

На правах рукописи



ПАВЛОВ Валерий Анатольевич

**ОБОСНОВАНИЕ СПОСОБА ОЦЕНКИ КОМПОНЕНТОВ
НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД ПО
ДЕФОРМАЦИЯМ СИСТЕМЫ «СКВАЖИНА – ТРЕЩИНА
ГИДРОРАЗРЫВА»**

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

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Кемерово 2014

Работа выполнена в лаборатории физических методов воздействия на массив горных пород Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт горного дела им. Н.А. Чинакала» Сибирского отделения Российской академии наук

Научный руководитель Сердюков Сергей Владимирович,
доктор технических наук,
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт горного дела им. Н. А. Чинакала» Сибирского отделения Российской академии наук, зав. лабораторией

Официальные оппоненты Лобанова Татьяна Валентиновна,
доктор технических наук,
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирский государственный индустриальный университет», научный руководитель Научно-исследовательского центра «Геомеханика»

Зубков Виктор Васильевич,
доктор технических наук,
Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», главный научный сотрудник

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Горный институт Уральского отделения Российской академии наук

Защита диссертации состоится «30» июня 2014 г. в 15-00 часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.102.02 в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева» по адресу: 650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28, факс (384-2) 58-33-80, email: kuzstu@kuzstu.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева» и на сайте организации по адресу www.kuzstu.ru

Автореферат разослан «__» _____ 2014 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Иванов В.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования.

Добыча полезных ископаемых является одним из определяющих параметров экономики России. Задача оценки компонентов напряженного состояния массива горных пород является одной из важнейших, так как напряженным состоянием определяется технология разработки месторождения, а также на ее основе производится прогноз проявления горного давления.

Знание напряженно-деформированного состояния горных массивов имеет фундаментальную значимость для решения широкого круга проблем, связанных с созданием безопасных технологий отработки месторождений и рациональным извлечением полезных ископаемых. Усложнение горно-геологических условий при добыче полезных ископаемых в связи с переходом на более глубокие горизонты, а также вовлечение в разработку месторождений с более сложными условиями по горному давлению ведут к возрастанию роли геомеханических измерений. Увеличение темпов добычи полезных ископаемых, рост глубин разработки делают необходимым контроль напряжений, действующих на большом удалении от выработанного пространства, то есть в тех зонах массива, которые будут подвергнуты выемке спустя некоторое время. Но даже в тех зонах, которые не будут непосредственно подвергнуты влиянию горных работ, происходит перераспределение напряжений, что может стать причиной динамических явлений в массиве.

Наиболее распространенным методом прямого измерения напряженного состояния массива горных пород является гидроразрыв. Расчет напряжений в этом методе проводят по данным измерений давлений раскрытия и закрытия единичной трещины гидроразрыва. В проницаемых горных породах такой подход не всегда возможен или ведет к значительным ошибкам из-за утечек рабочей жидкости. Многочисленные модификации метода позволили расширить область эффективного использования метода. Можно выделить следующие типы модифицированных методик на базе метода гидроразрыва:

- Метод гидравлического тестирования уже существующих трещин (Hydraulic Tests on Preexisting Fracture-НТПФ);
- Метод «сухого» разрыва (негидравлического разрыва, Sleeve fracture): одиночной трещины (Single Sleeve Fracture Method), двойной трещины (Double Sleeve Fracturing Method);
- Метод разрыва скважинным домкратом (Borehole jack fracture method).

Однако данные подходы, основанные на измерении давлений раскрытия нескольких разноориентированных трещин, не обеспечивают достаточной точности измерений напряжений по следующим причинам:

- 1) создание системы трещин заданной конфигурации не всегда возможно;
- 2) недостаточная точность измерения давления открытия трещин при радиальном нагружении (с использованием стандартных средств измерения);
- 3) взаимное влияние трещин при деформации прискважинной зоны массива горных пород.

Решение задачи повышения точности измерений напряжений на базе метода «сухого» гидроразрыва обеспечит достоверность проектирования и эффективность технологий разработки месторождений полезных ископаемых.

В связи с этим исследование, направленное на повышение достоверности оценки напряжений массива проницаемых горных пород, является актуальным.

Решению задачи, повышения точности оценки компонентов напряженного состояния массива проницаемых горных пород, на основании соединения классического метода гидроразрыва и «сухого» разрыва, посвящена диссертационная работа, которая выполнена в рамках государственного контракта ГК 16.515.11.5035 «Проведение исследований и разработка прототипа экологически безопасной технологии добычи метана из угольных пластов и подстилающих горных пород в шахтных условиях» Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2013 годы» «Рациональное природопользование», соглашения №8662 «Проведение научных исследований по созданию технологии управляемого гидроразрыва для повышения эффективности и безопасности подземной добычи твердых полезных ископаемых» Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы, грантов РФФИ (проект №11-05-00390, 12-05-31358).

Цель работы заключается в обосновании способа оценки компонентов напряженного состояния массива горных пород по деформационному поведению системы «скважина - трещина гидроразрыва» при различных типах нагружения стенок скважины.

Идея работы состоит в установлении зависимостей изменения формы сечения скважины, с контура которой идут трещины гидроразрыва, от отношения внешних сжимающих напряжений при радиально - симметричном и одноосно - направленном нагружении стенок скважины для оценки напряжений в проницаемых горных породах. Указанные зависимости предлагается использовать как для определения давлений открытия в случае использования направленно – одноосного нагружения, так и вместо давления запираения трещин в случае радиально-симметричного, достоверность измерения которых существующими способами не соответствует производственным требованиям.

В соответствии с целью и идеей работы определены следующие **задачи исследований**:

1) Изучить влияние напряженного состояния массива и упругих свойств горных пород на изменение площади поперечного сечения скважины, с контура которой сформирована одиночная трещина продольного гидроразрыва, под действием радиально симметричного нагружения стенок скважины.

2) Исследовать зависимость тангенциальных деформаций пород на контуре скважины, с контура которой идет несколько разнонаправленных трещин продольного гидроразрыва, от напряжений и упругих свойств горных пород, параметров трещин и одноосного нагружения стенок скважины ортогонального ее оси.

3) Создать способ измерения давлений открытия системы разнонаправленных трещин продольного гидроразрыва по тангенциальным деформациям пород на контуре скважины под действием одноосного нагружения её стенок.

4) Разработать способ определения напряжений в горных породах по изменению площади поперечного сечения скважины, содержащей одиночную трещину продольного гидроразрыва, при радиально симметричном нагружении стенок скважины.

