

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»

Комиссаров Игорь Анатольевич

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ КОМПЛЕКСНОЙ ПЛАСТОВОЙ ДЕГАЗАЦИИ
РАЗРАБАТЫВАЕМЫХ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ
ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ**

Специальность 2.10.3 – «Безопасность труда»

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель
д.т.н., доц. Коликов К.С.

Москва – 2025

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Современные геополитические изменения существенно повлияли на состояние угольной отрасли России. В 2024 году объем экспорта угля оказался почти вдвое ниже прогнозного уровня, при этом добыча угля в Кузбассе сократилась на 2% по сравнению с аналогичным периодом 2023 года. Финансовая ситуация также ухудшилась: по предварительным оценкам, при отсутствии господдержки совокупные убытки отрасли могут превысить доходы, полученные за 2020–2021 гг. в текущем 2025г. эти тенденции только усилились.

Прогнозы дальнейшего развития неоднозначны, однако в целом предполагается стабилизация текущего уровня добычи с последующим ростом. В этих условиях ключевым направлением становится повышение экономической эффективности угледобычи. Общей тенденцией является консолидация производства – сокращение числа очистных забоев при росте их производительности, что способствует переходу шахт к формату «шахта-лава» с производительностью до 10 млн тонн в год и более.

На шахтах России среднесуточная нагрузка на очистной забой за последние 10 лет выросла более чем на 1000 тонн, достигнув 10 386 т/сут. В ряде месяцев производительность отдельных лав превышала 1,0 млн т/мес. Это сопоставимо с мировыми рекордами, где показатели доходят до 1,6 млн т/мес. (более 57 тыс. т/сут). Вместе с тем, по оценке экспертов, потенциал современного подземного оборудования реализуется лишь на 30%.

Рост производительности комплексно-механизированных забоев является критическим условием конкурентоспособности отрасли. Однако увеличение интенсивности воздействия на углегазоносный массив в сочетании с ростом глубин горных работ и газоносности пластов требует высокого качества проектирования, а также мониторинга процессов. Простой очистных комплексов могут оборачиваться финансовыми потерями до 2000 долларов США в час. При этом за последние 16 лет на шахтах «Ульяновская», «Юбилейная», «Комсомольская», «Распадская», «Северная», «Листвяжная» произошли шесть крупных аварий, связанных с аэрологическими факторами, унесших жизни 302 человек.

В этих условиях критически важным направлением становится разработка эффективных решений по снижению газодинамической опасности и рисков смертельного травматизма. Одной из приоритетных задач является разработка технологий пластовой дегазации, адаптированных к условиям конкретных шахт.

За последние 10 лет специалисты АО «СУЭК-Кузбасс» совместно с Горным институтом НИТУ МИСИС и Санкт-Петербургским горным университетом императрицы Екатерины II (СПГУ) провели масштабные исследования газодинамических процессов при разработке газоносных угольных пластов. Были разработаны и внедрены технологии управления метановыделением, включая пластовую дегазацию.

Уголь, оставаясь одним из наиболее доступных и рентабельных невозобновляемых источников энергии, занимает ключевое место в мировой энергосистеме, при этом его ресурсы превышают запасы нефти и газа в несколько раз. Однако доля подземной добычи угля снижается, главным образом, из-за ограничений производительности, обусловленных газовым фактором. На глубинах 500–700 м газоносность пластов достигает 25–30 м³/т, при этом их проницаемость снижается, что негативно влияет на эффективность дегазации.

Дальнейшее повышение производительности возможно только при обеспечении высокой эффективности дегазационной подготовки угольных пластов. Это обуславливает необходимость совершенствования технологий дегазации и интенсификации процессов извлечения метана.

Существенный вклад в изучение газометанового состояния угольных пластов внесли ученые: академик Скочинский А.А., Черницын Н.Н., Эттингер И.Л., Лидин Г.Д., Айруни А.Т., Алексеев А.Д., Иванов Б.М., Фейт Г.Н., Малинникова О.Н. и др.

Особенно остро проблема газовыделения из разрабатываемых пластов проявляется при высоких темпах продвижения очистных забоев, когда времени на дегазацию недостаточно. Это повышает риск внезапных выбросов и взрывов метана и связано с низкой проницаемостью угольных пластов в естественном состоянии. Поэтому все большую актуальность приобретают технологии воздействия на угольные пласты, направленные на повышение их проницаемости. Большое значение в исследованиях по этому направлению имеют работы таких ученых, как: Ножкин Н.В., Баймухаметов С.К., Пучков Л.А., Васючков Ю.Ф., Сластунов С.В., Забурдяев В.С., Коликов К.С., Подображин С.Н., Полевщиков Г.Я., Ярунин С.А. и другие.

Заблаговременная дегазационная подготовка (ЗДП) редко используется в РФ из-за длительного срока извлечения газа (несколько лет) и высокой стоимости интенсификации притоков. Однако в условиях высокой газоносности пластов альтернативы этой технологии нет. Особое значение при применении данной технологии приобретает полнота обработки дегазируемого участка.

Основным технологическим элементом ЗДП является гидрорасчленение угольного пласта, направленное на раскрытие существующих трещин. Повышение эффективности ЗДП и предварительной пластовой дегазации за счёт увеличения проницаемости угольных пластов с помощью гидродинамических воздействий – актуальная задача для большинства угольных предприятий России и, в особенности, Кузбасса.

Пластовая дегазация из подземных выработок ограничена во времени и возможностях активного воздействия из-за близости очистных забоев. Однако даже в этих условиях имеются резервы для повышения эффективности, в том числе за счёт гидроразрыва, гидроударных и импульсных методов, что и составляет предмет настоящего исследования.

Цель работы – совершенствование технологии дегазации неразгруженных угольных пластов для обеспечения аэрологической безопасности при интенсивной отработке запасов угля на основе комбинирования способов гидрообработки.

Основная идея работы заключается в том, что повышение газоотдачи угольного пласта осуществляется гидровоздействием в импульсном режиме (в сочетании с базовым воздействием в режиме гидрорасчленения или без него), который обеспечивает наведение дополнительной трещиноватости в пласте.

Основные научные положения, выносимые на защиту:

1. Обоснован механизм снижения газовыделения в очистной забой из угольного пласта, подвергнутого гидрорасчленению (ГРП) или подземному гидроразрыву (ПодзГРП), который обеспечивается за счет комплекса факторов: извлечения метана из пласта, повышения остаточной газоносности и интенсификации дегазации разрабатываемого пласта оконтуривающими выработками.
2. Увеличение газопроницаемости неразгруженного от горного давления угольного пласта и полнота его обработки для эффективной дегазации должна достигаться без потери устойчивости массива комплексным применением гидрорасчленения и подземного гидроразрыва.
3. Повышение проницаемости неразгруженного угольного пласта за счет развития сети трещин усталостного характера обеспечивается применением прямого гидроудара с установленными параметрами, учитывающими режим нагружения и свойства пласта.
4. Механизм вспомогательного гидровоздействия с использованием эффекта обратного гидроудара для совершенствования комплексной технологии пластовой дегазации базируется на применении фундаментальных законов

гидродинамики и обеспечивает использование геоэнергии углепородного массива для повышения эффективности гидровоздействия.

