

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ

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

РОЗОНОВ Евгений Юрьевич

**ОХРАНА ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК, ПРОЙДЕННЫХ ПО ПЛАСТАМ,
ОПАСНЫМ ПО ГАЗОДИНАМИЧЕСКИМ УСЛОВИЯМ, НА ОСНОВЕ
ТЕХНОЛОГИИ ВЫСОКОНАПОРНОГО ГИДРОВОЗДЕЙСТВИЯ НА
УГЛЕПОРОДНЫЙ МАССИВ**

**Специальность 25.00.22 – «Геотехнология (подземная, открытая и
строительная)»**

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор РАН
ЕРЕМЕНКО Виталий Андреевич

Москва - 2021

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Горноподготовительные работы играют приоритетную роль в стабильном развитии угольной отрасли. Тенденция их развития заключается в разработке и внедрении высокопроизводительной проходческой технологии. При этом совершенствование способов охраны подготовительных выработок, особенно при проведении их по угольным пластам опасным по газодинамическим явлениям (ГДЯ), остается первостепенной задачей, от успешного решения которой зависят эффективность работы и рентабельность угольной шахты.

Шахтами ООО «ММК-УГОЛЬ» отрабатывается Чертинское угольное месторождение Кузбасса, характеризующееся сложными геодинамическими условиями. Возникают проблемы с обеспечением устойчивости подготовительных горных выработок, т.е. способности выработки функционировать в определенных условиях с заданными параметрами в течение требуемого отрезка времени и, соответственно, стабильности работы выемочных участков высокопроизводительных очистных забоев.

В связи с этим, разработка способа охраны горной выработки, обеспечивающей ее устойчивость при подготовке угольных пластов в сложных геодинамических условиях Чертинского месторождения является актуальной научно-технической задачей.

Цель работы. Разработка технологических решений по охране подготовительных горных выработок при проведении их по угольным пластам, опасным по газодинамическим явлениям, на основе направленного гидроразрыва горного массива и ориентированного поинтервального гидроразрыва угольного пласта.

Идея диссертационной работы заключается в использовании как для охраны горной выработки, так и для предотвращения ГДЯ (выброса угля и газа) технологии высоконапорного гидровоздействия, базирующейся на основе применения унифицированного специального горно-шахтного оборудования (высоконапорные насосы, пакеры, герметизаторы, щелеобразователи и т.д.).

Задачи научных исследований:

1. Анализ состояния вопроса повышения устойчивости подготовительных горных выработок, пройденных по пластам опасным по выбросам угля и газа.

2. Исследование состояния горного массива в условиях шахты «Чертинская-Коксовая» при проведении конвейерного штрека 555, на основе применения комплекса методов, включающего электромагнитное зондирование массива, отбор кернов с последующим определением физико-механических свойств пород, а также видеоэндоскопический осмотр скважин.

3. Разработка способа охраны подготовительных горных выработок, на основе применения направленного гидроразрыва труднообрушаемой кровли пласта.

4. Разработка способа поинтервального ориентированного гидроразрыва угольного пласта с целью снижения выбросоопасности угольного пласта при проведении подготовительных горных выработок.

5. Исследование процесса высоконапорного нагнетания воды в пласт и горный массив и установление закономерностей гидрорыхления угольного массива, для выбора его оптимальных режимов.

Методы исследования. При выполнении исследований использовался комплексный метод, включающий в себя анализ литературных источников по теме исследований, аналитические исследования, шахтные экспериментальные исследования с применением новых технических средств измерения и контроля углепородного массива, методы статистической обработки результатов исследований.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Применение комплекса методов оценки состояния горного массива, включающего электромагнитное зондирование массива, определение физико-механических свойств пород отобранных кернов, а также видеоэндоскопический осмотр скважин существенно повышает

оперативность получения достоверной информации о физико-механических свойствах, трещиноватости и о структуре пород кровли на всем протяжении горной выработки, которая необходима для разработки мероприятий по ее поддержанию на участках со сложными горно-геологическими и горнотехническими условиями.

2. Охрана подготовительных горных выработок, основанная на применении направленного гидроразрыва труднообрушаемой кровли пласта по предварительно нарезанным щелям в массиве, обеспечивает их необходимую устойчивость и исключает деформацию горной крепи.

3. Поинтервальный ориентированный гидроразрыв угольного массива приводит к повышению коллекторских свойств пласта и эффективности его дегазации, при этом давление нагнетания жидкости, близкое к $(1-1,5)\gamma H$, достигается в начальный момент при нагнетании жидкости 15-20 л/(мин·м), что способствует быстрому распространению воды в прилегающем к скважине участке угольного массива и снижению его выбросоопасности.

Новизна основных научных результатов:

1. Установлены параметры поинтервального ориентированного гидроразрыва угольного массива, обеспечивающего снижение выбросоопасности угольного пласта.

2. Установлены параметры направленного гидроразрыва труднообрушающихся пород кровли, обеспечивающего устойчивость горной выработки.

3. Установлена зависимость давления нагнетаемой воды при гидроразрыве угольного пласта от темпа нагнетания, длины фильтрующей части нагнетательной скважины и напряженного состояния призабойной части пласта.

Достоверность научных результатов, защищаемых в работе **подтверждается:**

- значительным объемом шахтных экспериментальных исследований;
- удовлетворительной сопоставимостью результатов аналитических исследований высоконапорного гидровоздействия на углепородный массив и шахтных экспериментальных работ;
- положительными опытом внедрения способа охраны горных выработок и обеспечивающего предотвращения ГДЯ.

Научное значение работы заключается в установлении рациональных режимов гидровоздействия, обеспечивающих устойчивость горных выработок.

Практическое значение работы заключается в следующем:

- разработан способ охраны горных выработок на основе высоконапорного гидровоздействия на вмещающий пласт горный массив, обеспечивающий устойчивость выработок и сохранность горной крепи;
- разработан способ предотвращения ГДЯ на основе использования метода поинтервального гидроразрыва угольного пласта;
- предложен комплекс высоконапорного горно-шахтного оборудования, обеспечивающий эффективное гидровоздействие на углепородный массив.

Реализация работы. Результаты проведенных исследований использованы при проведении конвейерного штрека 555 и конвейерного штрека 559 в условиях шахты «Чертинская-Коксовая» ООО «ММК-УГОЛЬ».