Методы исследований. Анализ и обобщение литературных источников, физическое и математическое моделирование, метод интегральных сингулярных уравнений, статистические методы анализа экспериментальных данных, лабораторные эксперименты на масштабных моделях, сопоставление теоретических и экспериментальных результатов.

Объект исследований – участок массива проницаемых горных пород.

Предмет исследования – компоненты напряженного состояния массива проницаемых горных пород.

Научные положения, выносимые на защиту:

при радиально симметричном нагружении стенок скважины, содержащей одиночную трещину продольного гидроразрыва, изменение площади поперечного сечения скважины определяется отношением минимального и максимального напряжений, действующих в породном массиве ортогонально оси скважины, а также упругими свойствами горных пород. Компоненты приращения площади поперечного сечения скважины, обусловленные раскрытием трещины продольного гидроразрыва на контуре скважины и упругими деформациями вмещающих горных пород, имеют одинаковый порядок;

одноосное нагружение стенок скважины перпендикулярно ее оси обеспечивает точность раскрытия трещин продольного гидроразрыва на контуре скважины при различии их ориентации на 10 и более градусов. Измерение тангенциальных деформаций породы на контуре скважины под

действием одноосного нагружения повышает точность определения давления открытия трещин продольного гидроразрыва на 20% и более;

установлено, что измерение давления раскрытия на контуре скважины нескольких разнонаправленных трещин, идущих с контура скважины, направленным-одноосным нагружением, позволяет определить компоненты напряженного состояния массива горных пород. Измерение давления раскрытия каждой трещины при этом осуществляется отдельно;

измерения компонентов напряженного состояния массива горных пород осуществляется по давлению открытия трещины на контуре скважины и последующему изменению площади поперечного сечения скважины, вызванному раскрытием трещины при радиально симметричном нагружении стенок скважины.

Научная новизна работы заключается в:

определении зависимости деформации прискважинной зоны массива горных пород, содержащей трещину гидроразрыва от внешнего поля напряжений, упругих характеристик горных пород, слагающих вмещающий массив, и величины радиального нагружения стенок скважины;

установлении характера зависимости между площадью поперечного сечения ствола скважины и отношением напряжений, действующих в массиве горных пород;

определении точности измерения давлений повторного раскрытия разноориентированных трещин гидроразрыва при направленном нагружении и особенностях раскрытия трещин при таком виде нагружения;

разработке метода и повышении достоверности измерения напряженного состояния массива проницаемых горных пород с использованием в расчетной схеме зависимости раскрытия трещины от внешнего поля напряжений, что позволяет повысить точность измерения отношения минимального и максимального напряжений в массиве.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций работы подтверждаются:

- хорошим совпадением данных численного моделирования и существующих результатов моделирования схожих задач, в том числе и аналитических решений;

- удовлетворительной сходимостью численных и фактических данных, полученных по результатам лабораторных экспериментов.

Научное значение работы состоит в обосновании метода измерения напряженного состояния массива проницаемых горных пород, использующего гидроразрыв и деформационные измерения.

Личный вклад автора заключается:

- в проведении аналитического обзора существующих методик измерения напряженного состояния, базирующихся на измерительном гидроразрыве и обозначении проблемных пунктов методик с использованием технологии гидроразрыва;

- построении математической модели задачи деформирования прискважинной зоны, содержащей трещину гидроразрыва и выполнении численных экспериментов по определению зависимости деформаций от параметров внешнего поля напряжений;

- в разработке и изготовлении стенда для физического моделирования процесса нагружения стенок скважины направленным нагружением для оценки точности определения ориентации существующих систем трещин и величины давления их раскрытия;

- в экспериментальных исследованиях процесса нагружения стенок скважины направленным одноосным нагружением;

- в разработке алгоритма оценки напряженного состояния горных пород по деформационной характеристике прискважинной зоны, содержащей трещину гидроразрыва.

Практическое значение работы заключается в разработке алгоритма оценки напряженного состояния массивов проницаемых и трещиноватых горных пород на базе метода измерительного гидроразрыва и деформационных измерений, который позволяет выполнять измерения в глубоких скважинах. А также в том, что полученные результаты легли в основу методических рекомендаций, позволяющих производить оценки напряженного состояния массива проницаемых и трещиноватых горных пород без использования давления заклинивания трещины.

Реализация выводов и рекомендаций работы. Алгоритм оценки напряжений предложенным методом, позволит провести исследования по определению напряженного состояния верхней части Земной коры и построения карты напряжений для территорий РФ. Наличие повсеместной информации о характере напряженного состояния массива пород позволит создавать геомеханические модели месторождений полезных ископаемых при корректных граничных условиях.

Разработана методика оценки напряженного состояния массива проницаемых горных пород. Основные положения разработанных методических рекомендаций изложены в отраслевом методическом документе: «Методика оценки напряженного состояния массива проницаемых горных пород с использованием радиальносимметричного или направленно-одноосного нагружения стенок ствола скважины». Методический документ согласован с Институтом горного дела СО РАН.

Апробация работы. Основные результаты исследований докладывались и обсуждались на: научном Симпозиуме «Неделя горняка» (Москва, МГГУ, 2008 г.); XLVIII Международной научной студенческой конференции (Новосибирск, НГУ, 2010 г.); 5 Международном симпозиуме по измерению напряжений (Китай, Пекин, 2010 г.); VI-VII Международных научных конгрессах и выставках “Гео – Сибирь” (Новосибирск, СГГА, 2010-2011 гг.); XIV Международном симпозиуме имени академика М. А. Усова студентов и молодых ученых (Томск, ТПУ, 2010 г.); 6 международной научной школе

молодых ученых и специалистов «Проблемы освоения недр в 21 веке глазами молодых» (Москва, ИПКОН, 2009 г.); 1-ой международной конференции “Математические методы в геофизике-2008” (Новосибирск, ИВМиМГ, 2008 г.), 46 Симпозиуме по Механике горных пород/Геомеханике (Сан-Франциско, США, 2011г.), Международной конференции по механическим, промышленным и производственным технологиям – 2011 (Мельбурн, Австралия, 2011г.), Международной конференции «Геология в развивающемся мире» (Пермь, Перм. гос. ун-т., 2011 г.).

Публикации. По результатам диссертационной работы опубликовано 20 работ, из них 4 статьи в журналах по перечню ВАК Минобрнауки России.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав и заключения, изложенных на 171 страницах машинописного текста, содержит 12 таблиц, 98 рисунков и список литературы из 115 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе дан обзор и анализ методов оценки напряженного состояния массива горных пород. Отдельно и более подробно рассмотрен «классический» метод измерительного гидроразрыва, методы «сухого» разрыва, определены их преимущества и недостатки.

