

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Бельтюкова Николая Леонидовича «Разработка скважинного метода измерения напряжений в массиве горных пород на основе эффекта Кайзера», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 25.00.20 «Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика»

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав и заключения, изложенных на 159 страницах машинописного текста. Содержит список использованной литературы из 102 наименований, 98 рисунков и 2 таблицы.

Актуальность темы

В настоящее время существует порядка двадцати методов определения напряжений в массиве горных пород. Все они основаны на измерении тех или иных физических параметров геосреды, значения которых зависят от величины присутствующих в среде напряжений. Контроль этих параметров позволяет далее расчетным путем получить количественную оценку действующих напряжений. Среди существующих методов наиболее привлекательными считаются те, которые реализуются с использованием измерительных скважин для проникновения вглубь массива и позволяют получать данные непосредственно в реальных условиях.

Как известно, массив горных пород, как правило, имеет блочно-иерархическую структуру, а для самих пород характерна изменчивость физических свойств, порой проявление специфических свойств, таких как ползучесть, природная неоднородность. Поэтому методы контроля напряжений в таких средах, если они основаны на измерении деформаций или перемещений, а также предполагают использование аппарата теории упругости при обработке экспериментальных данных, имеют низкую достоверность. В последние годы накоплен значительный объем экспериментальных данных по регистрации акустической и электромагнитной эмиссии горных пород при циклическом нагружении образцов горных пород. Эмиссионные эффекты получили название как эффекты памяти. Несмотря на то, что принципиальная возможность использовать эффекты памяти для количественной оценки действующих в породной среде напряжений очевидна, методология и техника практической реализации данной возможности не разработана.

С учетом изложенного, рецензируемая работа посвященная разработке и обоснованию скважинного метода определения компонент поля напряжений в массиве горных пород на основе эффекта Кайзера представляется вполне актуальной.

Обзор состояния проблемы и формулировка задач исследования

Данный раздел в диссертационной работе содержит три подраздела: обзор существующих методов определения напряжений; анализ механизмов возникновения эффекта Кайзера в горных породах и методов контроля действующих напряжений на его основе.

В первую часть обзора попали, в основном, механические способы контроля напряжений, базирующиеся на деформационных измерениях. Справедливо в качестве «эталонных» отмечены метод гидроразрыва стенок скважины и полной разгрузки, обладающие понятной физической сущностью и в числе немногих позволяющие получать оценку всех компонент главных напряжений. Рассмотрены варианты осуществления измерительного гидроразрыва по классической схеме; повторный гидроразрыв или нагружение стенок измерительной скважины в области существующей природной трещины; сухой гидроразрыв и др. Среди недостатков метода отмечены сложности в

определении момента смыкания берегов трещины гидроразрыва, а также необходимость иметь априорные сведения о направлении действия компонент главных напряжений.

Общим недостатком «эталонных» методов является высокая трудоемкость работ при их использования, а также потребность в сложном оборудовании.

В отдельный подраздел автор выделил рассмотрение методов оценки напряжений, основанных на анализе напряженно-деформированного состояния образцов горных пород. Отмечено, что несмотря на кажущуюся простоту, методы чувствительны к различным помеховым факторам и поэтому не имеют явных преимуществ перед «эталонными» способами контроля напряжений.

Детально в диссертационной работе проанализированы современные представления о физических основах эффекта Кайзера и существующие подходы его использования в методах по определению напряжений в горных породах. Очевидным является предположение, что воздействие природного поля напряжений на горную породу можно считать первым циклом нагружения, который испытала геосреда. Извлечение образца породы и повторное его нагружение в лабораторных условиях позволяет путем регистрации акустической эмиссии, оценить ту или иную компоненту поля напряжений, присутствующего в массиве.

В обзоре механизмов возникновения эффекта Кайзера в горных породах рассмотрены различные модели трещинообразования: модель дискообразной трещины, двумерная и «трехмерная» модели «крылатых» трещин; модель закрывающейся трещины. Установлено, что у исследователей в данной области не достигнуто пока единого представления о механизме проявления эффекта Кайзера. Во всяком случае доминируют две точки зрения: эффект Кайзера проявляется когда возникают условия для подрастания размеров трещин; также это может происходить при трении противоположных берегов трещин сдвига в том числе за счет разрушения шероховатостей на их поверхностях после смыкания берегов. Дан анализ четырех примеров использования эффекта Кайзера в методах определения напряжений в горных породах: методы одноосного и трехосного нагружений, метод растяжения и нагружения околоскважинной области массива. Каждый из них опирается на отдельные особенности проявления эффекта, либо реализует оригинальные схемы нагружения испытываемой среды. Отмечены преимущества данных методов в относительной простоте реализации и скорости получения конечных результатов.