Апробация работы. Основные положения и содержание работы докладывались на научных симпозиумах «Неделя горняка» в 2019 и 2020 гг. и научных семинарах КФ АО ВНИМИ.

Личный вклад автора заключается в постановке задач исследования, в разработке способа охраны горных выработок и способа борьбы с выбросами угля и газа, разработке методики шахтных исследований, организации и проведении экспериментальных работ на шахте «Чертинская-Коксовая», в обработке материалов экспериментов и получении основных научных результатов исследований.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 6 статей в изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и приложений, содержит 24 таблицы, 36 рисунков, список использованных источников из 108 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Вопросам разработки различных способов охраны подготовительных горных выработок, при проведении их в сложных горно-геологических условиях, было посвящено большое количество работ ведущих научных организаций ННЦ ГП-ИГД им. А.А. Скочинского, ВНИМИ, КузНИУИ, ШахтНИУИ, ДонУГИ и др. В качестве основополагающих следует отметить работы К.А. Ардашева, В.В. Беликова, В.А. Борисовца, Н.С. Булычева, В.В. Васильева, Г.Ф. Горбачева, В.В. Давыдова, Г.А. Каткова, О.И. Казанина, Н.Б. Ковалева, А.И. Кузнецова, М.А. Розембаума, Е.Я. Махно, О.В. Тимофеева, А.П. Широкова, Г.Г. Штумпфа, Е.И. Шемякина, И.А. Юрченко и др. Однако, несмотря на научно-технический прогресс, задача охраны выработок, особенно при проведении их по угольным пластам опасным по газодинамическим явлениям полностью не решена.

Вследствие того, что высокопроизводительные очистные забои, с нагрузкой более 10 тыс. т/сут, как правило, отрабатываются по столбовой системе, задача модернизации способов охраны горных выработок становится весьма актуальной. До сих пор не в полной мере изучены закономерности проявления горного давления во вмещающем массиве при проходке горной выработки. Не определены эффективные параметры крепления спаренных подготовительных выработок, пройденных широким забоем в сложных горно-геологических условиях, особенно при проведении их по пластам опасным по газодинамическим явлениям (ГДЯ).

На основе проведенного анализа литературных источников было установлено, что наибольшее влияние на устойчивость подготовительных выработок, помимо горно-геологических условий, оказывают горнотехнические факторы, прежде всего схема подготовки и система разработки угольного пласта, а также выбранные способы охраны выработок и тип их крепления. К горно-геологическим условиям, влияющим на устойчивость подготовительных выработок следует отнести, прежде всего: глубину горных работ, структуру и свойств вмещающих пород. Увеличение глубины горных работ вызывает, прежде всего, рост напряжений в угле-породном массиве, а также приводит к повышению нагрузок на средства охраны выработок и крепи.

Устойчивость горных выработок актуальна, особенно при проведении их по выбросоопасным угольным пластам. Разработка выбросоопасных пластов производится, как правило, в сложных горно-геологических условиях, что обусловлено большой глубиной работ, высокой газоносностью, тектонической нарушенностью и низкой прочностью призабойного массива. Это обуславливает необходимость применения комплекса специальных мер для их эффективной разработки, принятия взаимоувязанных решений по подготовке шахтных полей, применению средств механизации, ведению очистных, подготовительных и профилактических работ в выемочном участке.

В зависимости от особенностей горно-геологических условий применяются различные способы воздействия на опасный пласт при проведении подготовительных (пластовых) выработок:

- бурение опережающих разгружающе-дегазирующих скважин по пласту;
- создание разгрузочных щелей и пазов;
- барьерно-ограждающая предварительная дегазация пласта длинными скважинами;
- гидровывод опережающих полостей;
- гидроотжим пласта;
- гидроразрыв угольного пласта.

Для проектирования и строительства новых шахт, а также реконструкции старых с целью ведения добычи угля на глубоких горизонтах в широких масштабах требуются большие капиталовложения, а поэтому важно заранее знать горно-геологические условия их

эксплуатации, в частности поведение пород в будущих горных выработках.

До последнего времени в геологических отчетах по разведваемым участкам приводились весьма приближенные сведения об устойчивости пород и в основном по аналогии с ближайшими действующими шахтами, причем часто без достаточного научного обоснования.

С этим еще можно было мириться при строительстве сравнительно неглубоких шахт, но при глубине их 700-800м и как предполагается в дальнейшем - 1200-1400 м и производственной мощности свыше 10 тыс. тонн угля в сутки - требуются достаточно обоснованные данные о горно-геологических условиях эксплуатации, необходимые для правильного выбора места заложения ствола шахты, системы разработки, сечения капитальных и подготовительных выработок, конструкции и технологии их крепления и т.д. Для этого по разведочным данным должны быть определены все основные геологические факторы, влияющие на поведение пород в горных выработках, в том числе такие, как петрографический состав вмещающих пород, их вторичные изменения на различных стадиях метаморфизма углей, физико-механические свойства, мощности пластовых отдельностей в кровле (наряду с расслоением), трещиноватость, обводненность и газообильность месторождения и др.

К горно-геологическим условиям, влияющим на устойчивость подготовительных выработок следует отнести, прежде всего: глубину горных работ, структуру и свойства вмещающих пород. Увеличение глубины горных работ вызывает, прежде всего, рост напряжений в угле-породном массиве, а также приводит к повышению нагрузок на средства охраны выработок и крепи. Это в свою очередь приводит к росту смещений контура выработки из-за деформаций горных пород.

Глубина разработки угольного месторождения, влияет на изменение напряженно-деформированного состояния, зависит в большей степени от физико-механических свойств горных пород и угля.

Для разработки эффективных способов охраны выработок необходимо знать состояние вмещающего горного массива. Для уточнения свойств и состояния пород кровли пласта 5 в условиях шахты «Чертинская-Коксовая» исследования проводились при использовании трех методов:

- 1) отбор керн для уточнения прочностных свойств и структуры пород;
- 2) видеоэндоскопические обследования скважин для локализации зон трещиноватости и обводненности;

3) оценка состояния участков горного массива с помощью электромагнитного зондирования, позволяющего выявить напряженные и разгруженные участки массива.

