

На правах рукописи



Тащиенко Александр Леонидович

**ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ УСТРОЙСТВА ДЛЯ
ПОИНТЕРВАЛЬНОГО ГИДРОРАЗРЫВА ПРИ ПЛАСТОВОЙ
ДЕГАЗАЦИИ УГЛЯ**

Специальность: 05.05.06 – «Горные машины»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Кемерово – 2020

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева»

Научный руководитель:

Клишин Владимир Иванович,
доктор технических наук, профессор,
член-корреспондент РАН

Официальные оппоненты:

Ордин Александр Александрович,
доктор технических наук, старший
научный сотрудник, главный научный
сотрудник лаборатории подземной
разработки угольных месторождений
ФГБУН «Институт горного дела им.
Н.А. Чинакала» Сибирского отделения
Российской академии наук

Ушаков Сергей Юрьевич,
кандидат технических наук, филиал
ООО УК «ПМХ-Уголь», технический
директор

Ведущая организация:

Федеральное государственное
бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Сибирский государственный
индустриальный университет»

Защита состоится «14» января 2021 г. в 10:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.102.01 на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева» по адресу: 650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28. Факс (3842) 58-33-80, e-mail: rector@kuzstu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева» и на сайте <http://science.kuzstu.ru/wp-content/docs/OAD/Soresearchers/2020/tac/Dissertation.pdf>

Автореферат разослан

«__» _____ 2020 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Семыкина Ирина Юрьевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Энергетической стратегией России на период до 2035 г. в частности предусматривается разработка новых технологий и оборудования для эффективной дегазации угольных пластов. Вследствие малого объема дегазационных работ и недостаточной их эффективности на многих газообильных шахтах России сохраняется газовый барьер, препятствующий достижению высоких скоростей проведения выработок и больших нагрузок на очистные забои, что существенно снижает безопасность и эффективность ведения подземных горных работ.

В процессе дегазации ключевую роль играет техногенное воздействие на углепородный массив с целью развития его трещиноватости, что способствует выходу из угольного вещества связанного метана. Для этого используются скважины, пробуренные с поверхности, что требует специального оборудования с высокой трудоемкостью и стоимостью проведения работ. Наиболее распространенным методом является бурение дегазационных скважин из подготовительных выработок с последующим продольным вертикальным или горизонтальным гидроразрывом относительно оси скважин.

Одним из основных направлений решения поставленной задачи является разработка и промышленное освоение способов интенсификации газоотдачи угольных пластов. В этой связи перспективным является метод поинтервального гидроразрыва, поперечного относительно оси скважины, пробуренной параллельно очистному забою. Увеличение проницаемости пласта достигается за счет образования многократных искусственных трещин, пересекающих естественную трещиноватость и развивающихся в направлении движения очистного забоя с последующем раскрытием в зоне повышенного опорного давления.

Необходимость представленной работы обусловлена требованиями создания специального оборудования, способного работать в необсаженных скважинах большого и переменного диаметра для поинтервального гидроразрыва при пластовой дегазации угольного пласта. Поэтому обоснование и разработка параметров технического устройства, обеспечивающего заданное направление трещин гидроразрыва, является актуальной задачей.

Степень разработанности. Разработкой способов и средств инициирования процессов дегазации широко занимаются как у нас в стране, так и за рубежом. Большой вклад внесли ведущие ученые: А.Т. Айруни, А.Д. Алексеев, В.А. Бобин, А.С. Бурчаков, Ю.Ф. Васючков, А.Б. Ефременков, В.С. Забурдяев, Г.Г. Каркашадзе, К.С. Коликов, В.И. Клишин, В.В. Мельник, О.Н. Малинникова, Н.В. Ножкин, Г.Я. Полевщиков, Л.А. Пучков, А.Д. Рубан, И.В. Сергеев, С.В. Сердюков, С.В. Сластунов, О.В. Тайлаков, В.В. Ходот, С.А. Христианович, С.Ю. Ушаков, В.Н. Фрянов, О.И. Чернов, И.Л. Эттингер, С.А. Ярунин и др. По результатам работ установлено, что в настоящее время отсутствуют надежные устройства реализации технологий интенсификации процессов подземной дегазации поинтервальным гидроразрывом через

дегазационные скважины большого диаметра, пробуренные из подготовительных выработок. Реализация этих работ приведет не только к увеличению производительности, но и к повышению безопасности ведения подземных горных работ.

Целью работы является обоснование параметров устройства для поинтервального гидроразрыва при пластовой дегазации угля, обеспечивающего повышение безопасности и производительности подземной добычи.

Идея работы заключается в учете особенностей обжатия массива вокруг скважины упругими элементами и радиального их перемещения при создании специального оборудования для реализации поинтервального гидроразрыва.

Объектом исследования является устройство для реализации поинтервального гидроразрыва.

Предметом исследования являются режимы и параметры работы устройства для интенсификации дегазации угольных пластов методом поинтервального гидроразрыва поперек оси скважины.

Задачи исследования:

- разработать устройство поинтервального гидроразрыва для работы в необсаженных скважинах переменного диаметра и исследовать его конструктивные, кинематические и силовые параметры работы в лабораторных условиях;

- исследовать условие возникновения поперечных трещин в необсаженной скважине за счет растягивающих напряжений при работе устройства поинтервального гидроразрыва в виде последовательно соединённых пакеров;

- изучить в производственных условиях работу устройства поинтервального гидроразрыва в необсаженной угольной скважине и оценить развитие образующихся трещин.

Научная новизна:

- установлены параметры устройства, обеспечивающие поинтервальный гидроразрыв в необсаженной скважине;

- определено условие возникновения поперечной трещины за счет растягивающих напряжений в скважине, созданных устройством для поинтервального гидроразрыва;

- впервые в шахтных условиях устройством для поинтервального гидроразрыва получены поперечные трещины гидроразрыва относительно оси скважины, пробуренной параллельно очистному забою в угольном пласте, повышающие его газоотдачу.

Теоретическая и практическая значимость работы.

Научное значение работы заключается в установлении механизма появления дополнительных касательных напряжений на стенках скважины при подаче давления жидкости в последовательно соединённые упругие герметизирующие элементы, что обеспечивает в ней развитие области неупругих деформаций, приводящих к возникновению вертикальных трещин, что подтверждается результатами физических и численных экспериментов.

Практическая ценность работы состоит в том, что результаты выполненных исследований позволяют обосновать параметры устройства поинтервального гидроразрыва, обеспечивающие образование поперечной относительно оси скважины трещины для пластовой дегазации угля и делают возможным подключение устройства к существующим шахтным сетям.

Отличие от ранее выполненных работ заключается в обосновании и разработке устройства для поинтервального гидроразрыва угольного пласта при пластовой дегазации угля, построении модели и проведении численных и шахтных исследований возникновения поперечной трещины за счет растягивающих напряжений в массиве.

Методология и методы исследования включают анализ научно-информационных источников, патентов устройств для поинтервального гидроразрыва, методов интенсификации дегазации угольных пластов с поверхности и из подземных горных выработок; математическое моделирование работы устройства поинтервального гидроразрыва в необсаженной скважине для обоснования появления растягивающих напряжений на стенках скважины; лабораторные и натурные испытания экспериментальных образцов устройства поинтервального гидроразрыва с использованием сейсмоакустических исследований.

Научные положения, выносимые на защиту:

- двухсторонний пакер с длиной упруго расширяющихся элементов 1300 мм и установленным между ними клапаном диаметром 300 мм с возможностью осевого перемещения до 30 мм обеспечивает безаварийную работу при фиксации пакера давлением 1,5-2,0 МПа с последующим повышением до 5,0 МПа в угольных скважинах диаметром до 105 мм;

- устройство поинтервального гидроразрыва угольного пласта в виде последовательно соединённых упругих герметизирующих элементов создает дополнительные касательные напряжения на стенках скважины, что обеспечивает в ней развитие области неупругих деформаций, приводящих к возникновению поперечных трещин;

- использование устройства для поинтервального гидроразрыва угольного пласта вызывает образование в нем поперечных трещин гидроразрыва относительно оси скважины и увеличению на порядок его газоотдачи, что подтверждается результатами сейсмоакустического профилирования «in situ» до и после гидродинамического воздействия и скачкообразным снижением давления жидкости в системе автономного манометра.

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается результатами лабораторных и шахтных исследований режимов работы устройства поинтервального гидроразрыва, корректностью допущений, принятых при решении задач, применением в экспериментах современной аппаратуры и апробированных шахтных методов определения параметров воздействия.

Личный вклад автора заключается в:

- анализе существующих методов и устройств реализации поинтервального гидроразрыва угольного пласта из скважин, пробуренных из подготовительных выработок;
- обосновании требуемых параметров для построения математической модели взаимодействия устройства гидроразрыва с необсаженной скважиной, проведении численных экспериментов;
- разработке устройства для поинтервального гидроразрыва, стендовых и полноразмерных шахтных испытаниях экспериментального образца оборудования.

