

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «НАЦИОНАЛЬНЫЙ  
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИСиС»

Понизов Александр Владимирович

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОМПЛЕКСНОЙ ТЕХНОЛОГИИ  
ДЕГАЗАЦИОННОЙ ПОДГОТОВКИ УГОЛЬНОГО ПЛАСТА НА  
ОСНОВЕ ЕГО ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ  
ОБРАБОТКИ**

Специальность 05.26.03 – «Пожарная и промышленная безопасность»  
(в горной промышленности)

**А в т о р е ф е р а т**  
**диссертации на соискание ученой степени**  
**кандидата технических наук**

Научный руководитель:  
доктор технических наук, профессор  
Сластунов Сергей Викторович

Москва, 2021 г.

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность темы исследования.**

Распоряжением Правительства России N 14-р от 24 января 2012 утверждена программа развития угольной промышленности до 2030 года. В ней определено увеличение производительности труда в отрасли в 5 раз к 2030 году, повышение в 2÷3 раза по основным показателям уровня экологической и промышленной безопасности в отрасли.

По состоянию на 2019 г. в России среднесуточная нагрузка на один комплексно-механизированный забой (КМЗ) составила более 4,6 тыс. т/сут. На ряде шахт АО «СУЭК-Кузбасс» производительность длинных очистных забоев превысила 1,0 млн. т/мес (мировой рекорд производительности длинных очистных забоев превышает 1,6 млн. т/мес.). Более полное использование возможностей современной техники может позволить увеличение уровня добычи угля, по оценкам специалистов, как минимум на 30%.

В планах компании АО «СУЭК-Кузбасс» поднять уровень добычи до 30 тыс.т/сут и выше. Основной сдерживающий фактор – метан, выделяющийся в горные выработки при ведении горных работ. На шахтах в настоящее время применяется комплексная дегазация, включающая в себя снижение гапзовыделения из всех источников поступления газа в горные выработки. Эффективность извлечения метана из выработанного пространства достигает 80%, однако даже такая эффективность не обеспечивает при значительных нагрузках на очистной забой снятия газовых барьеров. Необходимо повышать эффективность дегазации собственно угольного пласта, доводя ее до 30-40%. Реальный же уровень эффективности пластовой дегазации как на шахтах компании, так и на многих шахтах основных угольных бассейнов б. СССР находится в диапазоне 10-20%.

Основная причина этого – крайне низкая проницаемость не разгруженных от горного давления угольных пластов.

В связи с изложенным весьма актуальны работы по совершенствованию технологии дегазационной подготовки разрабатываемого угольного пласта на основе его гидродинамической обработки, осуществляемой для повышения проницаемости угольного пласта и обеспечения его безопасной и интенсивной отработки.

**Целью диссертационной работы** является обоснование и разработка усовершенствованной технологии комплексной подземной дегазационной подготовки угольного пласта на базе его предварительной гидродинамической обработки для обеспечения безопасной и интенсивной отработки.

**Идея работы** заключается в том, что образование дополнительных трещин вследствие гидрорасчленения угольного пласта (раскрытие новых, развитие и объединение в единую систему уже существующих в пласте) существенно увеличивает газопроницаемость пласта и позволяет устранять проблему недостаточной эффективности пластовой дегазации не разгруженных от горного давления низкопроницаемых угольных пластов при применении традиционных технологий их дегазации.

#### **Основные научные положения, выносимые на защиту:**

1. Обоснованный механизм, обеспечивающий снижение газообильности очистной выработки в результате комплексной дегазационной подготовки газоносного угольного пласта, проводимой из подготовительных выработок, предусматривает следующее:

– снижение газоносности угольного пласта вследствие предварительного извлечения метана;

– увеличение остаточной газоносности угольного пласта вследствие блокирования метана в мельчайших порах и трещинах угольного пласта рабочей жидкостью,

а также учитывает продолжительный вынос метана из разрабатываемого угольного пласта подготовительной выработкой, из которой пробурены скважины гидроразрыва, причем означенные процессы должны рассматриваться комплексно и степень влияния каждого из них зависит от конкретных горнотехнических условий.

2. Выявленные эффективные технологические параметры подземного гидроразрыва включают следующее:

– ожидаемое давление гидроразрыва угольного пласта, которое может рассчитываться исходя из прочностных характеристик и глубины залегания угольного пласта, а также учитывает необходимость превышения забойного давления над давлением разрыва в 1,2 – 1,4 раза;

– объем рабочей жидкости определяется по фактору заполнения ею фильтрующего объема угольного пласта в зоне гидроразрыва и также учитывает дополнительный фактор блокирования части метана в мельчайших порах и трещинах разрабатываемого пласта;

– эффективная длина скважин подземного гидроразрыва определяется в зависимости от горнотехнических условий, определяющих возможную степень извлечения метана скважинами и подготовительной выработкой при комплексной дегазационной подготовке.

3. Гидродинамическое воздействие через пластовые скважины на неразгруженный от горного давления угольный пласт при нагнетании в последний рабочей жидкости с темпом, превышающим естественную приемистость пласта, реализуется в общем случае в режиме гидравлического расчленения угольного пласта с циклическими микрогидроразрывами и характеризуется образованием, в основном, вертикальных трещин.

**Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендации подтверждаются:**

- корректным применением уравнений математической физики, геомеханики и аэрогазодинамики для определения основных параметров гидродинамического воздействия на угольный пласт;

- представительным объемом шахтных исследований усовершенствованной технологии пластовой дегазации (зоны более 120 подземных скважин гидроразрыва) на четырех выемочных участках двух шахт АО «СУЭК-Кузбасс».

- положительными результатами шахтных испытаний основных технологических решений подземной пластовой дегазации в процессе ведении горных работ в зонах подземного гидродинамического воздействия на шахте им. С.М. Кирова АО «СУЭК-Кузбасс».

