DOI: 10.18454/PMI.2017.1.125

УДК 622.88:502.65

ОБОСНОВАННЫЙ ВЫБОР ТЕХНОЛОГИИ ПЛАСТОВОЙ ДЕГАЗАЦИИ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ПОДЗЕМНЫХ ГОРНЫХ РАБОТ ПРИ ИНТЕНСИВНОЙ ДОБЫЧЕ УГЛЯ

С.В.СЛАСТУНОВ[1], **Е.П.ЮТЯЕВ**[2]
[1] *Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва, Россия*
[2] *АО «СУЭК-Кузбасс», г.Ленинск-Кузнецкий, Россия*

В статье изложены основные аспекты методологического подхода к объективной аналитической оценке предельно допустимых нагрузок на очистные забои угольных шахт по газовому фактору. Аналитический прогноз основывается на оценке притоков метана в пространство очистного забоя из всех возможных источников его поступления на базе использования фундаментальных физических законов, современных средств математического моделирования и натурных исследований основных свойств и параметров состояния углегазоносного массива. Объективная достоверная оценка допустимых нагрузок является отправной точкой для обоснованного выбора технологии пластовой дегазации, который должен базироваться также на временном факторе и прогнозном показателе газоотдачи угольного пласта в дегазационные скважины. Разработаны рекомендации по выбору технологии пластовой дегазации разрабатываемого угольного пласта «Болдыревский» шахты им. Кирова, основанные на применении новых технологических схем (гидроразрыв пласта, осуществляемый из подготовительных пластовых выработок и др.), успешно прошедших натурную апробацию на указанном объекте.

***Ключевые слова*:** газовый фактор, допустимые нагрузки, методология прогноза, выбор технологии пластовой дегазации, гидроразрыв, практические рекомендации

***Как цитировать эту статью*:** Сластунов С.В. Обоснованный выбор технологии пластовой дегазации для обеспечения безопасности подземных горных работ при интенсивной добыче угля / С.В.Сластунов, Е.П.Ютяев // Записки Горного института. 2017. Т. 223. С. 125-130. DOI: 10.18454/PMI.2017.1.125

Введение. Стратегией развития угольной отрасли России до 2030 г. предусматривается рост добычи угля до 430 млн т/год. Тенденция интенсификации угледобычи характерна для многих шахт, в частности, на шахтах АО «СУЭК-Кузбасс» нагрузки на очистные забои постоянно растут и в отдельных случаях достигают 20÷30 тыс. т/сут. В России весьма велико количество шахт, опасных по газу. Абсолютная метанообильность на некоторых шахтах превышает 150 м^3/мин. Для многих шахт проблема метанобезопасности является основной. Эта проблема включает в себя много важных аспектов, одним из которых является потребность в разработке и внедрении эффективных технологий пластовой дегазации. Именно пластовая дегазация во многих случаях является сдерживающим фактором обеспечения безопасных условий угледобычи при высоких нагрузках на очистные забои.

На шахтах РФ достаточно широко и эффективно применяются способы текущей дегазации, обеспечивающие извлечение метана из разгруженного от горного давления угленосного массива и выработанного пространства в процессе ведения горных работ. Их эффективность составляет 70-80 % и более. Высокая эффективность этих способов дегазации обусловлена тем, что из массива извлекается, в основном, свободный газ. Отдельные проблемы в этой области не носят принципиального научного характера, эффективность работ по дегазации в существенной степени обеспечивается грамотным инженерным сопровождением.

Одной из ключевых задач в области обеспечения метанобезопасности при значительном росте нагрузок на очистные забои является разработка эффективной технологии пластовой дегазации, так как в современных горно-геологических и горно-технических условиях ее реальная эффективность в 10-20 % [1, 3] не всегда может снять существенные ограничения на нагрузки на очистные забои по газовому фактору и обеспечить высокопроизводительную разработку газоносных угольных пластов.