Научная новизна:

1. Впервые доказан и количественно описан синергетический эффект предварительной гидроимпульсной обработки (включая управляемый обратный гидроудар), обеспечивающий увеличение протяжённости и связности трещинной сети при последующем ГРП и устойчивый рост газоотдачи.
2. Установлены и экспериментально верифицированы параметрические условия эффективной гидрообработки углепородного массива, темпов закачки и цикличности «нагнетание–сброс», а также предложена методика, позволяющая выполнить оценку развития трещин с учетом прочности массива.
3. Впервые для условий пласта Болдыревский (шахта им. С.М. Кирова) доказана межскважинная гидродинамическая связь зон воздействия и продемонстрирована эффективность комплексного воздействия, включающего гидрорасчленение с поверхности и подземный гидроразрыв, обеспечивающего полноту обработки без ухудшения состояния кровли.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждаются: использованием математических моделей массопереноса метана в угольных пластах и современных программных комплексов численного моделирования, реализующих метод конечных элементов и подтверждённых результатами промысловых наблюдений; расчётными значениями давлений нагнетания рабочей жидкости, которые показали удовлетворительное совпадение с фактическими данными при проведении гидродинамических воздействий; полученная экспериментальная база включает обширный объём шахтных исследований эффективности комплексной пластовой дегазации – более 300 подземных скважин гидроразрыва и 11 поверхностных скважин ГРП на пяти выемочных участках двух шахт АО «СУЭК-Кузбасс»; практическая реализация разработанных рекомендаций при проведении очистных работ на шахте им. С. М. Кирова обеспечила реальный технологический эффект повышения эффективности дегазации.

Научное значение работы заключается в разработке механизмов и обосновании параметров реализации технологий углубления дегазации за счет повышения проницаемости угольных пластов путем проведения гидроударных активных воздействий на него на стадии заблаговременной и предварительной дегазации

Практическое значение работы заключается в разработке рабочих проектов, а также программ и методик работ по реализации гидроимпульсных технологий на стадиях

заблаговременной и предварительной дегазации пласта Болдыревского на шахте им. С.М. Кирова.

Методы исследования включали: анализ литературных материалов; изучение метаноносности и метанопроницаемости углегазозного массива; аналитические и экспериментальные исследования газодинамических процессов, протекающих в угольном пласте; шахтные наблюдения процессов метановыделения в горные выработки, скважины и дегазационные системы; технико-экономический анализ процесса дегазации источников газовыделения. Данные натурных наблюдений и экспериментов получены с применением апробированных и утвержденных в установленном порядке методик.

Реализация выводов и рекомендаций. Разработанная технология предварительной дегазации угольного пласта Болдыревский скважинами из подземных выработок реализована на выемочных участках 24-57, 24-58, 24-59, 24-60, 24-62, 24-63 и 23-64 на шахте им. С.М. Кирова АО «СУЭК-Кузбасс». Разработанная технология заблаговременной дегазации угольного пласта Болдыревский скважинами с поверхности реализована на выемочных участках 24-63, 23-64, 24-65 и 24-70 на шахте им. С.М. Кирова АО «СУЭК-Кузбасс». Подтверждена эффективность разработанной комплексной дегазации по факторам извлечения метана из угольного пласта и снижения метанообильности очистного забоя.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались на Международных научных симпозиумах «Неделя горняка» (2017–2021 гг.), на научных семинарах и заседаниях кафедры «Безопасность и экология горного производства» (2018–2020, 2023 гг.).

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 22 печатные работы, из которых 16 в изданиях, рекомендуемых ВАК Минобрнауки РФ.

Объем и структура работы. Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав и заключения, списка литературы из 177 наименований и 1 приложения. Работа изложена на 167 странице машинописного текста, содержит 9 таблиц, 41 рисунок и 1 приложение.

Автор выражает благодарность проф., д.т.н. Сластунову С.В., д.т.н. Коликову К.С., к.т.н. Садову А.П., к.т.н. Хаутиеву А.М.-Б. за участие в выполнении научных исследований, помощь, поддержку и научно-методические консультации. Автор благодарит коллектив кафедры БЭГП за поддержку в работе.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Повышение нагрузки на очистные работы приводит не только к обострению проблемы восстановления фронта очистных работ, но и сокращению времени предварительной дегазации и, как следствие, снижению её эффективности. Это определяет повышение актуальности проблемы совершенствования способов воздействия на разрабатываемый пласт для повышения его проницаемости. Этому вопросу посвящены основные исследования настоящей диссертации.

Технология заблаговременной дегазационной подготовки достаточно подробно исследована на шахтах Карагандинского бассейна. Широкие исследования подземного гидроразрыва были проведены и применялись на шахтах Кузбасса, Донецкого и Карагандинского бассейнов в 70-е и 80-е годы. На современном этапе необходимо не только учесть ранее полученные результаты, но и повысить энергетическую эффективность воздействия и научно обосновать параметры технологии для обеспечения возможности широкого практического применения как в условиях заблаговременной дегазационной подготовки, так и при реализации схем предварительной дегазации. Повышение энергетической эффективности возможно за счет использования гидроимпульсных воздействий с использованием эффекта прямого и обратного гидроудара, которые ранее в условиях предварительной дегазации практически не рассматривались.

На основе проведения теоретических, лабораторных и натурных исследований были определены эффективные параметры разрабатываемых технологических схем пластовой дегазации с учетом горно-геологических и горнотехнических условий выемочных участков шахты им. С.М. Кирова АО «СУЭК-Кузбасс».

В связи с изложенным в диссертации решались следующие основные задачи:

исследовать закономерности и параметры процессов пластовой дегазации угольных пластов при использовании гидродинамических методов воздействия, направленных на обеспечение метанобезопасности и эффективности подземной добычи угля.

развить технологический подход к реализации подземного гидроразрыва, основанный на применении управляемых гидроимпульсных воздействий для повышения проницаемости и эффективности дегазации разрабатываемого пласта.

3. Оценить возможности повышения эффективности предварительной дегазации угольных пластов на основе применения гидроударных технологий.
4. Определить рациональную область применения данных технологий при предварительной и заблаговременной дегазации угольных пластов.

5. Обосновать механизм снижения «газового барьера» при применении технологии ПодзГРП.
6. Оценить эффективность технологии ПодзГРП в процессе эксплуатации дегазационных скважин ППД и при ведении очистных работ.
7. Разработать усовершенствованную технологию заблаговременной дегазации пластов (ЗДП) путем их гидрорасчленения (ГРП) для применения в условиях предварительной пластовой дегазации.
8. Оценить работоспособность и эффективность усовершенствованной технологии ГРП в составе комплексной пластовой дегазации (ГРП + ПодзГРП + ППД).

В процессе выполнения диссертационной работы исследованы возможности гидродинамического воздействия на угольный пласт с использованием эффекта прямого гидроудара в качестве базового воздействия, несущую основную энергетическую нагрузку по раскрытию трещин в дегазируемом угольном пласте.

Повышение эффективности гидродинамического воздействия осуществлялось также за счет использования эффекта обратного гидроудара при выпуске воды из подземной пластовой скважины.

Исследования гидродинамического воздействия с использованием эффекта прямого гидроудара были проведены специалистами СПГУ с участием автора. Повышение эффективности воздействия обеспечивается за счет формирования переменных напряжений в призабойной зоне пласта, которые обеспечивают усталостный рост трещин вокруг скважины. Регулируемыми параметрами являются амплитуда давления и количество циклов приложения нагрузки.

На основе лабораторного определения физико-механических свойств образцов угля пластов «Поленовский» был оценен диапазон напряжений, который обеспечивает рост трещин при гидравлическом воздействии и составил 18-25 МПа.