Реализация работы. Основные положения и результаты исследований использовались при разработке устройства поинтервального гидроразрыва для пластовой дегазации угля и методических рекомендаций: «Методические рекомендации на выполнение работ по поинтервальному гидроразрыву пласта 24 в дегазационных скважинах выемочного столба лавы № 24-62 ПЕ «Шахта «им. С.М. Кирова» для интенсификации дегазации с целью обеспечения безопасной и стабильной работы очистного забоя». Устройство гидроразрыва было успешно испытано в условиях шахты через скважины, предварительно пробуренные из подготовительных выработок. Результаты испытаний доказали высокую эффективность проводимых мероприятий по поинтервальному гидроразрыву.

Апробация работы. Основное содержание работы и отдельные её положения докладывались и получили одобрение на научно-практических конференциях: международном научном симпозиуме «Неделя горняка» (Москва, 2018 г.); Наукоемкие технологии разработки и использования минеральных ресурсов (Новокузнецк, 2018-2019 гг.); Проблемы развития горных наук и горнодобывающей промышленности (Новосибирск, 2018-2019 гг.); семинарах АО «СУЭК-Кузбасс» (г. Ленинск-Кузнецкий, 2018 г.)

Публикации. Основные научные результаты работы изложены в 13 публикациях, в том числе 4 в изданиях, рекомендованных ВАК РФ; 5 в изданиях, индексируемых в базах Web Of Science и Scopus; подан 1 патент РФ на изобретение.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и одного приложения. Работа содержит 134 страницы машинописного текста, включая 66 рисунков, 1 таблицу, список литературы из 166 наименований и одно приложение.

Автор выражает глубокую благодарность проф., д.т.н. Тайлакову О.В., к.т.н. Опруку Г.Ю., к.т.н. Клишину С.В. за постоянное внимание, консультации, поддержку работы и практическую помощь при проведении исследований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении даны общая характеристика работы, показана актуальность обоснования параметров устройств для поинтервального гидроразрыва при пластовой дегазации угля, сформулированы цель и задачи исследований, а также идея работы, защищаемые положения, научная новизна и практическая значимость.

В первой главе рассмотрены существующие способы активного воздействия на угольный пласт с целью интенсификации метаноотдачи и извлечения метана. Для повышения эффективности предварительной дегазации неразгруженных пластов угля до начала очистных работ и текущей дегазации разработан принципиально новый способ получения максимального дебита скважины – способ направленного поинтервального гидроразрыва дегазационной скважины. Для осуществления метода разработаны специальные технические средства. С механической точки зрения направленный поинтервальный гидроразрыв приводит к образованию дренажных каналов высокой проводимости и протяженности в окрестности скважин за счет раскрытия естественных нарушений при распространении новых трещин.

Анализ известных конструкций устройств для поинтервального гидроразрыва при пластовой дегазации угля показал, что в настоящее время нет устройств способных работать в необсаженных скважинах большого (более 76 мм) и переменного диаметра. В настоящее время нет информации о влиянии параметров устройств гидроразрыва на характер образования и направления развития трещин гидроразрыва. Трещины развиваются в энергетически выгодном направлении, которое зависит от напряженного состояния массива и его трещиноватости. Учитывая, что под действием горного давления существующие наиболее развитые трещины по напластованию остаются прижатыми, стоит задача создания трещин гидроразрыва, ориентированных поперек скважины (вкрест простирания угольного пласта). Предполагается, что в такие трещины газ подпитывается из трещин напластования. Кроме того, под действием горного давления происходит раскрытие вновь созданных трещин.

Трудности заключаются в создании направленных трещин гидроразрыва, ориентированных поперек скважин, пробуренных параллельно очистному забою. Это наиболее выгодное направление трещин навстречу очистному забою, а их многократное создание с высокой плотностью в одной скважине позволяет в сотни раз увеличить площадь дренирования газа. С механической точки зрения наилучший результат достигается при перпендикулярном пересечении естественной трещиноватости развиваемой трещиной, когда возникает их связь с системой естественных трещин, не вскрытых скважиной, и при максимальной изоляции полости гидроразрыва. Австралийскими специалистами в условиях стендовых исследований было показано, что определяющими являются размеры изолированной полости L между пакерами и диаметром скважины d : при $L < 2d$ образуется единичная поперечная

трещина; при $2d < L < 4d$ образуются множественные трещины различного типа; при $L > 4d$ образуется единичная продольная трещина.

При осуществлении поинтервального гидроразрыва в угольном пласте при бурении возникает изменчивость сечения дегазационных скважин и отклонения их сечения от круговой формы, в том числе по причине изгиба штанги при бурении. Требуется создание надежных устройств для реализации метода поинтервального гидроразрыва угольного пласта.

Во второй главе приведены результаты и анализ экспериментальных исследований способа поинтервального гидроразрыва для решения ряда технологических задач. Способ является развитием метода направленного гидроразрыва прочных пород для управления горным давлением в очистных и подготовительных забоях, широко внедряемом на шахтах Кузбасса, а также метода разрушения прочного прослойка в угольном пласте. Однако их применение ограничено размерами шнура диаметром 45 мм.

Создание устройства, способного работать в скважинах диаметром более 76 мм, позволит решить проблему реализации способа поинтервального гидроразрыва через существующие дегазационные скважины, пробуренные из подготовительных выработок угольных шахт, и повысить газоотдающую способность неразгруженных угольных пластов. Устройство подается в скважину (рисунок 1) и при подаче жидкости происходит герметизация области гидроразрыва двумя связанными между собой через клапан пакерами за счет увеличения внешнего диаметра упруго расширяющихся пакерных оболочек. При дальнейшем увеличении давления происходит срабатывание клапана, установленного в корпусе между двумя пакерами, что приводит к созданию одной или нескольких поперечных трещин гидроразрыва. В дальнейшем после сброса давления устройство возвращается в исходное положение и передвигается для следующего гидроразрыва или извлекается из скважины.

Распор пакеров сжимает горизонтальные трещины и исключает разрыв пласта по этим трещинам на более удаленное расстояние, где вертикальные трещины пересекают горизонтальные и в них под давлением проникает жидкость, раскрывая существующие трещины в режиме гидрорасчленения (микроразрывы).

Известно, что с увеличением опорного давления впереди движущегося очистного забоя фильтрационная способность кливажных трещин, распространяющихся в большинстве своем по слоистости, уменьшается. Однако в случае реализации поинтервального гидроразрыва вкрест скважины, пробуренной параллельно очистному забою, при его приближении происходит дальнейшее раскрытие искусственно созданных трещин для выхода оставшегося метана. Новые образованные вертикальные трещины под действием горного давления не схлопываются, а развиваются (сохраняются). Возникает наведенная технологическая трещиноватость в пласте, в том числе за счет раскрытия под давлением существующих трещин. Механизм поинтервального гидроразрыва обеспечивает увеличение трещиноватости и газопроницаемости угольного пласта, а дальнейшее использование непосредственно энергии горного давления сохраняет их раскрытое состояние.

Поэтому данный метод повышения газоотдачи угольных пластов является простым и нетрудоемким, отличается низкой энергоемкостью и высокой эффективностью.

