

На правах рукописи



ПАТУТИН Андрей Владимирович

**ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ СИНХРОННОГО НАПРАВЛЕННОГО
ГИДРОРАЗРЫВА ДЛЯ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ДЕГАЗАЦИИ
УГОЛЬНОГО ПЛАСТА**

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 Институте 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» Козырева Елена Николаевна, кандидат технических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт угля Сибирского отделения Российской академии наук, ведущий научный сотрудник
Ведущая организация	Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Горный институт Уральского отделения Российской академии наук

Защита диссертации состоится «30» июня 2014 г. в 13-00 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 темы. Современное состояние подземной добычи угля характеризуется ростом глубины, газоносности и выбросоопасности разрабатываемых пластов. Увеличивается роль предварительной дегазации угля, от эффективности которой зависят безопасность и производительность подземных работ.

Основным методом интенсификации дегазации углепородного массива, не затронутого процессом разработки, является его гидроразрыв. Увеличение проницаемости пласта получают за счет образования трещин.

Одной из проблем шахтного гидроразрыва является неуправляемое развитие трещин, высокая вероятность их выхода в борта горных выработок и подсоса воздуха в дегазационные скважины. Это приводит к снижению депрессии в зоне дегазации и концентрации метана в извлекаемой газовой смеси, что усложняет его последующую утилизацию.

Другой проблемой является выполнение разрыва горных пород водой, что приводит к их обводнению, долговременному блокированию фильтрации газа, и не позволяет в полной мере использовать возможности гидроразрыва для увеличения продуктивности дегазационных скважин.

Актуальность представленной работы обусловлена необходимостью повышения эффективности предварительной дегазации угольных пластов методом гидроразрыва, в том числе, за счёт управления конфигурацией трещин и применения рабочих жидкостей гидроразрыва с малым отрицательным воздействием на газовую проницаемость пород.

Работа выполнена в рамках Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2013 годы» по теме «Проведение исследований и разработка прототипа экологически безопасной технологии добычи метана из угольных пластов и подстилающих горных пород в шахтных условиях» (государственный контракт №16.515.11.5035) и Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы по теме «Проведение научных исследований по созданию технологии управляемого гидроразрыва для повышения эффективности и безопасности подземной добычи твердых полезных ископаемых» (соглашение № 8662).

Целью работы является обоснование параметров технологии синхронного направленного гидроразрыва для интенсификации дегазации угольного пласта, обеспечивающей эффективное извлечение углеметана.

Идея работы состоит в учете особенностей напряженно-деформированного состояния угольного пласта при его синхронном направленном гидроразрыве рабочей жидкостью с малым остаточным объемом жидкой фазы.

Задачи исследования:

– исследовать влияние напряженного состояния углепородного массива и расположение трещин гидроразрыва на метановыделение;

– установить взаимосвязь между расстоянием, при котором происходит сбойка системы параллельных скважин и параметрами их синхронного гидроразрыва;

– исследовать свойства рабочей жидкости гидроразрыва угольных пластов на основе пеногеля;

– разработать методические рекомендации для проектирования системы дегазационных скважин и проведения синхронного направленного гидроразрыва в условиях напряженно-деформированного состояния массива горных пород посредством скважин, пробуренных из горных выработок.

Методы исследований включают аналитический обзор и обобщение научно-информационных источников, патентов, нормативно-технических документов по применению методов интенсификации для дегазации угольных пластов; математическое моделирование массива и процессов развития трещин гидроразрыва; испытания экспериментальных образцов рабочих жидкостей разрыва на основе пеногелей.

Объектом исследования является газонасыщенный углепородный массив.

Предметом исследования являются параметры процесса газоотдачи углепородного массива, обусловленного трещиной гидроразрыва.

Научные положения:

– размер зоны метановыделения при слиянии трещин гидроразрыва вдоль простирания пласта в 1,8–3 раза больше, чем в случае трещин той же длины вкрест простирания пласта;

– расстояние между параллельными скважинами, соединяемыми трещиной синхронного импульсного гидроразрыва линейно связано с логарифмом отношения импульсного давления к максимальному сжатию угольного пласта;

– применение рабочей жидкости гидроразрыва на основе пеногеля на 75–80% снижает объем жидкой фазы, закачиваемый в пласт, и обеспечивает малое влияние воды на фильтрацию метана к дегазационной скважине;

– решение по проектированию системы дегазационных скважин и проведению синхронного направленного гидроразрыва основывается на оценке ожидаемого метановыделения за счет перераспределения напряжений в массиве.

Научная новизна:

– выявлена количественная связь между системой трещин гидроразрыва и метановыделением из угольного пласта;

– установлено соотношение между режимом гидроразрыва и свойствами пласта, обеспечивающее объединение трещин в единую плоскость разрыва;

– разработана рабочая жидкость гидроразрыва газоносных угольных пластов с малым объемом остаточной жидкой фазы;

– разработаны методики для проектирования системы дегазационных скважин с использованием импульсного синхронного гидроразрыва угольного пласта рабочими жидкостями на основе пеногелей.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается применением сертифицированного лицензионного программного обеспечения для построения математических моделей; достаточным объемом лабораторных и натурных исследований с последующей обработкой результатов статистическими методами, которая позволяет получить сопоставимость результатов до 80%.