Большой объем литературных источников добросовестно и глубоко проанализированных автором позволяет отметить его эрудированность. На этой базе диссертантом сформулированы пять задач лабораторных и натурных исследований для обоснования собственных представлений об особенностях проявления эффектов Кайзера в горных породах и разработки на этой основе скважинного метода контроля напряжений в условиях *in situ*.

Исходные положения для разработки методического и аппаратного обеспечения метода

В главе 2 диссертации автором формулируется суть метода, подлежащего разработке и рассматриваются основные фрагменты его методического и технического наполнения. Предложена компоновка комплекса приборов и вспомогательных средств для осуществления экспериментальных работ в натурных условиях. Основу комплекса составляет скважинный гидродомкрат Гудмана и аппаратура для синхронной регистрации параметров АЭ и давления в гидросистеме. Выбор пьезоэлектрического преобразователя с резонансной частотой 165 кГц для регистрации АЭ-импульсов в породной среде следует признать обоснованной. Отмечено, что определение момента резкой активности АЭ при изменении напряжений в породной среде является важной проблемой при выявлении эффекта Кайзера. Это положение убедительно проиллюстрировано на результатах

экспериментальных исследований в соляном массиве и особенно в массиве нарушенных скальных пород.

При апробации разрабатываемого метода в соляном массиве Верхнекамского месторождения установлено, что при использовании гидродомкрата в качестве нагружающего стенки скважины (в вертикальном направлении) устройства, эффект Кайзера проявляется при давлениях, соответствующих значению вертикальной компоненты поля напряжений. Этот результат удастся подтвердить при повторном нагружении. Натурный эксперимент позволяет, фактически, произвести тарировку метода.

Так проявляется поведение породной среды в идеальном случае. В трещиноватом массиве связь давления в системе гидронагружения с параметрами порождаемого потока АЭ-импульсов порой не столь очевидная.

Дополнительно, с целью обоснования вывода о том, что эффект Кайзера имеет место при давлении, соответствующем усилию одноосного нагружения стенок скважины, выполнен большой цикл стендовых экспериментов. Они выполнены на блоках монолитных соляных пород, подверженных одноосному нагружению. Регистрация импульсов АЭ велась многоканальной аппаратурой. При регистрации полей перемещений и деформаций на гранях образцов была задействована бесконтактная оптическая система. Стендовые эксперименты имели хорошее аппаратное обеспечение. Результаты стендовых экспериментов выявили необходимость детального исследования напряженно-деформированного состояния пород околоскважинной области массива для более глубокого анализа экспериментального материала.

Фактически автором во второй главе определены тактико-технические требования к разработке скважинного метода оценки напряжений с использованием эффекта Кайзера, как в части технологии его применения, так и процедуры интерпретации экспериментальных данных.

Оценка достоверности и новизны результатов исследования, выводов и рекомендаций

Третья глава диссертационной работы посвящена численному моделированию напряженно-деформированного состояния прискважинной области массива. Моделирование выполнено в пакете «Ansys Workbench 18.0». Использование данного пакета положительно характеризует квалификационные возможности автора диссертационной работы. Параметры модели выбраны обоснованно, с учетом физико-механических свойств соляного массива, уровня действующих в нем напряжений. Единственно можно заметить, что употребление выражения (стр. 90) «в нетронутым массиве пород Верхнекамского месторождения калийных солей» вряд ли корректно, ввиду присутствия многокилометрового отработанного пространства.

Анализ картин распределения напряжений по отдельным стадиям искусственного воздействия на массив представляет несомненный интерес. Полезным следует считать обобщение результатов численного моделирования в форме идеализированных временных диаграмм изменения компонент поля напряжений и деформаций на контуре измерительной скважины при нагружении стенок гидродомкратом. В работе подробно рассмотрены напряженно-деформированные состояния породы прискважинного пространства в условиях нетронутого массива, после проведения скважины и, наконец, при нагружении ее стенок с помощью домкрата.

В процессе моделирования рассмотрены и проанализированы также отдельные вопросы, касающиеся методических аспектов и технических особенностей разрабатываемого метода контроля напряжений. Среди них: выявлена роль промежуточного главного напряжения, действующего по оси скважины, на величину критического давления в условиях различных комбинаций величин главных напряжений; даны рекомендации по форме нагружающих пластин гидродомкрата и центральному углу между ними; проанализированы условия возникновения критических давлений на стенках

скважины при различной ориентации оси силового воздействия относительно направления действия главных напряжений.