В изложенном направлении необходимо решать следующие научно-практические задачи:

• разработать методические основы корректного и объективного определения предельно допустимых нагрузок на очистной забой по газовому фактору;

• разработать и внедрить достоверные и работоспособные методы определения основных свойств и характеристик состояния угольных пластов при обосновании допустимых нагрузок на очистной забой;

DOI: 10.18454/PMI.2017.1.125

• обосновать методологию выбора технологий дегазационной подготовки шахтных полей и выемочных участков;

• разработать практические рекомендации по интенсификации пластовой дегазации газоносных пластов для конкретных горно-геологических и горно-технических условий.

Методология прогноза. Ученые и специалисты Национального исследовательского технологического университета «МИСиС» и АО «СУЭК-Кузбасс» предложили и обосновали методологию объективного прогноза допустимой нагрузки на очистной забой по газовому фактору, которая предусматривает оценку притоков метана в пространство очистного забоя из всех возможных источников его поступления на базе использования фундаментальных физических законов, современных средств математического моделирования и результатов натурных исследований основных свойств и параметров состояния углегазоносного массива [2, 4].

Было допущено, что при глубинах разработки угольных пластов до 500÷600 м правомерно для практических расчетов с допустимой погрешностью описывать процесс сорбции – десорбции метана уравнением Ленгмюра, учитывающим переход метана в фильтрующих порах и трещинах угольного пласта из молекулярно связанного состояния в газообразное.

Для расчета основных параметров газопереноса в угольном пласте допустимо использовать дифференциальное уравнение в частных производных для однофазного движения газа метана в пористой среде, отражающей свойства газоносного угольного пласта:

$$\operatorname{div}\left(\frac{C}{\mu}\rho \operatorname{grad} P\right) = \frac{\partial}{\partial t}\left[\Pi\rho + \frac{abP}{(1+aP)}\right],$$

где C – проницаемость угля, м^2; μ – динамическая вязкость метана, Па·с; ρ – плотность метана, кг/м^3; t – время, с; Π – пористость угля; a, b – константы сорбции в уравнении Ленгмюра; P – давление свободного метана в поровом пространстве, Па.

Математическое моделирование с использованием современных компьютерных программ позволяет проводить анализ факторов, определяющих максимально допустимые нагрузки на очистной забой по газовому фактору. Определяются притоки метана в очистную выработку в зависимости от скорости движения очистного комбайна, длины лавы, проницаемости угольного пласта. Методика расчета реализована на языке программирования «MathCad-14».

Выполненные применительно к условиям лавы 24-55 (пласт «Болдыревский», шахта им. Кирова, АО «СУЭК – Кузбасс») расчеты показывают, что при заданных параметрах и основных характеристиках состояния углегазоносного массива, высоких нагрузках на очистной забой, наибольший вклад в приток метана в выработанное пространство очистного забоя обеспечивают два источника – очистной забой и отбитый уголь. Притоки метана, поступающего из кровли и почвы, не превышают 5 %. Допустимая по требованиям правил безопасности величина притока метана (до 13,1 м^3/мин) в очистной забой в указанных условиях достигается при отсутствии эффективной пластовой дегазации с нагрузкой на очистной забой более 8100 т/сут.

Для обеспечения планового показателя в 10 000 т/сут на выемочном участке 24-55 была осуществлена предварительная пластовая дегазация из подготовительных выработок.

Представленный методический подход и разработанная на его основе аналитическая методика определения предельно допустимых нагрузок на очистной забой по газовому фактору предназначены для практической реализации в условиях действующих угольных шахт соответствующими структурами, имеющими технические возможности для определения основных свойств и характеристик состояния разрабатываемого угольного пласта.

Константы изотермы сорбции Ленгмюра наиболее достоверно определяются в лабораторных условиях. При отсутствии лабораторных исследований можно определить их косвенным методом в шахтных условиях: по величине темпа нарастания давления в скважине в течение времени, используя возможности компьютерного моделирования и с учетом дифференциальных уравнений массопереноса, можно методом решения обратной задачи уточнять постоянные Ленгмюра. Последние также можно оценивать по классификатору конкретного бассейна или месторождения как источнику ориентировочной (вспомогательной) информации.