Шахтная апробация технологической схемы подземного прямого гидроудара была осуществлена на выемочном участке 24-57 шахты им. С.М. Кирова (2 куста по 5 скважин). На настоящее время можно констатировать следующее.

1. По результатам проведенного поискового эксперимента на шахте им. С.М. Кирова оценены технологичность и эффективность прямого ударного гидродинамического воздействия на угольный пласт из подготовительной выработки (прямой гидроудар).
2. Установлено некоторое повышение газопроницаемости призабойной зоны дегазируемого угольного пласта после применения прямого гидроударного

воздействия, выразившееся в повышении концентрации метана на соседних скважинах.

3. Гидроударное воздействие в режиме прямого гидроудара на угольный пласт необходимо проводить многократно и с достаточно большим количеством циклов (до 1000 циклов и более), что крайне затруднено в реальных шахтных условиях.
4. Отмечено чрезмерное развитие трещиноватости краевой части непосредственно у устьев скважин, что в условиях кустовых скважин приводит к недостаточной эффективности.
5. Недостатки технологии прямого гидроудара, а также технологическая сложность ее реализации и ограниченность времени на обработку скважин предопределили необходимость поиска других технологий гидродинамической обработки пласта.
6. Была исследована возможность применения в качестве базового воздействия более энергоэффективную технологию подземного гидроразрыва.

Дано обоснование вспомогательного воздействия на угольный пласт в режиме обратного гидроудара, когда переменные напряжения формируются при истечении рабочей жидкости из подземной пластовой скважины после проведения подземного гидроразрыва. Рассмотрена физическая модель явления обратного гидравлического удара при торможении рабочей жидкости на стадии самоистечения. Показано, что величина ударного давления на основной фазе гидравлического удара может вычисляться по формуле Н.Е. Жуковского, о чем подробнее будет изложено ниже.

Технология подземного гидроразрыва известна достаточно давно, но имеет ряд существенных недостатков, требующих своего устранения.

В работе представлена усовершенствованная и исследованная с участием автора в условиях шахты им. С.М. Кирова технологическая схема гидроразрыва угольного пласта (здесь и далее ПодзГРП), свободная от недостатков известных, ранее применявшихся и неэффективных в современных горнотехнических условиях технологий. Главное преимущество разработанной усовершенствованной технологии заключается в высокой ее надежности и технологичности.

Совместно с ООО «Сибхимукрепление» была разработана и внедрена оригинальная конструкция скважины подземного гидроразрыва и определены рациональные параметры ее герметизации.

Основные параметры гидровоздействия в предполагаемом режиме гидроразрыва, освоения и эксплуатации скважин на первом поисковом объекте шахтных испытаний (скважины ПодзГРП №№ 1-6 на выемочном участке 24-58 шахты им. Кирова) были следующие:

- длина участка герметизации - 36 м;
- эффективная длина рабочего интервала – 2-7 м;
- давление нагнетания рабочей жидкости 16÷21,5 МПа;
- темп нагнетания – 10 л/с;
- пластовое давление – 3,2÷3,3 МПа;
- дебит метана после ГРП достигал 65 л/мин (до воздействия - 12 л/мин).

Эффективность данной технологии предварительной дегазации с использованием подземного гидроразрыва определяется следующими факторами:

1. снижение природной газоносности (x) разрабатываемого угольного пласта за счет извлечения метана пластовыми скважинами в зонах повышенной проницаемости;
2. снижение природной газоносности за счет газоистощения разрабатываемого пласта подготовительной выработкой, выступающей в качестве пластовой скважины большого диаметра, расположенной в массиве повышенной гидроразрывом проницаемости;
3. повышение остаточной газоносности (x_0) за счет частичного блокирования метана водой в порах угольного пласта, которое приводит к снижению эффективной газоносности ($x - x_0$).

Основные результаты поискового этапа работ на участках 24-58, 24-59 и 24-60 заключаются в следующем:

1. подтверждена технологичность и эффективность способа предварительной дегазации с использованием подземного гидроразрыва;
2. экспериментально установлен имеющий место режим гидровоздействия – гидрорасчленение угольного пласта с циклическими микрогидроразрывами;
3. Реализована методика определения рациональных параметров технологии ПодзГРП.

Реализация разработанной методики оценки эффективности комплексной технологии (подземный гидроразрыв + предварительная дегазация) в лаве 24-58 шахты им. С.М. Кирова показала, что дебиты и суммарный съем метана скважинами предварительной дегазации в зоне влияния скважин подземного гидроразрыва в 2-4 раза выше, что подтверждает эффективность способа по этому важнейшему фактору.

При ведении очистных работ на этом же объекте установлено, что в зонах ПодзГРП:

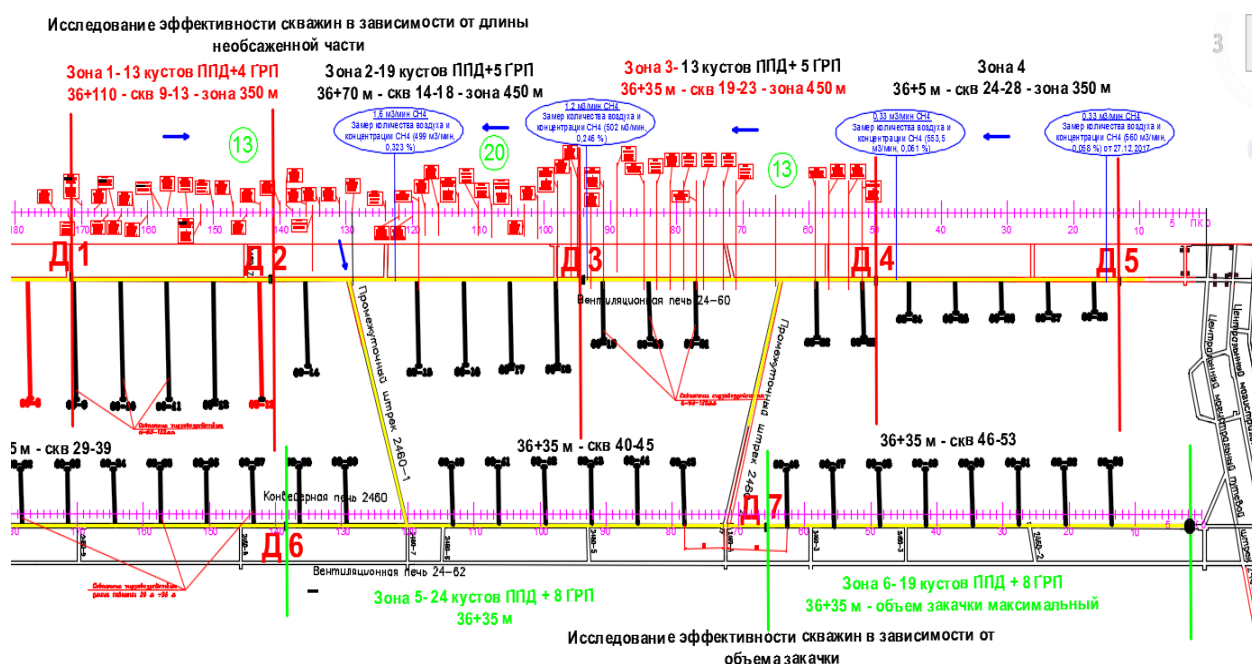
- относительная газообильность снижена на 32%;
- абсолютная газообильность снижена на 17%;
- остановки на проветривание за сутки снизились на 70%;

– суточная добыча увеличилась на 20%.

