

ISSN 1999-4125 (Print)

ISSN 2949-0642 (Online)

**ГЕОТЕХНОЛОГИЯ
GEOTECHNOLOGY**

Научная статья

УДК 622.831.817

DOI: 10.26730/1999-4125-2025-3-127-138

УСЛОВИЯ ВЗРЫВОБЕЗОПАСНОЙ РАБОТЫ ДЕГАЗАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ**Лупий Михаил Григорьевич¹, Трошков Николай Юрьевич^{2,*},
Белодедов Андрей Алексеевич³**¹ АО «СУЭК-Кузбасс»² Кемеровский филиал АО «Научно-исследовательский институт горной геомеханики и маркшейдерского дела – Межотраслевой научный центр «ВНИМИ»³ Южно-Российский государственный политехнический университет имени М. И. Платова

* для корреспонденции: troshkoff1973@mail.ru

**Информация о статье**

Поступила:

25 октября 2024 г.

Одобрена после
рецензирования:

10 июня 2025 г.

Принята к публикации:

20 июня 2025 г.

Опубликована:

26 июня 2025 г.

Ключевые слова:дегазационная система,
скважина, газоносность угля,
пласт, вакуум-насосная
станция, взрывоопасность,
подсос воздуха, концентрация
метана, огнепреградитель.**Аннотация.**

Приводятся результаты аналитических и экспериментальных исследований неравномерности снижения газоносности угольного массива вокруг дегазационных скважин при предварительной дегазации. Получено уравнение, описывающее изменение газоносности угля посередине между двумя соседними скважинами, на основании которого выведена формула для расчета расстояний между скважинами с учетом неравномерного газоистощения угля.

Изложены факторы, влияющие на основной параметр потенциальной взрывоопасности дегазационной системы – концентрацию метана на выходе вакуум-насосной станции (ВНС). Предложена формула для расчета предельно допустимых подсосов воздуха в дегазационную систему в зависимости от метанодобываемости и величины вакуума на входе вакуум-насоса.

Установлена статистическая связь между вероятностью взрывоопасной концентрации метана на ВНС, вакуумом и метанодобываемостью, на основе которой рекомендованы граничные условия безопасной работы дегазационных систем.

Приводятся результаты исследований, направленных на предупреждение воспламенений метановоздушных смесей при бурении дегазационных скважин с использованием газоразделительных мембран. При использовании этого способа в наиболее опасной части скважины создается инертная среда с содержанием кислорода не более 12%, что обеспечивает полную взрывобезопасность.

Рассмотрены результаты исследований по разработке быстродействующих автоматических устройств обнаружения и подавления взрыва метановоздушной смеси в дегазационных трубопроводах, разработаны компактные огнепреградители ОПС-1. В качестве устройства обнаружения рекомендуются датчики ИК-излучения продуктов взрыва. Огнепреградитель конструктивно представляет собой цилиндрический корпус с фланцами для присоединения к трубопроводу, внутри которого размещены два конических пакета сеток. Подобраны размеры ячеек сетки, которые обладают достаточной эффективностью тушения пламени и имеют приемлемое аэродинамическое сопротивление.

Для цитирования: Лупий М.Г., Трошков Н.Ю., Белодедов А.А. Условия взрывобезопасной работы дегазационной системы // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2025. № 3 (169). С. 127-138. DOI: 10.26730/1999-4125-2025-3-127-138, EDN: BLVSYD

Введение

В Кузнецком бассейне при разработке свит угольных пластов во многих случаях основным источником газовыделения является разрабатываемый пласт. Для уменьшения выделения метана из него применяется предварительная дегазация скважинами, пробуренными по пласту или вкрест его простирания [1, 2]. При этом снижение газоносности угольного массива вокруг дегазационной скважины различно – наибольшее вблизи скважины и наименьшее посередине между соседними скважинами. При недостаточной продолжительности дегазации или редкой сетке скважин возможен такой случай, когда газоносность угля в некоторой зоне между скважинами останется такой же, как до дегазации. В связи с этим при отработке угольного пласта, подвергнутого предварительной дегазации, газовыделение не будет одинаковым. Наименьшим оно будет в период выемки угля вблизи дегазационных скважин и наибольшим – при работе посередине угольного массива, заключенного между соседними скважинами. Если при дегазации газоносность части угольного массива не будет снижена, то периодами будет наблюдаться такое же газовыделение, как и до дегазации пласта, что может привести к загазированию выемочного участка и, как следствие, к возможности взрыва метановоздушной смеси в шахте [3, 4].