Личный вклад автора состоит в:

– анализе технических и технологических решений гидроразрыва для добычи метана угольных пластов в шахтных условиях, обобщении научных и практических результатов;

– построении математической модели углепородного массива и проведении численных экспериментов;

– формулировании основных требований к рабочим жидкостям гидроразрыва;

– составлении технического задания и программы исследований физических свойств жидкости разрыва;

– стендовых испытаниях экспериментального образца оборудования для гидроразрыва;

– обосновании методических рекомендаций для проведения работ по гидроразрыву.

Научное значение работы состоит в обосновании выбора параметров дегазации угольных пластов с применением метода синхронного направленного гидроразрыва.

Отличие от ранее выполненных работ заключается в комплексном подходе к решению проблемы дегазации угольных пластов, включающем построение модели метановыделения из горного массива, проведение численных исследований влияния трещин гидроразрыва на его напряженное состояние, использование пеногеля в качестве рабочей жидкости разрыва, возможность подключения разработанного комплекса оборудования к существующим шахтным системам вакуумной дегазации.

Практическая ценность работы заключается в том, что результаты выполненных исследований позволяют рассчитать расстояние между параллельными дегазационными скважинами и параметры синхронного направленного гидроразрыва с целью формирования единой магистральной трещины для интенсификации дегазации угольного пласта.

Реализация работы. Основные положения разработанных методических рекомендаций изложены в двух отраслевых методических документах: «Методика проектирования и создания дегазационных сеток с использованием управляемого продольного гидроразрыва и пеногелей в качестве рабочих жидкостей разрыва» и «Методика дегазации угольных пластов и вмещающих горных пород с применением направленного подземного гидроразрыва».

Данные методики приняты Институтом горного дела СО РАН и прошли всестороннюю экспертизу при Минобрнауки в рамках приемки результатов выполнения государственного контракта № 16.515.11.5035.

Апробация работы. Материалы диссертационной работы и её отдельные результаты докладывались автором на итоговой конференции по результатам выполнения мероприятий ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2013 годы» за 2011 год по приоритетному направлению «Рациональное природопользование» (Санкт-Петербург, 2011); на VIII международной научной конференции «Недропользование. Горное дело. Новые направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых» (Новосибирск, 2012); на международном симпозиуме SGEM 2012 (Албена, Болгария, 2012); на 2-ой Российско-Китайской научной конференции (Новосибирск, 2012).

Публикации. Основные научные результаты работы изложены в 12 публикациях, в том числе в 3 статьях опубликованных в изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Работа содержит 130 страниц машинописного текста, включая 43 рисунка, 14 таблиц, 122 наименования работ отечественных и зарубежных авторов.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Первая глава содержит обзор и анализ основных технологических решений, применяемых для повышения качества дегазационных работ.

Известно, что в отличие от природных месторождений газа, большая часть метана угольных месторождений находится в сорбированном состоянии, и лишь незначительное количество его находится в свободном и растворенном виде. Уголь способен удерживать определенное количество метана в связанном состоянии при соответствующих давлении и температуре. Извлечение метана из угля возможно только при условии нарушения сорбционного равновесия и увеличения проницаемости углепородного массива, через который газ движется к скважинам.

Анализ методов интенсификации дегазации в мировой практике показывает, что для стимуляции газоотдачи угольного пласта наиболее часто используется гидравлический разрыв пласта (ГРП); реже, и только при благоприятных горно-геологических условиях, методы кавитации и расширения открытого забоя скважины. Трещины, образовавшиеся в процессе ГРП, могут достигать в длину нескольких десятков метров и, соединяясь между собой и с другими трещинами, значительно увеличивают проницаемость массива. Этот метод является на сегодняшний день самым эффективным способом повышения дебита скважины. Исследованиями в области гидроразрыва и его применения при разработке твердых полезных ископаемых в разное время занима-

лись Клишин В.И., Козырева Е.Н., Кю Н.Г., Леконцев Ю.М., Лобанова Т.В., Полевщиков Г.Я., Чернов О.И. и другие.

На основе анализа научных достижений в области дегазации угольных пластов, а также используемых технологических решений сделаны выводы и сформулированы задачи исследования.

Вторая глава посвящена построению модели углепородного массива и численным исследованиям его напряженного состояния.

Для математического моделирования массива использовалось программное обеспечение FLAC 6.0, реализующее решение задачи расчета напряженно-деформированного состояния с использованием явной конечно-разностной схемы. Данный программный комплекс имеет широкие возможности для реализации поведения горных пород, склонных к деформационному разупрочнению за счет учета отдельностей и трещин квиважа, что особенно важно при расчете напряжений в массиве, вмещающем угольные пласты.

При разработке модели за основу был взят разрез реального углепородного массива (рис. 1). Ширина модели составляет 100 м, высота 80 м. Поскольку для повышения детальности угольного пласта вертикальные размеры модели были ограничены, к верхней границе приложена нагрузка 5 МПа, имитирующая вертикальное горное давление на глубине около 200 м.

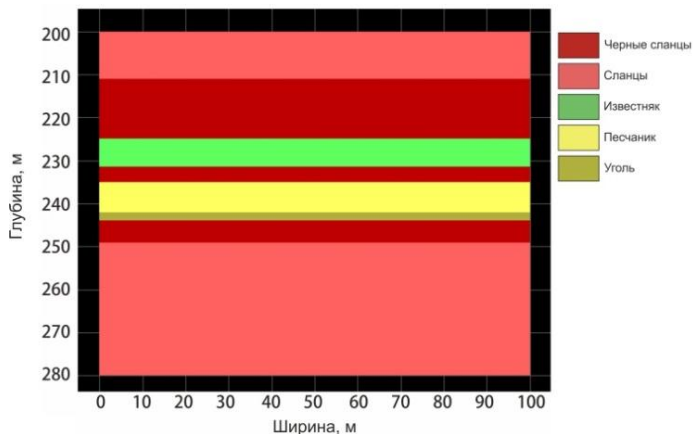


Рис. 1. Модель массива горных пород, содержащего угольный пласт.

