of In-situ Stress Magnitudes from Measurements on Cores / B.J. Pestman, C.J. Kenter, J.G. van Munster // *Society of Petroleum Engineers Inc. SPE/ISRM 47239. EUROCK '98 Symposium held in Trondheim Norway, 8-10 July 1998.* – Trondheim, 1998. – P. 171-177.

51. Pestman B.J. Field application of a novel core-based in-situ stress estimation technique / B.J. Pestman [et al] // *Society of Petroleum Engineers Inc. SPE/IRSM 78158. Rock Mechanics Conference held in Irving, Texas, 20-23 October 2002.* – Irving, 2002. – P. 1-7.

52. Lavrov A. The Kaiser effect in rocks: principles and stress estimation techniques / A. Lavrov // *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech.* – 2003. – V. 40. – P. 151-171.

53. Seto M. In-situ rock stress measurement from rock cores using the acoustic emission and deformation rate analysis / M. Seto, D.K. Nag, V.S. Vutukuri // *Geotech. Geol. Eng.* – 1999. – V. 17, № 3, 4. – P. 1-26.

54. Villaescusa E. Stress measurements from oriented core / E. Villaescusa, M. Seto, G. Baird // *Int. J. Rock. Mech. Min. Sci.* – 2002. – V. 39. – P. 603-615

55. Lehtonen A.V., Särkkä P. Evaluation of rock stress estimation by the Kaiser effect / M. Lu, C.C. Li, H. Kjørholt, H. Dahle (Eds.) // *In-situ rock stress.* – London: Taylor & Francis Group, 2006. – P. 135-142.

56. Momayez M. Application of the Kaiser effect to measure in situ stresses in underground mines / M. Momayez, F.P. Hassani // *Proceedings of the 33rd US symposium on rock mechanics, Santa Fe, New Mexico.* – Rotterdam: A.A. Balkema, 1992. – P. 979–987.

57. Hsieh A. The desirable and undesirable effects on stress reconstruction using the deformation rate analysis (DRA) / A. Hsieh, P. Dight // *ISRM 7th International Symposium on In-Situ Rock Stress, Tampere, Finland, 10-12 May 2016.* – Tampere, 2016. – P. 213-223.

58. Tang C.A. A theoretical model for Kaiser effect in rock / C.A. Tang [et al] // Pure Appl. Geophys. – 1997. – V. 50, № 2. – P. 203-215.

59. Hunt S.P. Modelling the Kaiser effect and deformation rate analysis in sandstone using the discrete element method / S.P. Hunt, A.G. Meyers, V. Louchnikov // Computers and Geotechnics. – 2003. – V. 30. – P. 611-621.

60. Louchnikov V. A numerical investigation into the stress memory effect in rocks: A thesis submitted in fulfillment of the requirements for the degree of Master of Engineering Science (Geomechanics) / Vadim Louchnikov. – Adelaide, 2004. – 154 p.

61. Windsor C.R. A comparison of rock stresses measured by WASM AE with results from other techniques that measure the complete rock stress tensor / C.R. Windsor, E. Villaescusa, L.A. Machuca // 5th International Symposium on In-situ Rock Stress, Beijing, China, 25 August 2010. – London: Taylor & Francis Group, 2010. – P. 211-216.

62. Асанов В.А. Экспериментальное определение напряжений в соляном массиве с использованием эффекта Кайзера / В.А. Асанов, В.Н. Токсаров // Труды Межд. конф. «Геодинамика и напряженное состояние недр Земли», 4-7 октября 1999 г. – Новосибирск, 1999. – С. 147-151.

63. Holcomb D.J. Observations of the Kaiser effect under multiaxial stress states: Implications for its use in determining in situ stress / D.J. Holcomb // Geophys. Res. Lett. – 1993. – V. 20, № 19. – P. 2119-2122.