DOI: 10.18454/PMI.2017.1.125

Пластовое давление метана определяется только в шахтных условиях на разрабатываемом пласте методом бурения пластовых скважин, надежной герметизации их устья и измерения темпа нарастания давления в закрытой скважине до максимума. При ограниченном времени испытаний о максимально возможной величине давления в скважине судят методом аппроксимации до максимума.

Проницаемость угольного пласта в очистном забое определяется по результатам газовой съемки в лаве в ремонтную смену. Целесообразно также уточнять природную газоносность угольного пласта ввиду большой ошибки ее определения при геолого-разведочных работах (до 30 %).

Для анализа работоспособности и достоверности разработанного метода определения предельно допустимых нагрузок на очистной забой по газовому фактору были использованы фактические данные по нагрузкам и данные, представленные в документе «График ввода и выбытия очистных забоев», где нашли отражения плановые ежемесячные нагрузки на очистные забои пластов «Болдыревский» и «Поленовский» шахты им. Кирова.

Исходные данные для оценки работоспособности и достоверности аналитической методики:

Лава	2457	2592	2593	2594
Прогноз базовый (принятый в СУЭКе) по максимально допустимой нагрузке, т/сут	7840	3310	3480	6890
Прогноз по аналитической методике определения максимально допустимой нагрузки, т/сут	8665	7063	6731	7409
Фактическая максимальная нагрузка на очистной забой, т/сут	8667	5700	7452	7200
Объем добытого угля, тыс.т	560	1547	2386	3184

В качестве объективного критерия оценки был использован показатель средневзвешенного отклонения по объему от факта. Чем меньше значение критерия, тем более достоверный прогноз. Выполненный анализ позволил определить, что достоверность разработанной аналитической методики прогноза на 20 % выше базовой методики, применяемой в АО «СУЭК-Кузбасс».

Необходимо отметить, что такая сравнительная оценка подтверждает только методическую правильность разработанного аналитического метода (точность прогноза повышается на 15-20 %) и его принципиальную работоспособность, однако в настоящее время полученные численные значения не могут быть признаны достоверными и представительными ввиду большой неточности исходных данных для расчетов. Это касается в первую очередь значения природной газоносности, пластового давления и сорбционных характеристик угольных пластов.

Необходимо отметить, что достоверная методика определения предельно допустимых нагрузок на очистной забой по газовому фактору является необходимым элементом при выборе технологии пластовой дегазации, так как позволяет выйти на величину требуемой эффективности пластовой дегазации, которая надежно обеспечит достижение плановых показателей по темпам добычи угля.

Обоснованный выбор технологии пластовой дегазации принципиально важен, что отмечалось нами ранее [7]. Разработанные методические рекомендации по выбору способа пластовой дегазации при дегазационной подготовке запасов угля предусматривают двухэтапное решение.

Первый этап:

• согласно стратегическому плану угольной компании по нагрузкам на очистной забой (планируемая нагрузка) на каждом выемочном участке определяется целесообразность проведения пластовой дегазации. Ключевым моментом является наличие ограничений на нагрузку на очистной забой по газовому фактору, определяемых на основе действующих руководящих документов и разработанного аналитического метода. Практическим выходом этого пункта является определение требуемой эффективности пластовой дегазации или величины необходимого снижения газоносности разрабатываемого угольного пласта, подлежащего пластовой дегазации и последующей отработке;

• определяется резерв времени, имеющийся в запасе на проведение дегазации угольного пласта. Этот показатель позволяет во многом решить вопрос о возможности применения заблаговременной (за 3 года и более), предварительной (осуществляется более 6 мес.в) и текущей дегазации разрабатываемого пласта. Эффективность схем дегазации зависит от времени, отведенного на извлечение метана из соответствующего источника его поступления в горные выра-

DOI: 10.18454/PMI.2017.1.125

ботки. Временным фактором предопределяется ограниченная эффективность технологий текущей (оперативной) пластовой дегазации, применяемых совместно и в увязке с ведением основных горных работ, и потенциально наиболее высокая эффективность заблаговременной дегазации;