Аналитический обзор существующих методов оценки напряженного состояния показал, что одним из наиболее эффективных и используемых методов является гидравлический разрыв. К преимуществам данной технологии относится возможность измерения напряжений на большом удалении, простота реализации методики и интерпретации получаемых данных. В нашей стране исследования по этому методу сосредоточены в Институте горного дела СО РАН. Наибольший вклад в развитие технических и методических средств измерительного гидроразрыва в России внесли: **Аксенов В.К., Зубков В. В., Курленя М.В., Кю Н.Г., Леонтьев А.В., Лобанова Т.В., Попов С.Н., Сердюков С.В., Федоренко В.К., Юн Р.** и другие.

За рубежом в создании технологии измерительного гидроразрыва значительный вклад внесли: **Bredehoeft J., Cornet F.H., Fairhurst C., Haimson B.C., Ito T., Mizuta Y., Rummel F., Serata S., Stephansson O., Zoback C.**

Стандартно используемый метод оценки напряженного состояния горных пород с помощью гидроразрыва предусматривает нагружение стенок скважины и берегов образующихся трещин давлением рабочей жидкости. В расчетной схеме метода используются давление запирания трещины (P_s), регистрируемое после прекращения работы насоса и давление ее открытия на контуре скважины (P_r) в повторном цикле нагружения. В проницаемых породах значение P_s зависит от утечек рабочей жидкости в окружающую среду, величина которых в общем случае неизвестна. Другая проблема состоит в фильтрации рабочей жидкости разрыва в трещину, что ведет к

неинформативности регистрируемого P_r и невозможности оценки напряжений классическим методом. Для предотвращения контакта рабочей жидкости с горной породой применяют непроницаемую оболочку, что исключает возможность измерения P_s и ведет к необходимости его замены другим параметром. Практическое развитие получили способы, основанные на измерении давлений открытия нескольких различно ориентированных трещин. По способу создания трещин они разделяются на:

- метод НТПФ (Hydraulic Tests on Preexisting Fracture), использующий природную трещиноватость пород, когда она хорошо выражена;
- метод двойного разрыва DF (Double Sleeve Fracturing Method), в котором радиально симметричное нагружение стенок скважины через непроницаемую оболочку формирует сначала трещину в направлении действия максимального сжатия, а при дальнейшем повышении давления за счет перераспределения напряжений – вторую трещину, ортогональную первой;
- метод одиночного разрыва SF (Single Sleeve Fracture Method), в котором создают несколько трещин разной ориентации за счет применения направленного одноосного растяжения контура скважины перпендикулярно ее оси. Экспериментальные исследования показывают, что в неравномерном поле сжатия геометрия формирующихся трещин имеет более сложный характер, чем принято в указанных методах. При создании трещины методом SF в направлении, не совпадающем с главными напряжениями, она отклоняется от заданной плоскости и приобретает криволинейную форму. Показано также, что в таком поле не работает и основное условие метода DF – образующиеся трещины не ортогональны друг другу. При повторном раскрытии это ведет к неконтролируемому взаимодействию трещин, к значительной погрешности оценки напряжений, которая растет с увеличением неравномерности внешнего поля.

В данной работе предложен следующий подход к решению проблемы, идея которого состоит в применении непроницаемой оболочки для исследования деформационной характеристики призабойной зоны скважины, содержащей протяженную трещину гидроразрыва, предварительно сформированную стандартным способом. В процессе повторного нагружения трещина частично открывается вдоль плоскости гидроразрыва, где среда имеет нулевую прочность на растяжение. Длина открытого участка L ($L < L_0$) постепенно увеличивается, что влияет на напряженное состояние горной породы в окрестности скважины, на величину раскрытия трещин на ее контуре и на площадь поперечного сечения. Если деформационная характеристика достаточно чувствительна к параметрам поля сжатия, то возможно решение обратной задачи – их оценки по данным деформационного теста.

Предложено два способа совершенствования существующих модификаций «сухого» разрыва с использованием комплексной технологии. Совершенствование метода двойного разрыва предложено по следующей

схеме. На предварительном этапе предполагается создание двух протяженных трещин в направлении максимального сжатия с использованием технологии классического гидроразрыва. После проводится измерение деформаций скважины в ходе нагружения дилатометром (радиальносимметричное нагружение стенок скважины). Так как формирование ортогональной системы трещин не предполагается, то необходим дополнительный параметр, используемый вместо давления повторного раскрытия второй системы трещин в алгоритме оценки напряжений. В качестве дополнительного параметра предлагается использовать зависимость раскрытия трещины на контуре скважины от давления в устройстве для оценки отношения минимального и максимального главных напряжений в массиве. Совершенствование метода одиночного разрыва заключается в следующем. На предварительном этапе формируем систему двух ортогональных протяженных систем трещин, используя высокоинтенсивное нагружение изолированного интервала скважины рабочей жидкостью, стандартной установкой гидроразрыва. С использованием устройства направленного разрыва измеряем давления повторного раскрытия сформированных ортогональных систем трещин. При этом в отличие от методов скважинного домкрата и «сухого» разрыва трещины образуют, предварительно используя технологию гидроразрыва, что позволяет предположить возможность формирования протяженных прямолинейных трещин. На основе анализа литературы сформулированы цель и задачи исследования.

Во второй главе приведена математическая модель деформирования системы «скважина - трещина гидроразрыва» при нагружении стенок скважины радиально симметричным напряжением. Представлены результаты численных расчетов влияния внешнего поля напряжений, упругих параметров горных пород и давления в скважинах на деформационное поведение системы «скважина - трещина гидроразрыва».

Для обоснования возможности использования деформационных измерений с использованием изолирующей оболочки для определения напряжений в массиве решается следующая задача. В условиях плоской деформации рассматривается упругая плоскость с круговым отверстием радиуса R . На бесконечности действует поле сжимающих напряжений интенсивностью σ_{max} и σ_{min} (МПа). Направление максимального сжатия σ_{max} совпадает с осью Ox (рис.1). В этом же направлении имеются две центрально симметричные туннельные прямолинейные трещины, начинающиеся с контура отверстия в соответствии с классическим предположением для метода измерительного гидроразрыва, что и подтверждается многочисленными лабораторными и полевыми экспериментами. Полагаем, что длина трещин $L_0 \gg R$. В отверстии действует давление σ_0 – для радиальносимметричного нагружения и σ_{x0} – для направленно одноосного. В начальный момент времени трещины сомкнуты.