**Научная новизна работы** заключается в обосновании комплексного подхода к составу работ по повышению эффективности дегазации разрабатываемого угольного пласта с использованием гидродинамического воздействия, предусматривающий:

- нагнетание рабочей жидкости в угольный пласт через подземные скважины в режиме гидрорасчленения для повышения газопроницаемости пласта;

- выдержку в нем рабочей жидкости для реализации процесса замещения метана водой в сорбционном объеме;

- частичное удаление жидкости из пласта для повышения его фазовой проницаемости для газа;

- извлечение газа с последующим возможным заводнением пласта для целей блокировки оставшегося метана в мельчайших порах и трещинах пласта, обеспечивающей существенное снижения эффективной газоносности пласта.

**Научное значение работы** заключается в обосновании технологических решений по совершенствованию подземной комплексной дегазационной подготовки разрабатываемых угольных пластов, базирующейся на использовании эффекта существенного повышения газопроницаемости угольного пласта в зонах его гидродинамического воздействия для интенсификации извлечения метана из не разгруженных от горного давления низкопроницаемых угольных пластов, а также снижения газовыделения из разрабатываемого пласта в очистной забой в результате блокирования в угле части метана.

**Практическое значение работы** заключается в разработке технологических решений, вошедших в утвержденные в установленном порядке методики и техно-рабочие проекты, а также натурной апробации новых технологий гидродинамического воздействия на угольные пласты, основанные на существенном повышении их газопроницаемости.

Разработаны и утверждены в установленном порядке:

- Программы и методики экспериментальных работ по апробации и оценке эффективности предварительной дегазации пласта Болдыревский на поле шахты им. С.М. Кирова (выемочные участки 24-58, 24-59, 24-60) с использованием гидроразрыва пласта из подземных скважин, Ленинск-Кузнецкий, 2015-18 гг.;

- Технологические части проектов по предварительной дегазации пласта Болдыревский на поле шахты им. С.М. Кирова на выемочных участках 24-58, 24-59, 24-60, 24-62 с использованием гидроразрыва пласта из подземных скважин, Ленинск-Кузнецкий, 2015 -2018 гг.;

- Паспорта на выполнение работ по гидроразрыву пласта Болдыревский в выемочных участках 24-58, 24-59, 24-60, 24-62 шахты им. С.М. Кирова АО «СУЭК-Кузбасс», Ленинск-Кузнецкий, 2015-18 гг.

**Методы исследования** включали: анализ публикаций по теме диссертации; изучение газопроницаемости угольного пласта; аналитические и экспериментальные исследования газогидродинамических процессов, протекающих в неразгруженном угольном пласте; натурные исследования процессов газовыделения в горные выработки, скважины и дегазационные системы. Данные натурных наблюдений получены с применением утвержденных в установленном порядке методик.

### **Реализация выводов и рекомендаций работы.**

Разработанная технология предварительной дегазации угольного пласта Болдыревский реализована на выемочных участках 24-58, 24-59 и 24-60 на шахте им. С.М. Кирова АО «СУЭК-Кузбасс». Подтверждена высокая эффективность технологии по факторам извлечения метана системами дегазации и снижения метанообильности очистного забоя.

**Апробация работы.** Результаты, изложенные в диссертационной работе, докладывались на научных симпозиумах «Неделя горняка – 2016 – 2019», а также на заседаниях совета директоров АО «СУЭК-Кузбасс», заседаниях научных семинаров и заседании кафедры Безопасность и экология горного производства Горного института НИТУ «МИСиС».

**Публикации.** Основные положения диссертации изложены в 15 печатных работах, в том числе в 14 научных статьях (из них в 6 из списка журналов, рекомендованных ВАК, в т.ч. 2 зарегистрированы в базе данных Scopus) и одном патенте на изобретение.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения, списка используемой литературы из 129 наименований, 3 приложений, содержит 51 рисунок и 13 таблиц.

Автор выражает глубокую благодарность д.т.н. Ютяеву Е.П., к.т.н. Садову А.П., профессорам Горного института НИТУ «МИСиС» Сластуну

С.В. и Коликову К.С. за ценные научные консультации и практическую помощь при проведении исследований.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

В работе проанализированы основные технологические схемы дегазации угольных шахт. Выявлено, что наиболее сложно решаемая задача при интенсивной разработке метаноносных угольных пластов связана с разработкой и внедрением эффективных технологий пластовой дегазации. На угольных пластах с высокой метаноносностью экономически состоятельная добыча угля возможна исключительно при использовании комплекса современных способов снижения метановыделения из разрабатываемых пластов с эффективностью не менее 30÷40%. Фактическая эффективность пластовой дегазации, применяемая в настоящее время на шахтах России, как правило, не превышает 10 - 15%, что является существенным ограничителем интенсивной и безопасной угледобычи.

Исследованы основные направления совершенствования технологии подземной дегазационной подготовки угольных пластов к интенсивной и безопасной разработке, в частности, различные технологические схемы гидроразрыва угольных пластов, гидроударное, физико-химические воздействия на них и ряд других. Оценены достоинства и недостатки известных технологий, степень их разработанности и готовности к внедрению на угольных шахтах. Показаны потенциальные преимущества технологии гидроразрыва угольных пластов.

В диссертации решались следующие основные задачи:

1. Проанализировать основные технологические схемы, параметры и эффективность применяемых способов дегазации угольных шахт, в частности, способов предварительной пластовой дегазации (ППД), осуществляемой из подземных выработок.

2. Определить основные направления совершенствования технологии подземной пластовой дегазации.

3. Изучить основные технологические решения по дегазации разрабатываемых пластов с применением их гидродинамической обработки.

4. Разработать эффективную технологию подземной комплексной дегазационной подготовки не разгруженного от горного давления угольного пласта.

5. Определить эффективные технологические параметры гидроразрыва (гидрорасчленения) угольных пластов, осуществляемого из подземных горных выработок.

6. Разработать основную методическую и технологическую документацию для шахтных испытаний усовершенствованной технологии подземного гидродинамического воздействия, апробации и оценки ее эффективности на шахте им. С.М. Кирова.

7. Провести шахтные экспериментальные работы по апробации и внедрению усовершенствованной технологии подземного гидродинамического воздействия на газоносный угольный пласт.