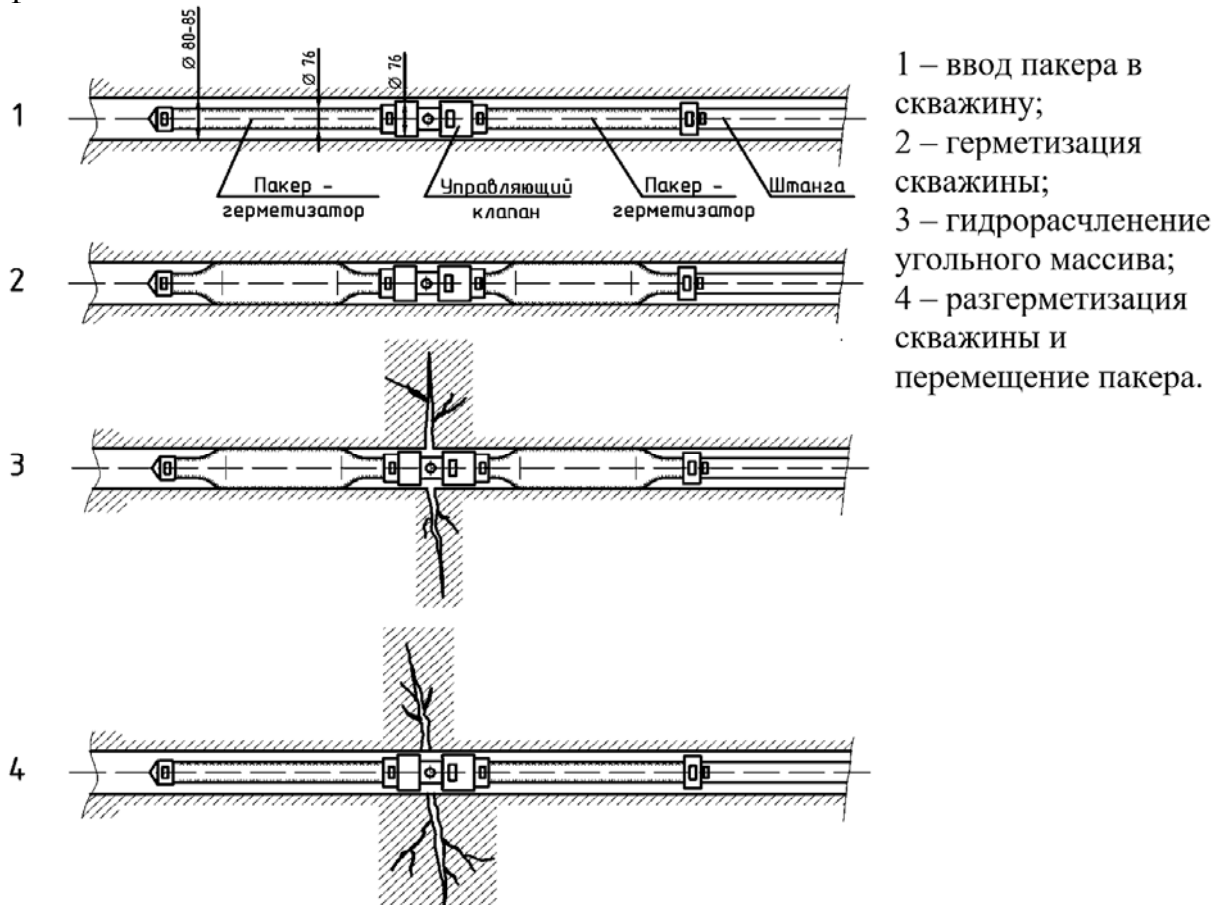


Рисунок 1 – Технологическая схема реализации поинтервального гидроразрыва угольного массива

В технологии поинтервального гидроразрыва угольного пласта рассмотрены условия возникновения поперечных трещин гидроразрыва. Этому могут способствовать предварительно созданные инициирующие трещины. Предложено аппроксимировать инициирующую трещину (щель) длины h_{cr} в виде сходящихся под заданным углом отрезков и дуги окружности с радиусом r_{cr} , как показано на рисунке 2. В качестве модели деформирования и потери устойчивости материала выбрана популярная упругопластическая модель Кулона-Мора, описывающая зависимость касательных напряжений материала от величины приложенных нормальных напряжений. В ее основе лежит гипотеза о зависимости предельных касательных напряжений от среднего нормального напряжения, а также предположение о том, что данная зависимость обусловлена внутренним трением в твердом теле. Данная теория широко используется в горном деле применительно к связным горным породам и требует определения четырех расчетных параметров: модуля упругости, коэффициента Пуассона, сцепления и угла внутреннего трения.

Задача решалась численно методом конечных элементов в квазистатической постановке с пошаговым решением по параметрам

нагружения. В процессе численного счета рассчитывались зоны пластических деформаций, оказывающие влияние на дальнейшее состояние образца.

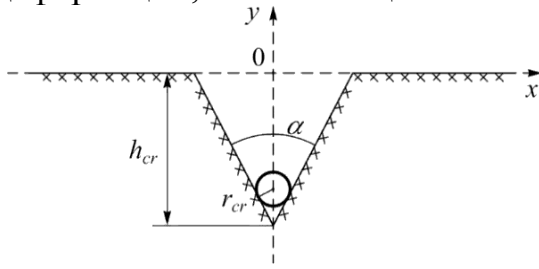


Рисунок 2 – Сглаживание инициирующей трещины дугой окружности

Основные уравнения плоской задачи теории упругости выглядят следующим образом. В прямоугольной декартовой системе координат $u(x, y)$ и $v(x, y)$ – смещения в точке (x, y) ; σ_{xx} , σ_{yy} и τ_{xy} – напряжения; а ε_{xx} , ε_{yy} и γ_{xy} – деформации. Пусть для исследуемого материала E и ν – модуль упругости и коэффициент Пуассона соответственно. Уравнения равновесия запишутся следующим образом:

$$\begin{aligned}\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} &= 0, \\ \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} &= 0.\end{aligned}$$

Зависимость между перемещениями и деформациями (уравнения Коши):

$$\varepsilon_{xx} = \frac{\partial u}{\partial x}, \varepsilon_{yy} = \frac{\partial v}{\partial y}, \gamma_{xy} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right).$$

Условия совместности деформаций

$$\frac{\partial^2 \varepsilon_{xx}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_{yy}}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 \gamma_{xy}}{\partial x \partial y} = 0.$$

Закон Гука:

$$\begin{aligned}\sigma_{xx} &= \frac{E}{1-\nu^2} \varepsilon_{xx} + \frac{E\nu}{1-\nu^2} \varepsilon_{yy}, \\ \sigma_{yy} &= \frac{E}{1-\nu^2} \varepsilon_{yy} + \frac{E\nu}{1-\nu^2} \varepsilon_{xx}, \\ \tau_{xy} &= \frac{1}{2} \frac{E}{1+\nu} \gamma_{xy}.\end{aligned}$$

Условие для перехода от упругого поведения к пластическому задается функцией текучести, которой в случае использования критерия Кулона-Мора соответствует выражение:

$$|\tau| + \sigma \tan \varphi - C = 0.$$

Здесь $|\tau|$ – величина касательных напряжений; σ – величина нормальных напряжений; φ – угол внутреннего трения; C – сцепление.

В терминах кругов Мора данный критерий может быть записан как

$$\frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_2) + \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_2) \sin \varphi - C \cos \varphi = 0,$$

где σ_1 и σ_2 – максимальное и минимальное главные напряжения соответственно.

Необходимыми параметрами материала для расчета задач являются сцепление C и угол внутреннего трения φ . Они не используются при расчете

напряжений и деформаций, но необходимы для расчета зон пластического течения, в которых значения напряжений превысили критические значения и закон Гука не выполняется.

В данном исследовании физические параметры модели приняты следующие: модуль упругости $E = 5 \cdot 10^3$ МПа; коэффициент Пуассона $\nu = 0.16$; плотность $\rho = 2400$ кг/м³; сцепление $C = 1.0$ МПа; угол внутреннего трения $\varphi = 20^\circ$. Ширина нагружаемого образца 1.6 м, высота – 1.0 м. Расстояние между пакерами составило 0.4 м. Глубина щели $h_{cr} = 0.04$ м, радиус закругления $r_{cr} = 0.001$ м. Параметром нагружения в численном счете является давление в межпакерном пространстве P , которое изменялось от 0 до 20 МПа.

Результаты численного расчета напряженно-деформированного состояния образца с инициирующей трещиной представлены на рисунке 3. Темным цветом показан процесс последовательного развития зон пластических деформаций с увеличением параметра нагружения (области ненулевых значений пластических деформаций). Видно, что потеря несущей способности материала реализуется как в кончике трещины, так и в областях прилегания герметизирующих элементов.

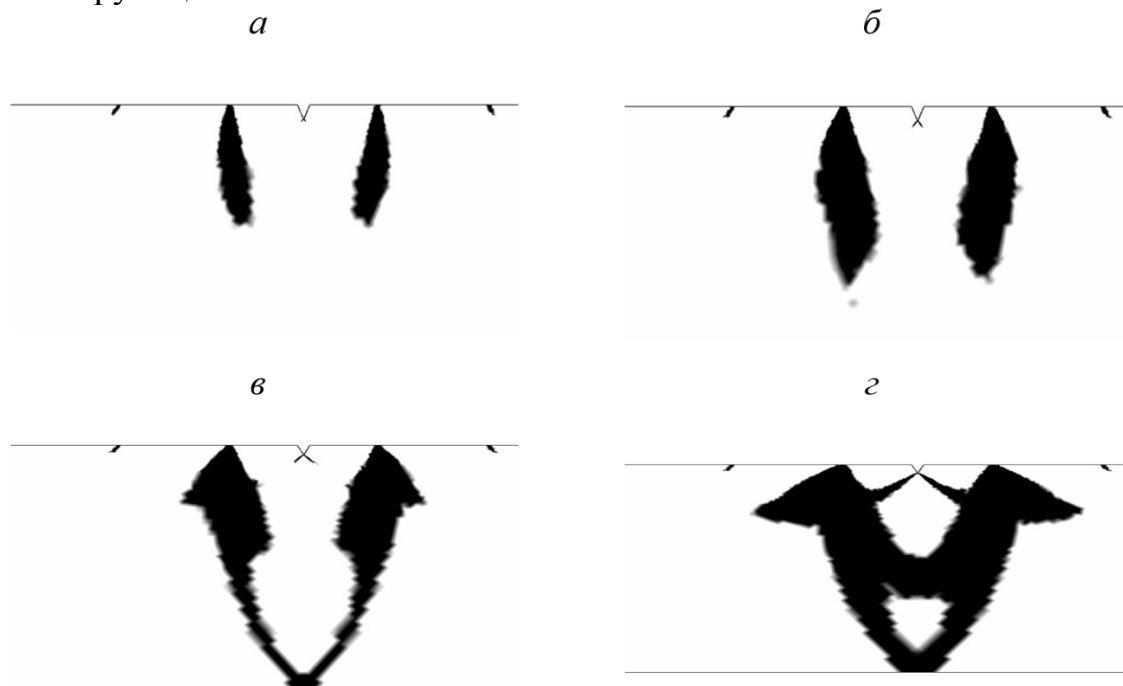


Рисунок 3 – Развитие зон пластических деформаций при нагружении образца с инициирующей щелью

Поля горизонтальных и вертикальных смещений на конечном этапе нагружения представлены на рисунке 4. Хорошо видно образование штампа, ограниченного по ширине межпакерным интервалом.