• прогнозируется возможный дебит метана из дегазационных пластовых скважин, что позволяет определить с учетом резерва времени на дегазацию эффективность соответствующей схемы пластовой дегазации. Прогноз достижимого дебита метана определяется на базе использования фундаментальных законов газопереноса (в частности, с использованием приведенной выше формулы или в соответствии с другими известными подходами, например, [3]) и экспериментального определения основных свойств и параметров состояния неразгруженного от горного давления угольного пласта непосредственно на объектах дегазации. Дополнительно можно также ориентироваться на подтвержденную в близких шахтных условиях объективную эффективность некоторых схем пластовой дегазации.

Второй этап: научно обосновывается общая технологическая схема дегазации угольного пласта, которая может иметь в качестве составных элементов различные варианты заблаговременной, предварительной и других видов пластовой дегазации, а также способов их усиления.

Пример выработки рекомендаций по выбору способа пластовой дегазации для условий выемочного поля 24-59 шахты им. Кирова:

Первый этап	Второй этап
Величина «газового барьера»	Подземная пластовая дегазация (базовая схема)
Резерв времени на пластовую дегазацию	Гидроразрыв пласта из подготовительных выработок (вспомогательная схема)
Прогнозная эффективность пластовой дегазации (на основе прогноза дебитов метана из пластовых скважин)	Автопневмовоздействие: рекомендуемый способ интенсификации дегазации

В качестве базовой схемы рекомендована стандартная технология подземной пластовой дегазации, осуществляемой из подготовительных выработок аналогично тому, что было реализовано на предыдущих выемочных участках данного шахтного поля. Параметры реализации стандартной технологии изложены в действующей Инструкции по дегазации угольных шахт (2012 г.) и проекте на дегазацию шахты.

Обоснование рекомендации технологии подземного гидроразрыва (ПодзГРП), осуществляемого из подготовительных выработок в качестве вспомогательной технологической схемы, базируется на положительных результатах работ, проведенных под руководством авторов настоящей статьи на шахте им. Кирова (пласт «Болдыревский», скважины ПодзГРП № 1-12) в 2015-2016 гг. [5], где эффективность подземной пластовой дегазации с предварительным гидроразрывом угольного пласта составила 30÷40 %.

Если на некоторых скважинах подземной пластовой дегазации нельзя достичь требуемой эффективности по извлечению метана, то разработанной методикой выбора технологии пластовой дегазации рекомендовано применение способов интенсификации газовыделения из пластовых дегазационных скважин. Для выемочного поля 24-59 предусмотрено применение в этом качестве технологии автопневмовоздействия (АПВ). Для обоснования рекомендации в качестве схемы интенсификации технологии АПВ предварительно на выемочном участке 24-55 были проведены экспериментальные работы по апробации и испытаниям данной технологии [7], суть которой заключается в периодическом перекрытии дегазационной скважины в период ее эксплуатации при надежной герметизации последней. При закрытии скважины давление в ней может подниматься от 0,5 МПа и более до величины пластового давления (для выемочного участка 24-58, например, установленная нами величина пластового давления составила 3,2 МПа), что способствует повышению проницаемости угольного пласта в прискважинной зоне. На восьми экспериментальных скважинах дебит метана после АПВ увеличивался в несколько раз (от 3÷8 до 22÷27 л/мин) и стабильно держался на повышенном уровне несколько месяцев, что позитивно сказалось на конечной эффективности пластовой дегазации.