Для выявления зон расслоений и трещиноватости массива пород кровли использовался видеоэндоскоп Wohler VIS 250. На рисунке 1 представлены зоны трещинообразования и ослабления пород кровли.



Рисунок 1 - Зоны трещинообразования и ослабления пород кровли

Геомеханическое состояние горного массива можно определять методом дипольного электромагнитного зондирования с применением геофизической аппаратуры ANGEL-M. Метод основан на зависимости электропроводящих свойств пород от величины горного давления, степени нарушенности и трещиноватости массива пород. Создав в массиве переменное электромагнитное поле индукционным способом при помощи диполя и регистрируя напряженность компонентов магнитной составляющей можно определить геомеханическое состояние массива горных пород, а также выявлять пригруженные и разгруженные участки и зоны.

Основная задача исследований заключается в поиске участков напряженно-деформированного состояния массива, опасного по внезапным выбросам угля и газа.

Результаты геофизических исследований в конвейерном штреке 555 представлены на рисунке 2.

Результаты геофизических исследований в основном коррелируют с результатами исследований образцов керновых проб и видеозондоскопических обследований скважин в части наличия зон повышенной трещиноватости вмещающих пород, а также зон устойчивых не трещиноватых пород кровли, которые при определенных условиях способны зависать, что в свою очередь способно привести к деформации крепи и потере сечения горной выработки, что подтверждает необходимость разработки специального способа охраны конвейерного штрека 555.

Проведенный комплекс исследований состояния горного массива на выемочном участке лавы № 555, отрабатывающей угольный пласт 5 показал, что реальные горно-геологические условия участка кардинально отличаются от проектных (прогнозных). Это приводит к интенсивной конвергенции (изменению контура выработки) в пространство конвейерного штрека № 555, что потребовало разработки специального активного способа охраны горной выработки на основе воздействия на массив водой высокого давления.

Нами разработан способ и параметры направленного гидроразрыва горного массива.

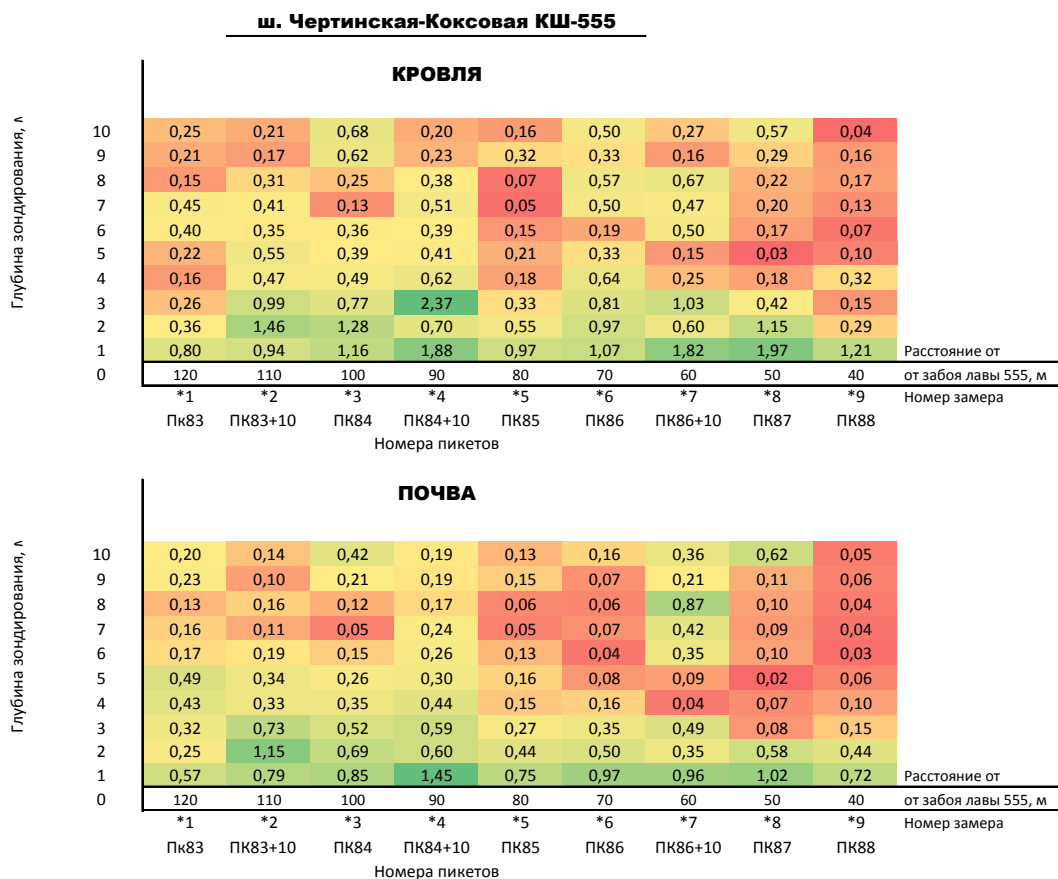


Рисунок 2 - Результаты геофизических исследований

Примечание к рисунку 2:

- для кровли и почвы - по значению показателя $F \geq 1,0$ (зеленая заливка) отбивается разгруженная, преимущественно трещиноватая зона во вмещающих породах кровли;
- значение показателя $0,2 \leq F < 1$ (желтая заливка) указывает на среднюю трещиноватость кровли;
- значение показателя $F < 0,2$ (красная заливка) указывает на плотную структуру кровли.

Геомеханическое состояние массива оценивается по величине параметра "F" равного $F = V_{xx}/V_{yy}$ в плоскости, перпендикулярной оси выработки и $F = V_{xx}/V_{zz}$ в направлении кровля-почва, где: V_{xx} , V_{yy} , V_{zz} – амплитуда электромагнитного поля в трех направлениях.

Сущность способа направленного гидроразрыва горного массива (НГР ГМ) заключается в том, что зависающие (труднообрушаемые) породы основной кровли под воздействием воды высокого давления разделяются на блоки незначительных размеров. НГР ГМ осуществляется специальным горно-шахтным оборудованием.

Основными параметрами способа НГР ГМ при наклонных схемах заложения рабочих скважин (шпуров) являются величины, описывающие геометрию их заложения и инициирующих щелей в горном массиве.