При расчетах задаются следующие основные параметры горных пород: сила сцепления, угол внутреннего трения, угол дилатации, предел прочности на растяжение, причем значения вводятся как для матрицы породы, так и для плоскостей напластования. Каждый из этих параметров имеет начальную максимальную величину и уменьшается до остаточной величины, зависящей от величины пластической части e^p полной деформации. Именно это умень-

шение значений прочностных характеристик характеризует деформационное разупрочнение матрицы породы и плоскостей ослабления.

Для оценки размеров области дегазации в углепородном массиве, а также влияния разгрузки массива на его газоотдачу использовались экспериментальные данные, которые получают в ходе проведения дегазационного теста. По результатам измерений строят зависимость удельного газовыделения от напряженного состояния углепородного массива для вертикальной и горизонтальной компонент поля напряжений. Пример итоговой зависимости газовыделения от горного давления показан на рис. 2.

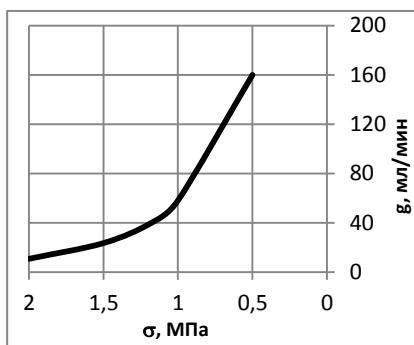


Рис. 2. Зависимость скорости газовыделения от напряженного состояния газонасыщенных пород.

Оценка размеров области дегазации была проведена на основании того, что газовыделение в массиве существенно возрастает, когда напряжения достигают значений 2,0 МПа и ниже. Таким образом, при анализе распределения напряжений выделялись «полезные области» достаточной разгрузки, показывающие зоны дренирования в углепородном массиве.

В ходе численных экспериментов отработывалась методика расчета напряженно-деформированного состояния углепородного массива, содержащего различные комбинации плоскостей продольного гидроразрыва. При этом определялись оптимальные сочетания и параметры базовых элементов, например, сочетания трещин вдоль и вкрест простирания угольного пласта, значения внешних напряжений и тип деформирования пород.

На рис. 3 представлены картины распределения напряжений при наличии в модели двух трещин на разных расстояниях друг от друга.

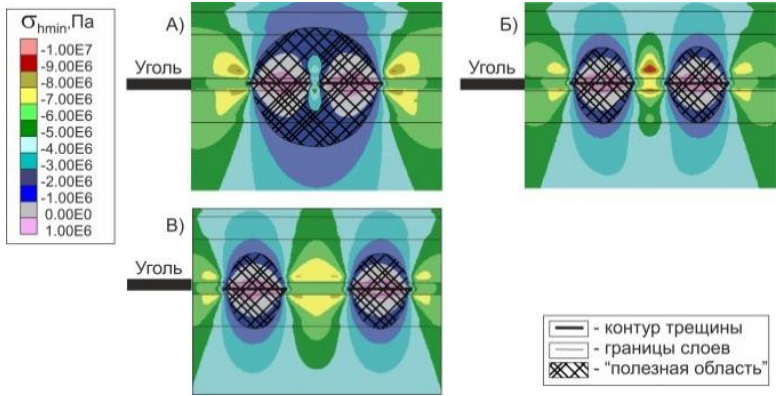


Рис. 3. Распределение минимального горизонтального сжатия в модели углеродного массива в присутствии двух десятиметровых горизонтальных трещин при следующих расстояниях между ними: А) 1 м; Б) 5 м; В) 10 м.

Для сравнения эффективности разгрузки массива различными конфигурациями трещин в модели задавались две трещины длиной десять метров на разных расстояниях друг от друга. Напряженное состояние и площадь разгрузки рассчитывались при расположении трещин вдоль и поперек пласта угля. Полученные графики представлены на рис. 4.

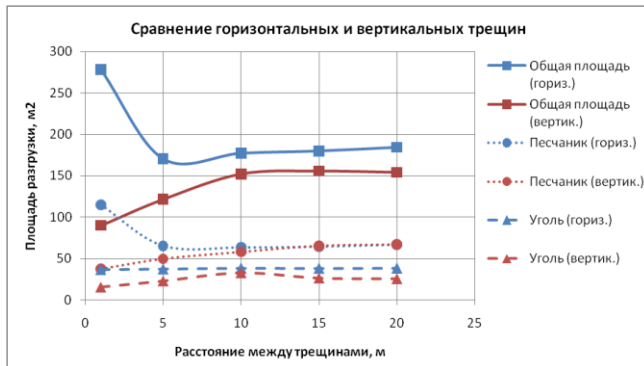


Рис. 4. Графики зависимости площади разгрузки от расстояния между трещинами.

Из полученных расчетов следует, что добиться необходимой разгрузки угольного пласта и вмещающих пород можно различными комбинациями горизонтальных и/или вертикальных трещин, однако, наилучшие результаты

получены при формировании горизонтальных трещин с очень малым расстоянием между ними, т.е. когда происходит образование одной магистральной трещины разрыва, соединяющей все дегазационные скважины.