64. Lavrov A. Experimental and numerical study of the Kaiser effect in cyclic Brazilian tests with disk rotation / A. Lavrov [et al] // Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. – 2002. – V. 39. – P. 287-302

65. Николенко П.В. Обоснование и разработка методов и средств контроля напряжений в массиве на основе эффектов памяти в композиционных материалах: автореф. дисс. на соиск. уч. ст. канд. техн. наук / Николенко Петр Владимирович. – Москва, 2013. – 22 с.

66. Лыков К.Г. Разработка методов определения напряженного состояния массива горных пород на основе их эмиссионных эффектов

памяти: автореф. дисс. на соиск. уч. ст. канд. техн. наук / Лыков Константин Генрихович. – Москва, 1990. – 13 с.

67. Асанов В.А. Оценка напряженно-деформированного состояния целиков Верхнекамского калийного месторождения / В.А. Асанов, В.Н. Токсаров, И.Л. Паньков // 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.

68. Токсаров В.Н. Оценка геомеханического состояния краевых частей массива скважинными гидравлическими датчиками / В.Н. Токсаров // Стратегия и процессы освоения георесурсов: Материалы науч. сессии Горного ин-та УрО РАН по результатам НИР в 2003 г. 19-23 апр. 2004 г. – Пермь: Горный институт УрО РАН, 2004. – С. 214-217.

69. Токсаров В.Н. Экспериментальное определение напряжений в соляных породах: автореф. дисс. на соиск. уч. ст. канд. техн. наук / Токсаров Валерий Николаевич. – Пермь, 2000. – 18 с.

70. Lord A.E. Field determination of prestress (existing stress) in soil and rock masses using acoustic emission / A.E. Lord, R.M. Koerner // J. Acoust. Emission. – 1985. – V. 4, № 1. – P. S11-S16.

71. McElroy J.J. An acoustic jack to assess in situ rock behavior / J.J. McElroy, R.M. Koerner, A.E. Lord // Int. J. Rock Mech. Min. Sci. – 1985. – V. 22. – P. 21-29.

72. Watters R.J. Directional acoustic emission activity in response to borehole deformation in rock masses / R.J. Watters, A. Soltani // J. Acoust. Emission. – 1985. – V. 4, № 1. – P. S17-S18.

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

74. Moriya H. Analysis of fracture propagation behavior using hydraulically induced acoustic emissions in the Bernburg salt mine, Germany / H. Moriya [et al] // *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* – 2006. – V. 43. – P. 49-57.

75. Zimmermann G. Permeability Enhancement and Fracture Development of Hydraulic In Situ Experiments in the Äspö Hard Rock Laboratory, Sweden / G. Zimmermann [et al] // *Rock Mechanics and Rock Engineering*. – 2018. – Online First Articles: <https://doi.org/10.1007/s00603-018-1499-9>.

76. Zang A. How to Reduce Fluid Injection Induced Seismicity / A. Zang [et al] // *Rock Mechanics and Rock Engineering*. – 2018. – Online First Articles: <https://doi.org/10.1007/s00603-018-1467-4>.

77. Manthei G. Moment tensor evaluation of acoustic emission sources in salt rock / G. Manthei, J. Eisenblätter, T. Dahm // *Construction and Building Materials*. – 2001. – V. 15. – P. 297-309.

78. Manthei G. Experience on acoustic wave propagation in rock salt in the frequency range 1-100 kHz and conclusions with respect to the feasibility of a rock salt dome as neutrino detector / G. Manthei, J. Eisenblätter, T. Spies // *International Journal of Modern Physics A*. – 2006. – V. 21, Supplement 1. – P. 30-34.

79. Heuze F.E. Scale effects in the determination of rock mass strength and deformability / F.E. Heuze // *Rock Mechanics*. – 1980. – V. 12. – P. 167-192.

80. ASTM D4971-08 Standard Test Method for Determining In Situ Modulus of Deformation of Rock Using Diametrically Loaded 76-mm (3-in.) Borehole Jack. – 2008. – 7 p.

81. Yoshikawa S. A new method for estimation of the crustal stress from cored rock samples: laboratory study in the case of uniaxial compression / S. Yoshikawa, K. Mogi // *Tectonophysics*. – 1981. – V. 74. P. 323-339.