Эффективная высота обрушения пород, когда обеспечивается подбучивание труднообрушающегося слоя кровли:

$$h_n = \frac{m_b - h_{ло} \cdot (k_{ло} - 1)}{k_{мо} - 1} + h_{ло}, \text{ м} \quad (1)$$

где: m_b – вынимаемая мощность угольного пласта, 1,85 м;

$h_{ло}$ – мощность непосредственной кровли, 2,5 м;

$k_{ло}$, $k_{мо}$ – коэффициенты разрыхления пород легко- и труднообрушаемых пород, 1,25; 1,15.

Высота обрушения массива составит: порядка 10 м

Высота заложения зародышевой щели от поверхности обнажения кровли:

$$Z = \frac{h_n + h_{ло}}{2} \quad (2)$$

Высота заложения зародышевой щели по формуле (2) составит 6,6 м.

С учетом глубины заложение анкерной крепи второго уровня в конвейерном штреке 555 глубину заложение зародышевой щели от кровли выработки принимаем равной 8 м.

Интервал бурения шпуров по длине конвейерного штрека 555 равен $2r$, где r – радиус распространения искусственной трещины (зависит от производительности насоса). Интервал бурения скважин принимается равным 15-20 м.

Формирование зародышевых щелей для дальнейшего гидроразрыва горного массива осуществляется специальными щелеобразователями ЦМ-45/1 или ЦГ-45. При направленном гидроразрыве, для увеличения протяженности трещины в нужном направлении, необходимо заранее формировать центр напряжений в виде инициирующей щели определенной длины.

На рисунке 3 представлена схема расположения скважин с параметрами их заложения из конвейерного штрека 555 в массиве пород.

После осуществления НГР ГМ на экспериментальном участке в конвейерном штреке 555 по мере движения лавы 555 проводился мониторинг за смещением пород кровли и почвы пласта 5, боков выработки на опытном участке.

Схема расположения глубинных и контурных реперных станций представлена на рисунке 4.

Конструктивно глубинные реперы РГ 3 выполнены в виде полый втулки с осевыми отверстиями, в которых размещены упругие «усы».

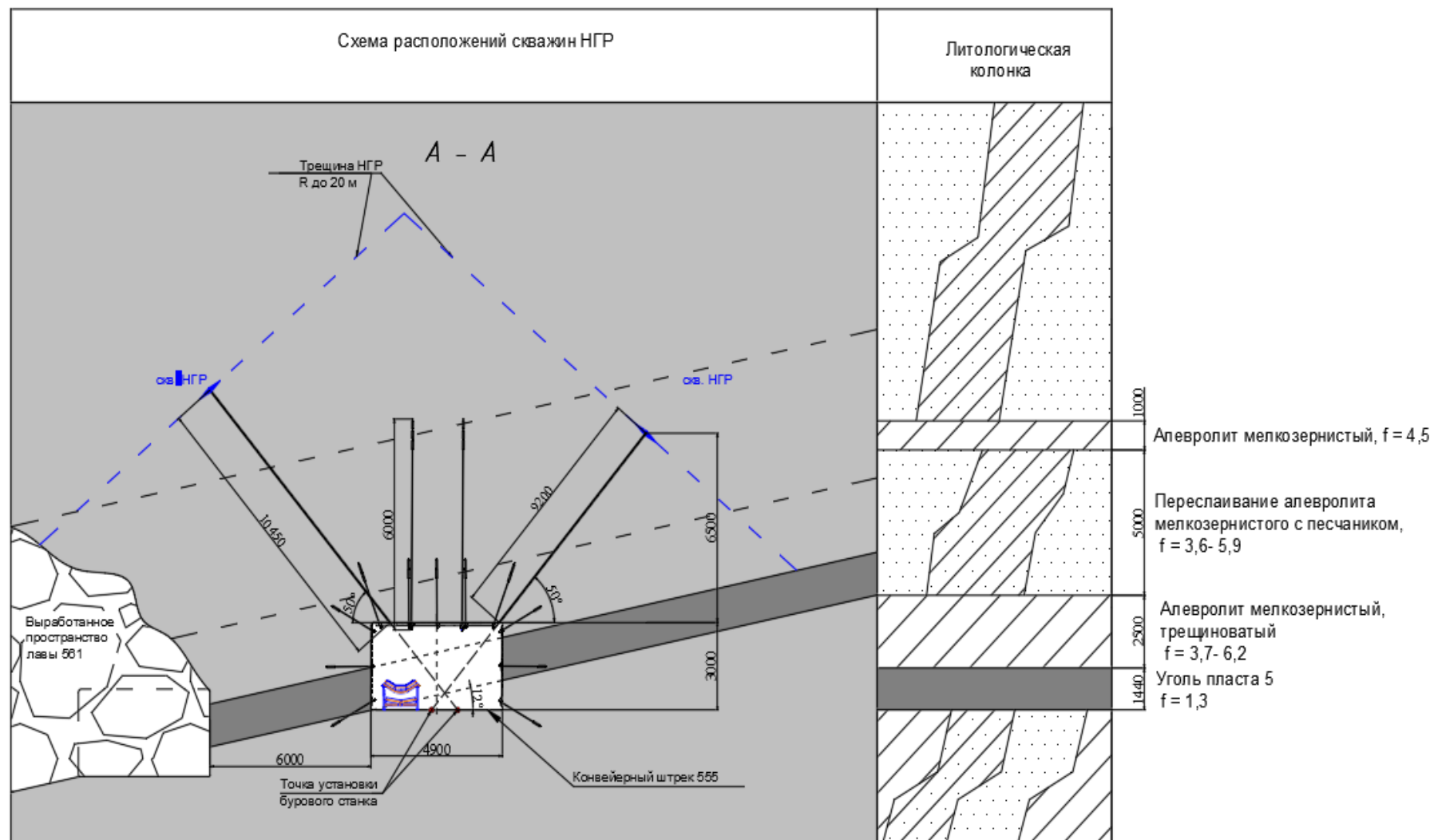


Рисунок 3 - Схема расположения скважин НГР из конвейерного штрёка 555 (Вид А-А)