В третьей главе предложен способ синхронного направленного гидроразрыва в шахтных условиях и технические средства его реализации.

Разработка способа синхронного направленного гидроразрыва включает проведение численных экспериментов процесса взаимодействия и слияния трещин при сближении скважин на относительно малые расстояния, а также исследование свойств жидкости гидроразрыва угольных пластов на основе пеногеля.

На основании проведенных исследований сформулирована задача определения взаимного расположения скважин синхронного гидроразрыва, обеспечивающих слияние трещин при заданном напряженном состоянии.

Для ее решения использовалось программное обеспечение, разработанное в лаборатории механики взрыва ИГД СО РАН при участии П.А. Мартынюка на основе пошагового алгоритма построения квазистатических траекторий распространения трещин. Данная программа позволяет определять траекторию в зависимости от следующих входных значений:

1) расстояния d между центрами начальных трещин, сформированных геомеханическим способом в окрестности скважин;

2) длины трещин l ;

3) минимального σ_H и максимального σ_V сжимающих напряжений в угледородном массиве и их отношения σ_H/σ_V ;

4) угла gam между направлением максимального напряжения σ_V и нормалью к заданной плоскости слияния трещин; в рассматриваемом случае угол gam равен углу падения пласта (рис. 5).

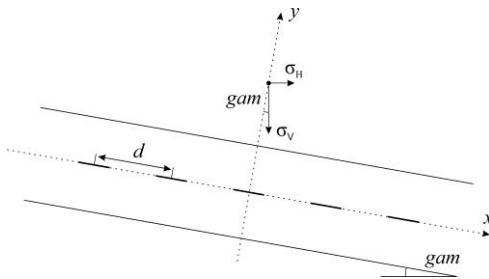


Рис. 5. Начальное положение трещин в однородном сжимающем поле.

В ходе численных экспериментов полагалось, что в изотропной упругой плоскости имеется пять трещин длиной $l = 2$ каждая (полудлина равна 1), расположенных на одной прямой вдоль оси X, а на бесконечности действует сжимающие напряжения интенсивностью σ_V и σ_H ($\sigma_V > \sigma_H$). Угол между направлением максимального напряжения σ_V и нормалью к заданной плоскости слияния трещин равен gam . Затем происходит подача жидкости в трещины под давлением $e_{00} \times p_0$ ($e_{00} > 1$), обеспечивающим их рост.

Расчет процесса развития трещин останавливался, когда выполнялось одно из следующих условий: либо трещины сближались по координате X на величину ax_{krit} , либо одно из крыльев какой-либо трещины выходило за границу заданного интервала ay_{krit} .

Целью численных исследований являлось определение максимально возможного расстояния d_{max} между параллельными скважинами, при котором трещины сливаются в единый разрыв, и оценка влияния различных факторов на это расстояние.

На рис. 6 приведены расчетные зависимости максимального расстояния d_{max} от e_{00} при значениях отношения минимального главного напряжения к максимальному равных 0,8 и 0,5.

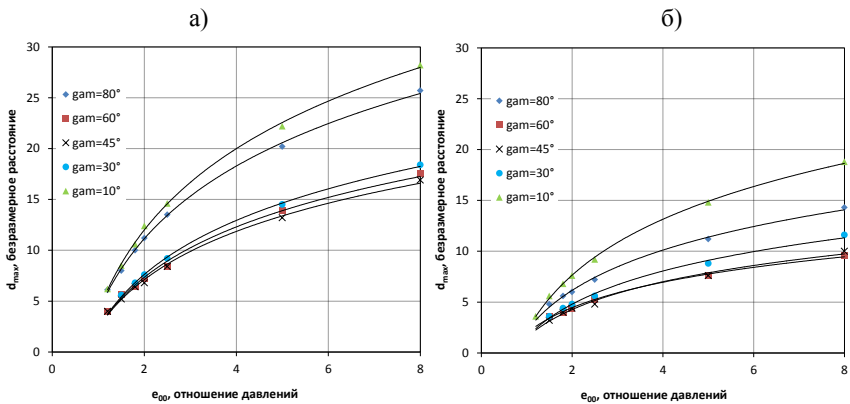


Рис. 6. Полученные зависимости d_{max} от e_{00} для $qdp=0.8$ (а) и $qdp=0.5$ (б).

Из представленных графиков видно, что при увеличении импульсного давления объединение трещин в единый разрыв происходит на большем расстоянии друг от друга. При этом расстояние d_{max} растет тем быстрее, чем точнее линия, на которой находится ряд трещин, совпадает с направлением одного из главных напряжений. Общая зависимость $d_{max}(e_{00})$ имеет вид $d_{max}=A \cdot \ln(e_{00})+B$ с величиной достоверности аппроксимации $R^2 > 0,99$.

Полученные результаты показывают сильное влияние давления разрыва на устойчивость развития трещин в заданном направлении. При малых давлениях (низких темпах подачи жидкости разрыва в трещины) значение d_{max} в несколько раз ниже (примерно, прямо пропорционально параметру e_{00}), чем при высоких значениях e_{00} , что свидетельствует в пользу импульсного характера гидроразрыва. Для реализации высокого темпа подачи жидкости в трещину необходимо использовать высокопроизводительные насосы, либо спе-

циальные батареи пневмогидроаккумуляторов большой емкости, автоматически подключаемые в момент начала формирования разрыва.