Важнейшим элементом газового режима является требование к соблюдению предельно допустимых норм содержания метана в рудничном воздухе и периодичности замеров концентрации газа в действующих очистных и подготовительных выработках. Превышение допустимых концентраций газа рассматривается как одна из наиболее опасных аварий и неизбежно ведет к прекращению горных работ до восстановления нормального аэрогазодинамического режима выработки. Простой горных работ по причине загазирования выработок являются весьма распространенным видом перерывов в работе угледобывающих предприятий [5, 6].

Загазирования вызывают ряд следующих нежелательных последствий: создают реальную угрозу взрывов и вспышек метана и пыли; нарушают технологический процесс добычи угля и проведения выработок, приводят к невыполнению государственного плана добычи угля, норм выработки и сменных заданий, к повышению интенсификации труда, травматизму, увеличению опасности завала лав,

резко ухудшают технико-экономические показатели работы предприятий [7].

Решение проблемы газоопасности шахт заключается в предотвращении опасности загазирования выработок и источников высокой температуры, научно обоснованном установлении плановых заданий и норм выработки рабочих с учетом газообильности шахт, в выборе параметров дегазации по заданному коэффициенту ее эффективности и регулировании технико-экономических показателей работы шахт с учетом их потенциальной газоопасности и взрывоопасности [8-10].

Одной из проблем взрывобезопасности является возможность взрыва метановоздушных смесей (МВС) при бурении скважин, особенно восстающих, так как в этих скважинах в определенные моменты времени возможна взрывоопасная концентрация метана – 5-16 %. При наличии источника высокой температуры в скважинах могут возникнуть вспышки и взрывы МВС.

Значительные объемы работ по дегазации, большая протяженность расположенных в горных выработках газопроводов, опасная концентрация горючего в отсасываемой смеси обуславливают важность разработки и применения в практике способов и средств обеспечения ее безопасности.

Результаты исследований

Применяемая в настоящее время методика расчета параметров схем предварительной дегазации [11] не учитывает факта неравномерности снижения газоносности угольного массива вокруг дегазационных скважин. Так, расстояние между скважинами рассчитывается по количеству метана, извлекаемого за время, равное продолжительности дегазации, т. е. по среднему снижению газоносности дегазуемого угольного массива.

С целью учета неравномерности дегазации угольного массива проведены аналитические и экспериментальные исследования, в результате которых установлено, что газоносность угольного массива посередине между двумя соседними дегазационными скважинами, пробуренными на пласт вкрест его простирания, начинает снижаться только при продолжительности дегазации, большей определенной по формуле

$$t_0 = \frac{\gamma x_0 R^2}{16J_0}, \text{ сут} \quad (1)$$

где γ – объемный вес угольного массива, т/м³;

x_0 – природная газоносность угольного пласта, м³/т;

R – расстояние между дегазационными скважинами, м;

J_0 – начальное удельное газовыделение в скважину, м³/сут·м.

При продолжительности предварительной дегазации больше указанной газоносность угля в центре между соседними скважинами снижается в соответствии с уравнением:

$$x = \frac{ax_0 \exp \left[-\frac{4J_0 t}{\pi \gamma (x_0 - x_c) R^2} \right]}{a - x_0 \left\{ 1 - \exp \left[-\frac{4J_0 t}{\pi \gamma (x_0 - x_c) R^2} \right] \right\}}, \text{ м}^3/\text{т} \quad (2)$$

где a – коэффициент уравнения Ленгмюра, м³/т;

t – время с начала работы дегазационных скважин в условиях их взаимодействия, сут;

x_c – газоносность угольного пласта при давлении газа, равном давлению в скважине (для практических расчетов можно принимать газоносность при давлении, равном атмосферному), м³/т.