Данные результаты явились основанием для применения разработанной технологии на выемочных участках 24-60, 24-62, 24-63, 24-64 и 24-65.

Также отмечено, что с увеличением темпа нагнетания рабочего агента, возрастает эффективность дегазации. Последний вывод предполагает в перспективе поиск и применение более мощного нагнетательного оборудования для реализации технологии ПодзГРП.

Методический подход к выявлению рациональных параметров подземного гидроразрыва, приведенный на рисунке 1, позволил обосновать эффективную длину скважины ПодзГРП.



Р

и

с

Выемочное поле было разбито на 4 участка с различными величинами рабочего интервала скважин ПодзГРП: 5, 35, 70 и 110 метров. Динамика газовыделения скважин ППД в зонах с различной длиной рабочего интервала скважин ПодзГРП, пробуренных из вентиляционной печи 24-60, во времени приведена на рисунке 2.

Установлено, что в первой степени приближения рациональная длина скважин ПодзГРП по фактору извлечения метана составляет 70 метров (красная кривая).

Основная оценка эффективности технологии ПодзГРП при ведении очистных работ и выявление ее рациональных параметров была проведена на выемочном участке 24-60. Результаты натурной апробации позволили констатировать следующее:

Методический подход к выявлению рациональной длины скважин подземного

гидроразрыва

- эффективность предварительной дегазации из конвейерной печи выше, чем из вентиляционной;
- проведение подземного гидроразрыва повышает эффективность пластовой дегазации.

Данный эффект объясняется влиянием на эффективность предварительной дегазации фазовой проницаемости, т.к. из конвейерной печи зона гидроразрыва осушается эффективней.

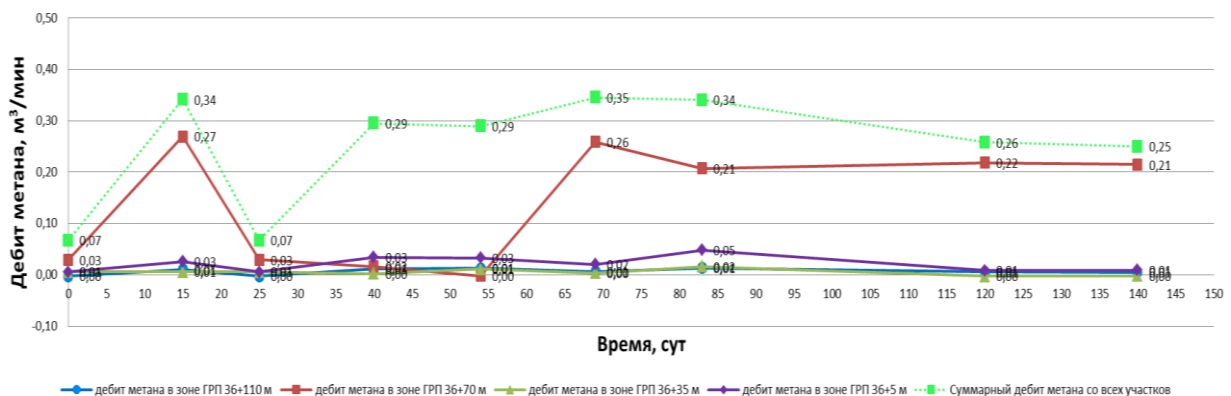


Рисунок 2 – Экспериментальное выявление рациональной длины скважин ПодзГРП

По результатам сравнения зон рекомендуются различные значения рабочих интервалов скважин ПодзГРП из конвейерной и вентиляционной печей: 70 м и 5 м соответственно.

Выполнено обоснование прогнозируемой величины давления нагнетания рабочего агента. Аналитическое определение давления гидроразрыва предусматривает наличие в угольном пласте тектонически напряженных и тектонически разгруженных зон. Предложена формула, подтвердившая свою работоспособность при внедрении технологии подземного гидроразрыва на выемочных участках 24-58, 24-59, 24-60.

$$p_r = (1 - \nu)(2q_{\infty} + \sigma_s),$$

где p_r – давление жидкости, необходимое для образования вертикальной трещины при гидроразрыве, кгс/см²;

q_{∞} – боковое горное давление, кгс/см²;

σ_s – коэффициент Пуассона; σ_s – давление гидроразрыва, кгс/см²;

$$p_{грп} = (\gamma_{п} H + \sigma_p) \alpha,$$

где α – коэффициент, учитывающий необходимое превышение забойного давления над давлением разрыва, ($\alpha = 1,2-1,4$).

Предложена и проверена в экспериментальных шахтных условиях аналитическая зависимость, обеспечивающая определение проектного объема рабочей жидкости при реализации технологии ПодзГРП. Объем определяется исходя из целесообразности заполнения всего фильтрующего объема в зоне влияния скважин подземного гидроразрыва. Если освоение скважин и съем газа из них не предусмотрен в связи с дефицитом времени на пластовую дегазацию, то объем может определяться по формуле гидратации угольного пласта и достигать 20÷40 л/т обработанных запасов угля. Режим гидратации и его параметры были исследованы и подтверждены на многих шахтах Донбасса (Л.В. Савенко).

Совершенствование технологии заблаговременной дегазации пласта велось по двум направлениям путем включения в состав мероприятий по комплексной пластовой дегазации циклических гидроударных воздействий, производимых на угольный пласт через скважины, пробуренные с поверхности:

- применение технологии гидрорасчленения с использованием прямого гидроударного воздействия в качестве основного воздействия на угольный пласт через скважины с поверхности;
- повышение энергетической эффективности гидрорасчленения за счет обратного гидроударного воздействия в качестве вспомогательного воздействия.

Разработана учеными из СПГУ (Коршунов Г.И., Серегин А.С., Магомет Р.Д. и др.) с непосредственным участием автора и предложена к реализации технологическая схема прямого гидроудара на угольный пласт через скважины с поверхности при его заблаговременной дегазации. Дано аналитическое обоснование предлагаемой технологии с использованием прямого гидроудара. Расчеты показали, что при воздействии в этом режиме напряжения в угольном пласте достигают $18 \div 26$ МПа при времени действия импульса 0,02 с, что обеспечивает прирост трещиноватости.

Проведенные лабораторные исследования показали, что при напряжениях 25 МПа необходимо не менее 1000 циклов для обеспечения условий роста трещин, при напряжениях 19,5 МПа необходимо не менее 3000 циклов, а при напряжениях менее 18 МПа рост трещин не наблюдается и при количестве циклов 6000.

Сделан основной вывод о том, что анализируемая технология прямого гидроудара имеет ограниченную область применения и ее целесообразно использовать только в качестве вспомогательного (например, при недостаточной мощности насосного оборудования), а не базового воздействия.

Обосновывается, что возможности гидроударного воздействия более целесообразно реализовывать в виде применения технологии обратного гидроудара.

Предложена технологическая схема гидроударного воздействия при реализации его на стадии истечения воды по окончании базового гидровоздействия, в частности, традиционного гидрорасчленения угольного пласта. Приводится аналитическое обоснование механизма обратного гидроудара.