Второй задачей в рамках разработки способа синхронного направленного гидроразрыва являлись исследования свойств жидкостей разрыва на основе пеногеля.

Неудачи при проведении гидроразрыва в низкопроницаемых угольных пластах обусловлены, в основном, медленным выносом жидкости разрыва, блокирующей фильтрацию газа в создаваемых трещинах и вмещающих горных породах. Увеличение продуктивности дегазационной скважины при этом происходит крайне медленно – по мере очистки трещины в течение многих месяцев. Этим обусловлен интерес к пенным составам, самопроизвольно распадающимся со временем с малым объемом остаточной жидкой фазы. Использование азотной пены имеет ряд преимуществ: закачка малого количества жидкости меньше блокирует фильтрацию метана; энергия сжатого газа, который входит в состав пены, помогает выдавливать отработанный раствор из трещины; вакуумирование скважины в процессе дегазационных работ приводит к быстрой очистке трещины и пласта. Недостатком пенных составов является их низкая способность к транспортировке проппанта, что ведет к необходимости проведения гидроразрывов с высоким темпом нагнетания пены.

Для проведения гидроразрыва угольных пластов перспективно создание жидкостей гидроразрыва на основе пеногелей, которые образуются при температуре 20–40°C, а через определенное время распадаются с малым количеством остаточной жидкости.

Для решения поставленной задачи совместно с Институтом химии нефти СО РАН (г. Томск) проведены исследования кинетики гелеобразования, физико-химических и реологических характеристик пеногелей на основе метилцеллюлозы (МЦ) – водного раствора полимера с нижней критической температурой растворения (НКТП). Состав исследуемой композиции приведен в таблице 1.

Таблица 1

Состав пеногелеобразующей композиции на основе метилцеллюлозы

Вещество	Концентрация, % мас.
Метилцеллюлоза	1,0
Нитрит натрия NaNO_2	7,0
Хлорид аммония NH_4Cl	6,0
Хлорид алюминия AlCl_3	1,0

Для исследования свойств пеногелей в смеси с проппантом в качестве раскрепляющего материала использовали алюмосиликатный проппант BORPROP 12/18 (ГОСТ Р 51761–2001, API RP–60) с насыпной плотностью

1,86 г/см³. Проппант к раствору добавляли в весовом соотношении 1:5, 1:2, 1:1, 2:1 (20, 50, 100, 200 г проппанта на 100 г раствора).

Исследование стабильности наполненных проппантом пеногелей в статических условиях выявило следующие закономерности. Обнаружено, что в течение 1,5–2 часов продолжается увеличение объема пеногеля и распределения в нем проппанта по всему объему. Наполненные проппантом пеногели стабильны в течение 5 часов, затем начинается разложение пеногеля. На дне цилиндров образуется жидкий слой, объем которого увеличивается со временем. Проппант постепенно оседает и распределяется в жидком слое. Степень разложения пеногелей во времени определялась по отношению количества выделившейся жидкости к количеству раствора, взятого для образования пеногелеобразующей композиции. За 24 часа степень разложения составляет примерно 50 %.

Фильтрационные опыты с пеногелем проводили в двух вариантах:

1) пустую колонку заполняли проппантом, затем наполняли пеногелем и проводили фильтрацию воздуха;

2) пустую колонку заполняли предварительно приготовленной седиментационно устойчивой суспензией проппанта в пеногеле, содержащей 37,5% проппанта по массе, затем проводили фильтрацию воздуха.

Первый вариант соответствовал максимально плотной упаковке проппанта в колонке и минимально возможному количеству пеногеля, равному поровому объему (п.о.) колонки с проппантом. Второй вариант соответствовал максимальному количеству пеногеля и минимальному содержанию проппанта в колонке.

На рис. 9 показана динамика изменения газопроницаемости в опыте по первому и второму вариантам (кривая 1 и 2 соответственно).

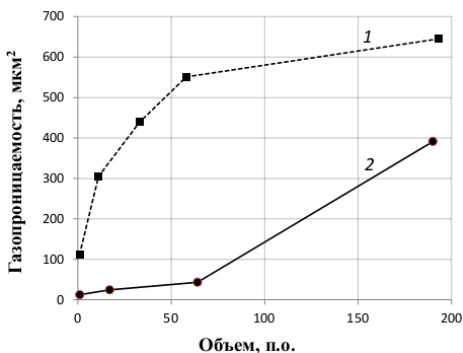


Рис. 9. Зависимость газопроницаемости колонки от прокачанного объема воздуха:

1 – колонка с проппантом, заполненная пеногелем;
2 – колонка, заполненная 37,5%-ной суспензией проппанта в пеногеле.

Видно, что в первом варианте эксперимента, после прокачки около 50 поровых объемов воздуха, газопроницаемость колонки стала такой же, как у колонки с проппантом без пеногеля, т.е. восстановилась практически полностью.

Во втором варианте газопроницаемость восстанавливалась медленнее, начальный градиент давления фильтрации воздуха составил 40–180 кПа/м, что выше, чем в опытах по первому варианту. После прокачки 200 поровых объемов воздуха, газопроницаемость колонки достигла значения 70% от величины газопроницаемости колонки с проппантом без пеногеля.

Результаты фильтрационных экспериментов позволяют заключить, что остаточные эффекты инъекции пеногеля не окажут существенного влияния на эффективность дегазации угольного пласта через скважину с трещиной гидроразрыва, созданной закачкой суспензии проппанта в пеногеле на основе метилцеллюлозы.