8. Оценить технико-экономическую эффективность работ по применению усовершенствованной технологии комплексной дегазационной подготовки разрабатываемых пластов.

Постоянно усложняющиеся условия подземной разработке угольных пластов характеризуются величинами средней эффективности подземной пластовой дегазации (ППД) для шахт, например, Карагандинского бассейна 10-15%, для шахт Кузбасса (на примере шахт АО «СУЭК-Кузбасс») в среднем 10% при применении нисходящих пластовых дегазационных скважин и не более 15÷20% при применении горизонтальных и восстающих скважин.

Низкий уровень эффективности пластовой дегазации вполне объективно связан с тем, что в угольном пласте до 98 % всего угольного

метана находится в связанном (в значительной степени, в сорбированном) состоянии. Перевод метана в свободное состояние и реализация процесса переноса его к скважине требует значительных временных и энергетических затрат, связанных с необходимостью существенного изменения свойств и состояния низкопроницаемого угольного пласта.

Показано, что съем метана пластовой скважиной существенно зависит от проницаемости пласта и времени его дегазации. Это предопределяет преимущества заблаговременной и предварительной пластовой дегазации перед текущей (оперативной) дегазацией по весьма весоному фактору времени и делает наиболее перспективными операции по искусственному увеличению проницаемости дегазуемого угольного пласта путем создания повышенной трещинной газопроницаемости.

Представлен анализ направлений совершенствования технологии пластовой дегазации в части кардинального повышения проницаемости угольных пластов, обозначены перспективы применения технологии подземного гидроразрыва подготавливаемых к эффективной разработке угольных пластов.

Представлена общая характеристика угольного пласта в качестве объекта пластовой дегазации. Изучены параметры трещиновато – пористой структуры угольного пласта и основные закономерности метанопереноса в нем.

Газоперенос в угольном пласте может описываться дифференциальным уравнением в частных производных, учитывающим закон сохранения массы, закон фильтрации Дарси и уравнение сорбции Ленгмюра, которое имеет вид

$$\operatorname{div}\left(\frac{C_1}{\mu_1} \rho_1 \cdot \operatorname{grad} P_1\right) = \frac{\partial}{\partial t}\left[\Pi \rho_1 + \frac{abP_1}{(1+aP_1)}\right] \quad (1)$$

где  $C_1$  – газопроницаемость угля,  $m^2$ ;

$\mu_1$  – динамическая вязкость метана,  $Pa \cdot c$ ;

$\rho_1$  – плотность метана, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_1 = \frac{P_1}{RT} \mu_{CH_4}$ ,

$P_1$  – давление метана в поровом пространстве, Па;

$\mu_{CH_4}$  – молярная масса метана;

$R$  – универсальная газовая постоянная;

$t$  – время, с;

$\Pi$  – пористость угля;

$a, b$  – константы сорбции в уравнении Ленгмюра.

Известная и разработанная с участием автора модель двухфазной фильтрации позволяет прогнозировать радиус зоны гидравлической обработки при различных режимах нагнетания жидкости, изменение проницаемости угольного пласта по метану и воде в процессе гидрообработки. Однако указанная модель базируется на предположении, что угольный пласт однороден и изотропен, что не отвечает реальности и предопределяет целесообразность определения ряда параметров экспериментальным путем в шахтных условиях.

Обозначены возможные режимы внедрения рабочей жидкости в угольный пласт. Рекомендованы к применению для интенсивной дегазации угольного пласта два основных режима гидродинамического воздействия на него – гидрорасчленение и гидроразрыв, осуществляющие раскрытие новых и расширение уже существующих трещин для значительного повышения газопроницаемости дегазируемого угольного пласта.

Рабочую жидкость, подаваемую в угольный пласт, целесообразно выдерживать определенное время в пласте для выполнения работы по замещению метана водой в сорбционном объеме, что является положительным фактором для уменьшения природной метаноносности в зоне гидравлической обработки. Целесообразно после некоторой выдержки рабочую жидкость удалять из пласта для его эффективной дегазации, так как вода, находящаяся в трещинно-поровом пространстве угольного пласта,

существенно уменьшает фазовую проницаемость пласта для метана и замедляет процесс его извлечения.

Обоснована целесообразность использования механизма гидратации угольного пласта, представлены основные технологические параметры данного процесса. Вода, находящаяся в угольном пласте, проникает в мельчайшие поры и трещины за счет сил самодвижения, в частности, капиллярных сил. Она блокирует метан в мельчайших порах и трещинах пласта, что приводит к существенному (по известным исследованиям, на  $2\div 5$  м<sup>3</sup>/т) увеличению остаточной газоносности угля и, как следствие, уменьшению выделения метана из увлажненных зон в выработки в процессе ведения горных работ.

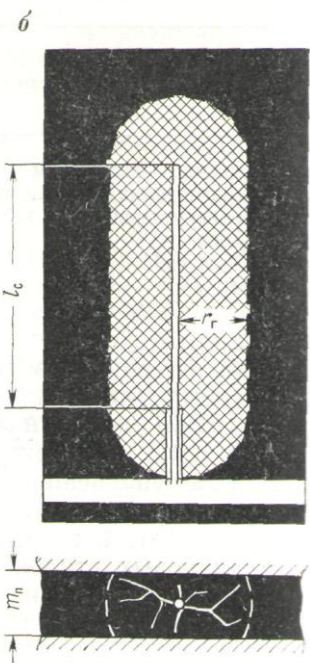
Обоснованы базовые технологические параметры усовершенствованной нами технологии подземного гидроразрыва, в частности, давление нагнетания рабочей жидкости, темп закачки, общий ее объем и радиус влияния скважин гидроразрыва. Отличительные особенности защищенной патентом РФ усовершенствованной технологии подземного гидроразрыва (здесь и далее, ПодзГРП), осуществляемого из подготовительных выработок, приведены в таблице 1.