На рисунке 5 представлен результат численного расчета процесса распространения зон пластических деформаций в материале при отсутствии инициирующей щели. В отличие от задачи, рассмотренной выше, здесь задавались дополнительные касательные напряжения на контактах между пакерами и горной породой.

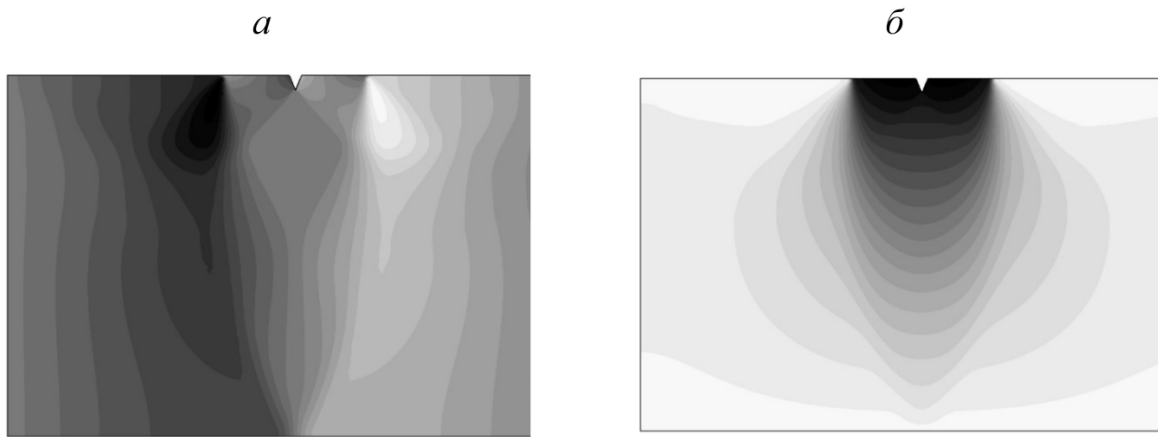


Рисунок 4 – Поле горизонтальных (а) и вертикальных (б) смещений на конечном этапе нагружения

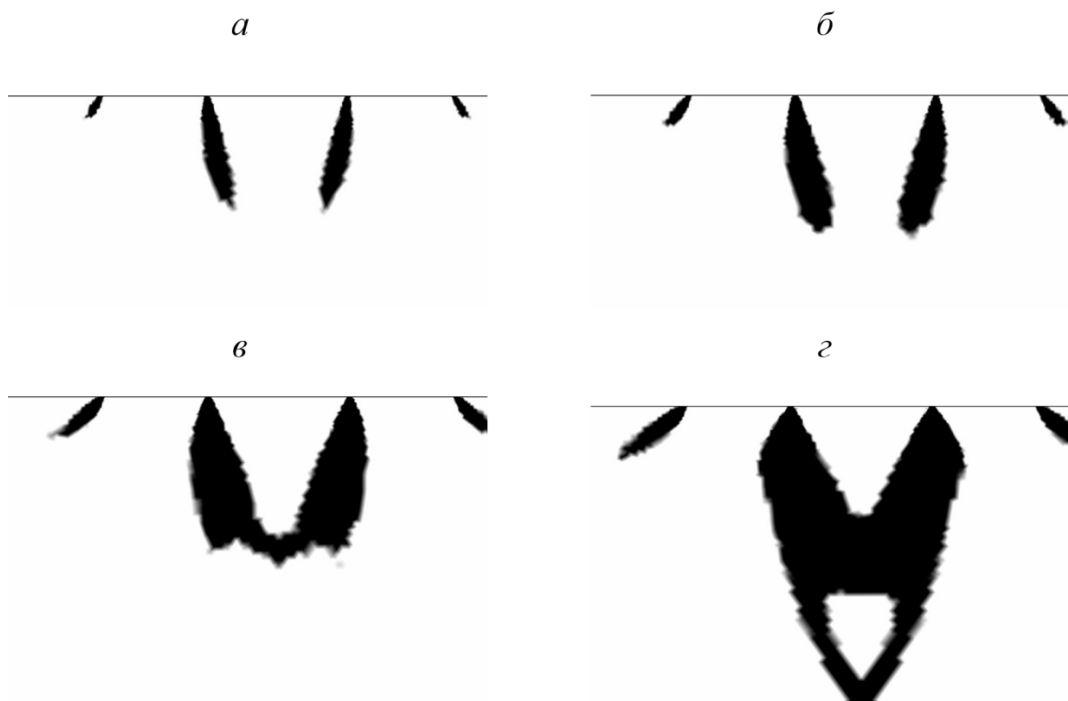


Рисунок 5 – Развитие зон пластических деформаций при нагружении образца без инициирующей щели с заданием касательных напряжений на контактах пакеров с горной породой

Упругопластический критерий Кулона-Мора позволяет описать развитие областей неупругих деформаций в задаче о деформировании образца горной породы при проведении направленного гидроразрыва. Введение дополнительных касательных напряжений на контактах между герметизирующими элементами и горной породой приводит к картинам деформирования, схожим с картинами, полученными при наличии инициирующей щели гидроразрыва.

В дальнейшем выполнено численное исследование напряженно-деформированного состояния стенок скважины, расширяющимися под действием внутреннего давления пакерными уплотнителями. Задача решалась методом конечных элементов в рамках линейной теории упругости в

трехмерной осесимметричной постановке программным комплексом COMSOL Multiphysics®. Горная порода и уплотнители представлялись разномодульными упругими материалами.

При взаимодействии уплотнителей со стенкой скважины рассматривался абсолютно жесткий контакт без проскальзывания. Горная порода представлена упругим материалом с модулем Юнга $E_c = 5.4$ ГПа и коэффициентом Пуассона $\nu_c = 0.16$, характерными для угля. Материал уплотнителей — резина с модулем Юнга $E_p = 0.5$ ГПа и коэффициентом Пуассона $\nu_p = 0.45$.

Расчеты показали, что растягивающие напряжения в материале возникают в области, ограниченной уплотнениями ($-h_e/2 < z < h_e/2$) и примыкающей к стенке скважины. Для примера на рисунке 6 представлено распределение осевых напряжений σ_z при значении параметра $h_e = 20$ см.

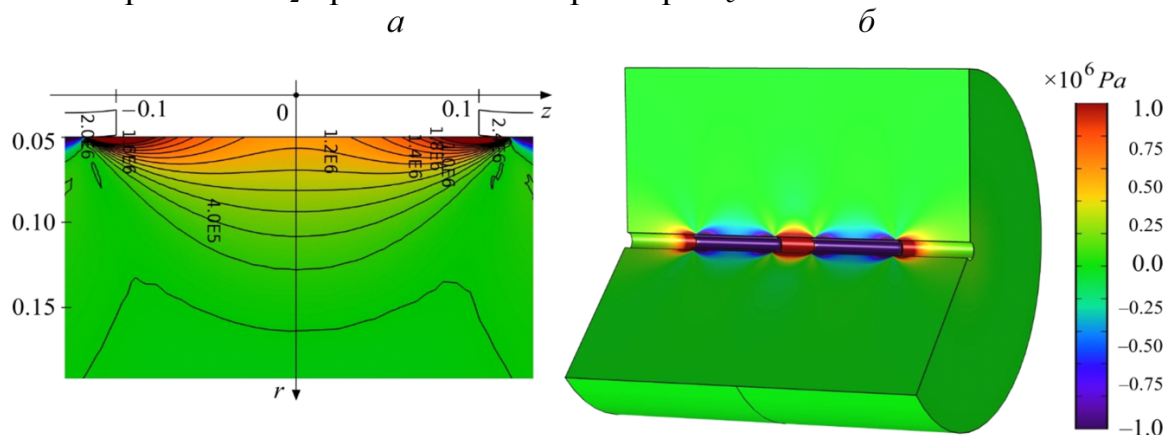


Рисунок 6 – Распределение осевых напряжений σ_z на конечном шаге нагружения: сечение плоскостью Orz (a); трехмерная картина нагружения (б)

Отдельный интерес в рассмотренной задаче представляет построение линий тока энергии подобно движению сжимаемой жидкости. Конфигурации линий тока энергии показывают, что при нагружении уплотнений пакера внутренним давлением часть энергии уходит с уплотнений вглубь массива, а часть возвращается на свободную поверхность скважины (рисунок 7).