В методике выбора технологии пластовой дегазации на первом этапе, как отмечалось, первоначально определяются наличие и величина «газового барьера», что реализуется применением разработанной аналитической методики определения предельно допустимых нагрузок на

DOI: 10.18454/PMI.2017.1.125

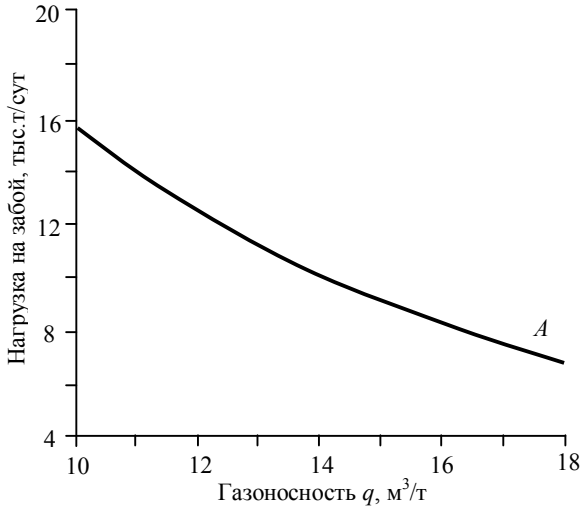


Рис.1. Нагрузка на очистной забой в зависимости от газоносности пласта «Болдыревский», лава 24-58

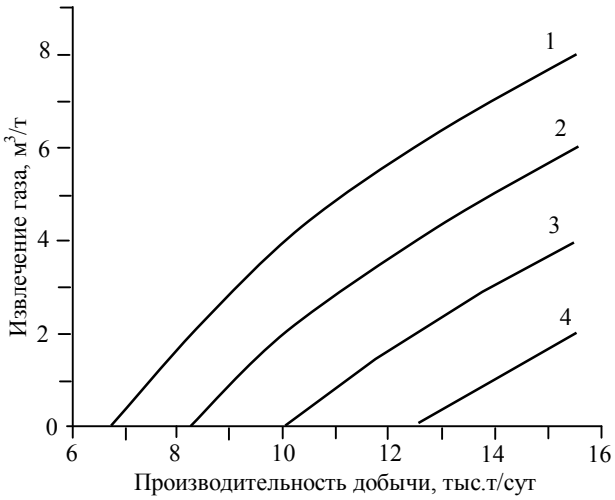


Рис.2. Необходимое извлечение метана для повышения производительности очистного забоя

Начальная газоносность угольного пласта:
1 – 18 м^3/т; 2 – 16 м^3/т; 3 – 14 м^3/т; 4 – 12 м^3/т

очистной забой по газовому фактору. Приведем рассчитанные в соответствии с разработанной методикой максимально допустимые нагрузки на очистной забой в зависимости от остаточной после осуществления пластовой дегазации газоносности пласта «Болдыревский», лава 24-58 (рис.1). Несложно видеть, что при снижении газоносности пласта предложенной комплексной дегазацией до 11 м^3/т, предельно допустимая нагрузка на очистной забой в лаве 24-58 возрастет до 14 тыс.т/сут.

Номограмма для определения необходимого извлечения метана в процессе пластовой дегазации (рис.2) позволяет делать достоверный выбор пластовой дегазации в зависимости от требуемой нагрузки на очистной забой.

Например, если будет достоверно определено, что фактическая газоносность пласта «Болдыревский» на выемочном участке составляет 14 м^3/т и нагрузка планируется на уровне 11 000 т/сут, то необходимая глубина дегазации (необходимое извлечение метана из разрабатываемого пласта в процессе пластовой дегазации) составит 1 м^3/т. Эта задача может быть решена применением стандартной технологии подземной пластовой дегазации одиночными или спаренными скважинами, пробуренными из подготовительных выработок.

Если же фактическая газоносность пласта «Болдыревский» на выемочном участке составляет 16 м^3/т и нагрузка планируется на уровне 14 000 т/сут, то необходимая глубина дегазации (необходимое извлечение метана из разрабатываемого пласта в процессе пластовой дегазации) составит 5 м^3/т. Из известных [1, 3, 6, 8] данных о фактической достоверной эффективности различных схем пластовой дегазации в этом случае должна была бы быть в качестве базовой схемы рекомендована технология заблаговременной дегазации угольных пластов скважинами с поверхности (ЗДП) с гидрорасчленением пластов, эффективность которой может составлять 40÷50 % и которая может обеспечить извлечение метана на уровне 5 м^3/т и более. В качестве вспомогательной схемы могла бы быть в этом случае рекомендована технология подземной пластовой дегазации из подготовительных выработок в зонах ГРП с расчетной расширенной сеткой пластовых скважин при невозможности достичь требуемой эффективности дегазации на первой базовой стадии дегазационных работ.