*Таблица 1 – Отличительные особенности усовершенствованной технологии подземного гидроразрыва (ПодзГРП), осуществляемого из подготовительных выработок.*

| № | Существенные отличия | Гидроразрыв из подземных выработок (согласно Инструкции по дегазации угольных шахт, Ростехнадзор, 2013) | Усовершенствованная технология ПодзГРП                                                             |
|---|----------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 | Методический подход  | Условия применения и параметры гидроразрыва определяются опытным путем или по рекомендации              | Условия применения и параметры гидроразрыва установлены аналитически и проверены экспериментальным |

|   |                                                           |                                                                                                                                                                                               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|---|-----------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|   |                                                           | НИИ, разработавшей способ                                                                                                                                                                     | путем                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| 2 | Общая длина скважин гидроразрыва, м                       | <p>На 30-40 м меньше длины лавы</p> $L_{\text{скв}} = L_{\text{лав}} - (30 \div 40) \text{ м}$                                                                                                | $L_{\text{скв}} = (L_{\text{герм}}) + 35 \div 70 \text{ м}$ <p>Диапазон 35÷70 м определен экспериментально.</p> <p>35 м – скважины ППД отсутствуют или не осваиваются.</p> <p>70 м – скважины ППД эксплуатируются в штатном режиме.</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| 3 | Длина участка герметизации ( $L_{\text{герм}}$ ), м       | <p>Не менее половины расстояния между скважинами ГРП</p>                                                                                                                                      | <p>Больше размера зоны газового дренирования</p> <p>подготовительной выработки,</p> <p>30÷36 м</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| 4 | Способ герметизации                                       | Цементирование (цементный раствор)                                                                                                                                                            | Двухкомпонентная смола («Шахтиклея»)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| 5 | Давление нагнетания рабочей жидкости, кгс/см <sup>2</sup> | $P_r = 0,3H - 41,8$ <p>где H – глубина залегания угольного пласта от земной поверхности, м.</p> <p><u>Формула не работает, т.к. на практике имеют место значительно большие давления.</u></p> | $P_r = (1 - \nu)(2 q_{\infty} + \sigma_s)$ <p>где <math>P_r</math> - давление жидкости, необходимое для образования вертикальной трещины при гидроразрыве, кгс/см<sup>2</sup>;</p> <p><math>\nu</math> - коэффициент Пуассона;</p> <p><math>q_{\infty}</math> - боковое горное давление, кгс/см<sup>2</sup>;</p> <p><math>\sigma_s</math> - напряжение угля на разрыв, кгс/см<sup>2</sup>.</p> $P = [\sigma_p] + q_{\infty}$ <p>или <math>P = [\sigma_p] + \rho g</math></p> $P_{\text{грп}} = (\gamma_n H + \sigma_p) \alpha$ <p>где <math>\alpha</math> - коэффициент, учитывающий необходимое превышение забойного давления над давлением разрыва (<math>\alpha = 1,2-1,4</math>)</p> |

|   |                        |                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|---|------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 6 | Режим нагнетания       | На длинных лавах<br><u>возможна реализация</u><br><u>режима фильтрации</u>      | <p>Построение индикаторной кривой</p> <p><math>P = f(t)</math> и <math>P = f(q)</math> – при <b>гидрорасчленении</b> монотонное возрастание давления нагнетания до его практической (+/- 10%) стабилизации.</p> <p>Возможны кратковременные экстремумы (<b>микрогидроразрывы</b>).</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| 7 | Радиус гидроразрыва, м | Определяется опытным путем или по рекомендации НИИ-разработчика (не более 30 м) | <p><b>Аналитическая модель</b> двухфазной фильтрации позволяет прогнозировать радиус зоны гидрообработки [5].</p> <p><i>В настоящее время определяется экспериментально по данным водопроявлений в горные выработка в процессе ПодзГРП</i></p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| 8 | Темп нагнетания, л/с   | Не определен.                                                                   | $q_{\max} = \frac{2 \cdot \pi \cdot L \cdot h \cdot \bar{n}_{\text{ср}} \sqrt{m \cdot K \cdot \Delta P}}{\sqrt{\mu \cdot t}}$ <p>где: <math>L</math> - протяжённость трещин, м; <math>h</math> - мощность пласта, м; <math>\bar{n}_{\text{ср}}</math> - среднее число трещин расчленения, шт.; <math>m</math> - пористость, долей ед.; <math>K</math> - проницаемость, м<sup>2</sup>; <math>\Delta P</math> - перепад давления вдоль трещин, МПа; <math>\mu</math> - вязкость закачиваемой жидкости, спз; <math>t</math> – время гидрорасчленения, с</p> <p><math>q</math> (ПодзГРП) = 5÷10 л/с</p> <p><i>Предпочтителен максимальный темп нагнетания с плавным выходом на режим</i></p> |

|   |                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|---|---------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 9 | Объем нагнетания рабочей жидкости, м <sup>3</sup> | $Q'_{\text{ж}} = (\pi R_{\text{г}}^2 + 2R_{\text{г}} \cdot l'_{\text{г}}) m k_3,$ <p><math>l'_{\text{г}}</math> - полезная (эффективная) длина скважины ГРП, м.</p>  | $Q_{\text{в}} = c \pi r^2 m n k_3$ <p><math>Q_{\text{в}}</math> – объем закачки жидкости, м<sup>3</sup>;</p> <p><math>r</math> – радиус действия скважины гидроразрыва в плоскости пласта, м;</p> <p><math>m</math> – полная мощность пласта, м;</p> <p><math>n</math> – фильтрующая пористость</p> <p><math>k_3</math> – коэффициент заполнения угольного массива рабочей жидкостью для гидроразрыва</p> <p><math>c</math> – поправочный коэффициент (1,5)</p> <p>Для пласта Болдыревский <math>n = 0,01</math>,<br/> <math>m = 2,2</math> м.</p> <p>Экспериментально получили <math>k_3 = 0,6</math>.</p> <p>При реализации режима гидратации</p> <p><b><math>Q_{\text{ж}} = 20 \div 40</math> л/т</b></p> |
|---|---------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

Для создания высокого давления закачки в скважину рабочей жидкости целесообразно использовать нагнетательное оборудование типа плунжерного насоса Наулинсо ЕНР, АЗЕ-5 (шахтная маслостанция) или аналогов с темпом нагнетания не менее 5-10 л/с. Показано, что при давлении нагнетания жидкости в скважину 8 ÷ 30 МПа после гидроразрыва образуются и сохраняются в раскрытом виде трещины в пласте, не требуя специального закрепления различного рода проппантами (кварцевый песок и др.).