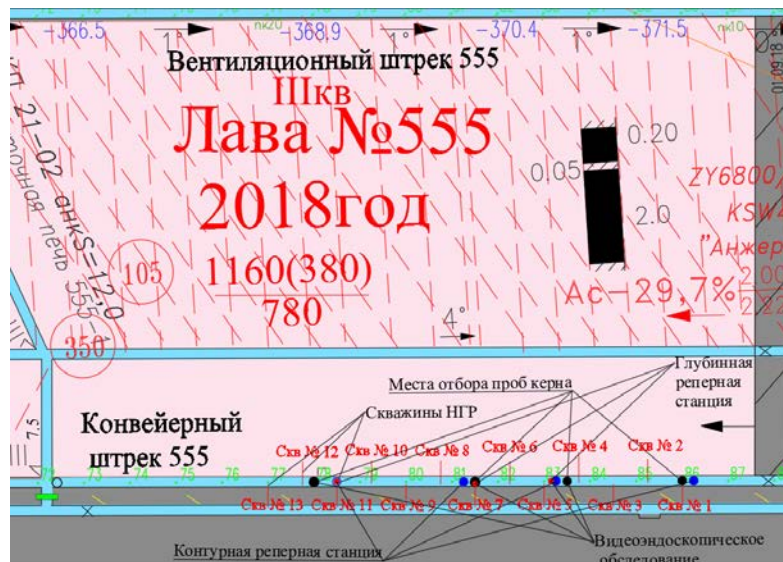


Рисунок 4 - Схема расположения глубинных и контурных реперных станций

При проведении подготовительных выработок выемочных участков 550, 560, 561, 555 наблюдались существенные проявления горного давления на расстоянии порядка 20-30 м от забоя в виде смещений кровли до 200-250 мм, выдавливания решётчатой затяжки, деформации и разрывов анкерной крепи кровли, деформации боков. Наиболее интенсивные проявления наблюдались в зонах влияния нарушений, под краевыми частями целиков по вышележащему пласту, несмотря на то что междупластье составляло 130 м и выработки находились вне расчётной зоны ПГД. Это приводило к необходимости усиления крепи и перекрепки выработок вслед за подготовительным забоем. Поэтому для снижения напряжений в массиве и смещения их концентраторов от контура выработки вглубь массива было решено применить активные методы управления кровлей из подготовительного забоя. Для контроля смещений реперные станции устанавливались в забое и наблюдения велись по мере его подвигания, см. рис. 5.



Рисунок 5 - Показания реперной станции РГ-3 на ПК 48+10

(глубина заложения: P1 – 7 м, P2 – 3,2 м, P3 – 0,5 м)

При выполнении мероприятий НГР удалось добиться существенного снижения смещений пород кровли, эффективности работы анкерной крепи и поддержания выработки.

Учитывая то, что конвейерный штрек 555 пройден по пласту 5, опасному по внезапным выбросам угля и газа, потребовалась разработка эффективного способа предотвращения газодинамических явлений.

Способ предотвращения выбросов как сложное инженерное мероприятие включает в себя искусственное воздействие на угольный пласт, вмещающие породы или горный массив

в целом, оценку эффективности и технологических мероприятий при осуществлении воздействия.

Нами предложен способ ориентированного поинтервального гидроразрыва пласта.

Ориентированный поинтервальный гидроразрыв используется для снижения времени и повышения эффективности предварительной дегазации пластов и вмещающих пород в шахте. Сущность способа заключается в формировании в пласте системы искусственных трещин гидроразрыва определенной конфигурации. Трещины служат для разгрузки горного массива и создания в нем специальных каналов для осушения горных пород и дегазации массива.

Рост проницаемости призабойной зоны угольного пласта при использовании ГРП происходит благодаря образованию новых трещин или раскрытия и продления в нем естественных трещин. Искусственные трещины, сформированные в процессе ориентированного поинтервального гидроразрыва пласта, могут быть в длину несколько десятков метров и, соединяясь между собой, значительно увеличивают проницаемость угольного пласта и горного массива и повышают эффективность дегазационной скважины. Этот способ, на сегодняшний день, является наиболее эффективным методом повышения дебита дегазационной скважины, что приводит к снижению выбросоопасности угольного пласта.

На рисунке 6 представлен поэтапный процесс герметизации скважин и гидроразрыва пласта, включающего досылку разрывного устройства, подачу давления в систему и герметизацию скважины, процесс создания трещин в массиве и сброс давления из системы с последующим перемещением устройства по скважине. Интервал перемещения составляет 4,5 м.