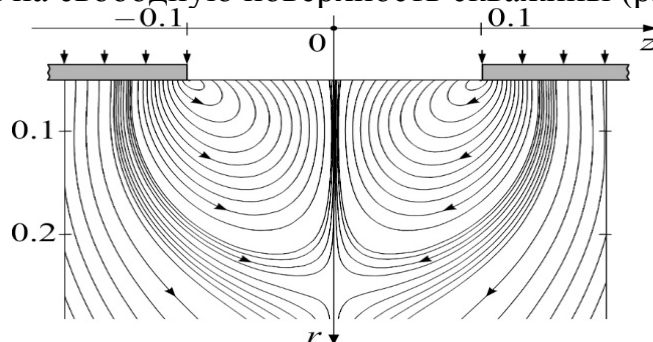


Рисунок 7 – Линии тока энергии в деформируемой горной породе при нагружении уплотнений пакера внутренним давлением

Представленная схема расчета по шагам нагружения с учетом формирования области контакта упругих уплотнений и стенки скважины позволяет описать распределение давлений на границе «уплотнения — горная порода», а также исследовать напряженно-деформированное состояние геосреды при заданном рабочем давлении в пакере в зависимости от расстояния

между уплотнителями. Полученные результаты позволяют понять физические процессы, происходящие в зоне работы клапана, установленного между двумя пакерами.

В третьей главе выполнен анализ работы устройств, реализующий метод поинтервального гидроразрыва, проведена корректировка разрывного устройства и предложен метод расчета растягивающих усилий. Предложено между герметизаторами устанавливать клапан с компенсатором осевых смещений.

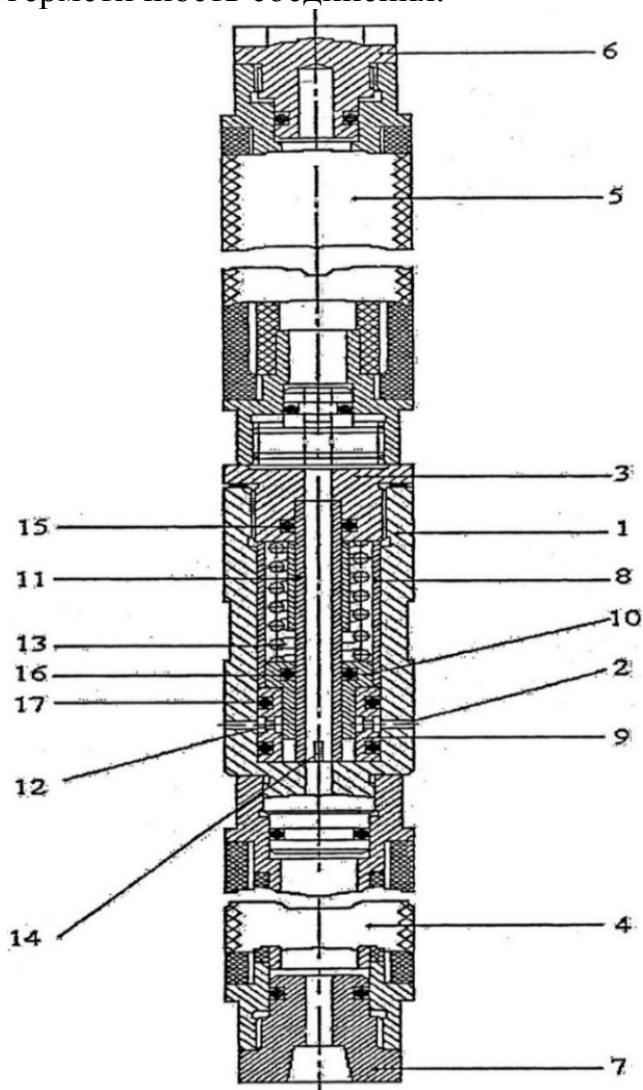
Для реализации технологии ориентированного поинтервального гидроразрыва пласта для интенсификации газовыделения в необсаженных дегазационных скважинах диаметром более 76 мм, пробуренных в угольный пласт из подземных горных выработок, предложено и разработано устройство поинтервального гидроразрыва (рисунок 8), которое включает в себя два упруго расширяющегося рукава 1,2 диаметром 76 мм, между которыми установлен в корпусе распределитель давления золотникового типа 3, предназначенный для регулирования давления рабочей жидкости в гидросистеме разрывного устройства. Величина настройки клапана определяет условие обжата скважины упругими элементами. Запорный наконечник 4 ограничивает подачу жидкости, которая поступает через муфту 5. Причем длина распределителя давления не превышает двух диаметров скважины, что является главным фактором при формировании вертикальных трещин гидроразрыва.



Рисунок 8 – Устройство поинтервального гидроразрыва

Распределитель давления золотникового типа служит для своевременного пакерования скважины в зоне между упруго расширяющимися рукавами и дальнейшего повышения давления в этой зоне до величины достаточной для гидроразрыва угольного массива (рисунок 9). Он состоит из полого корпуса, выполненного в виде стакана 1 с отверстиями 2 для прохода рабочей жидкости, соединенного открытой частью с полой втулкой 3 посредством резьбы. На концах корпуса закреплены упруго расширяющиеся рукава 4 и 5, способные

деформироваться под действием давления рабочей жидкости. В полости корпуса у дна стакана посредством распорной втулки 8 закреплена уплотнительная втулка 9, в которой размещен золотник 10, в центральное отверстие которого входит пустотелый патрубок 11, установленный между дном стакана 1 и торцом углубления в полой втулке 3. В стенках уплотнительной втулки 9 имеются радиальные отверстия 12, оси которых совпадают с осями отверстий 2 в стенках стакана 1. Прижатие золотника 10 к торцу уплотнительной втулки 9 осуществляется пружиной 13, установленной между золотником 10 и дном втулки 3. На торцах (со стороны дна стакана 1) золотника 10 и пустотелого патрубка 11 имеются шлицевые прорези соответственно 14 и 15. Уплотнения 16 в полой втулке 3, 17 в золотнике 10 и 18 в уплотнительной втулке 9 обеспечивают герметичность всех соединений устройства. Поверхность отверстия уплотнительной втулки 9 притерта по наружному диаметру золотника 10, что также обеспечивает достаточную герметичность соединения.



устройство подается рабочая жидкость под давлением, от действия которого уплотнительные элементы 4 и 5, увеличиваясь в диаметре, прижимаются к стенкам скважины – происходит герметизация ее участка, на котором расположена инициирующая щель. При повышении давления, на которое настроена пружина 13, золотник 10 начинает перемещаться в сторону втулки 3, при этом открывается доступ к радиальным отверстия 12 и 2 в стенках уплотнительной втулки 9 и стакана 1, через которое рабочая жидкость поступает в загерметизированное пространство скважины. После проведения гидроразрыва давление рабочей жидкости сбрасывается и золотник 10 под действием пружины 13 возвращается в исходное положение, а упруго расширяющиеся рукава 4 и 5 занимают исходную форму.

Рисунок 9 – Распределитель давления
Устройство работает следующим образом. Через штуцер 7 в

Исследования режимов работы разрывного устройства с распределителем давления (рисунок 10) проводились на испытательном стенде.

Стенд (рисунок 11) включает в себя отрезок трубы 1, имитирующий скважину в горном массиве. Труба 1 с внутренним диаметром 80 мм снабжена манометром 2 и шаровым краном 3. Введенное в трубу 1 разрывное устройство 4 подключено при помощи напорной магистрали к насосной установке 5. Напорная магистраль снабжена расходомером Stauf DM-750 германского производства пропускной способностью 16 л/мин при давлении 32 МПа.