Максимальное газовыделение из разрабатываемого пласта, которое может наблюдаться при выемке угля посредине между соседними дегазационными скважинами, равно

$$J_{\max} = (x - x_{\text{ост}})A, \text{ м}^3/\text{сут} \quad (3)$$

и не должно превышать допустимое, т.е.

$$J_{\max} \leq J_{\text{доп}}, \quad (4)$$

где A – нагрузка на очистной забой т/сут;

$J_{\text{доп}}$ – допустимое газовыделение из разрабатываемого пласта по фактору вентиляции, м³/сут;

$x_{\text{ост}}$ – остаточная газоносность угля, выдаваемого с участка, м³/т.

Так как из определения коэффициента эффективности дегазации разрабатываемого пласта

$$J_{\text{доп}} = 0,01A(x - x_{\text{ост}})(100 - K_{\text{пл}}), \text{ м}^3/\text{сут} \quad (5)$$

то, используя условие (4) и уравнения (1) и (2), получим расстояние между дегазационными скважинами, равное

$$R = 2 \sqrt{\frac{J_0 T}{\pi \gamma (x_0 - x_c) \ln \left[\frac{x_0(C+B)}{C(x_0-B)} \right] + \frac{\gamma x_0}{4}}}, \text{ м} \quad (6)$$

где $K_{\text{пл}}$ – требуемый коэффициент эффективности дегазации разрабатываемого пласта, %;

T – время с начала работы скважины, сут;

$$C = a - x_0; \quad (7)$$

$$B = 0,01K_{\text{пл}}(x_0 - x_{\text{ост}}). \quad (8)$$

Сравнение результатов расчетов по формуле (6), учитывающей неравномерность дегазации угольного массива вокруг скважин, с результатами расчетов по соответствующей формуле действующего нормативного документа по дегазации [11], не учитывающего неравномерность дегазации, показало, что они различаются в 1,2-1,3 раза. Величина отклонения зависит от продолжительности работы скважин и

требуемого коэффициента эффективности дегазации.

Для предупреждения загазований очистных забоев в период выемки угля в центре между соседними дегазационными скважинами необходимо расстояние между скважинами определять по предлагаемой методике, учитывающей факт неравномерности газоистощения угольного массива вокруг дегазационных скважин.

Помимо технологических схем дегазации угленосного массива одним из основных параметров, влияющих на потенциальную взрывоопасность дегазационных систем, является концентрация метана в каптируемой смеси на выходе вакуум-насосных станций (ВНС), которая формируется метанодобываемостью и подсосами воздуха в дегазационную систему. Метанодобываемость и подсосы воздуха в значительной степени изменяются во времени, поскольку зависят от большого числа влияющих на них факторов. Так, дебит каптируемого метана и его колебания зависят от газоносности и газопроницаемости дегазируемых коллекторов, числа, длины и диаметра скважин, величины разрежения в них, которые, в свою очередь, не остаются постоянными во времени и пространстве. Кроме того, дебит метана и его вариации определяются применяемыми способами и схемами дегазации источников метанообильности шахт. В результате анализа данных, характеризующих длительный (до одного года) режим работы 22 ВНС шахт Кузбасса, установлено, что в диапазоне средней метанодобываемости, равной 2-8 м³/мин, коэффициент вариации изменяется в пределах 0,46 - 0,23, что соответствует изменению среднеквадратического отклонения дебита метана от 0,9 до 1,8 м³/мин [12].

Суммарные подсосы воздуха в дегазационную систему слагаются из подсосов в дегазационные скважины, в участковые, а также магистральные газопроводы, находящиеся под разрежением. Полной герметичности устьев скважин при существующей технологии их герметизации добиться практически невозможно из-за большой трещиноватости горного массива. Кроме того, некоторые типы скважин (скважины с дневной поверхности; скважины, пробуренные из подземных выработок в выработанное пространство и на спутники) имеют аэродинамическую связь с выработанным пространством, вызывающую значительные подсосы воздуха и их колебания.