Рекомендуемый диапазон времени Δt перекрытия жидкости в цикле при обработке через скважины, пробуренные с поверхности

$$\Delta t = k \frac{L + R}{c}$$

где k – эмпирический коэффициент, равный 2...10;

L – глубина залегания пласта, м;

R – радиус зоны гидравлической обработки, м;

c

– скорость распространения ударной волны/на второй фазе гидроудара -по формуле Н.Е. Жуковского

$$\Delta p = \rho \cdot v \cdot c.$$

Расчетная формула для скорости распространения ударной волны

$$c = \sqrt{\frac{K}{\rho} \frac{1}{1 + \frac{K}{E} \cdot \frac{D}{\delta}}}$$

где K – модуль упругости жидкости, у воды $K = 19,62 \cdot 10^8$ Па;

D – диаметр трубопровода, м;

δ – толщина стенки трубопровода;

E – модуль упругости стенки трубы, для стальных труб $K/E \approx 0,01$.

В работе дано обоснование усовершенствованной для горнотехнических условий шахты им. С.М. Кирова комплексной дегазации разрабатываемого угольного пласта на основе его гидрорасчленения через скважины с поверхности.

Первыми объектами предполагаемого применения технологии гидрорасчленения угольного пласта Болдыревский в условиях предварительной дегазации явились выемочные поля 24-63 (скважины 1-6-ГРП) и 24-64 (скважины 7-11-ГРП).

Эффект от применения ГРП с поверхности, как базового воздействия на дегазируемый пласт, достигается практически по тем же направлениям, что и при подземном гидроразрыве, т.е. снижение газоносности пласта (x) в зонах ГРП; повышение остаточной газоносности пласта (x_0) в зонах гидрообработки; снижение потенциальной выбросоопасности угольного пласта вследствие его увлажнения, повышения квазипластичности и снижения газоносности. При этом снижение газоносности в зависимости от потенциального времени дегазации может достигаться как за счет извлечения метана через скважину ГРП, так и скважинами предварительной дегазации.

Состав технологических операций в условиях ГРП с поверхности как способа предварительной дегазации содержит следующее:

- сооружение скважины ГРП в соответствии с паспортом;
- опрессовка скважины ГРП;
- гидрорасчленение угольного пласта;
- выдержка воды в пласте;
- выпуск воды после падения давления на устье скважины;
- промывка скважины;
- спуск рабочей жидкости в подготовительную выработку;
- извлечение газа через скважину ГРП на поверхность.

Рекомендуемый состав комплексной пластовой дегазации имел следующий вид (таблица 1).

Обоснование этого технологического предложения заключалось в следующем. Так как на выемочном участке 24-64 требуемый коэффициент дегазации составил 0,4 (в отличие от участка 24-63, где он составлял 0,3), рекомендовалось в составе комплексной дегазации дополнительно предусмотреть в качестве вспомогательного воздействия обратный гидроудар.

Обоснованы рекомендуемые параметры ГРП как базового воздействия в условиях предварительной дегазации. Ориентировочный расчет проектного объема закачки учитывает особенности структуры угольного пласта, подвергнутого гидрорасчленению.

Первоначально считаем, что естественная трещиноватость представлена двумя системами естественных трещин, раскрываемых в процессе ГРП. Угольный пласт имеет блочно-трещиноватую структуру с размерами блоков порядка b . Ширина раскрытия трещин d , радиус воздействия скважины гидрорасчленения R .

Таблица 1 – Рекомендации на применение обратного гидроудара в составе комплексной пластовой дегазации

Объект, лава, пласт	Требуемая степень дегазации и пласта	Срок дегазации, мес.	Рекомендуемая схема дегазации		
			Основная	Вспомогательные	Способ интенсификации и газовыделения

Лава 24-63 Болдыревски й			ГРП	ПодзГРП, ППД	Спуск воды в горную выработку
Лава 24-63 Болдыревски й			ГРП	ПодзГРП, ППД	ГУВ (обратный гидроудар) + спуск воды в горную выработку

Ориентировочные значения названных величин почерпнуты из проанализированного опыта работ по ЗДП в Карагандинском и Донецком бассейнах.

Объем закачки при ГРП в условиях ЗДП (срок пластовой дегазации три и более лет, отсутствие влияния горных работ) определяется из условия заполнения всего фильтрующего объема в зоне влияния скважины ГРП.

Объем закачки при ГРП в условиях ЗДП (срок 3 года и более) при заполнении всего фильтрующего объема

$$Q_{\text{р.ж.}} = \pi \cdot R^2 \cdot h \cdot m_{\text{эф}} \cdot k_{\text{ф}} \cdot k_{\text{с}},$$

г

д мощность угольного пласта, 2,15 м;

ф – коэффициент, учитывающий потери жидкости на фильтрацию, 1,1;

– коэффициент, учитывающий потери жидкости при сбросе давления, 1,05;

эф – эффективный коэффициент фильтрации (фильтрация в трещинах пласта); 0,01.

$$Q_{\text{р.ж.}} = 3,14 \cdot 125^2 \cdot 2,15 \cdot 0,01 \cdot 1,1 \cdot 1,05 = 1220 \text{ м}^3.$$

Ориентировочный объем закачки в этом случае принимается 1220 м³. Минимальный объем закачки при ГРП в условиях предварительной дегазации (срок – менее трех лет, наличие возможного влияния горных выработок) определяется исходя из условия заполнения водой не всего фильтрующего объема в зоне влияния скважин ГРП, а только объема раскрываемых трещин. Ориентировочный объем закачки в этом случае составляет 500 м³.

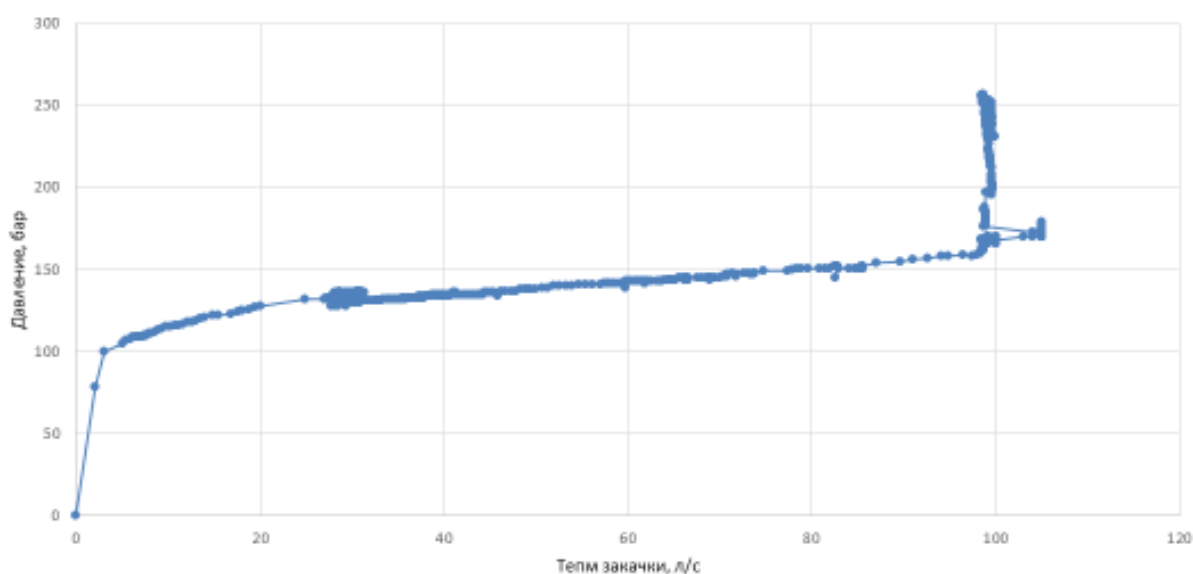
Проектный объем закачки при ГРП в условиях ЗДП без освоения скважин ГРП (реализация режима гидратации пласта), как это имело место на первых выемочных участках ш. им. С.М. Кирова, составляет 2700 м³.