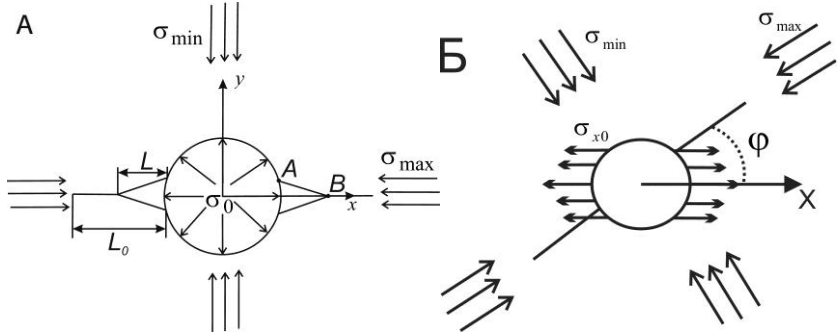


Рис. 1. Схема к математической постановке задачи

Под действием внешнего поля (σ_{max} , σ_{min} , $\alpha = \sigma_{min}/\sigma_{max}$) и давления σ_0 внутри круговое отверстие радиуса R (см) деформируется в эллипс с площадью поперечного сечения:

$$S_{эл} = \pi ab \approx \pi R^2 \left[1 + \frac{2\sigma_{max}}{E} ((1+\nu)\overline{\sigma_0} \cdot (3\alpha - 1) - (1-\nu^2) \cdot (1+\alpha)) \right], \quad (1)$$

где E – модуль упругости (ГПа), ν – коэффициент Пуассона, $\overline{\sigma_0} = \sigma_0/\sigma_*$, где $\sigma_* = \sigma_{max}(3\alpha - 1)$; $\sigma_* = P_r$ – давление повторного раскрытия трещины (МПа); a и b – длина осей эллипса (см); $\alpha = \sigma_{min}/\sigma_{max}$.

До тех пор, пока $\overline{\sigma_0} < 1$, берега трещин будут сомкнуты и площадь поперечного сечения скважины определяется выражением (1), при $\overline{\sigma_0} > 1$ берега трещины в точке А раскроются на величину $[v]_A$ – нормальное раскрытие трещин на контуре отверстия. В результате при $\overline{\sigma_0} > 1$ площадь сечения будет суммой деформированного кругового отверстия (1) и приращения площади поперечного сечения, вызванного раскрытием трещины на контуре отверстия $2R[v]_A$. Необходимо, используя измеряемые зависимости объема $V = Sh$ (h – длина зонда с изолирующей оболочкой) от давления σ_0 на стенках отверстия, построить возможный алгоритм нахождения параметров внешнего поля сжатия σ_{max} , σ_{min} . Для этого найдем $[v]_A$ как функцию от $\overline{\sigma_0}$, σ_{max} и α . Находим решение описанной выше математической задачи (рис.1); на контуре отверстия заданы следующие граничные условия:

$$\sigma_n = -\sigma_0; \tau_s = 0,$$

где σ_n и τ_s – нормальные и касательные напряжения на границах (МПа).

Рассматриваем вариант, когда $\overline{\sigma_0} > 1$, то есть существуют раскрытые участки

трещины длиной L (см), и так как рабочая жидкость не поступает в трещины, то на этих участках выполняются следующие граничные условия:

$$\sigma_n = 0; \tau_s = 0$$

Сформулированная задача является частным случаем задачи о развитии звездчатой системы трещин и сводится к решению комплексного сингулярного интегрального уравнения:

$$\frac{1}{2\pi} \int_L [R(T, T_1) \cdot g^+(t) + S(T, T_1) \cdot \overline{g^-(t)}] dt = P(T_1, \sigma_{\max}, \sigma_0, \alpha); \quad (2)$$

где точки на контуре L определяются переменными $T_1 = t_1 + (1+l) = l \cdot \eta + (1+l)$; $l = L/2R$; $|\eta| \leq 1$ (точки наблюдения), а $T = t + (1+l) = l \cdot \xi + (1+l)$; $|\xi| \leq 1$ – переменная интегрирования, черта над функцией обозначает комплексное сопряжение.

Раскрытие сомкнутых трещин происходит устойчиво, то есть большим значения L соответствуют большие значения σ_0 . Величина σ_0 , необходимая для раскрытия сомкнутых трещин на длину L , находится из условия $K_I=0$ и определяется равенством:

$$\frac{\sigma_0}{\sigma_*} = \frac{1}{3\alpha - 1} \cdot \frac{\sigma_0}{\sigma_{\max}} = \frac{1}{1 - 3\alpha} \cdot \frac{A(\alpha, L/R)}{B(L/R)},$$

где числовые множители $A(\alpha, L/R)$ и $B(L/R)$ определяются в результате решения вспомогательных задач. Проведены численные расчеты, в которых при фиксированном значении α из интервала $[0,5;1]$ изменялась длина L , что позволило построить зависимости σ_0/σ_{\max} и $[\overline{v}]_A$ – безразмерного раскрытия от l , а также исключая l получить зависимости $[\overline{v}]_A$ от σ_0/σ_{\max} при различных α . Заметим, что при $l \rightarrow 0$ раскрытие $[\overline{v}]_A \rightarrow 0$, а $\sigma_0/\sigma_{\max} \rightarrow 3\alpha - 1$, то есть $\sigma_0 \rightarrow \sigma_*$. Смещение берегов трещины на контуре отверстия представляется формулой:

$$[\overline{v}]_A = [\overline{v}]_A(\alpha, \sigma_0) = \frac{[v]_A \cdot E}{4(1 - \nu^2) \cdot \sigma_{\max} \cdot R},$$

в этом случае зависимости $[\overline{v}]_A$ разделяются по α . Изначально находились зависимости $e_0(L) = \sigma_0/\sigma_{\max}$ и $[\overline{v}]_A(L)$ при различных $\alpha = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} \in [0,5;1]$.

Длину трещины невозможно контролировать, поэтому, исключив ее в исследованном диапазоне значений из полученных предварительных

зависимостей, получаем основные расчетные зависимости для $\overline{[v]}_A$. Данные зависимости могут быть аппроксимированы полиномами пятой степени с точностью до 0,99. Кривые аппроксимации изображены на рис.2.