Расстояние между пластовыми скважинами гидроразрыва, пробуренными по простиранию (падению) пласта, должно приниматься равным двукратной величине радиуса влияния скважин гидроразрыва.

Разработана и эффективно применена новая технология герметизации скважин для проведения качественного гидроразрыва с помощью «Шахтикля», подаваемого по трубкам в затрубное пространство с помощью

пневмонасоса. Разработана, согласована и утверждена в установленном порядке Программа и методика проведения шахтных экспериментальных испытаний технологии предварительной дегазации угольного пласта Болдыревский с использованием его гидроразрыва из подземных скважин на поле шахты им. С.М. Кирова (выемочные участки 24-58, 24-59 и 24-60).

Обоснованы и вошли в утвержденный паспорт основные технологические параметры проведения предварительной пластовой дегазации с использованием технологии ПодзГРП на пласте Болдыревский (шахта им. С.М. Кирова, АО «СУЭК-Кузбасс»):

- глубина герметизации – не менее 36 м;
- ожидаемое давление при гидрозакачке –  $10 \div 30$  МПа;
- темп нагнетания рабочей жидкости –  $5 \div 10$  л/с;
- радиус влияния скважин гидроразрыва –  $25 \div 35$  м;
- объем закачки рабочей жидкости  $5 \div 100$  м<sup>3</sup>;
- расстояние между скважинами ПодзГРП – 70 м;
- параметры типовой пластовой дегазации на данном этапе

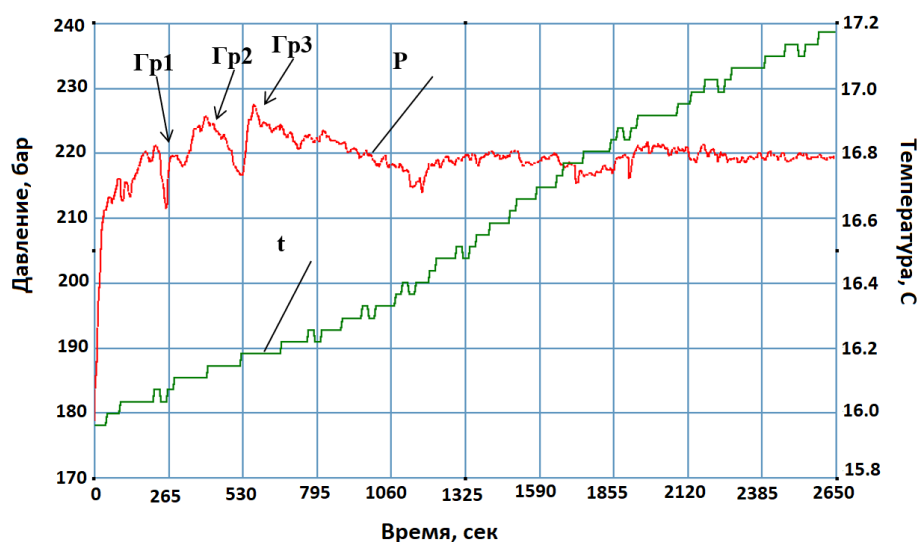
исследований - без изменения. В перспективе - сокращение объема бурения пластовых дегазационных скважин ППД в зонах ПодзГРП.

По результатам проведения поисковых экспериментальных работ режим закачки рабочей жидкости в угольный пласт Болдыревский был определен как **режим гидрорасчленения с циклическими микрогидроразрывами**. При таком режиме рабочая жидкость не разрывает угольный пласт, а только устраняет некоторые препятствия на пути движения жидкости и объединяет порово-трещинное пространство угольного пласта в единую проницаемую систему трещин, ориентированных к нагнетательной скважине.

Дополнительные исследования процесса гидродинамического воздействия на угольный пласт были проведены совместно с ЗАО «Углеметан Сервис». На рисунке 1 приведены результаты исследования

режима внедрения рабочей жидкости в угольный пласт, которое было проведено на скважине ПодзГРП 60/9. На графике можно наблюдать указанный выше общий характер процесса нагнетания жидкости в виде гидрорасчленения угольного пласта с рядом образованных микрогидроразрывов (Гр1, Гр2, Гр3).

Динамика падения давления после проведения ПодзГРП позволяет достоверно определять по разработанной нами методике истинную величину пластового давления. Так на выемочном участке 24-58 на глубине залегания пласта Болдыревский от 425 до 466 метров величина пластового (газового) давления в не разгруженном от горного давления угольном пласте составила  $32 \div 33$  бар.

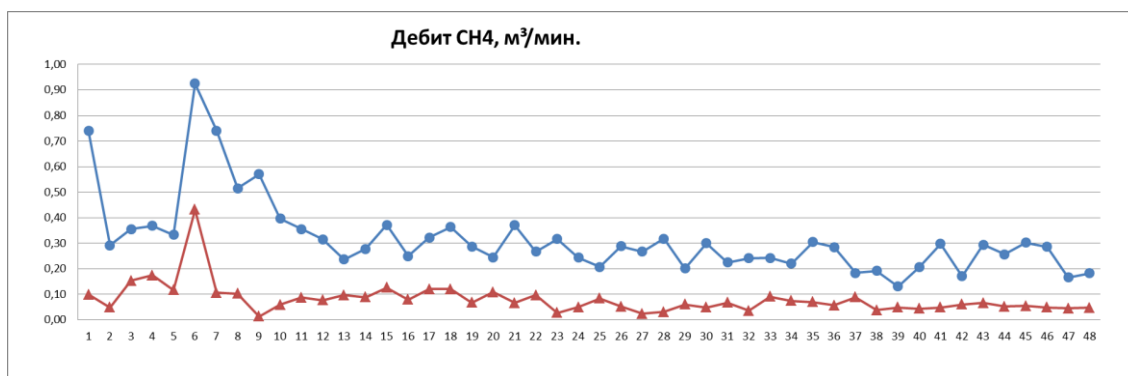


*Рисунок 1 – Изменение давления  $P$  при проведении гидравлического разрыва пласта на скважине ПодзГРП 60/ 9*

Реализация процесса гидроразрыва (гидрорасчленения) на экспериментальных скважинах подтверждается резким ростом дебита метана из скважин гидроразрыва после проведения гидродинамического воздействия и выпуска из скважины рабочей жидкости. Этот рост может быть объяснен повышением проницаемости пласта, раскрытием (образованием) трещин и

сопутствующим существенным повышением поверхности обнажения угольного пласта в них.