Выявлена необходимость учета фактора времени выдержки воды в пласте и темпа ее нагнетания. Установлена реализация эффекта набухания угля в зоне гидровоздействия, представленная на примере зоны скважины 6 ГРП (рисунок 3).

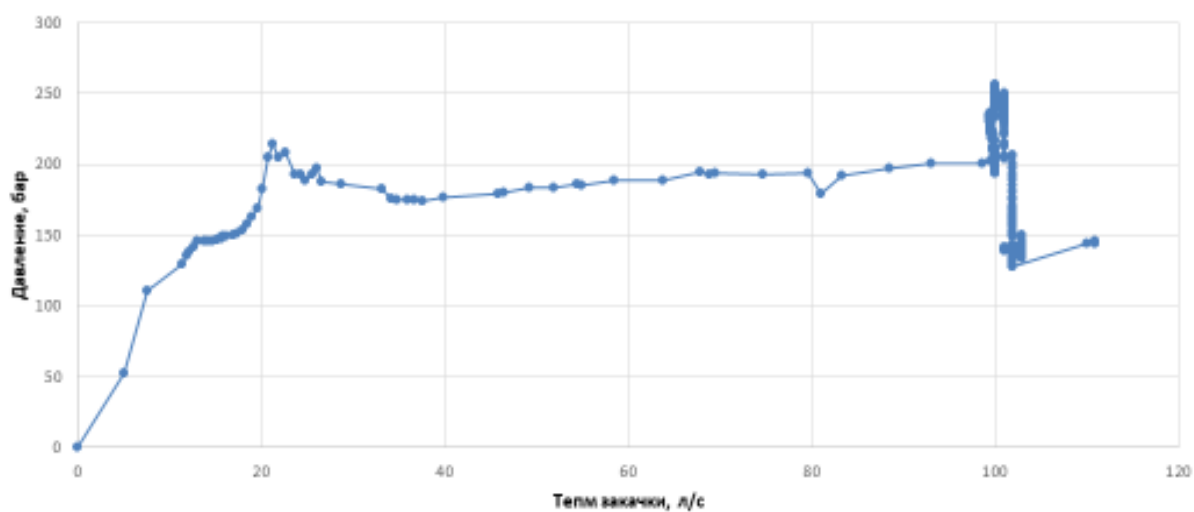
Давление ГРП на 2 рабочем этапе обработки 150 бар, на 3 этапе через 4 суток выдержки воды в пласте 190 бар, что говорит о потенциальной возможности на 2-м этапе обработки воде проникать в дополнительный, неиспользуемый ранее, фильтрующий объем пласта, увеличивая при этом равномерность гидрообработки.

Также сделан вывод, что темп нагнетания следует ограничить 95÷100 л/с, так как не желательны гидроразрывы дегазируемого пласта в конце закачки воды в пласт.

Подтверждено, что при осуществлении ГРП с поверхности раскрытие трещин происходит по направлению основной системы трещиноватости угольного пласта. Об этом свидетельствуют зафиксированные водопроявления на пикетах КП207 и ПК202 в вентиляционной печи при осуществлении гидрорасчленения на скважине 1 ГРП.



а)



б)

Рисунок 3 – Оценка влияния фактора набухания угля в процессе выдержки рабочей жидкости ГРП в пласте: а) график зависимости давления в скважине 6 ГРП (2 этап $p_{\text{гпр}} = 150$ бар) от темпа закачки рабочей жидкости; б) график зависимости давления в скважине 6 ГРП (3 этап $p_{\text{гпр}} = 190$ бар, темп нагнетания 98 л/с, объем закачки – 1301 м³)

Рост давления на ранее обработанной скважине 2 ГРП в зависимости от давления во время гидрорасчленения пласта через скважину 3 ГРП показывает, что выбранная сетка заложений скважин ГРП обеспечивает перекрытие зон влияния соседних скважин (рисунок 4).

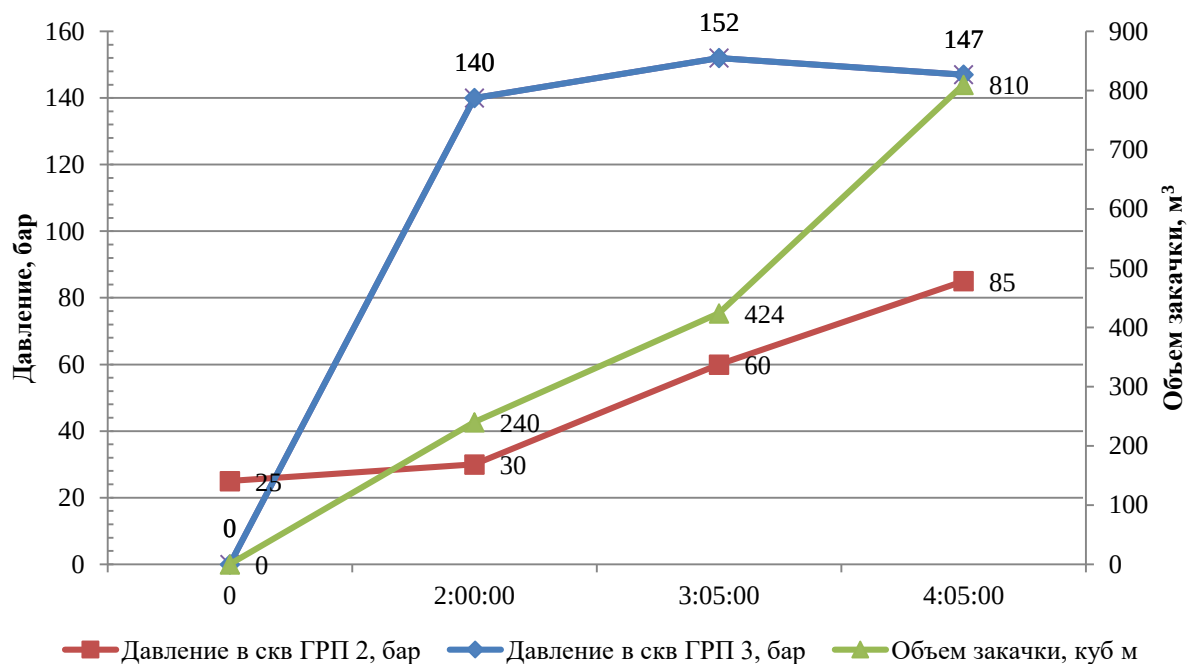


Рисунок 4 – Гидравлическая связь между скважинами 2 и 3 ГРП

Аналогичное подтверждение получено по динамике падения давления в скважинах 2 ГРП и 3 ГРП после проведения гидрорасчленения. Наглядно прослеживается их гидравлическая связь.

Проводилась дальнейшая оптимизация времени выдержки воды в пласте между циклами гидрообработки. Представлены результаты выдержки воды в пласте на скважине 10 ГРП длительностью 12-14 суток. Высокие величины площади петли гистерезиса подтверждают эффективность выполненной гидрообработки (рисунок 5).

По серии экспериментов сделан вывод о целесообразности в дальнейшем обеспечивать выдержку рабочей жидкости в пласте между циклами 12-14 суток без стравливания давления для существенной реализации эффекта набухания угля.