Рисунок 10 – Стендовые испытания устройства поинтервального гидроразрыва в трубе диаметром 80 мм

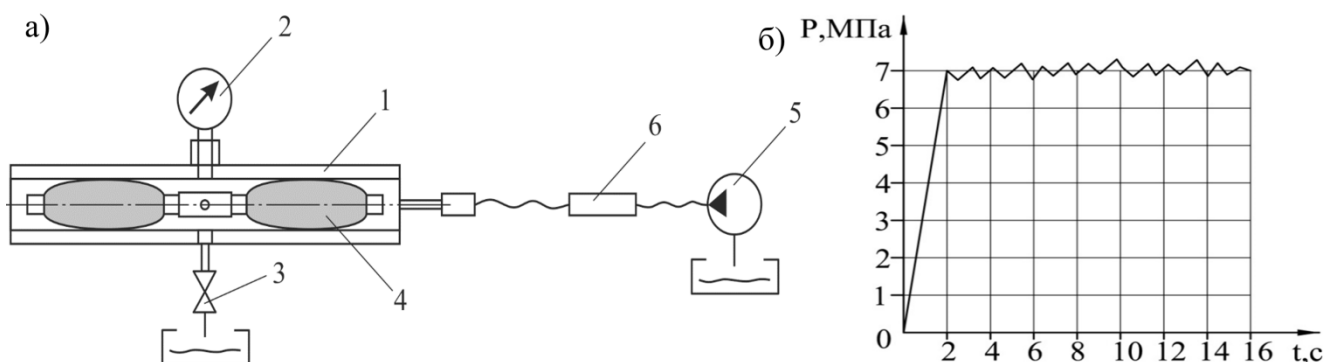


Рисунок 11 – Схема стенда для испытания устройство поинтервального гидроразрыва (а); характер изменения давления в межпакерном клапане (б)

Испытания проводились в следующей последовательности. В трубу 1 вводилось разрывное устройство 4 таким образом, чтобы распределитель давления находился в зоне установки манометра 2 и шарового крана 3. Затем при закрытом шаровом кране 3 к разрывному устройству 4 от насосной установки 5 через напорную магистраль с расходомером 6 подавалась под давлением рабочая жидкость. При достижении давления в магистрали 7 МПа (по манометру в насосной установке), начинало подниматься давление в трубе 1 в зоне расположения межпакерного клапана, что фиксировалось манометром 2. Это означало, что упруго расширяющиеся рукава разрывного устройства изолировали пространство, в котором находится межпакерный клапан, а пружина 13 золотника 10 (см. рисунок 9), отстроенная на 7 МПа, сжалась, позволив золотнику пропуск рабочей жидкости под давлением в межпакерную зону. Максимальное давление рабочей жидкости в межпакерной зоне,

зафиксированное в ходе испытаний, составило 16 МПа. Протекание жидкости через упруго расширяющиеся рукава отсутствовало.

Далее открывался шаровой кран 3, что обеспечивало свободный выпуск рабочей жидкости из межпакерной зоны на дневную поверхность. Затем к разрывному устройству 4 от насосной установки 5 по напорной магистрали с расходомером подавалась рабочая жидкость. Объем пропускаемой рабочей жидкости фиксировался расходомером, а давление манометром насосной установки. При достижении давления в напорной магистрали 7 МПа происходило вытекание рабочей жидкости из межпакерной зоны через открытый шаровой кран. Объем пропускаемой жидкости в единицу времени через три отверстия диаметром 4 мм в корпусе межпакерного клапана составил 6,5 л/мин. Испытаниями установлено, что во время выпуска рабочей жидкости в межпакерную зону протечки ее через упруго расширяющиеся рукава отсутствовали. На рис. 14 б представлен график изменения давления в напорной гидросистеме в процессе выпуска рабочей жидкости через межпакерный клапан. Колебания давления в процессе выпуска рабочей жидкости не превышали 0,5 МПа. В дальнейшем величина отверстий была увеличена до 8 мм.

При бурении скважин за счет промывки и изгиба подающей штанги происходит значительная изменчивость диаметра самой скважины. В момент подачи рабочей жидкости в устройство, упругие элементы герметизаторов увеличиваются в диаметральном направлении и прижимаются к стенкам скважины. При этом, в силу неизменности объемов упругих элементов, происходит их укорачивание в осевом направлении. Поскольку два герметизатора, связанные между собой через жесткий корпус, выполненный в виде стакана, создают значительные растягивающие силы, стремящиеся разрушить данное соединение, это приводит к снижению надежности работы устройства, которое должно обеспечить работу при высоких давлениях рабочей жидкости и нестабильных размерах самой скважины – от 76 до 105 мм.

Для измерения осевого перемещения герметизаторов (пакеров) от давления были выполнены дополнительные лабораторные исследования не только в трубе диаметром 80 мм, но и диаметром 105 мм. Пакер диаметром 76 мм, длиной с заделками 1113 мм и длиной резиновой части 830 мм устанавливался в трубу диаметром 105 мм (рисунок 12).



Рисунок 12 – Стендовые испытания пакера в трубе диаметром 105 мм

Раскрытие пакера произошло при давлении от 0,1 до 0,5 МПа без надежного крепления в трубе (скважине). При этом край пакера переместился на 80 мм (рисунок 12а). Дальнейшее увеличение давления от 0,5 до 2,0 МПа приводит к надежному закреплению пакера в трубе (скважине). При этом край пакера перемещается на 15 мм (рисунок 12б). Дальнейшее увеличение давления до 5,0 МПа не привело к перемещению торца пакера (рисунок 12 в).

Для повышения надежности работы устройства, предназначенного для гидроразрыва скважин в угольном массиве, предложено устранить растягивающие силы в месте присоединения упругих элементов к втулкам герметизаторов, за счет введения в конструкцию компенсатора осевых перемещений.

В четвертой главе представлены результаты шахтных исследований метода поинтервального гидроразрыва с использованием разработанного оборудования. Эксперименты проводились в целях повышения безопасности эксплуатации выемочного участка № 24-62 и снижения его природной газоносности на шахте им. С.М. Кирова АО «СУЭК-Кузбасс» в соответствии с разработанными «Методическими рекомендациями...». Для оценки эффективности гидродинамического воздействия на угольный пласт выполнены исследования по оценке степени гидродинамического воздействия на угольный пласт в процессе проведения гидроразрыва на основе применения сейсмических методов, а также на каждом интервале гидроразрыва выполнена верификация его процесса путем оценки изменения давления в скважине при нагнетании рабочей жидкости.

Мощность угольного пласта Болдыревский составляет 2,35 м, крепость $f=1,5-2$ по шкале проф. М.М. Протоdjаконова. Пласт отнесен к угрожаемым по горным ударам, по газовому фактору шахта отнесена к сверхкатегорийной. Скважина № 66 диаметром 93 мм пробурена в угольный пласт из горной выработки конвейерного штрека выемочного участка № 24-62 на глубину 140 м (рисунок 13а). Перед началом работ был произведен монтаж высоконапорного оборудования и контрольно-измерительной аппаратуры (рисунок 13б).

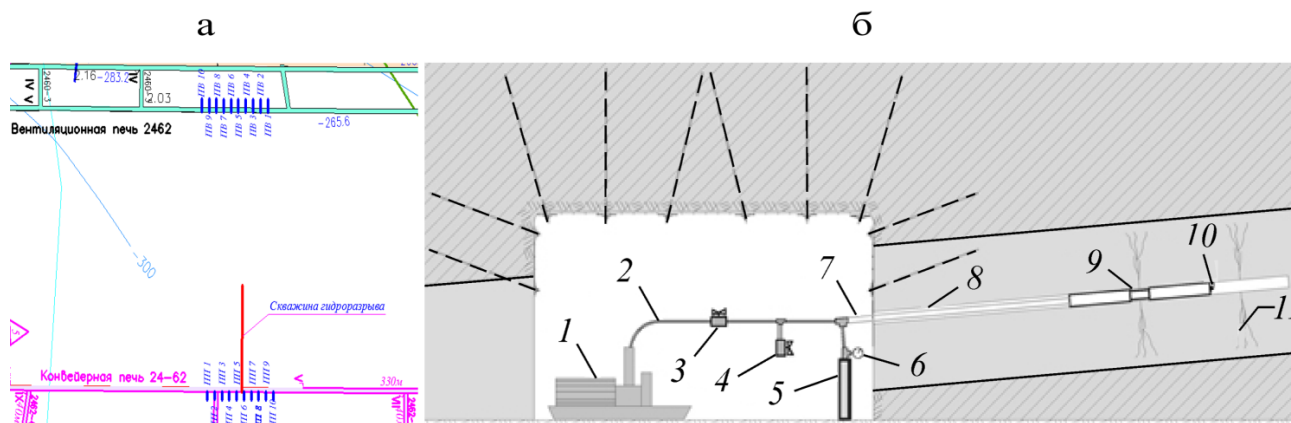


Рисунок 13 – Схема расположения дегазационной скважины с поинтервальным гидроразрывом (а); технологическая схема расположения оборудования (б): 1 – насосная станция; 2 – высоконапорный рукав; 3 – кран подачи рабочей

жидкости; 4 – кран слива; 5 – колба высокого давления с автономным манометром; 6 – механический манометр; 7 – став высоконапорных труб; 8 – скважина гидроразрыва; 9 – разрывное устройство; 10 – заглушка.