Бесспорно, построенная в работе модель является некоторым приближенным отражением реальных деформационных процессов, которые будут происходить в натуральных условиях когда интервал скважины подвергается искусственному силовому воздействию. Тем не менее, результаты численного моделирования позволили автору выдвинуть рабочую гипотезу, согласно которой при реализации разрабатываемого скважинного метода с использованием эффекта Кайзера, проявления акустической эмиссии можно ожидать в двух случаях: при активизации движений трещин в областях сжатия, когда давление на стенки скважины достигает значений компоненты поля напряжений, действующей в направлении нагружения; при образовании трещин разрыва, когда давление на стенки скважины приводит к возникновению на контуре растягивающих напряжений.

Глава 4 посвящена результатам экспериментов по физическому моделированию образцов соляных пород в камере трехосного сжатия, выполненных в целях изучения проявлений эффекта Кайзера при напряженно-деформированных состояниях, испытываемых породами в околоскважинной области. Как справедливо отмечено в работе, эффект Кайзера в условиях трехосного нагружения образцов горных пород, подверженных испытаниям по схеме Кармана, широко исследован. В связи с этим в работе основное внимание уделено изучению особенностей деформирования образцов и анализу условий возникновения эффекта Кайзера при различных схемах и режимах нагружения когда вначале после установочного цикла в образце реализуется ориентированная трещиноватость, а далее осуществляется повторное нагружение в тестовом цикле в нормальном по отношению к трещинам направлении.

Лабораторные исследования проведены на сервогидравлическом комплексе MTS-815, оснащенным универсальным программным продуктом Multi Purpose Test Ware. Аппаратура и оборудование позволяли испытывать образцы в широком диапазоне скоростей нагружения по схемам Кармана и Беккера. Контроль и запись импульсов акустической эмиссии осуществлялся с помощью двух пьезоэлектрических преобразователей и регистрирующей аппаратуры Vallen AMSY-6, синхронизированной с работой комплекса. Следует отметить современный уровень оснащения лабораторных исследований, тщательно продуманную методику подготовки макетных образцов и последовательность проведения экспериментов.

В опытах реализовано несколько режимов трехосного нагружения:

- разгрузка и восстановление осевой компоненты напряжений в образце после нагружения в режиме гидростатического сжатия в установочном цикле;
- разгрузка и восстановление осевой компоненты напряжений в образце после нагружения по схеме Беккера в установочном цикле;
- разгрузка и восстановление осевой компоненты напряжений в образце после нагружения по схеме Кармана в установочном цикле;
- разгрузка и восстановление боковой компоненты напряжений в образце после нагружения по схеме Кармана в установочном цикле.

Таким образом, выполнен большой и представительный объем исследований, в которых воспроизведены и проанализированы различные сценарии нагружения модельных образцов с синхронной регистрацией параметров акустической эмиссии. В каждом случае даны объяснения фактам проявления эффекта Кайзера и указаны возможные источники и механизмы этих проявлений.

В целом, оценивая результаты физического моделирования, отметим, что в работе получено подтверждение достоверности основных положений рабочей гипотезы (см. глава 3) о двух факторах, обуславливающих возникновение акустической эмиссии в зависимости от направления нагружения стенок измерительной скважины гидродомкратом.

Диссертационную работу завершает материал по практическому применению разработанного скважинного метода контроля напряжений в массиве в различных горно-геологических условиях солевых и рудных месторождений России и Казахстана. Следует отметить, что спектр охваченных экспериментальными работами месторождений впечатляет, что бесспорно является достоинством работы. Оценка напряженного состояния соляных пород выполнена на рудниках БКПРУ-2 и СКРУ-3 ПАО «Уралкалий» и в условиях осваиваемого на глубинах 1100-1300 м Гремячинского месторождения. Кроме того опробование метода выполнено в Казахстане в карьере Сарбайского месторождения магнетитовых руд, а также в целиках месторождения медистых песчаников Жаман-Айбат. Данные, полученные на Гремячинском месторождении, пожалуй, представляют наибольший интерес. Прежде всего, эксперименты выполнены на существенной (1100 м) глубине, в восьми горизонтальных скважинах, пробуренных в стенке проходческого транспортного штрека в сторону нетронутого массива. Вскрыта классическая схема распределения вертикальной компоненты вблизи контура выработки, значение которой по мере удаления от контура стабилизируется около величины γH , тем самым тестируя метод на достоверность. Кроме того, установлено, что напряженное состояние соляного массива Гремячинского месторождения близко к гидростатическому. Так и должно быть пока месторождение не вступит в стадию активного освоения.

Данные по контролю напряжений в карьере Сарбайского месторождения и в целиках месторождения Жаман-Айбат не столь выразительны. Сказывается влияние взрывной технологии на состояние массива и существенной его исходной нарушенности.