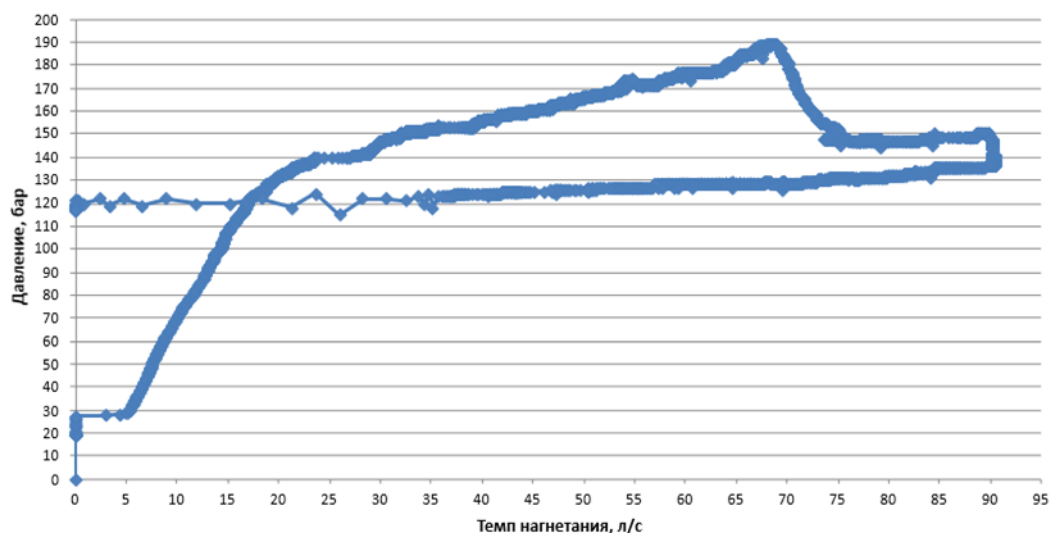


Рисунок 5 – Оценка эффективности выдержки воды в пласте по петле гистерезиса приемистости в скважине 10 ГРП

Подтверждена возможность технологического совмещения двух основных гидродинамических воздействий: ГРП и ПодзГРП. Установлено перекрытие зон влияния скважин ГРП и ПодзГРП, что также подтверждает правильность выбранных параметров комплексной пластовой дегазации.

При проведении ПодзГРП в зонах ГРП констатируется реализация режима гидрорасчленения, т.е. происходит не гидросбойка или фильтрация, а раскрытие естественных систем трещинообразования угольного пласта, что существенно повышает равномерность его обработки.

Оценка эффективности комплексной пластовой дегазации была проведена на выемочном участке 24-63 (рисунок 6), где было выделено 7 зон, имеющих свой специфический состав комплекса (ГРП + ПодзГРП) или его отсутствие (зоны сравнения).

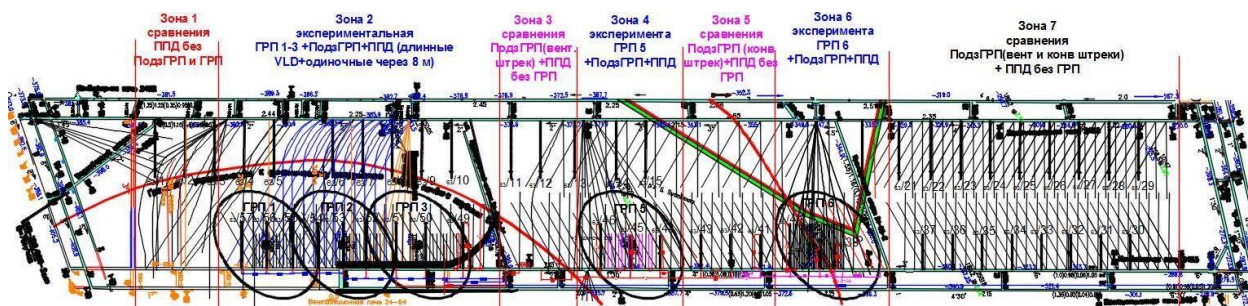


Рисунок 6 – Расположение сравниваемых зон комплексной дегазации на выемочном участке 24-63

Эффективность выполненных работ по комплексной дегазации с применением ГРП подтверждают следующие полученные результаты:

- рост нагрузки на очистной забой на 16% (6806 т/сут), по сравнению со всеми зонами сравнения (5718 т/сут);
- снижение потерь времени за один цикл добычи на 15% по остановкам на проветривание;
- снижение относительной газообильности по зонам комплексной дегазации на 12

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является научно – квалификационной работой, в которой представлены новые научно обоснованные технологические решения и разработки, имеющие существенное значение для развития угольной отрасли страны в части решения актуальной задачи обеспечения аэрологической безопасности и эффективности подземной угледобычи на основе разработки технологии комплексной дегазации разрабатываемых угольных пластов с использованием гидродинамических воздействий.

Основные **научные и практические результаты** работы, полученные диссертантом, заключаются в следующем:

Основные **научные и практические результаты** работы, полученные диссертантом, заключаются в следующем:

а основе анализа теории и практики дегазации разрабатываемых угольных пластов, обоснована необходимость и определены пути совершенствования технологии гидродинамических воздействий, обеспечивающих повышение проницаемости.

обоснована перспективность исследования и применения комплексной технологии дегазации угольных пластов с их гидрорасчленением через скважины, пробуренные с поверхности, и технологии предварительной дегазации с использованием подземного гидроразрыва угольного пласта.

гидроударное воздействие в режиме прямого гидроудара на угольный пласт для достижения значимой эффективности подземной пластовой дегазации необходимо проводить многократно и с большим количеством циклов (1000 циклов и более), что ограничивает область его практического применения.

проанализирована физическая модель реализации обратного гидравлического удара при торможении рабочей жидкости на стадии самоистечения в процессе освоения скважин. Воздействие в этом режиме технологично и может

применяться как при заблаговременной, так и при предварительной дегазации для повышения эффективности дегазации.

исследованы и обоснованы рациональные параметры подземного гидроразрыва угольного пласта (ПодзГРП), осуществляемого в составе комплексной пластовой дегазации.

при реализации технологии ПодзГРП идентифицированы два основных целесообразных режима внедрения рабочего агента в угольный пласт: гидрорасчленение и гидрорасчленение с циклическими микрогидроразрывами, при этом повышение эффективности комплексной пластовой дегазации обеспечивается повышением темпа закачки рабочей жидкости.

обоснована целесообразность использования подземного гидроразрыва и её основные параметры, при этом рабочий интервал восстающих скважин составляет 70 м, а нисходящих – 5 м, при расстоянии между скважинами гидроразрыва 70 м в случае обеспечения темпа закачки 10 л/с (для условий шахты им. С.М. Кирова).

обоснованы принципы действия и определены ключевые технологические параметры гидродинамического воздействия на неразгруженный угольный пласт при заблаговременной дегазации с применением прямого гидроудара через поверхностные скважины.

оценка радиуса влияния гидродинамического воздействия с использованием прямого гидравлического удара показала, что при количестве циклов воздействия до 500 он не превышает 15 м. Эти параметры предопределяют то, что технология с использованием прямого гидроудара предполагается как вспомогательное (технологический резерв), а не основное воздействие.

ано аналитическое обоснование механизма вспомогательного гидродинамического воздействия с использованием эффекта обратного гидроудара как способа повышения использования энергии гидрорасчленения при заблаговременной дегазации на этапе самоистечения рабочей жидкости в процессе начального освоения скважин.