Заключение. Анализируя в целом ситуацию по шахтам АО «СУЭК – Кузбасс», можно отметить следующее. Наибольший уровень нагрузок на очистные забои имеют шахты «Котинская», «Талдинская – Западная» и им. Кирова. По газовому фактору интерес представляют две из них – «Котинская» и им. Кирова. Рассмотрение ограничений нагрузки на очистной забой по газовому фактору по ряду выемочных полей шахты им. Кирова и «Котинская» показывает, что для большинства (до 80 %) очистных забоев требуется применение пластовой дегазации с проектной эффективностью в диапазоне 10÷35 %. Такую эффективность при благоприятных условиях мо-

гут обеспечить способы предварительной дегазации, осуществляемой из подготовительных выработок: от типовой пластовой дегазации без применения активных воздействий до применения вспомогательных воздействий, например гидроразрыва дегазируемых угольных пластов.

На основе представленных исследований разработаны и приняты к реализации рекомендации по технологическим схемам и параметрам пластовой дегазации для перспективных выемочных участков поля шахты им. Кирова.

ЛИТЕРАТУРА

1 *Баймухаметов С.К.* Проблемы безопасности разработки высокогазоносных угольных пластов. Караганда: Полиграфия, 2006. 201 с.

2. *Мазаник Е.В.* Совершенствование технологии дегазации угольных шахт на основе заблаговременной поэтапной скважинной подготовки шахтных полей: Автореф дис. … канд. техн. наук / МГГУ. М., 2010. 22 с.

3. *Каркашадзе Г.Г.* Безопасная отработка газоносных угольных пластов по газовому фактору на основе учета свойств углепородного массива и параметров системы разработки / Г.Г.Каркашадзе, Г.П.Ермак, Е.П.Ютяев // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2014. № 5. С. 152-156.

4. Предварительный и оперативный прогноз допустимых нагрузок на очистной забой при интенсивной отработке газоносных угольных пластов / Г.Г.Каркашадзе, С.В.Сластунов, Г.П.Ермак, Е.П.Ютяев // Уголь. 2015. № 3. С.30-35.

5. Повышение эффективности пластовой дегазации на основе гидроразрыва угольных пластов / С.В.Сластунов, Е.П.Ютяев, Е.В.Мазаник, А.П.Садов // Горный информационно-аналитический бюллетень. Специальный выпуск № 60-2. 2015. С. 408-418.

6. *Сластунов С.В.* Выбор технологии управления газовыделением на выемочном участке при дегазационной подготовке угольных пластов к безопасной и эффективной разработке // Энергетическая безопасность России. Новые подходы к развитию угольной промышленности: Сборник трудов XV Междунар. научно-практической конференции / Кемеровский технический университет. Кемерово, 2013. С. 316-318.

7. *Сластунов С.В.* Интенсификация извлечения метана из угольных пластов на основе повышения их проницаемости в процессе циклических сорбционных деформаций // Механика горных пород при разработке месторождений углеводородного сырья: Сборник Междунар. научно-технической конференции / Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 2015. С. 41-42.

8. Управление свойствами и состоянием угольных пластов с целью борьбы с основными опасностями в шахтах / В.В.Ржевский, Б.Ф.Братченко, А.С.Бурчаков, Н.В.Ножкин. М.: Недра, 1984. 327 с.

Авторы: **С.В.Сластунов**, *д-р техн. наук*, *профессор*, *slastunovsv@mail.ru* (*Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»*, *Москва*, *Россия*), **Е.П.Ютяев**, *генеральный директор АО «СУЭК-Кузбасс»*, *mazanikev@suek.ru* (*АО «СУЭК-Кузбасс»*, *г.Ленинск-Кузнецкий*, *Россия*).

Статья принята к публикации 22.11.2016.