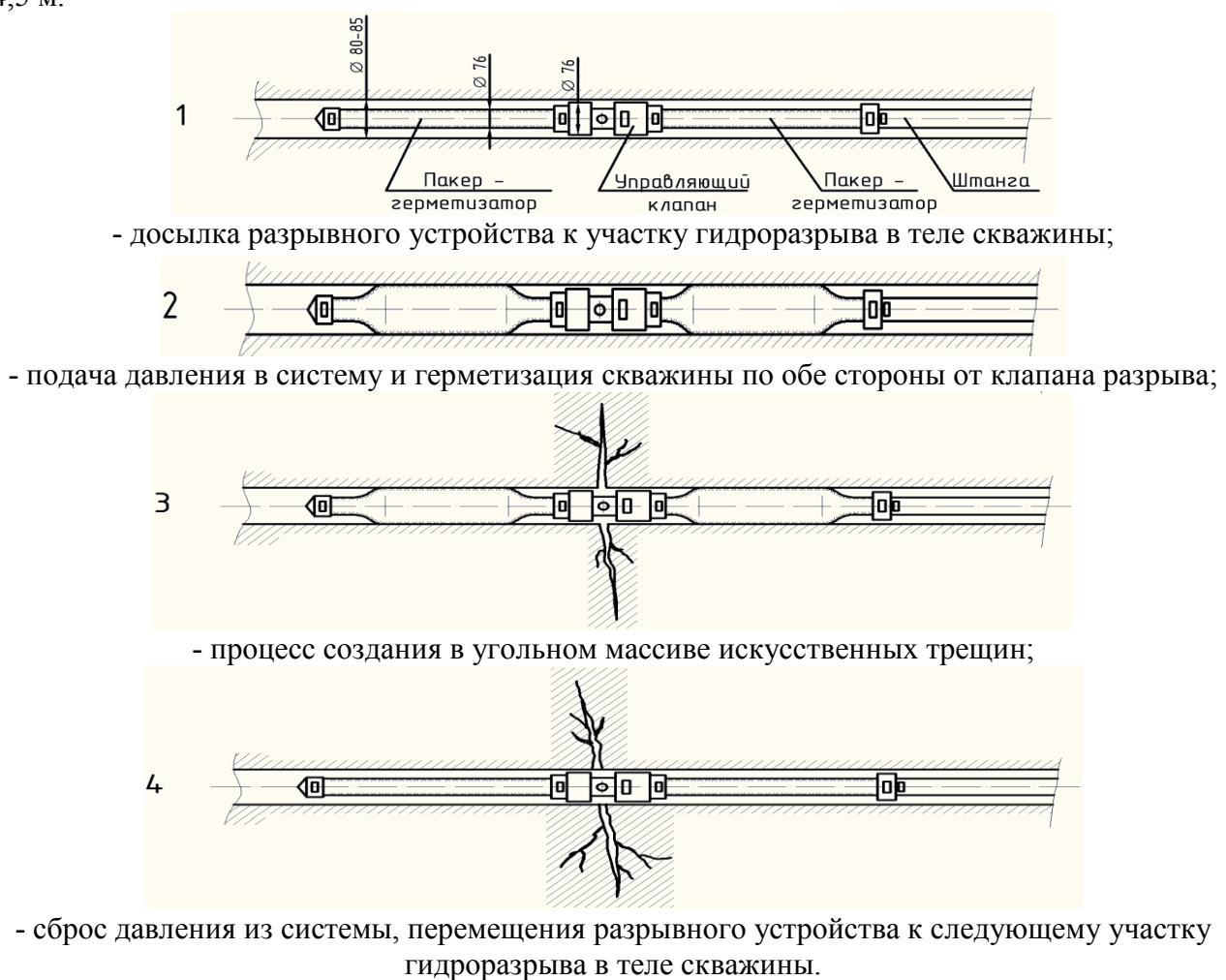


Рисунок 6 - Поэтапный процесс герметизации скважины и гидроразрыва угольного пласта.

Схемы бурения скважин для гидроразрыва через передовую одиночную или парные скважины представлены на рисунках 7 и 8.

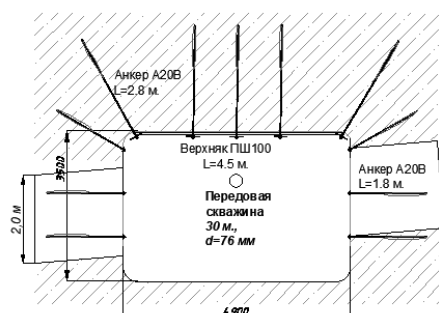
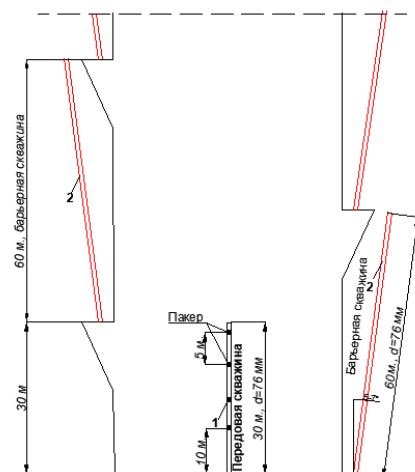


Рисунок 7 - Бурение скважин для гидроразрыва через передовую одиночную (1) и парные барьерные скважины (2)

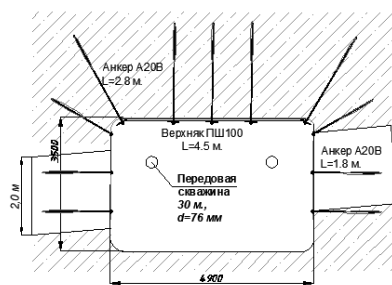
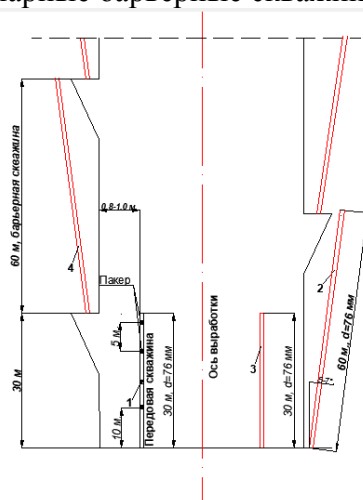


Рисунок 8 - Бурение скважин для гидроразрыва через парные передовые (1), (2) и парные барьерные (3), (4) скважины

Для оценки эффективности проведенных работ по гидродинамическому воздействию на угольный пласт 5 проводился контроль концентрации метана.

До гидровоздействия концентрация метана в скважине составляла 26-34 %, после гидровоздействия 83-98%.

Проведены исследования изменения давления воды при высоконапорном нагнетании в выбороопасный пласт.

Комплексную оценку фильтрационных свойств и увлажняемости различных угольных пластов предложено производить по интегральному показателю удельного водопоглощения пласта φ_0 , см/МПа.с, определяемому с помощью опытных нагнетаний по количеству воды, поглощаемой с 1 см² площади поверхности скважины в единицу времени при градиенте давления, равном единице:

$$\varphi_0 = \frac{Q}{P_0 \cdot t_n \cdot S_b}, \quad (3)$$

где: Q - суммарный расхода воды, см³;

P_0 - начальное (максимальное) давление нагнетания, МПа;

t_n - продолжительность нагнетания воды под давлением P_0 , с;

S_b - площадь водопоглощающей поверхности скважин, см².

В результате обработки замеров выполненных совместно с КФ ВНИМИ по шахтопластам Кузнецкого бассейна получены значения удельного водопоглощения пласта φ_0 , по которым выявлены и подтверждены результатами исследований фильтрационных и хрупкопластических свойств, разрушаемости и увлажняемости углей различной степени метаморфизма три группы угольных пластов, различающиеся особенностями свойств увлажнения и требующие определенных параметров и режимов нагнетания жидкости в пласт (таблица 1).