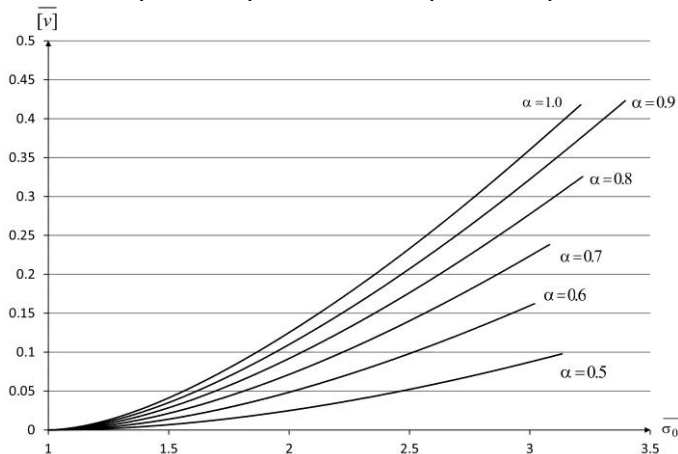


Рис. 2. Зависимость $\overline{[v]}_A$ от $\overline{\sigma}_0$

Для построенной математической модели выполнены численные расчеты, обосновывающие возможность использования измерения круговых деформаций контура скважины в ходе нагружения для определения внешних напряжений σ_{\max} , σ_{\min} . Рассмотрено влияние величины углового сектора, на котором проводятся измерения на точность предлагаемого метода. То есть, выполнены численные расчеты для определения круговых деформаций контура отверстия при нагружении стенок скважины радиальносимметричным нагружением стенок отверстия, находящегося в поле напряжений.

Третья глава посвящена решению задачи о деформации прискважинной зоны, содержащей трещину гидроразрыва, при нагружении стенок скважины направленным одноосным нагружением. Также в главе приведены результаты экспериментов направленных на получение технических характеристик устройства направленного разрыва и подтверждения численных расчетов.

При формировании на стенке скважины четырех и более трещин для избирательной оценки давлений открытия отдельных трещин на втором этапе измерения напряжений предложено применять направленное одноосное нагружение стенок скважины с помощью специальной установки направленного разрыва, препятствующей контакту рабочей жидкости со средой. Решение данной задачи с нагружением стенок скважины направленным одноосным нагружением (рис.1 б) сходно с описанным выше, отличие заключается лишь в параметрах одноосной нагрузки, которые будут входить в правую часть интегрального сингулярного уравнения (2). Выполненное

решение этой задачи показало чувствительность в определении ориентации трещин и совпадающего с ними одного из главных напряжений при использовании направленного одноосного нагружения. Подчеркнем, что предложенная математическая модель нагружения стенок скважины одноосным напряжением не учитывает всех особенностей напряженного состояния, формируемого реальным устройством направленного разрыва.

Так как предлагаемое устройство направленного разрыва отличается по принципу действия и конструкторским особенностям от традиционно используемых аналогов, то необходимо изучить его технические характеристики, эффективность взаимодействия с массивом и проанализировать поведение трещины, когда нагружение стенок скважины осуществляется этим устройством. Более того, численное моделирование выполнено для определенного типа нагрузки, прикладываемого к стенкам скважины при задании направленной одноосной нагрузки. Для изучения соответствия реально создаваемого нагружения и результатов математического моделирования необходимо выполнить ряд стендовых экспериментов с использованием устройства направленного нагружения. На втором этапе предлагаемой методики, которая, по сути, является совершенствованием метода разрыва скважинным домкратом и одиночной трещины, нагружение интервала скважины осуществляется с использованием устройства направленного разрыва. В ходе натурных экспериментов при использовании устройства направленного разрыва мы можем фиксировать давление в устройстве и объем жидкости, закачанной в устройства, раскрытие устройства у стенки скважины. Цели экспериментов:

- 1) Получить параметр передачи нагрузки от устройства направленного разрыва на стенки скважины и определить формируемое устройством напряженное состояние на стенках скважины.

- 2) Изучить возможность использования устройства направленного разрыва для определения ориентации естественных и техногенных систем трещин на основе анализа лабораторных и численных исследований. Возможность точечной оценки давления раскрытия устройством направленного разрыва позволит измерять напряженное состояние, используя давления раскрытия нескольких разноориентированных систем трещин.

- 3) Исследовать особенности поведения трещины, создаваемой устройством направленного разрыва.

По сравнению с устройством, использующим гидравлические или пневматические домкраты, предложенное устройство обладает следующими преимуществами: имеет меньшее расстояние между нагружающими плоскостями, в результате угловой сектор, в котором предположительно происходит инициация трещины, уменьшается, эффективно работает в условиях скважин с кривым профилем стенок и наличием каверн.

В ходе экспериментов устройство направленного разрыва помещалось на стенд, моделирующий скважину с трещиной при наличии внешнего одноосного

нагружения. Результаты экспериментов по определению давления, необходимого для раскрытия трещины на контуре отверстия при различных значениях внешней нагрузки и пространственном расположении устройства, (отклонении от горизонтального расположения) позволили получить параметр передачи нагрузки от устройства направленного разрыва на стенки скважины. Получен коэффициент корреляции между давлением в устройстве и величиной нагрузки, передаваемой внешними нагружающими плоскостями на стенку скважины, который составляет 0,625. Для стандартного скважинного домкрата, использующего гидравлические цилиндры в качестве нагружающего инструмента, эффективность передачи нагрузки составляет 0,25. Для оценки точности определения ориентации трещин предлагаемым устройством при условии последовательных разнонаправленных циклов нагружения в одном и том же интервале скважины выполнен ряд стендовых испытаний. Возможность точечного измерения давления повторного раскрытия определенной системы трещин позволит использовать предлагаемый алгоритм оценки напряжений, требующий информацию о давлениях раскрытия нескольких различно ориентированных систем трещин. Схема выполнения эксперимента следующая: устройство распорного нагружения помещается в скважину и нагнетанием жидкости в его гидравлическую систему определяется давление раскрытия трещины на стенки скважины. Далее устройство поворачивается на угол 5° и эксперимент повторяется. Угол поворота устройства 5° выбран, исходя из результатов численного моделирования. Результаты циклов экспериментов хорошо согласуются с результатами численного моделирования. На рис.3 представлены экспериментальные результаты измерения давления повторного раскрытия разноориентированных систем трещин при последовательном вращении устройства направленного разрыва. Как показывают результаты стендовых экспериментов, устройство направленного разрыва позволяет измерять давления раскрытия существующих систем трещин с точностью до 0,1 МПа (1 атм.)– 1% от измеряемого давления раскрытия трещины.