По результатам проведенных шахтных испытаний разработанной технологии подземного гидроразрыва отмечено повышение в  $2 \div 4$  раза дебитов метана и суммарного съема последнего из скважин подземной пластовой дегазации (ППД), пробуренных и функционирующих в зонах влияния скважин ПодзГРП (рисунок 2, по оси абсцисс – порядковые номера замеров, которые проводились 2 раза в неделю в течение 6,5 месяцев).



*Рисунок 2 - Дебиты метана в скважины ППД в зоне ПодзГРП (синяя кривая) и в зоне сравнения (красная кривая)*

Отметим, что основной эффект по извлечению метана на выемочном участке следует ожидать не непосредственно из скважин ПодзГРП, а из типовых скважин ППД, функционирующих в зонах гидроразрыва в условиях существенно повышенной проницаемости угольного пласта.

Установлено отсутствие корреляции между давлением нагнетания рабочей жидкости и эффективной длиной пластовой скважины подземного гидроразрыва. Можно предположить, что давление нагнетания зависит от локальных горно-геологических и горнотехнических условий области угольного пласта, подвергаемого гидроразрыву, в частности, наличия тектонических напряжений в массиве, тектонически разгруженных и тектонически напряженных зон.

Повышение эффективности пластовой дегазации в части снижения газообильности очистного забоя в зонах ПодзГРП базируется не только на повышении дебитов скважин ППД, но и на газоистощении угольного пласта подготовительной выработкой, из которой пробурены скважины ПодзГРП. Разработан методический подход к аналитическому определению фактора снижения газоносности угольного пласта подготовительной выработкой. Показано, что поступление метана из угольного пласта в подготовительную выработку может составлять не менее весомую величину, чем суммарный съем метана скважинами ППД. Целесообразность интенсификации процесса газовыделения из пласта в выработку определяется снижением пиковых концентраций метана в очистной выработке при разрушении угля.

Рост дебита метана непосредственно из скважин гидроразрыва и его существенные значения фиксировались в период до 50 -100 суток. Затем происходило его падение, что связано, с нашей точки зрения, с истощением газового коллектора в достаточно ограниченной зоне гидроразрыва (по фактическим оценкам радиус гидроразрыва находится на уровне  $25 \div 35$  метров) и возвратом дебитов к значениям, характерным для не разгруженных от горного давления зон угольного пласта.

Средний дебит скважин ППД на данном пласте и шахтном поле находится на уровне  $5 \div 10$  л/мин (при длине скважин порядка 150 метров). Дебит сравнительно коротких скважин ПодзГРП повышался в процессе эксперимента до 50 л/мин и более. Диапазон дебитов из скважин ПодзГРП в целом изменялся по скважинам от 2,27 до 640,5 л/мин.

Установлено отсутствие негативной или критической информации по состоянию углегазонасного массива (в частности, по состоянию кровли) в зонах гидродинамического воздействия.

Были проведены исследования по снижению газообильности лавы и сокращения простоев добычного оборудования по газовому фактору. Основная методически корректная оценка эффективности технологии ПодзГРП была осуществлена в процессе ведения очистных работ лавой 24-

58. На рисунке 3 представлено расположение скважин ПодзГРП №№ 1-12 на этом выемочном участке и выделены зоны ответственности разработанной технологии ПодзГРП (на рисунке красным цветом) и зоны сравнения, где гидроразрыв перед ППД не применялся (на рисунке синим цветом). Сравнение параметров работы очистного забоя в зоне ГРП и зоне сравнения приведено в таблице 2.

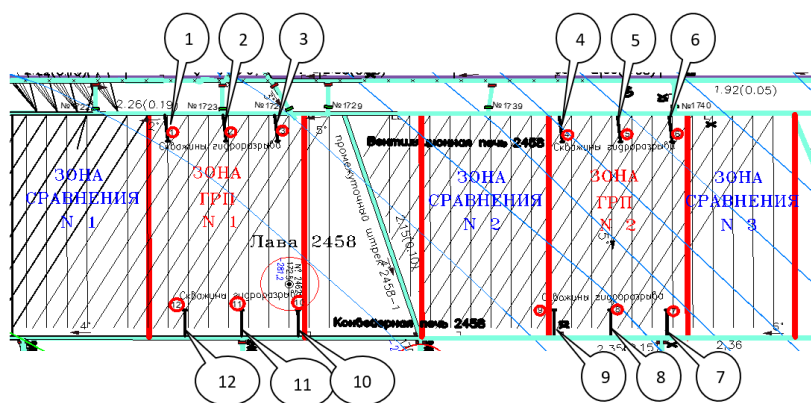


Рисунок 3 – Расположение скважин ПодзГРП на участке 24-58

Таблица 2 - Сопоставление основных параметров работы очистного забоя в зоне ПодзГРП и в сравниваемой зоне

| Основные показатели                    | Ед. изм. | Значения | Зона сравнения<br>(№1+№2+№3) | Зона ГРП<br>(№1+№2) | Δ, % |
|----------------------------------------|----------|----------|------------------------------|---------------------|------|
| Абсолютная метанообильность            | м³/мин   | max      | 8,88                         | 7,81                | 12   |
|                                        |          | среднее  | 8,29                         | 7,29                | 12   |
| Относительная метанообильность         | м³/т     | max      | 1,37                         | 0,84                | 39   |
|                                        |          | среднее  | 1,14                         | 0,80                | 30   |
| По газовому фактору остановки за сутки | мин/сут  | max      | 129,9                        | 71,52               | 45   |
|                                        |          | среднее  | 122,39                       | 71,45               | 42   |
| Суточная добыча                        | т/сут    | max      | 13 007                       | 13 350              | 3    |
|                                        |          | среднее  | 10 747                       | 13 037              | 21   |