обоснован механизм снижения газовыделения в выемочные участки при комплексной дегазации разрабатываемого угольного пласта в зонах влияния скважин ГРП.

одтверждена работоспособность и эффективность разработанной технологической схемы ГРП и основных ее параметров при применении этой

технологии в условиях предварительной дегазации в ходе ведения очистных работ.

становлена возможность реализации режима гидрорасчленения угольного пласта в процессе подземного гидроразрыва (реализации технологии ПодзГРП) в зонах влияния скважин ГРП, пробуренных с поверхности.

Список научных трудов

1. Коршунов Г.И., Серегин А.С., Садов А.П., Комиссаров И.А. Дегазация угольных пластов на основе циклического гидродинамического воздействия // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). ОВ 3 «Промышленная безопасность», 2014, с.29-35.
2. Комиссаров И.А., Магомет Р.Д., Серегин А.С. Обеспечение метанобезопасности угольных шахт за счет повышения эффективности дегазации угольных пластов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). СВ 7 «Промышленная безопасность предприятий минерально-сырьевого комплекса в XXI веке, 2015, с.190-195.
3. Макаров В. А., Понизов А. В., Комиссаров И. А. Исследование влияния размеров отбитого комбайном угля на газообильность очистного забоя. В сб. «Повышение промышленной безопасности и эколого-экономической эффективности при ведении горных работ» // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2018. – № 1 (специальный выпуск 3). – М.: Издательство «Горная книга» (ISSN 0236-1493), с.23-29
4. Мазаник Е.В., Комиссаров И.А., Сластунов С.В. Гидродинамическое воздействие на угольный пласт с использованием эффекта обратного гидроудара на стадии свободного истечения воды из подземной пластовой скважины. Znanstvena misel journal. Slovenia (ISSN 3124-1123). №19/2018, Vol.1, с. 56-58.
5. Сластунов С.В., Мазаник Е.В., Комиссаров И.А. Методика опытных испытаний технологии циклического гидроударного воздействия на угольный пласт через скважины с поверхности. Znanstvena misel journal. Slovenia (ISSN 3124-1123). №19/2018, Vol.1, с. 59-63.
6. Сластунов С.В., Мазаник Е.В., Мешков А.А., Комиссаров И.А. Гидродинамическое воздействие на угольный пласт с использованием эффекта обратного гидроудара на стадии свободного истечения воды из подземной пластовой скважины // Горный информационно-аналитический бюллетень

(научно-технический журнал). Специальный выпуск 32 «Безопасность и экология горного производства», №6, 2018, с.9-16.

7. Сластунов С.В., Мешков А.А., Мазаник Е.В., Комиссаров И.А. Методика опытных испытаний технологии циклического гидроударного воздействия на угольный пласт через скважины с поверхности // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). Специальный выпуск 32 «Безопасность и экология горного производства», №6, 2018, с.17-25.
8. Тайлаков О.В., Кормин А.Н., Уткаев Е.А., Комиссаров И.А. Оценка газоносности и проницаемости угольных пластов в шахтных условиях // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2018
9. Сластунов С.В., Мазаник Е.В., Комиссаров И.А., Хаутиев А.М.-Б. Выявление рациональных параметров технологии подземного гидроразрыва в части оптимизации темпа нагнетания рабочей жидкости // Горный информационно-аналитический бюллетень (ГИАБ), № 9, 2018, с. 90-95.

Сластунов С.В., Мешков А.А., Мазаник Е.В., Комиссаров И.А. Анализ режимов нагнетания рабочей жидкости при применении технологии подземного гидроразрыва // Горный информационно-аналитический бюллетень (ГИАБ), № 10, 2018, с. 110-117.
11. Мазаник Е.В., Хаутиев М.-Б., Комиссаров И.А., Сластунов С.В. Обоснование эффективных параметров подземной комплексной дегазации угольных пластов на основе их гидроразрыва// Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). Специальный выпуск 48 Подземная угледобыча XXI – 2, 2018, с.23-32.
12. Сластунов С.В., Мазаник Е.В. Хаутиев А.Б.-М. Комиссаров И.А. Некоторые результаты шахтных исследований технологии комплексной пластовой дегазации с использованием подземного гидроразрыва // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). № 5, специальный выпуск 10 «Безопасность и экология горного производства», 2019, с.44-49.
13. Slastunov S., Meshkov A., Mazanik E., Khautiev A., Komissarov I. Exploratory work on the hydrodynamic effect on the coal seam through wells drilled from the surface, at the mine. S. M. Kirov. Znanstvena misel journal (Slovenia), vol.1, (ISSN 3124 -1123), №36/2019, p.53-56.
14. Slastunov S., Mazanik E., Meshkov A., Khautiev A., Komissarov I. Identification of the main modes of hydrodynamic impact on the coal seam through wells drilled from the

surface at the mine. S. M. Kirov. Znanstvena misel journal (Slovenia), vol.1, (ISSN 3124-1123), №36/2019, p.57-61.

Сластунов С.В., Коликов К.С., Мазаник Е.В., Комиссаров И.А. Прогноз дебита метана при извлечении из угольных пластов// Наука и техника в газовой промышленности, № 2(82), 2020, с.77-88.

16. Мешков А. А., Садов А. П., Комиссаров И. А., Хаутиев А. М.-Б., Сластунов С. В. Экспериментальные работы по гидорасчленению угольного пласта Болдыревский через скважины, пробуренные с поверхности на шахте им. С.М. Кирова // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – № 11. – С. 37–45. (DOI: 10.25018/02361493-2020-11-0-37-45).
17. Сластунов С.В., Мазаник Е. В., Садов А. П., Хаутиев А. Б.-М., Комиссаров И.А. Поисковые экспериментальные работы по добыче метана из выработанных пространств угольных шахт // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). - 2021. - № 5, С.134-145.
18. Сластунов С.В., Мешков А.А., Садов А.П., Хаутиев А.М.-Б., Комиссаров И.А. Апробация технологии гидорасчленения разрабатываемых угольных пластов через скважины с поверхности на поле шахты им. С.М. Кирова // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2021.
19. Сластунов С. В., Садов А. П., Хаутиев А. М.-Б., Комиссаров И. А. Результаты апробации технологии гидорасчленения угольного пласта через скважины с поверхности на шахте Кирова // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 11. – С. 121–132. DOI:
20. Сластунов С. В., Коликов К. С., Садов А. П., Хаутиев А. М.-Б., Комиссаров И. А. Обеспечение безопасной и интенсивной разработки газоносных угольных пластов на основе их комплексной дегазационной подготовки// Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 2. – С. 152–166. DOI:

Способ гидравлического разрыва угольного пласта. Лупий М.Г., Галсанов Н.Л., Ледяев Н.В., Поздеев Е.Э., Садов А.П., Комиссаров И.А., Квитко Е.А., Хаутиев А.М.Б., Шмат В.Н., Черухин А.А., Власов В.В., Мешков А.А., Мазаник Е.В., Коликов К.С., Сластунов С.В. Патент на изобретение RU 2802245 С1, 23.08.2023. Заявка № 2023101623 от 26.01.2023.

Коликов К.С., Маневич А.И., Ледяев Н.В., Комиссаров И.А. Повышение

эффективности дегазации угольного пласта при его подготовке к безопасной отработке на основе использования эффекта сорбционных деформаций // Горная

п

р

о

м

ы

ш

л

е

н

н

о

с

т

ь

.

№

.

с

9

2

—

D

O

I

:

.