Рис. 3. Зависимость давления раскрытия трещины от угла поворота устройства

Из результатов экспериментов видно, что с использованием предложенного устройства удается определить ориентацию трещин с точностью до 5°. Таким образом, устройство направленного нагружения может быть успешно использовано для определения ориентации систем естественных и техногенных трещин. В результате ряда стендовых испытаний устройства направленного одноосного нагружения получены параметры, необходимые для использования результатов проведенного численного моделирования при создании законченного алгоритма оценки напряженного состояния массива горных пород.

В четвертой главе представлены методики оценки компонентов напряженного состояния массива горных пород по нескольким давлениям раскрытия разноориентированных систем трещин при использовании направленно одноосного нагружения стенок скважины и деформационного поведения системы «скважина – трещина гидроразрыва» при радиально симметричном нагружении. Приведено описание и технологические схемы оборудования, предлагаемого для проведения измерений напряженного состояния массива горных пород по предлагаемым методикам.

Предлагаемые методики измерения величин напряжений, действующих во вмещающем массиве горных пород, предполагают последовательность действий отраженную на рис. 4.

Предложен алгоритм определения параметров внешнего поля, основанный на полученной расчетной зависимости $[\bar{v}]_A$ от $\bar{\sigma}_0$. Считаем, что данные полевых экспериментов имеют вид диаграмм «давление-объем». Полагая, что h - длина зонда с изолирующей оболочкой, можем записать объем рабочей жидкости в цилиндре высотой h :

$$V_0 = \pi R^2 h \left\{ 1 + \frac{2\sigma_{\max}}{E} \left[(1+\nu) \cdot \bar{\sigma}_0 \cdot (3\alpha - 1) - (1-\nu^2) \cdot (1+\alpha) + \frac{4}{\pi} \cdot (1-\nu^2) \cdot [\bar{v}] \right] \right\}.$$

Общий вид зависимости V от $\bar{\sigma}_0$ при переходе от объема к изменению площади поперечного сечения изображен на рис.5.

На участке OA происходит заполнение устройства жидкостью, следовательно, объем V_0 при $\bar{\sigma}_0 \approx 0$ будет

$$V_0 = \pi R^2 h \left[1 - \frac{2\sigma_{\max}}{E} \cdot (1-\nu^2) \cdot (1+\alpha) \right]$$

Рассмотрим приращение объема $\Delta V = \Delta V_1 + \Delta V_m$, получаемого в результате действия давления $\bar{\sigma}_0$ (ΔV_1 - линия AD) и раскрытия трещин (ΔV_m при $\bar{\sigma}_0 > 1$)

$$\begin{aligned} \Delta V &= \Delta V_1 + \Delta V_m = \pi R^2 h \frac{2\sigma_{\max}}{E} \cdot (1+\nu) \left[\bar{\sigma}_0 \cdot (3\alpha - 1) + \frac{4 \cdot (1-\nu)}{\pi} \cdot [\bar{v}] \right] = \\ &= A_0 \cdot \sigma_s \left[\bar{\sigma}_0 + \frac{4 \cdot (1-\nu)}{\pi(3\alpha - 1)} \cdot [\bar{v}] \right] \end{aligned} \quad (3)$$

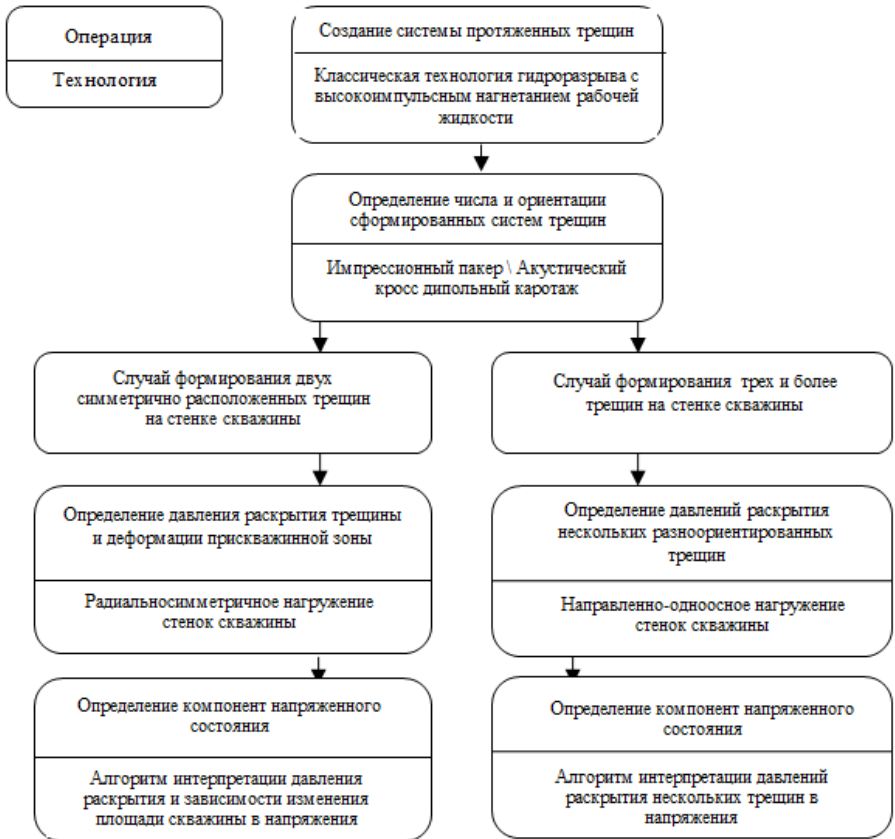


Рис. 4. Алгоритм действий при измерении напряжений

где $A_0 = \pi R^2 h \frac{2}{E} \cdot (1 + \nu)$ - угловой коэффициент прямой AD. Наклон этой прямой определяется уверенно. Так при $h = 100$ см; $E = 3 \cdot 10^4$ МПа; $\nu = 0,3$; $R = 0,07$ м, измеряя объем в см³, а напряжения в МПа, получаем β - угол наклона прямой AD к горизонтальной оси равным $\approx 53^\circ$. Так как зависимости $[\bar{v}]_A(\alpha, \bar{\sigma}_0)$ достаточно хорошо разделяются при различных α (рис. 2), то и приращения ΔV_m также должны разделяться по α . Это позволяет найти α и $\sigma_* = \sigma_{\max}(3\alpha - 1)$ по следующему алгоритму.