На величину подсосов воздуха в дегазационную систему и их вариации во времени значительное влияние оказывает вакуум, который тоже изменяется в больших пределах (коэффициент вариации составляет 0,10-0,37 [12]) в связи с периодическим подключением и отключением скважин,

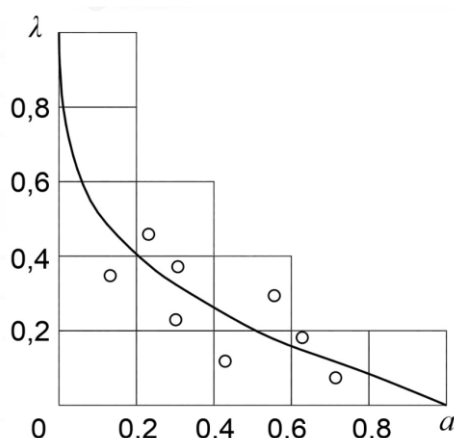


Рис. 1. Зависимость статистической вероятности взрывоопасной концентрации метана λ на выходе ВНС от безразмерного показателя α

Fig. 1. Dependence of the statistical probability of explosive concentration of methane λ at the exhaust of the VNS on the dimensionless indicator α

воздуха, получить надежную функциональную зависимость вероятности взрывоопасной концентрации метана на выходе ВНС на основе лишь математических моделей в настоящее время затруднительно. Решение данного вопроса в определенной степени может быть достигнуто статистическими методами.

В результате обработки годовых данных режима работы 22 ВНС шахт Кузбасса, включающих результаты замеров концентрации метана, вакуума и дебита метана с периодичностью, предусмотренной правилами безопасности, установлена зависимость минимально возможной концентрации метана C_{min} , %, на выходе ВНС от определяющих факторов [14-16]

$$C_{min} = 100 \frac{J_0}{Q_0} \left[2 - \frac{\sqrt{H_0^3}(\sqrt{J_0} + 1,97)}{\sqrt{J_0}(\sqrt{H_0^3 + 3140}) \exp\left(-\frac{1430}{\sqrt{H_0^3}}\right)} \right] \quad (9)$$

где J_0 – средняя метанодобываемость системы, м³/мин;

Таблица 1. Результаты расчетов предельно допустимых взрывобезопасных подсосов воздуха в дегазационную систему

Table 1. Results of calculations of maximum permissible explosion-proof air leaks into the degassing system

Table 1. Results of calculations of maximum permissible explosion-proof air leaks into the degassing system						
H_0 , мм рт. ст.	J_0 , м ³ /мин					
	4		8		14	
	ΔQ_{σ} , м ³ /мин, по формулам					
	(11)	(12)	(11)	(12)	(11)	(12)
200	7,0	7,0	24,9	26,6	56,0	55,9
300	5,2	5,3	22,0	23,7	50,5	51,3
400	3,2	3,5	19,0	20,8	46,3	46,8
500	1,8	1,8	16,5	17,9	42,0	42,2

изменением во времени и пространстве длины и средневзвешенного диаметра газопроводов, снижающих или повышающих общее гидравлическое сопротивление системы, а также в связи с изменением атмосферного давления и скоплением воды в дегазационных газопроводах.

В работе [13] отмечено, что на ряде шахт несколько взрывов капируемого газа в дегазационных системах, использующих метан, произошло из-за неправильной эксплуатации отдельных узлов дегазационной установки газоотсасывающих машин, контрольно-измерительных приборов и т. п. При отсутствии взрывчатой концентрации метана на ВНС подобные ситуации вряд ли могли произойти. В связи с указанным вопрос обеспечения безопасного уровня концентрации метана на выходе ВНС имеет большое значение и является целью статьи.

Поскольку концентрация метана является зависимой от дебита метана и подсосов воздуха, ее вероятностная оценка должна базироваться на указанных параметрах. Однако в связи с многообразием и недостаточной изученностью причин, влияющих на дебит метана и подсосы

Q_0 – средняя производительность ВНС по смеси, м³/мин;

H_0 – средний вакуум на ВНС на стороне всаса вакуум-насоса, мм рт. ст.

Если выразить параметр Q_0 через количество капируемого метана J_0 и общие подсосы воздуха в дегазационную систему ΔQ_0 ,

$$Q_0 = J_0 + \Delta Q_0, \quad (10)$$

то при $C_{min} = 16\%$ из выражений (9) и (10) получим

$$\Delta Q_\sigma = J_0 \left\{ 6,25 \left[2 - \frac{\sqrt{H_0^3}(\sqrt{J_0} + 1,97)}{\sqrt{J_0}(\sqrt{H_0^3 + 3140}) \exp\left(-\frac{1430}{\sqrt{H_0^3}}\right)} \right] \right\} \quad (11)$$

где ΔQ_σ – предельно допустимые взрывобезопасные подсосы воздуха в дегазационную систему, м³/мин.