Экспериментальным путем установлены рациональные режимы увлажнения угольных пластов:

- для пластов I группы необходимо применять режим с длительным контактом нагнетаемой жидкости с массивом без его разрыва одиночными трещинами, который можно обеспечить при работе насосных установок с автоматическим регулированием параметров нагнетания при значениях давления, исключающих гидроразрыв пласта;

- для пластов II группы требуется низконапорное увлажнение при пониженных расходах жидкости, достигаемое во многих случаях безнасосной подачи воды от противопожарнооросительного водопровода или при работе насосных установок с автоматическим регулированием параметров нагнетания;

- для пластов III группы необходимо обеспечить высоконапорное увлажнение путем непрерывного нагнетания жидкости под давлением на пределе упругих деформаций или многоциклического нагнетания с переменным темпом и периодическим повышением давления до гидроразрывных значений с последующим длительным насыщением жидкостью растрескавшегося массива.

На основании результатов исследований высоконапорного нагнетания воды в пласт через скважины, пробуренные со стороны забоя подготовительной выработки, установлено, что данный способ предотвращения внезапных выбросов наиболее эффективен при достижении в результате нагнетания гидрорыхления угольного массива. Оно характеризуется смещением вглубь массива зоны максимума опорного давления, снижением газовыделения из пласта и незначительным (2-3 см) отжимом угля на кромке забоя. На пластах мощностью 1,5-2,5 м указанный эффект имеет место, как правило, при глубине герметизации нагнетательных скважин 8-10 м.

В ходе исследований большое внимание уделялось изучению зависимости давления нагнетаемой воды от темпа нагнетания, длины фильтрующей части нагнетательных скважин и напряженного состояния призабойной зоны пласта.

Таблица 1 – Параметры нагнетания воды в различные группы пластов по увлажняемости

Группа пластов по увлажняемости	Марка угля	Содержание летучих веществ V^r , %	Удельное водопоглощение φ_0 , см/МПа.с	Характеристика углей	Значения параметров нагнетания, ниже которых исключается гидроразрыв пласта	
					Давление, МПа	Темп, л/мин
I	Д, Г, Ж	более 30	0,03-0,06	Угли слабометаморфизованные, средней крепости, вязкие, с повышенной пластичностью и с пониженной хрупкостью, со слабо раскрытой трещиноватостью и низкой водопроницаемостью	7-13	5-15
II	К, ОС, Т	10-30	0,04-0,08	Угли средней степени метаморфизма, низкой прочности, высокой пластичности, с хорошо развитой и легко раскрывающейся трещиноватостью, высокой водопроницаемостью	4-7	15-25
III	П/А, А	менее 10	0,01-0,05	Угли высокометаморфизованные, крепкие, хрупкие, с низкой пластичностью, с хорошо развитой и легко раскрывающейся трещиноватостью, низкой водопроницаемостью	8-3	>25

При нагнетании со стороны забоя выработки глубина герметизации скважин принималась постоянной и равной 10 м и был получен наибольший эффект устранения выбороопасности в данных условиях. В связи с тем, что длина фильтрующей части скважин и производительность насосной установки в различных опытах отличались, влияние их на давление оценивалось через удельный темп нагнетания – расход воды в минуту на 1 м фильтрующей камеры.

Зависимость давления от удельного темпа определялась как в начальный момент нагнетания, когда фронт проникновения воды в угольный массив в основном определяется поверхностью фильтрующей части скважины, так и при относительно установившемся режиме нагнетания (через 20-30 мин работы насосов), когда поверхность соприкосновения воды с углем значительно больше.

В таблице 2 приведены значения начального и установившегося давления воды при различном темпе нагнетания и длине фильтрующей камеры нагнетательных скважин, полученные в результате осреднения.

Таблица 2 – Значения начального и установившегося давления воды при различном темпе нагнетания в скважины

Глубина герметизации l_r , м	Длина фильтрующей части l_ϕ , м	Темп нагнетания q , л/мин	Удельный темп нагнетания q' , л/мин. м	Начальное давление P_n , МПа	Установившееся давление P , МПа
10	9	16	1,8	10,3	9,9
10	11	81	7,3	13,85	11,7
10	9	69	7,6	14,1	11,8
10	9	85	9,3	15,3	12,3
10	6	90	15	17,67	13,69
10	5	84	17	18,47	14,09
10	3	86	29	21,59	15,67

Обработка этих данных дала возможность получить зависимость начального давления P_n , которое имеет место через 2-3 мин после включения насоса и давления через 30 мин работы насосов P от удельного темпа нагнетания.

$$P_n = 91,2 + 7,2q' - 0,1(q')^2; \quad (4)$$

$$P = 93,1 + 3,7q' - 0,052(q')^2. \quad (5)$$

где: P – давление, МПа; q' – удельный темп, л/мин. м.

Видно, что в начале нагнетания большему удельному темпу соответствует большее давление нагнетания, т. е. увеличение длины фильтрующей камеры или снижение производительности насоса способствуют снижению давления. Давление нагнетания близкое к $(1-1,5)\gamma H$ достигается в начальный момент при удельном темпе 15-20 л/мин, при большем удельном темпе давление еще выше. Повышение давления способствует быстрому распространению воды в прилегающем к скважине участке угольного массива.

При установившемся режиме нагнетания влияние удельного темпа на давление, как видно из графика, выражено значительно слабее, чем в начале нагнетания. Давление через 30 мин работы насоса при удельном темпе 30 л/мин.м на 50% выше, чем при темпе 2 л/мин.м, в то же время в начале нагнетания это различие составляет 110%.

Анализ данных зависимостей дает возможность выбора наиболее приемлемого режима нагнетания, при котором исключаются динамические явления типа внезапного отжатия угля в призабойной части. Установлено, что при темпе нагнетания примерно 20 л/мин.м гидрообработка пласта производится при давлении, близком к $\gamma \cdot H$. Таким образом,

результаты исследования взаимосвязи давления и темпа нагнетания воды при различной длине фильтрующей части нагнетательных скважин позволяют сделать вывод об оптимальном режиме гидрообработки пласта с целью устранения его выбросоопасности, за счет повышения эффективности дегазации угольного пласта и снижения концентрации напряжений на кромке пласта.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации, являющейся завершенной научно-квалификационной работой, представлены новые, научно обоснованные технологические решения по охране подготовительных горных выработок при проведении их по угольным пластам, опасным по газодинамическим явлениям, базирующиеся на направленном гидроразрыве горного массива и ориентированном поинтервальном гидроразрыве угольного пласта, что имеет существенное значение для развития технологии разработки месторождений угля подземным способом, а также повышения эффективности горного производства в целом.