Рассмотрим полученную в результате проведения эксперимента зависимость $\Delta S(\sigma_0)$ – рис.5, т.к. угол $\beta \approx 53^\circ$, то можно выделить ΔS от (σ_0) при $\sigma_0 > \sigma_*$. На рисунке представлены приращения площади отверстия, которые могут быть получены из экспериментальных данных.

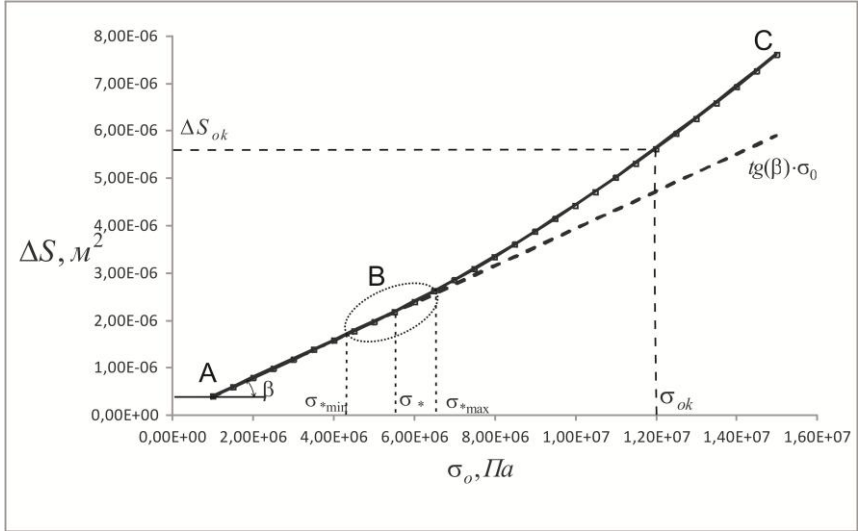


Рис. 5. Предполагаемый вид экспериментальных диаграмм

Истинное значение σ_* не выделяется, но можно указать интервал $(\sigma_{*1}, \sigma_{*2})$, в котором σ_* содержится. Выберем $\sigma_{0i} > \sigma_*$ ($i = \overline{1, k}$) и зафиксируем с определенной точностью экспериментальные величины $\Delta V_0(\sigma_{0i})$ и $\Delta V_{0m}(\sigma_{0i})$. Будем, используя (4) и (5), сравнивать их с расчетными ΔV и ΔV_r , вычисленными в выбранных точках $\overline{\sigma_{0i}} = \sigma_{0i} / \sigma_*$. В качестве истинного σ_* принимается то, при котором функция:

$$F_1(\alpha, \sigma_*) = \sum_{i=1}^k \left[\frac{\Delta V_m(\overline{\sigma_{0k}})}{\Delta V_m(\overline{\sigma_{0i}})} - \frac{\Delta V_{0m}(\sigma_{0k})}{\Delta V_{0m}(\sigma_{0i})} \right]^2 \quad (4)$$

достигает минимума в области, где $\alpha \in [0.5; 1]$ и $\sigma_* \in [\sigma_{*1}; \sigma_{*2}]$. Используя найденное σ_* , вычисляется квадратичное отклонение:

$$F_2(\alpha, \sigma_*) = \sum_{i=1}^k \left[\Delta V(\overline{\sigma_{0i}}) - \Delta V_0(\sigma_{0i}) \right]^2, \quad (5)$$

при различных α . В качестве истинного α выбирается значение, при котором эта функция имеет минимум.

Проведены численные расчеты при следующих значениях параметров: $E=3 \cdot 10^4$ МПа; $U=0,3$; $R=0,07$ м; $\sigma_{\min}=20$ МПа. Выполненные расчеты показали,

что если экспериментальные значения $\Delta V_0(\sigma_i)$ регистрируется с точностью ~5-10%, то σ_* определяется с точностью 6% при $\sigma_*=5$ МПа и 2,5% при $\sigma_*=20$ МПа. Если $\alpha \leq 0,8$, то оно находится однозначно, а при $\alpha=1$ и 0,9 получаются значения 0,9 и 0,8, соответственно, т.е. здесь ошибка в определении α порядка 10%. Зная α и σ_* , находим параметры внешнего поля σ_{\max} и σ_{\min} . Благодаря особенности алгоритма измерения и самого метода, фактически измеряемой величиной является отношение минимального и максимального напряжений в массиве. В классической методике гидроразрыва отношение напряжений определяется только после нахождения σ_{\min} и σ_{\max} и, следовательно, включает погрешности их измерения.

Практическая реализация методики с использованием устройства направленного нагружения включает создание в исследуемом интервале скважины, сложенной высокопроницаемыми горными породами, двух ортогональных систем протяженных трещин. Предполагается, что трещины формируются первоначально в направлении действия максимального сжимающего напряжения, а вторичные – трещины в направлении минимального сжатия, аналогично методу двойной трещины. Отличие от метода двойной трещины в данном случае заключается в том, что трещины формируются предварительно с использованием высокоинтенсивного нагружения интервала скважины рабочей жидкостью. После создания протяженных трещин в интервал скважины помещается устройство направленного одноосного нагружения. Предполагается, что трещины обладают достаточно большой длиной, чтобы в процессе нагружения этим устройством они только раскрывались, но не увеличивали свою длину. Регистрируемым параметром являются диаграммы «давление - объем» или «смещение - давление» при условии использования дополнительных датчиков, размещенных на корпусе устройства. На полученных диаграммах регистрируется давление $P_{r1,2}$. Сначала регистрируется давление раскрытия первой системы трещин P_{r1} . Далее вращением устройства определяется давление раскрытия вторичной системы трещин P_{r2} (Рис.3).

Определение направления максимального сжатия в данном случае заключается в поиске азимута, соответствующего наименьшему давлению раскрытия на контуре скважины. Далее, используя формулу,

$$P_{rj} = 3\sigma_{\min} - \sigma_{\max} + 4(\sigma_{\max} - \sigma_{\min}) \sin^2(\theta - \varphi),$$

где $P_{r1,2}$ - давление раскрытия первой и второй систем трещин (МПа), θ - направление трещины ($^\circ$), φ - направление максимального сжимающего напряжения ($^\circ$), σ_{\min} и σ_{\max} - минимальное и максимальное напряжения (МПа), действующие в массиве, находим значения максимального и минимального сжимающих напряжений в массиве.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертационная работа является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение задачи обоснования способа оценки компонент

напряженного состояния массива горных пород по деформациям системы «скважина – трещина гидроразрыва», имеющей существенное значение для отрасли наук о Земле.