Анализ формулы (11) показал, что она может быть заменена эквивалентной, но более удобной для практических расчетов формулой

$$\Delta Q_\sigma = J_0(5,48 - 0,29 \cdot 10^{-2} H_0) - 0,58 \cdot 10^{-2} H_0 - 11,42, \quad (12)$$

В качестве подтверждения этого в Таблице 1 приведены результаты расчетов ΔQ_σ по формулам (11), (12) при различных значениях входящих параметров.

Из формулы (12) следует, что предельно

Таблица 2. Характеристики вакуум-насосов
Table 2. Characteristics of vacuum pumps

Тип насосов	A	B
ВВН-50	50	0,0710
КВН 50/1,5	50	0,0710
ЖВН-50	50	0,0667
РМК-4	27	0,0366

допустимые взрывобезопасные подсосы воздуха в дегазационную систему находятся в линейной зависимости от метанодобываемости и величины вакуума на стороне всаса вакуум-насоса. При постоянной метанодобываемости величина ΔQ_σ уменьшается с ростом вакуума, а при постоянном вакууме величина ΔQ_σ возрастает с увеличением метанодобываемости.

Для отыскания статистической зависимости вероятности взрывоопасной концентрации метана на выхлопе ВНС от влияющих факторов использован безразмерный показатель

$$\alpha = \frac{\Delta Q_\sigma}{Q_0 - J_0}, \quad (13)$$

равный отношению предельно допустимых взрывобезопасных подсосов воздуха в дегазационную систему к фактическим подсосам воздуха, сущность которого заключается в том, что при $\alpha \geq 1$ взрывоопасная концентрация метана на выхлопе ВНС должна отсутствовать, а при $\alpha < 1$ она должна иметь место с определенной вероятностью.

Данное положение подтверждается зависимостью статистической вероятности взрывоопасной концентрации метана λ от показателя α (Рис. 1). Точки на графике относятся к разным дегазационным системам, работавшим в различных режимах.

Приведенная на Рис. 1 зависимость аппроксимируется выражением

$$\lambda = 1 - \sqrt[3]{\alpha}, \quad (14)$$

Если представить параметр Q_0 в зависимости от вакуума на всасе вакуум-насоса

$$Q_0 = A - BH_0, \quad (15)$$

то выражение (14) с учетом формул (12), (13), (15) запишется:

$$\lambda = 1 - \sqrt[3]{\frac{J_0(5,48 - 0,29 \cdot 10^{-2} H_0) - 0,58 \cdot 10^{-2} H_0 - 11,42}{A - BH_0 - J_0}} \quad (16)$$

где A, B – коэффициенты характеристики вакуум-насосов (Таблица 2) [14, 15]:

Из анализа формулы (16) следует, что с увеличением метанодобываемости и вакуума на всасе вакуум-насосов вероятность взрывоопасной концентрации метана на выхлопе ВНС снижается.

В практических условиях взрывобезопасная концентрация метана на выхлопе ВНС ($C_{min} \geq 16\%$) может быть достигнута двумя способами: созданием соответствующего вакуума на всасе вакуум-насоса при отсутствии возможности увеличения метанодобываемости и обеспечением соответствующей метанодобываемости при отсутствии возможности увеличения вакуума.

Первый способ может быть реализован с помощью регуляторов вакуума (например, задвижек Лудло), устанавливаемых на стороне всаса вакуум-насоса. Величина вакуума при этом, согласно формуле (16), должна составлять

$$H_0 \geq \frac{A + 11,42 - 6,48J_0}{B - 0,58 \cdot 10^{-2} - 0,29 \cdot 10^{-2}J_0}, \text{ мм рт. ст.} \quad (17)$$

Так, при метанодобываемости $J_0 = 5 \text{ м}^3/\text{мин}$ для вакуум-насосов типа ВВН-50 и КВН-50/1,5 величина вакуума должна быть не менее 570 мм рт. ст.