Бурение дегазационных пластовых скважин осуществляются буровыми установками типа IDS-90 или БУГ-200 из вентиляционной печи № 24-64. Разрывное устройство, предназначенное для проведения работ по гидроразрыву, подается в скважину буровым станком на ставе высоконапорных труб, соединяющихся при помощи специально разработанных быстроразъемных соединений (рисунок 14).

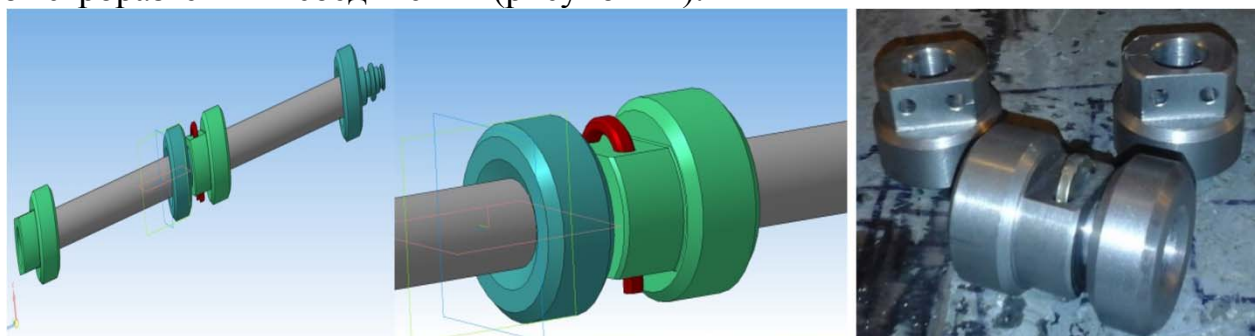


Рисунок 14 – Высоконапорная труба с быстроразъемным соединением

Отвод метановоздушной смеси из скважин предусматривается по участковым дегазационным трубопроводам, проложенным по вентиляционной и конвейерной печам №24-62. Дегазационный трубопровод подвешивается с помощью каната за анкера основного крепления. Устье каждой дегазационной скважины оборудуется кондуктором. Дегазационные скважины после окончания их бурения подключаются к дегазационному трубопроводу. Неподключенные дегазационные скважины герметично закрываются.

Два гидравлических разрыва пласта выполнены с интервалом 10 м, длительность первого гидроразрыва составила 11,8 мин (рисунок 15а) и 7,0 мин (рисунок 15б) соответственно. При первом гидроразрыве на глубине 40 м открытие клапана произошло при давлении 10,3 МПа, в то время как открытие клапана при втором гидроразрыве на глубине 30 м произошло при давлении 9,5 МПа. Нагнетание рабочей жидкости в обоих случаях производилось насосом с производительностью 160 л/мин. В обоих случаях в первые 5-10 сек происходил скачкообразный гидроразрыв пласта. При этом величина температуры жидкости оставалась практически постоянной в районе 4-5 градусов.

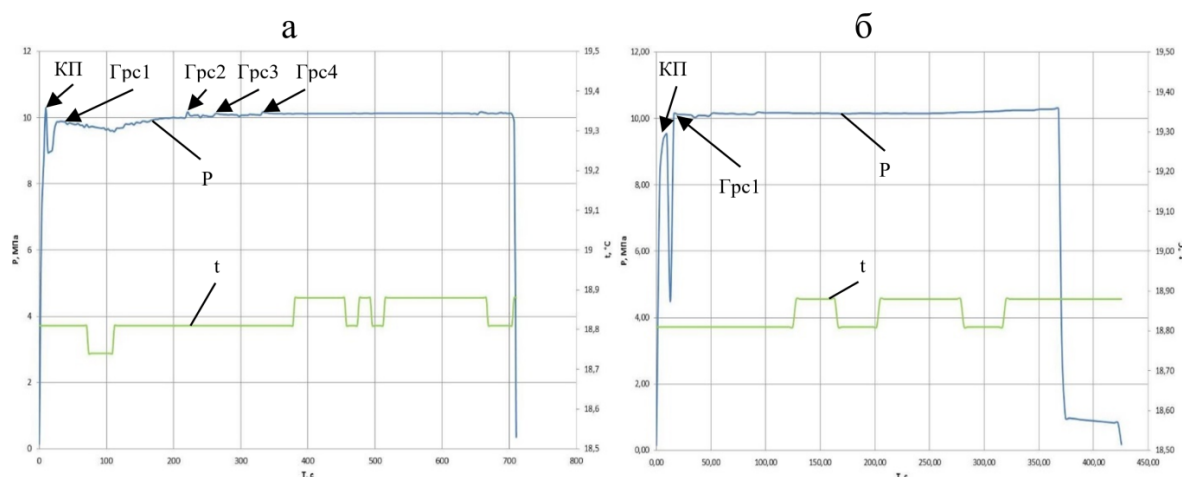


Рисунок 15 – Изменение давления P и температуры t при применении устройства поинтервального гидроразрыва

По результатам распространения скоростных характеристик прохождения сейсмических волн до и после гидроразрывов была выполнена оценка результатов воздействия. Для этого были использованы шахтные автономная сейсмическая станция «Р-1» и геофоны для приема сейсмических данных. На скорость прохождения волны в массиве влияет горная среда, чем она плотнее, тем выше скорость прохождения волн. Распределения скорости прохождения волны до и после проведения гидроразрыва на выемочном участке № 24-62 имеют следующий вид (рисунок 16).

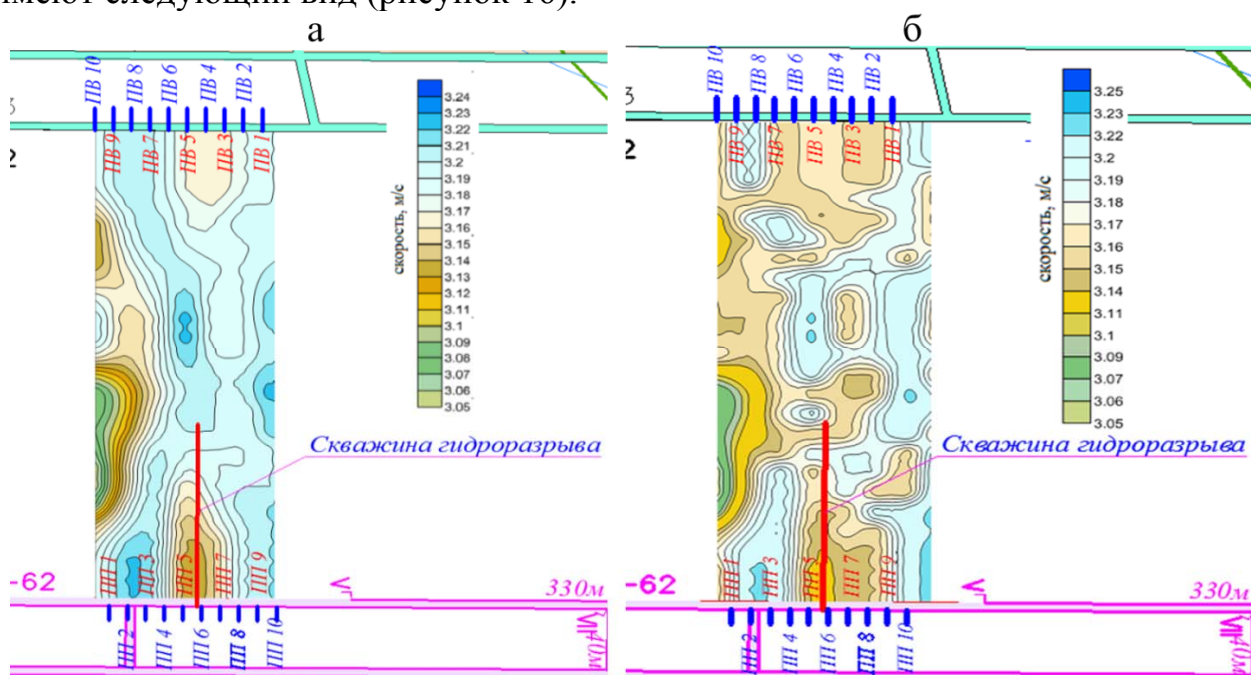


Рисунок 16 – Распределение скоростных характеристик до (а) и после (б) проведения поинтервального гидроразрыва

Независимая проверка специалистами шахты концентрации метана в загерметизированной скважине показала значительное превышение концентрации метана в испытательной скважине, а также в соседней. Результаты замеров метана в скважинах 1 и 2 в районе ПК 44 на 01.06.2019 г. (1 смена) показали концентрацию CH_4 до 63% и 24% соответственно (куст 17), в

то время как в районе ПК 34 (куст 13) соответственно 10% и 20, а в кустах 15, 16 – всего 1,0% и 1,6%. Это свидетельствует о высокой эффективности проведенных мероприятий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе изложены научно обоснованные технические и технологические решения, заключающиеся в определении параметров и разработке устройства для реализации технологии поинтервального гидроразрыва, обеспечивающего направленное распространение трещин для интенсификации процесса дегазации в угольном пласте, имеющие существенное значение для развития угледобывающих регионов страны.