Для реализации предложенного способа гидроразрыва создаваемое оборудование должно обеспечивать возможность формирования протяженных дегазационных плоскостей по простиранию угольных пластов за счет высоких темпов подачи жидкости разрыва на основе пеногелей. Важным условием являлась возможность подключения комплекса к существующим шахтным системам подачи воды, например, на основе отечественного насоса УНИ-1 (УНР-2).

Для выполнения данных требований, разработано оборудование шахтного гидроразрыва, в состав которого входит устройство направленного разрыва, импрессионный пакер, скважинный трубопровод и система управления.

Устройство направленного гидроразрыва угольных пластов состоит из нижнего и верхнего пакеров, инжекторного пакера, а также из инжектора и деталей удлинителя. Общая схема устройства гидроразрыва показана на рис. 7.

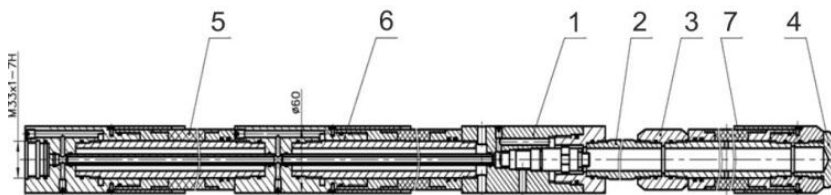


Рис. 7. Общий вид устройства разрыва: 1 – инжектор, 2 – удлинитель, 3 – муфта удлинителя, 4 – заглушка, 5 – верхний пакер, 6 – инжекторный пакер, 7 – нижний пакер.

Верхний и инжекторный пакеры незначительно отличаются друг от друга только соединительными размерами и конструкцией внешних труб с правой стороны.

Внутренний канал верхнего пакера предназначен для подачи гидравлического масла (азота) под давлением до 35 МПа в пакерные оболочки, расположенные дальше от устья скважины. Кольцевой канал между внешней и

внутренней трубами используется для подачи жидкости разрыва под давлением до 25 МПа в межпакерный интервал через инжектор.

Нижний пакер содержит только одну трубу, внутреннее пространство которой соединено с пневматической системой устройства разрыва и через отверстие в самой трубе с пакерной оболочкой.

Конструкция пакеров обеспечивает возможность последовательного соединения нижних или верхних секций пакеров между собой длиной до 4,5 метров. Длина интервала разрыва может составлять до 40 метров.

Импрессионный пакер представляет собой дополнительное устройство, предназначенное для регистрации трещин (в т.ч. трещины гидроразрыва) на стенке скважины. В качестве чувствительного элемента использована пакерная оболочка proRING54–1000 компании Sava-Solexperts с дополнительным слоем мягкой резины толщиной несколько миллиметров, нанесенной на поверхность пакерной оболочки. В состав импрессионного пакера входит встроенный механический регистратор угла поворота импрессионного пакера, срабатывающий во время подачи в пакер масла или азота. Максимальное давление импрессии 8 МПа, выдержка – до 1 часа.

Скважинный трубопровод имеет коаксиальную двухлинейную конструкцию. Внутренняя линия с проходным диаметром 6 мм служит для подачи гидравлического масла (азота) в пакеры и выдерживает давление 45 МПа. Внешняя линия, сформированная межтрубным пространством трубопровода, имеет условный диаметр проходного сечения 18 мм и служит для подачи жидкости разрыва под давлением до 35 МПа. В случае необходимости использования сложных двухкомпонентных составов, требующих смешения непосредственно в устройстве разрыва, возможно подключение пакеров к отдельной гибкой линии высокого давления. Трубопровод выполнен в виде отдельных однотипных секций длиной 2 м и массой 4,4 кг каждая; его конструкция обеспечивает оперативную сборку в шахтных условиях линии длиной до 100 м. В транспортном положении концы секций трубопровода закрыты пластиковыми крышками.

Система управления экспериментального образца оборудования состоит из блока управления подачей жидкости гидроразрыва и гидравлического масла (азота) в пакеры при выполнении гидроразрыва. Особенностью системы является возможность подключения пневмогидроаккумуляторов для обеспечения высокого темпа нагнетания жидкости разрыва даже при работе с малопроизводительными насосами. Конструкция оборудования обеспечивает возможность работы с насосом УНИ–1 (УНР–2) – одним из немногих серийно выпускаемым отечественным насосом, применяемым в шахтных условиях для выполнения гидроразрывов на водной основе.

Проведенные стендовые испытания экспериментального образца оборудования включали проверку герметичности гидравлической и пневматической подсистем, давления в интервале разрыва при различном давлении в пакерной подсистеме, узла регулировки темпа подачи жидкости разрыва. Оборудование успешно прошло все испытания.

В четвертой главе описывается применение разработанного подхода к планированию работ по предварительной дегазации углепородного массива с проведением операции синхронного направленного гидроразрыва в шахтных условиях.

Исходными данными для проектирования системы дегазационных скважин с трещинами гидроразрыва, являются:

1) геологические данные, включающие положение и состав пластов и включений горных пород, положение известных тектонических нарушений;

2) физические свойства горных пород, слагающих углепородный массив, включая упругие свойства горных пород, их плотность, проницаемость (по возможности);

3) напряженное состояние углепородного массива;

4) данные дегазационного теста;

5) расположение горных выработок, схема ведения горных работ.