Можно констатировать, что среднее значение относительной газообильности очистного забоя в зонах гидроразрыва на выемочном участке 24-58 снижено на 30%, добыча в среднем повышена на 20 %, а продолжительность остановок добычной техники по фактору проветривания уменьшились более, чем на 40%, что позволяет положительно оценивать

эффективность и перспективы дальнейшего практического применения разработанного способа.

Дана оценка технико-экономической эффективности усовершенствованной комплексной технологии предварительной дегазации разрабатываемого угольного пласта путем его гидродинамической обработки. С учетом затрат на реализацию технологии годовой экономический эффект для выемочного участка 24-58 составил более 70,9 млн. руб.

## **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 безопасности и эффективности подземной угледобычи на базе совершенствования технологий комплексной пластовой дегазационной подготовки угольных пластов путем применения их предварительной гидродинамической обработки.

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

1. Установлено, что на современных глубинах разработки газоносных угольных пластов невозможно обеспечить метанобезопасность интенсивной подземной разработки угля без решения вопросов эффективной пластовой дегазации.

2. В составе предварительной дегазационной подготовки газоносных угольных пластов целесообразно предусматривать их гидродинамическую обработку, осуществляемую в установленных режимах и параметрах.

3. Предложена и обоснована усовершенствованная технологическая схема дегазации разрабатываемых угольных пластов с применением их подземного гидроразрыва (гидрорасчленения).

4. Предложен к применению и обоснован механизм гидратации угольного пласта, представлены его основные технологические параметры, обеспечивающие снижение газовыделения из увлажненных зон разрабатываемого пласта в горные выработки.

5. Обоснованы и определены (оценены) основные технологические параметры подземного гидроразрыва угольного пласта, в частности:

- объем рабочей жидкости определяется по фактору заполнения всего фильтрующего объема угольного пласта при раскрытии трещин в пределах проектируемого радиуса гидроразрыва, а также по фактору блокирования метана в мельчайших порах и трещинах угольного пласта;

- прогнозируемое давление нагнетание рабочей жидкости при гидроразрыве угольного пласта, которое учитывает глубину залегания угольного пласта и его прочностные характеристики;

- эффективная длина скважин подземного гидроразрыва определяется в зависимости от горнотехнических условий, определяющих возможную степень извлечения метана скважинами и подготовительной выработкой при комплексной дегазационной подготовке.

6. Разработана, согласована и утверждена в установленном порядке Программа и методика проведения шахтных экспериментальных испытаний технологии предварительной дегазации угольного пласта Болдыревский с использованием его гидроразрыва из подземных скважин на поле шахты им. С.М. Кирова (выемочные участки 24-58, 24-59 и 24-60).

7. Разработана новая эффективная технология герметизации скважин для проведения качественного гидроразрыва с помощью «Шахтикля», подаваемого с помощью пневмонасоса по трубкам в затрубное пространство.

8. Реализация технологии ПодзГРП позволила достоверно определить величину пластового давления на объектах поисковых работ и для условий

пласта Болдыревский на глубине 425÷466 метров пластовое давление составило 32÷33 бар.

9. Комплексная пластовая дегазационная подготовка угольного пласта включает в себя мероприятия по снижению эффективной газоносности угольного пласта за счет извлечения части метана из техногенно подготовленного угольного пласта и замещения метана водой в сорбционном объеме, а также блокирования другой его части в мельчайших порах и трещинах пласта.

10. Выявлено, что увеличения остаточной метаноносности угольного пласта достигается вследствие блокирования метана рабочей жидкостью в микроструктуре угольного пласта, проникающей туда за счет капиллярных сил, особенно в условиях применения нисходящих дегазационных скважин.

11. Повышение эффективности пластовой дегазационной подготовки в части снижения метанообильности очистного забоя в зонах ПодзГРП достигается не только за счет извлечения газа скважинами ППД в зонах подземного гидроразрыва, но и вследствие выноса газа вентиляционной струей в подготовительной выработке, из которой пробурены скважины ПодзГРП.

12. Установлено, что вынос метана вентиляционной струей из зоны дезинтеграции угольного пласта в зоне гидроразрыва является не менее весомым фактором эффективной дегазационной подготовки угольного пласта, чем съем метана пластовыми дегазационными скважинами.

13. В зонах подземного гидроразрыва эффективность функционирования типовых скважин подземной пластовой дегазации по извлечению из угольного пласта метана в 2÷4 раза выше, чем в зонах сравнения, где гидроразрыв не проводился.

14. Установлено, что основной эффект от реализации технологии ПодзГРП в части извлечения метана достигается его извлечением через скважины типовой пластовой дегазации, пробуренных в зонах влияния скважин гидроразрыва, а не непосредственно через скважины ПодзГРП.

15. Средний дебит отдельных пластовых скважин (5-10 л/мин) на шахте им. С.М. Кирова после гидродинамического воздействия увеличивался в 5-100 раз и достигал величин более 600 л/мин.

16. В результате применения технологии ПодзГРП на выемочном участке 24-58 среднее значение относительной метанообильности очистного забоя было снижено на 30%, продолжительность остановок добычного оборудования по газовому фактору снизилась на 40%, добыча угля была в среднем увеличена на 20 %.

17. Разработанная технология ПодзГРП в составе комплексной пластовой дегазации показала свою высокую эффективность и перспективность для практического использования и дальнейшего совершенствования.

18. Представлены и обоснованы отличительные параметры и показатели применения усовершенствованной технологии ПодзГРП от известной, изложенной в основном руководящем документе - Инструкции по дегазации угольных шахт, Ростехнадзор, 2013.