Основные научные и практические результаты выполненных исследований заключаются в следующем:

1. Анализ отечественного и зарубежного опыта разработки методов дегазации угольных пластов с поверхности и из подземных горных выработок свидетельствует о недостаточной эффективности их применения. Это требует создания методов интенсификации процессов дегазации. Проведение операций гидроразрыва угольных пластов из подземных горных выработок через необсаженные скважины с целью интенсификации дегазации позволило обосновать схему поинтервального гидроразрыва угольного пласта, позволяющую создать в массиве протяжённые трещины гидроразрыва вкрест простирания пласта.

2. Разработана конструкция устройства поинтервального гидроразрыва, включающая упруго расширяющиеся герметизирующие элементы, между которыми установлен специальный настраиваемый клапан, обеспечивающий необходимое прижатие устройства к стенкам скважины. Установлено, что герметизаторы в силу неизменности объемов упругих элементов укорачиваются в осевом направлении и значительно увеличивают свои размеры в диаметральном направлении, что вызывает значительные растягивающие силы и снижает надежность работы устройства. Выполнены лабораторные исследования, установлены параметры устройства. Раскрытие пакера произошло при давлении от 0,1 до 0,5 МПа без надежного крепления в скважине, а его перемещение составило 80 мм. Увеличение давления от 0,5 до 2,0 МПа приводит к надежному закреплению пакера и дальнейшему перемещению на 15 мм. Показано, что двухсторонний пакер с длиной упруго расширяющихся элементов 1300 мм и установленным между ними клапаном 300 мм с возможностью осевого перемещения до 30 мм обеспечивает безаварийную работу при фиксации пакера давлением 1,5-2,0 МПа с последующим повышением до 5,0 МПа в угольных скважинах диаметром до 105 мм;

3. Математическим моделированием и численными экспериментами установлено, что устройство поинтервального гидроразрыва угольного массива в виде последовательно соединённых упругих герметизирующих элементов создаёт дополнительные касательные напряжения на стенках скважины, что обеспечивает в ней развитие области неупругих деформаций, приводящих к

возникновению вертикальных трещин. Конфигурации линий тока энергии для значения межпакерного участка 200 мм показывают, что при нагружении уплотнений пакера внутренним давлением часть энергии уходит с уплотнений вглубь массива, а часть возвращается на свободную поверхность скважины. Применение разработанного устройства в технологии поинтервального гидроразрыва угольных пластов позволяет создавать поперечные относительно оси скважины трещины гидроразрыва из скважин, пробуренных параллельно очистному забою.

4. Экспериментально в шахтных условиях установлено, что применение устройства для поинтервального гидроразрыва угля с обоснованными параметрами в пределах интервала межпакерного пространства изолированной полости L и диаметром скважины d , составляющего $2d < L < 4d$, вызывает образование поперечных относительно оси скважины трещин гидроразрыва и увеличению на порядок его газоотдачи. Это подтверждается результатами сейсмоакустического профилирования *in situ* до и после гидродинамического воздействия и скачкообразным снижением давления жидкости в системе автономного манометра. Концентрация метана в загерметизированной скважине показала значительное превышение концентрации метана в испытательной скважине.

5. На основании проведенных исследований разработаны и утверждены «Методические рекомендации на выполнение работ по поинтервальному гидроразрыву пласта 24 в дегазационных скважинах выемочного столба лавы № 24-62 ПЕ «Шахта «им. С.М. Кирова» для интенсификации дегазации и методические рекомендации для проектирования системы дегазационных скважин.

Направления дальнейших исследований:

1. Совершенствование конструкции скважинного устройства для поинтервального гидроразрыва с целью расширения области применения технологии поинтервального гидроразрыва.
2. Разработка математических моделей механизма скважинного устройства для поинтервального гидроразрыва с целью совершенствования конструкции для повышения параметров его надежности.
3. Совершенствование конструкции устройства для усиления эффективности поинтервального гидроразрыва за счет сохранения образованной трещины путем добавления расклинивающего материала – пропантанта.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК

1. Федорин, В.А. Геотехнологическое обоснование схем подготовки угольных пластов шахты «Октябрьская» (СУЭК) / В.А. Федорин, А.Л. Тациенко // Вестник КузГТУ. – 2007. – № 1. – С. 12-16.

2. **Тациенко, А.Л.** Основные технические аспекты внедрения технологии гидроразрыва угольного пласта / **А.Л. Тациенко**, М.С. Плаксин, А.В. Понизов // Вестник КузГТУ. – 2017. – № 3. – С. 30-36.
3. Клишин, В.И. Инновационные методы интенсификации процесса дегазации угольных пластов из подготовительных выработок / В.И. Клишин, **А.Л. Тациенко**, Г.Ю. Опрук // Вестник КузГТУ. – 2017. – № 6. – С. 89-96.
4. **Тациенко, А.Л.** Возникновение трещин гидроразрыва при поинтервальном гидроразрыве угольного пласта / А.Л. Тациенко, С.В. Клишин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2018. – № S49. – С. 49-57.

Публикации в изданиях, индексируемых в базах Web Of Science и Scopus

5. Klishin V.I. Technology and means of a coal seam interval hydraulic fracturing for the seam degassing intensification / V. I. Klishin, G.Y. Opruk, **A.L. Tatsienko** // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2016. – Vol. 53. – Article № 012019.
6. Klishin, V.I. Development of device for interval-by-interval hydraulic fracture / V.I. Klishin, G. Y. Opruk, D.I. Kokoulin, **A.L. Tatsienko** // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2019. – Vol. 262. – Article № 012028.
7. Klishin, V. Stimulation of Gas Emission Processes in Boreholes Using Interval Hydraulic Fracturing in Borehole Local Parts / V. Klishin, G. Opruk, **A. Tatsienko** // E3S Web of Conferences. – 2018. – Vol. 41. – Article № 03005.
8. Klishin, V.I. Seismic monitoring of hydrodynamic impact on coal seam at interval hydraulic / V.I. Klishin, O.V. Taylakov, G.Yu. Opruk, M.P. Makeev, S.V. Sokolov, A.S. Teleguz and **A.L. Tatsienko** // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. – 2019. – Vol. 377. – Article № 012034.
9. Klishin, V. Study of the Interaction of a Packing Device with a Coal Seam at Interval Hydraulic Fracturing / V. Klishin, S. Klishin, **A. Tatsienko** // E3S Web of Conferences. – 2020. – Vol. 174. – Article № 01060.

Статьи в прочих изданиях

10. Клишин В.И. Применение поинтервального гидроразрыва угольного пласта для интенсификации пластовой дегазации / В.И. Клишин, Г.Ю. Опрук, **А.Л. Тациенко** // Научные технологии разработки и использования минеральных ресурсов. – 2016. – №2. – С. 33-39.
11. Клишин В.И. Устройство компенсации осевого перемещения для поинтервального разрыва скважин в угольном массиве / В.И. Клишин, Г.Ю. Опрук, **А.Л. Тациенко** // Научные технологии разработки и использования минеральных ресурсов. – 2018. – №4. – С. 218-224.
12. Клишин В.И. Разработка устройства поинтервального гидроразрыва угольного пласта / В.И. Клишин, Г.Ю. Опрук, Д.И. Кокоулин, **А.Л. Тациенко** // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. – 2018. – Т. 5. – №2. – С. 245-250.

13. Заявка на изобретение РФ № 2020 106707 Скважинное устройство для осуществления гидроразрыва горных пород / Клишин В.И., Анферов Б.А., Кузнецова Л.В., Клишин С.В., **Тащиенко А.Л.**

Личный вклад автора в работах, выполненных в соавторстве, заключается в следующем:

[5, 6, 7, 10, 13] – выполнение основного объема исследований, обработка полученных результатов, формулировка выводов;

[1, 2, 3] – постановка задач, формулировка выводов;

[4, 9] – обработка статистической информации, формулировка выводов;

[8, 11, 12] – проведение экспериментов, обработка результатов.

Подписано к печати 11.11.2020 г. Формат 60×84/16

Уч.-изд. л. 1,1. Тираж 90 экз. Заказ 300экз.

Отпечатано в издательском центре УИП КузГТУ.

650000, Кемерово, ул. Д. Бедного, 4а.