Для оценки дополнительной добычи метана от перераспределения напряжений в углепородном массиве за счет трещин гидроразрыва необходимо провести специальные измерения в нескольких испытательных скважинах с целью получить усредненные зависимости начального удельного метановыделения в дегазационную скважину g_0 , $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$, и коэффициента темпа снижения газовыделения из дегазационной скважины во времени a , $1/\text{мин}$, от разгрузки горного давления $\Delta\sigma$.

В этом случае, при известных характеристиках $g_0(\Delta\sigma)$ и $a(\Delta\sigma)$, а также результатах численных расчетов на модели углепородного массива пространственных изменений напряженного состояния углепородного массива, вызванных гидроразрывами планируемой конфигурации, оценка дополнительной добычи метана дается следующими приближенными выражениями:

$$Q_{\text{CH}_4} \approx S_d \cdot \int_0^T g_0(\Delta\sigma_{av}) \cdot e^{-a(\Delta\sigma_{av}) \cdot t} dt; \quad (1)$$

$$\Delta\sigma_{av} = \frac{1}{V} \int_{(V)} [\sigma_2(x, y, z) - \sigma_1(x, y, z)] dV;$$

где $\sigma_1(x, y, z)$, $\sigma_2(x, y, z)$ – напряжение дегазируемой области углепородного массива после применения технологии синхронного направленного гидроразрыва и начальное напряжение в массиве соответственно, S_d – площадь дегазационной системы (поверхность рабочих участков дегазационных скважин и раскрытых участков трещин гидроразрыва), V – объем разгружаемой области, T – период дегазации, $\Delta\sigma_{av}$ – среднее значение разгрузки дегазируемого объема углепородного массива; g_0 – удельное начальное газовыделение в дегазационную скважину; a – коэффициент темпа снижения газовыделения дегазационной скважины во времени.

Расчеты проводят отдельно для вертикальных и горизонтальных сжимающих напряжений с суммированием получаемых данных.

Ожидаемое значение коэффициента интенсификации дегазации K данной конфигурацией трещин подземного гидроразрыва рассчитывают по формуле

$$K = \frac{S_d^{(k)} \cdot \sum_{k=1}^2 \int_0^T g_0^{(k)} (\Delta\sigma_{av}) \cdot e^{-a_k(\Delta\sigma_{av})t} dt}{S_d^{(0)} \cdot \int_0^T g_0^{(0)} \cdot e^{-a_0 t} dt} + 1; \quad (2)$$

где (0) – индекс газовыделения без разгрузки; (k) – индекс газовыделения с разгрузкой горного давления.

Относительное снижение периода дегазации вычисляется из уравнения

$$S_d \cdot \sum_{k=1}^2 \int_0^T g_0^{(k)} (\Delta\sigma_{av}) \cdot e^{-a_k (\Delta\sigma_{av})t} dt = S_d \cdot \int_0^{T_0} g_0^{(0)} \cdot e^{-a_0 t} dt \quad (3)$$

по формуле $\Delta T = \frac{T_0 - T}{T_0} \cdot 100\%$.

Разгрузку угленородного массива рассчитывают для различных конфигураций системы трещин гидроразрыва, элементом которых являются продольные трещины вдоль и вкрест простирания угольного пласта.

Оптимальную конфигурацию системы трещин гидроразрыва заказчик работ выбирает исходя из одного из следующих критериев:

- 1) максимальное увеличение степени дегазации при сохранении продолжительности дегазации (критерий интенсификации);
- 2) максимальное снижение продолжительности дегазации при заданной ее степени (критерий эффективности);
- 3) максимальная интенсификация или повышение эффективности дегазации при заданном объеме работ по выполнению подземного направленного гидроразрыва (экономический критерий).

В случае, когда оптимизированная конфигурация содержит последовательность продольных разрывов, направленных вдоль простирания угольного пласта, то проводят расчет расстояния между скважинами, при котором образующиеся в процессе разрыва трещины сливаются в единую магистральную трещину.

Выходными данными при проектировании дегазационных сеток являются последовательность выполнения гидроразрывов, схема бурения скважин и оценка эффективности дегазации.

Указания по проведению шахтного гидроразрыва оформлены в отдельный методический документ и включают расчет параметров гидроразрыва, описание основных операций при проведении работ, оценку эффективности применяемого подхода. Расчет параметров гидроразрыва включает выбор рабочей жидкости, расчеты давления, объема закачки рабочей жидкости и времени ее нагнетания.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является научно-квалификационной работой, в которой решена задача по интенсификации дегазации угольного пласта методом гидроразрыва, включающая в себя учет особенностей его напряженно-деформированного состояния, использование рабочей жидкости с малым остаточным объемом жидкой фазы, что имеет существенное значение для развития отрасли наук о земле.

Основные научные выводы и рекомендации заключаются в следующем:

1. Анализ отечественного и зарубежного опыта проведения операций гидроразрыва угольных пластов с целью интенсификации дегазации показал, что мало внимания уделяется распределению поля напряжений в пласте, а это является главным фактором при формировании трещины.

2. В результате математического моделирования и численных экспериментов установлено, что наибольший размер зоны метановыделения в массиве наблюдается при соединении нескольких трещин синхронного гидроразрыва в единую магистральную трещину, ориентированную вдоль простирания угольного пласта.

3. Установлено, что расстояние между параллельными скважинами, соединяемыми трещиной синхронного импульсного гидроразрыва линейно связано с логарифмом отношения импульсного давления к максимальному сжатию угольного пласта. При увеличении импульсного давления объединение трещин в единый разрыв происходит на большем расстоянии друг от друга. В случае, когда трещины развиваются в направлении одного из главных напряжений, формирование магистральной трещины выполняется при наибольших расстояниях между скважинами.