19. Обоснован новый способ дегазационной подготовки газоносного угольного пласта к отработке, совершенствующий разработанный в диссертации, при котором центральная часть выемочного столба дополнительно дегазифицируется в режиме откачки метана вакуум-насосом через длинные направленные скважины, пробуренные навстречу очистному забою.

20. Представлена оценка технико-экономической эффективности разработанной технологии ПодзГРП. Годовой экономический эффект для условий выемочного участка 24-58 составил более 70 млн. руб.

**Основные положения диссертации изложены в следующих опубликованных работах:**

- 1.Мазаник Е.В., Понизов А.В., Садов А.П., Сластунов С.В. Усовершенствованная технология предварительной дегазации угольных пластов на основе их гидроразрыва. Сборник статей по материалам XIV международной заочной научно-практической конференции: «Развитие науки в XXI веке» 1 часть, г. Харьков, Х.: научно-информационный центр «Знание», 2016. С.111-116. ISSN: 6827-0151.
- 2.Сластунов С.В., Мазаник Е.В, Садов А.П., Понизов А.В. Углубление пластовой дегазации на основе усовершенствованной технологии подземного гидроразрыва. Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2016. № 9. С. 296-303. (БАК)

- 3.Сластунов С.В., Ютяев Е.П., Мазаник Е.В., Садов А.П., Понизов А.В. Разработка технологии дегазации угольного пласта с использованием его гидроразрыва для обеспечения метанобезопасности горных работ. Сборник статей по материалам XVI международной заочной научно-практической конференции: «Развитие науки в XXI веке» (13.08.2016 г.), 1 часть, г. Харьков, Х.: научно-информационный центр «Знание», 2016. С.42-47. ISSN: 6827-0151.
- 4.Сластунов С.В., Ютяев Е.П., Мазаник Е.В., Садов А.П., Понизов А.В. Шахтные испытания усовершенствованной технологии подземной пластовой дегазации с использованием гидроразрыва. «Уголь», ноябрь, 2016, с 32-36. (БАК)
- 5.Каркашадзе Г.Г., Мазаник Е.В., Понизов А.В. Моделирование процесса гидравлической обработки и дегазации выбросоопасных угольных пластов при столбовой системе разработки с высокими нагрузками на очистной забой. Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2017. № S1. С. 90-101. (БАК)
- 6.Сластунов С.В., Мазаник Е.В., Понизов А.В., Сметанин В.С. Методика проведения шахтных экспериментальных испытаний технологии передовой дегазации пласта-спутника «Подполеновский» с использованием гидроразрыва углепородной толщи. Приднепровский научный вестник. 2017. Т. 4. № -11. С. 72-83.
- 7.Сластунов С.В., Мазаник Е.В., Понизов А.В., Сметанин В.С. Разработка усовершенствованной технологии подземного гидроразрыва угольного пласта для его эффективной предварительной дегазации. Приднепровский научный вестник. 2017. Т. 4. № 11. С. 84-89.
- 8.Мазаник Е.В., Понизов А.В., Сметанин В.С., Сластунов С.В. Шахтные испытания усовершенствованной технологии гидроразрыва угольного пласта для повышения эффективности предварительной дегазации. Сборник статей XXIV международной конференции «Развитие науки в XXI веке» (15.04.2017г.), 1 часть, 2017 г., с. 41-49.
- 9.Мазаник Е.В., Понизов А.В., Сметанин В.С., Сластунов С.В. Оценка эффективности подземного гидроразрыва угольного пласта для углубления предварительной дегазации. Материалы докладов XII международной научно-практической конференции " 21 век: фундаментальная наука и технологии "24-25 апреля 2017 г. North Charleston, USA ,29406, 2017.Том 1, с.60-66.
10. Мазаник Е.В., Понизов А.В., Сметанин В.С, Сластунов С.В. Шахтные испытания усовершенствованной технологии гидроразрыва угольного пласта для повышения эффективности предварительной дегазации. ЗНАНИЕ. Номер: 4-1 (44) Год: 2017 Страницы: 41-50
- 11.Мазаник Е.В., Понизов А.В., Сластунов С.В., Пащенко П.Н. Шахтные исследования усовершенствованной технологии подземного гидроразрыва угольного пласта в целях его эффективной предварительной дегазации. Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — 2018. — № 1 (специальный выпуск 3). — М.: Издательство «Горная книга» (ISSN 0236-1493), с. 16-22. (БАК)
- 12.Макаров В.А., Понизов А.В., Комиссаров И.А. Исследование влияния размеров отбитого комбайном угля на газообильность очистного забоя. Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — 2018. — № 1 (специальный выпуск 3). — М.: Издательство «Горная книга» (ISSN 0236-1493), с.23-29. (БАК)
- 13.Сластунов С.В., Каркашадзе Г.Г., Коликов К.С., Ютяев Е.П., Мазаник Е.В., Садов А.П., Понизов А.В., Никитин С.Г. Способ подготовки газоносного угольного пласта к отработке. Патент РФ № 2 659 298 (Заявка: 2017133145 от 22.09.2017). Бюл. № 19 (73), 29.06.2018. (БАК)
- 14.Сластунов С.В., Ютяев Е.П., Мазаник Е.В., Садов А.П., Понизов А.В. Обеспечение метанобезопасности шахт на основе глубокой дегазации угольных пластов при их подготовке к интенсивной разработке, ИЮЛЬ, 2019, «УГОЛЬ», с.42-47. (Scopus, БАК)
15. A V Ponizov (2020) Designing In-Seam Gas Drainage Technology Based on Hydrodynamic Approach. In: IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 459 052076.
16. Сластунов С.В., Понизов А.В., Садов А.П., Хаутиев А.Б.-М. Гидрорасчленение угольных пластов для их эффективной дегазационной подготовки через подземные скважины. Горный информационно-аналитический бюллетень (ГИАБ), № 6-1, 2020г., Москва, изд-во «Горная книга», с.15-25. (БАК)