Оценивая достоверность выполненных исследований отметим, что она обеспечена непротиворечивостью суждений, выводов и рекомендаций автора большому числу проанализированных им теоретических и экспериментальных работ в затронутой области, строгой постановкой задач по математическому и физическому моделированию процессов проявления эффекта Кайзера в горных породах при изменении их напряженно-деформированного состояния, выполнением цикла экспериментов по испытанию работоспособности метода в натуральных условиях, в породных массивах различных месторождений, применением современных приборных комплексов, удовлетворительной сходимостью полученных данных по контролю напряжений в горных породах с данными других исследователей.

Выполненные исследования обладают несомненной новизной. Детально изучены закономерности проявления эффекта Кайзера в околоскважинном пространстве; предложена трехмерная численная модель НДС пород, с помощью которой исследовано поле напряжений возле измерительной скважины при силовом воздействии на ее стенки гидродомкрата; определены условия возникновения акустической эмиссии от направления силового воздействия во взаимосвязи с параметрами действующего поля напряжений; получены оценки уровня напряжений в окрестности подземных выработок на пяти месторождениях России и Казахстана.

Практическая значимость полученных автором результатов

Практическая ценность работы состоит в разработке аппаратного комплекса для выполнения в натуральных условиях экспериментальных исследований напряженного состояния массива горных пород с использованием в качестве информативного параметра эффекта Кайзера, выявляемого в процессе нагружения интервала измерительной скважины гидродомкратом Гудмана, а также методики интерпретации экспериментальных данных. Разработанный метод и аппаратный комплекс пополняют арсенал технических средств контроля действующих напряжений, необходимых для вооружения инженерных служб горнодобывающих предприятий при решении вопросов эффективной и безопасной отработки месторождений.

Автореферат, публикации, язык и стиль диссертации

Автореферат в полной мере соответствует основному содержанию диссертации, а представленный в нем список опубликованных автором пятнадцати работ отражает основные научные положения диссертации и процедуру получения новых результатов. Шесть работ опубликованы в изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки РФ.

Диссертация и автореферат написаны ясным, лаконичным языком, хорошо иллюстрированы. Стиль изложения соответствует нормам и правилам оформления научных работ.

Замечания

1. Использование в названии работы и в большинстве разделов текста выражения «измерение напряжений» не вполне корректно. Впредь можно рекомендовать употребление терминов «оценка, определение, контроль напряжений».

2. Научные положения, сформулированные в работе, следовало разместить непосредственно в тексте диссертации, а изложение материалов и результатов исследований представить в стиле обоснования их достоверности.

3. Методика обработки данных об акустической эмиссии предусматривает их анализ по двум параметрам: активность и суммарный счет. Больше возможностей для понимания процессов движения в породной среде при изменении условий ее нагружения можно было бы получить с привлечением амплитудно-частотного анализа, а также использованием узкополосных датчиков АЭ в различных частотных диапазонах.

4. Разработанный метод слишком чувствителен к массе факторов, снижающих его достоверность. Поэтому добываемые количественные значения напряжений скорее следует интерпретировать в качестве оценок их уровня. В работе не дана оценка погрешности метода и области его применения на фоне других способов экспериментального определения напряжений.

Заключение

Несмотря на сделанные замечания, диссертационная работа Бельтюкова Н.Л. представляет собой завершённое научное исследование, в котором решена актуальная задача обоснования и разработки скважинного метода определения напряжений в массиве горных пород, что является существенным вкладом в развитие экспериментальной геомеханики, обеспечивает получение объективной информации о действующих в массиве напряжений при контроле опасных концентраций горного давления, а также необходимой при геомеханических расчетах в качестве параметрического наполнения.

Диссертационная работа соответствует требованиям п. 9-14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 г. (с изменениями от 28.08.2017 г.), а ее автор Бельтюков Николай Леонидович заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 25.00.20 «Геомеханика, разрушение торных пород, рудничная аэрогазодинамика и торная теплофизика»

Официальный оппонент:

Леонтьев Аркадий Васильевич

доктор технических наук по специальности 25.00.20

ведущий научный сотрудник Лаборатории

горной информатики Института горного дела

СО РАН

e-mail: leon@misd.ru, тел. 8-905-954-1732



А.В.Леонтьев

Институт горного дела им. Н.А. Чинакала Сибирского
отделения Российской академии наук, 630091, Россия,
г. Новосибирск, Красный проспект 54, Тел./факс (383)
205 30 30. e-mail: mailigdtirmisd.ru

Подпись д.т.н. Леонтьева А.В. *удостоверено*.
Ученый секретарь ИГД СО РАН
канд. техн. наук

25 марта 2019 г.



А.П. Хмелинин