4. Для формирования магистральной трещины показана целесообразность импульсного синхронного гидроразрыва с высокими темпами подачи жидкости в растущие трещины. Это может быть реализовано использованием высокопроизводительных насосов, либо специальных пневмогидроаккумуляторов большой емкости, автоматически подключаемых в момент начала формирования разрыва.

5. Исследована жидкость гидроразрыва угольных пластов на основе пеногеля, обладающая высокой способностью к транспортировке пропанта и обеспечивающая малый блокирующий эффект на фильтрацию метана к скважине. Разработан способ синхронного направленного гидроразрыва и создан экспериментальный образец оборудования для его реализации. Предложены оригинальные технологические решения, в том числе, система управления, позволяющая использовать маломощные насосы за счет применения пневмогидроаккумуляторов; скважинный трубопровод, имеющий две независимые линии для использования в качестве рабочих жидкостей сложных химических составов, в том числе и на основе пеногелей.

6. Полученные результаты легли в основу разработанных методических рекомендаций для проектирования системы дегазационных скважин с

учетом напряженного состояния массива и использованием направленного шахтного гидроразрыва.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах.

В изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Курленя, М.В. Пенгель для гидроразрыва газоносных угольных пластов в шахтных условиях / М.В. Курленя, Л.К. Алтунина, В.А. Кувшинов, **А.В. Патутин**, С.В. Сердюков // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. Новосибирск. – 2012. – № 6. – С. 3–11.
2. **Patutin, A.V.** Numerical Studies of Coal Bed Fracturing for Effective Methane Drainage / A.V. Patutin, P.A. Martynyuk, S.V. Serdyukov // Journal of Siberian Federal University. Engineering&Technologies. – 2013. – Vol.6. – №1. – P. 75–82.
3. **Патутин, А.В.** Определение начальных условий для построения математической модели углепородного массива / А.В. Патутин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2013. – №7. – С. 397–401.

В прочих изданиях:

4. **Патутин, А.В.** Проведение исследований и разработка прототипа экологически безопасной технологии добычи метана из угольных пластов и подстилающих горных пород в шахтных условиях / А.В. Патутин, С.В. Сердюков // Итоговая конференция по результатам выполнения мероприятий ФЦП "Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2013 годы" за 2011 год по приоритетному направлению "Рациональное природопользование", Санкт-Петербургский государственный горный университет. – Санкт-Петербург: СПбГУ. – 2011. – С. 6–7.
5. **Патутин, А.В.** Численные исследования геомеханического способа управления продольным гидроразрывом в угольном пласте / А.В. Патутин // Проблемы геологии и освоения недр: Труды XVI Международного симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых ученых. Том II; Томский политехнический университет. – Томск: Издательство Томского политехнического университета. – 2012. – С. 364–366.
6. **Патутин, А.В.** Численное моделирование гидроразрыва системы скважин в угольном пласте / А.В. Патутин // Материалы 50-й Международной научной студенческой конференции «Студент и научно-технический прогресс»: Геология. Новосибирский государственный университет. – Новосибирск. – 2012. – С. 135.
7. **Патутин, А.В.** Численное моделирование управления продольным гидроразрывом в угольном пласте / А.В. Патутин, С.В. Сердюков, А.А. Зиновьев // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2012. VIII Международная научная конференция «Недропользование. Горное дело. Новые направления и технологии поиска,

- разведки и разработки месторождений полезных ископаемых»: сб. материалов в 2 т. Т.2. – Новосибирск: СГГА. – 2012. – С. 130–134.
8. Зиновьев, А.А. Численное моделирование процесса разгрузки углеродного массива / А.А. Зиновьев, **А.В. Патутин**, С.В. Сердюков // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2012. VIII Международная научная конференция «Недропользование. Горное дело. Новые направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых»: сб. материалов в 2 т. Т.2. – Новосибирск: СГГА. – 2012. – С. 174–178.
9. Serdyukov, S.V. Hydraulic fracturing of several wells in coal bed: numerical experiments / S.V. Serdyukov, **A.V. Patutin**, A.A. Zinovyev // 12th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2012, 17-23 June, Albena, Bulgaria. – 2012. – Vol.1. – P. 603–609.
10. Zinovyev, A.A. Numerical simulation of coal measure rocks stress-relief / A.A. Zinovyev, S.V. Serdyukov, **A.V. Patutin** // 12th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2012, 17-23 June, Albena, Bulgaria. – 2012. – Vol.2. – P. 223–230.
11. Zinovyev, A.A. Optimization of coal measure rocks stress relief to increase the efficiency of the degassing process: numerical modeling using FLAC software / A.A. Zinovyev, **A.V. Patutin**, S.V. Serdyukov // in Proceedings of 46th US Rock Mechanics Symposium ARMA 2012, 24-27 June, Chicago, USA. – 2012. – Paper No. ARMA 12–370.
12. Зиновьев, А.А. Численное моделирование процесса разгрузки углеродного массива / А.А. Зиновьев, **А.В. Патутин**, С.В. Сердюков // 2-ая Российско-Китайская научная конференция "Нелинейные геомеханико-геодинамические процессы при обработке месторождений полезных ископаемых на больших глубинах". Сборник трудов. – Новосибирск: ИГД СО РАН. – 2012. – С. 209–212.

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.