Основные результаты выполненных исследований:

1. Установлено, что приращение площади поперечного сечения скважины, вызванное раскрытием трещины, влиянием внешних напряжений и давления в отверстии, имеют один порядок величины.

2. Получена зависимость раскрытия трещины от внешнего поля напряжений и параметров нагружения, которая выражается тождеством, содержащим полиномы пятого порядка с характерными коэффициентами. Значения коэффициентов зависят от отношения минимального и максимального напряжений, действующих в массиве.

3. Показано, что отклонение ориентации трещины от направления максимального сжатия в пределах $\pm 10^\circ$ и изменение модуля Юнга и коэффициента Пуассона в интервале $\pm 10\%$ не вносит существенной погрешности в точность оценки раскрытия трещины на контуре отверстия.

4. Показано, что измерения касательных деформаций на стенке скважины позволяют повысить точность оценки давления повторного раскрытия трещины и получить зависимость раскрытия трещины от давления, которое благодаря использованию полученной математической зависимости дает оценку соотношения величин максимального и минимального напряжений в массиве.

5. Установлено, что использование направленного одноосного нагружения в скважине позволяет определить давления раскрытия каждой трещины, идущей от контура скважины, в поле сжатия.

6. Получены характерные параметры направленного нагружения, позволяющие использовать при измерении напряжений устройством направленного разрыва результаты выполненного численного моделирования. Эффективность передачи нагрузки на стенки скважины составляет более 60%.

7. Предложен метод измерения напряженного состояния, повышающий точность измерения отношения минимального и максимального напряжений, который позволяет оценивать напряженное состояние массива проницаемых горных пород без использования в измерительной схеме дополнительных предположений и допущений.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах.

в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. **Павлов, В.А.** Развитие метода гидроразрыва применительно к оценке напряженного состояния проницаемых горных пород / В.А. Павлов, А.В. Янкайте, С.В. Сердюков // Горный информационно - аналитический бюллетень– 2009- №12.

2. 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 // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых – Новосибирск, 2011 - №3.
3. Мартынюк, П.А. Комплексное использование гидроразрыва и деформационных измерений в оценке напряженного состояния массива проницаемых горных пород / П.А. Мартынюк, **В.А. Павлов**, С.В. Сердюков // Горный информационно - аналитический бюллетень– 2013- №2.
4. **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– 2013- №12.

В прочих изданиях:

5. **Павлов, В.А.** Измерение напряжений в массиве и определение ориентации систем трещин методом направленного гидроразрыва/ В.А. Павлов // Материалы XLVIII Международная студенческая конференция “Студент и научно – технический прогресс”: Геология // Новосиб. гос. ун-т. Новосибирск, 2010. – С. 19.
6. **Павлов, В.А.** Совершенствование технологии направленного гидроразрыва применительно к измерению напряженного состояния массива горных пород / В.А. Павлов, С.В. Сердюков // Сборник материалов VI Международный научный конгресс и выставка “Гео – Сибирь - 2010”, Новосибирск. – Новосибирск: СГГА, 2010. –С. 142-146.
7. **Павлов, В.А.** Методы оценки напряженного состояния глубокозалегающего проницаемого флюидонасыщенного пласта/ В.А. Павлов // Материалы 6 международной научной школы молодых ученых и специалистов «Проблемы освоения недр в 21 веке глазами молодых», г. Москва, 16-20 ноября 2009 г. – ИПКОН РАН, 2009. – С. 99-102.
8. Павлов, В.А. Моделирование процесса деформирования системы «скважина – трещины гидроразрыва» в задаче оценки напряженного состояния массива горных пород/ С.В. Сердюков, П.А. Мартынюк, **В.А. Павлов** // Материалы 1-ой международной конференции “ММГ-2008” // <http://www.sccc.ru/Conf/mmg2008/abstracts.html> (Опубликованы на CD носителе).
9. **Pavlov, V.A.** The Hydraulic Fracture Opening Pressure Multiple Test for the Stress State Measurement in Permeable Rock / V.A. Pavlov, P.A. Martynuk, S.V. Serdyukov // Rock Stress and Earthquakes – Xie (ed.), Taylor & Francis Group, London, 2010, P.167-172.

10. **Павлов, В.А.** К вопросу совершенствования технологии мини-гидроразрыва для оценки напряженного состояния проницаемых нефтенасыщенных пластов/ В.А. Павлов // Труды XIV Международного симпозиума имени академика М. А. Усова студентов и молодых ученых// Издательство ТПУ: Томск. – 2010. – С. 317-318.
11. **Павлов, В.А.** Распределение напряжений в области трещины при проведении микро-гидроразрыва / В.А. Павлов, П.А. Мартынюк, С.В. Сердюков // Сборник материалов VII Международный научный конгресс и выставка “Гео – Сибирь - 2011”, Новосибирск. – Новосибирск: СГГА, 2011. – С. 142-146.
12. **Pavlov, V.A.** The method of rock massive stress state estimation by deformational characteristics of near-the borehole zone which contains the hydraulic fracture / V.A. Pavlov, S.V. Serdyukov, P.A. Martynuk // 45th US Rock Mechanics / Geomechanics Symposium held in San Francisco, CA, June 26–29, 2011. – P. 511-516.
13. **Pavlov, V.A.** The borehole method of rock massive stress state estimation / V.A. Pavlov, P.A. Martynuk, S.V. Serdyukov // International Conference on Mechanical, Industrial, and Manufacturing Engineering (MIME 2011), Australia, Melbourne, 15-16 January, 2011 - P.453-457.
14. **Павлов, В.А.** Сравнительный анализ существующих технологий оценки напряженного состояния массива горных пород на базе направленного гидроразрыва // Сборник научных трудов (по материалам Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых) – Пермский гос.ун-т., Пермь, 2011 - стр. 333-334.

Подписано к печати ____ апреля 2014 г.

Формат 60×84 1/6. Бумага офсетная. Отпечатано на ризографе.

Печ. л. 1,2. Тираж 100 экз. Заказ № _____

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования «Кузбасский государственный
технический университет имени Т. Ф. Горбачева»

650000, Кемерово, ул. Весенняя, 28.

Типография Федерального государственного бюджетного образовательного
учреждения высшего профессионального образования «Кузбасский
государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева»

650000, Кемерово, ул. Д. Бедного, 4а.