82. Асанов В.А. Сквжинный 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.

83. 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.

84. Токсаров В.Н. Использование акустического эффекта памяти для оценки напряженного состояния трещиноватых скальных пород / В.Н. Токсаров [и др.] // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. – Новосибирск: ИГД СО РАН, 2015. – № 2. – С. 353-357.

85. Лавров А.В. Акустическая эмиссия при деформировании и разрушении горных пород (обзор) / А.В. Лавров, В.Л. Шкуратник // Акустический журнал. – 2005. – Т. 51, Приложение. – С. 6-18.

86. Lajtai E.Z. The mechanism of deformation and fracture in potash rock / E.Z. Lajtai, E.J.S. Duncan // Can. Geotech. J. – 1988. – V. 25. – P. 262-278.

87. 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.

88. Hoek E. Fracture initiation and propagation in intact rock – A review / E. Hoek, C.D. Martin // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. – 2014. – V. 6. – P. 287-300.

89. Schulze O. Development of damage and permeability in deforming rock salt / O. Schulze, T. Popp, H. Kern // Engineering Geology. – 2001. – V. 61. – P. 163-180.

90. Popp T. Evolution of dilatancy and permeability in rock salt during hydrostatic compaction and triaxial deformation / T. Popp, H. Kern, O. Schulze // J. Geoph. Res. – 2001. – V. 106, № B3. – P. 4061-4078.

91. Alkan H. Rock salt dilatancy boundary from combined acoustic emission and triaxial compression tests / H. Alkan, Y. Cinar, G. Pusch // Int. J. Rock Mech. Min. Sci. – 2007. – V. 44. – P. 108-119.

92. Третьякова Т.В. Пространственно-временная неоднородность процессов неупругого деформирования металлов / Т.В. Третьякова, В.Э. Вильдеман. – М.: Физматлит, 2016. – 120 с.

93. Макаров А.Б. Практическая геомеханика. Пособие для горных инженеров / А.Б. Макаров. – М.: Горная книга, 2006. – 391 с.

94. Барях А.А. Физико-механические свойства соляных пород Верхнекамского калийного месторождения: учебное пособие / А.А. Барях, В.А. Асанов, И.Л. Паньков. – Пермь: ПГТУ, 2008. – 199 с.

95. Fjaer E. Petroleum related rock mechanics (2nd edition) / E. Fjaer [et al.] // Development in petroleum sciences. – Amsterdam: Elsevier, 2008. – V. 53. – 492 p.

96. 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.

97. 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.

98. Опарин В.Н. Зональная дезинтеграция и устойчивость подземных выработок / В.Н. Опарин. – Новосибирск: СО РАН, 2008. – 277 с.

99. Макаров А.Б. Обратный расчет прочности массива руды по факту разрушения междукамерных целиков / А.Б. Макаров // Материалы 6-й международной научно-технической конференции «Проблемы и пути инновационного развития горнодобывающей промышленности». – Алматы, 2013. – С. 189-194.

100. Букин А.Н. Определение напряженного состояния междукамерных целиков на залежах Джекказганского месторождения, приуроченных к антиклинальным структурам / А.Н. Букин, Ю.В. Жужгов, Ю.И. Чабдарова //

Материалы III семинара «Измерение напряжений в массиве горных пород», Новосибирск, 27 сентября-2 октября 1971 г. – Новосибирск: ИГД СО АН СССР, 1972. – С. 153-157.

101. Чабдарова Ю.И. Горное давление в антиклинальных структурах Дзезказгана / Ю.И. Чабдарова, Ю.В. Жужгов, А.Н. Букин. – Алма-Ата: Наука, 1980. – 194 с.

102. Токсаров В.Н. Экспериментальное определение напряжений в массиве горных пород Сарбайского карьера / В.Н. Токсаров [и др.] // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. – Новосибирск: ИГД СО РАН, 2017. – Т. 4, № 2. – С. 286-289.