Основные научные и практические результаты работы заключаются в следующем:

1. Наибольшее влияние на способность выработки функционировать в определенных условиях с заданными параметрами в течение требуемого отрезка времени, помимо горно-геологических условий, оказывают горнотехнические факторы, прежде всего схема подготовки и система разработки угольного пласта, а также разработанные способы охраны выработок и тип их крепления. К горно-геологическим условиям, влияющим на сохранность подготовительных выработок следует отнести, прежде всего: глубину горных работ, структуру и свойств вмещающих пород. Увеличение глубины горных работ вызывает, прежде всего, рост напряжений в угле-породном массиве, а также приводит к повышению нагрузок на средства охраны выработок и крепи.

2. Способность выработки функционировать в определенных условиях с заданными параметрами в течение срока эксплуатации особенно важна, при проведении их по выбросоопасным угольным пластам. Разработка выбросоопасных пластов производится, как правило, в сложных горно-геологических условиях, что обусловлено большой глубиной работ, высокой газоносностью, тектонической нарушенностью и низкой прочностью призабойного массива. Это обуславливает необходимость применения комплекса специальных мер для их эффективной разработки, принятия взаимоувязанных решений по подготовке шахтных полей, применению средств механизации, ведению очистных, подготовительных и профилактических работ в выемочном участке.

3. Применение комплекса методов оценки состояния горного массива, включающего электромагнитное зондирование массива, определение физико-механических свойств пород отобранных кернов, а также видеоэндоскопический осмотр скважин существенно повышает оперативность получения достоверной информации о структуре, физико-механических свойствах, трещиноватости и состоянии пород кровли на всем протяжении горной выработки, которая необходима для дальнейшей разработки мероприятий по ее поддержанию. Геофизические исследования горного массива на выемочном участке 555 шахты «Чертинская-Коксовая» проведены комплексом «ANGEL – М». Результаты в основном коррелируют с результатами исследований образцов керновых проб и видеоэндоскопических обследований скважин в части наличия зон повышенной трещиноватости вмещающих пород, а также зон устойчивых не трещиноватых пород кровли, которые при определенных условиях способны зависать, что в свою очередь способно привести к деформации крепи и потере сечения горной выработки, что подтверждает необходимость разработки специального способа охраны конвейерного штрека 555.

4. Разработан способ и определены параметры направленного гидроразрыва горного массива с целью охраны горных выработок. Сущность способа направленного гидроразрыва горного массива (НГР ГМ) заключается в том, что зависающие (труднообрушаемые) породы основной кровли под воздействием воды высокого давления, до 20 МПа, разделяются на блоки незначительных размеров. НГР ГМ осуществляется специальным горным-шахтным

оборудованием. Формирование зародышевых щелей для дальнейшего гидроразрыва горного массива осуществляется специальными щелеобразователями ЩМ-45/1 или ЩГ-45. При НГР ГМ для увеличения протяженности трещины в нужном направлении необходимо заранее формировать центр напряжений в виде, сформированной предварительно, инициирующей щели определенной протяженности и формы.

5. Разработаны рекомендации и условия применения ориентированного поинтервального гидроразрыва пласта как способа борьбы с выбросами угля и газа при проведении горной выработки. Результаты промышленных испытаний разработанного способа, в условиях конвейерного штрека 559, показали его эффективность.

6. Для оценки эффективности проведенных работ по гидродинамическому воздействию на угольный пласт 5 проводился контроль концентрации метана. До гидровоздействия концентрация метана в скважине составляла 26-34 %, после гидровоздействия 83-98%.

7. Проведены исследования изменения давления воды при высоконапорном нагнетании в выбросоопасный пласт. Установлена зависимость давления подачи воды от удельного темпа нагнетания. В начале нагнетания большему удельному темпу соответствует большее давление нагнетания, т. е. увеличение длины фильтрующей камеры или снижение производительности насоса способствуют снижению давления. Давление нагнетания близкое к $(1-1,5) \gamma H$ достигается в начальный момент при нагнетании жидкости 15-20 л/(мин·м), что способствует быстрому распространению воды в прилегающем к скважине участке угольного массива и снижению его выбросоопасности.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах автора.

В изданиях, рекомендуемых ВАК Минобрнауки РФ, а также индексируемых в наукометрической базе Scopus:

1. Гречишкин П.В., Розонов Е.Ю., Клишин В.И., Опрук Г.Ю., Щербаков В.Н. Управление кровлей для повышения эффективности поддержания выработок, охраняемых податливыми целиками. Уголь. 2019. №10 (1123). С. 35-41. DOI: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2019-10-35-41>

2. Гречишкин П.В., Харченко В.Ф., Розонов Е.Ю., Горностаев В.С., Панин С.Ф. Повышение эффективности оценки состояния пород кровли выработок с применением различных методов в условиях шахты «Чертинская-Коксовая». Уголь. 2019. №10 (1123). С. 42-46. DOI: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2019-10-42-46>

в изданиях, рекомендуемых ВАК Минобрнауки РФ:

3. Розонов Е.Ю. Разработка активного способа охраны горных выработок на основе направленного гидроразрыва горного массива // Горный информационно-аналитический бюллетень. -2021. - № 9 (специальный выпуск 14)-с. 3-11 .DOI: 10.25018/0236-1493-2021-9-14-3.

4. Розонов Е.Ю. Использование динамики концентрации газа для прогноза газодинамических явлений в горных выработках // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – № 10 (специальный выпуск 29). – С. 12-18. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-10-29-12-18.

5. Розонов Е.Ю., Карасев Г.А., Щербаков В.Н. Оптимальные параметры гидрорыхления выбросоопасных угольных пластов при проведении горных выработок // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – № 10 (специальный выпуск 29). – С. 3-11. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-10-29-3-11.

6. Джигрин А.В., Харченко В.Ф., Малова С.А., Розонов Е.Ю., Карасев Г.А., Горностаев В.С., Щербаков В.Н. Основные проблемы повышения безопасности и эффективности разработки угольных пластов подземным способом // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – № 10 (специальный выпуск 30). – С. 3-16. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-10-30-3-16.