Второй способ может быть реализован путем обеспечения метанодобываемости, определяемой из выражения

$$J_0 \geq \frac{A - BH_0 + 0,58 \cdot 10^{-2} H_0 + 11,42}{6,48 - 0,29 \cdot 10^{-2} H_0}, \frac{\text{м}^3}{\text{мин}} \quad (18)$$

Так, при вакууме 300 мм рт. ст. для вакуум-насоса типа РМК-4 метанодобываемость должна быть не менее 5,2 м³/мин.

По данным исследований [16], вспышки и взрывы метана при бурении скважин с продувкой сжатым воздухом происходят практически по всей длине скважины, а при бурении с промывкой – до длины 22 м. При дальнейшем увеличении длины скважины в ней за счет метановыделения из стенок и штыба при бурении поддерживается невзрывоопасная среда с содержанием метана, значительно превышающим верхний предел взрывчатости.

В последние десятилетия изучению механизма воспламенения МВС фрикционным искрением уделялось много внимания и зарубежными, и отечественными учеными. Установлено, что при разрушении горных пород (песчаника, кварцита) поджигание метана происходит от раскаленного следа после прохода резца или от раскаленных частиц металла и горных пород (фрикционных искр). При высоких линейных скоростях движения резца (более 5 м/с) воспламенения могут быть и от следа, и от искр, а при меньших скоростях – преимущественно от нагретой поверхности следа.

Основной способ борьбы с воспламенениями от фрикционных искр – подача распыленной воды в зону разрушения горных пород. Однако опыт работы шахт показывает, что более третьей части всех воспламенений метана в шахтах от фрикционного искрения происходит при работающем орошении, что говорит о крупных недостатках этого основного на угольных шахтах способа обеспечения взрывозащиты при

механическом разрушении горных пород. Главными из них, по мнению авторов, являются: наличие «теневых» объемов пространства, куда из-за кусков отбитого угля, горной породы или частей горной машины не может попасть вода в достаточном количестве и где может быть взрывчатая газовоздушная смесь; постоянное эжектирование распыленной водой кислорода в зону выделения метана и фрикционного искрения; засорения сопел распыляющих устройств. Кроме того, орошение как способ борьбы с воспламенениями не всегда можно применять при бурении. Так, при бурении скважин большого диаметра и бурошнековой выемке из-за увлажнения отбитой массы происходит ее налипание на буровой став и заклинивание последнего.

К тому же воду в требуемом количестве трудно доставить к забою скважин из-за больших неконтролируемых ее потерь на стыках штанг (100 и более стыков).

При бурении скважин малого диаметра на шахтах зачастую применяется продувка скважин для удаления штыба. В случае подачи достаточно большого количества сжатого воздуха в скважину (по сравнению с выделяющимся метаном) в забое создается невзрывчатая метановоздушная смесь. Однако при выделении метана в количестве 5–15% от подаваемого в скважину воздуха в скважине создается взрывчатая смесь и при появлении опасных фрикционных искр происходит ее воспламенение. Таким образом, традиционные способы предупреждения воспламенений и взрывов метановоздушных смесей от фрикционного искрения при бурении скважин исчерпали свои возможности и не всегда предупреждают возникновение аварий.

По нашему мнению, наиболее перспективным направлением предотвращения воспламенений метановоздушных смесей в скважинах является создание инертной среды в буримых скважинах с помощью газоразделительных мембранных аппаратов [17]. Сущность этого способа состоит в том, что в скважине (в призабойном пространстве или его части – зоне резания) создают постоянную инертную среду из воздуха, обедненного кислородом до 12% и менее. Инертная среда движется по скважине и выносит из нее метан, не образуя при этом взрывчатых смесей с метаном при любом их соотношении, и одновременно препятствует попаданию воздуха из горной выработки к забою скважины в зону интенсивного выделения метана и возможного фрикционного искрения.

Инертную среду получают путем пропускания сжатого воздуха через мембранные газоразделительные аппараты, которые уже освоены в странах СНГ. Для нейтрализации МВС в районе режущего органа бурового станка предлагается подавать компрессором сжатый

воздух по трубопроводу через пленочный газоразделительный аппарат к устью скважины. Получаемый при этом воздух, обогащенный азотом, поступает по штанге бурового станка к забою, а другая часть воздуха, обогащенная кислородом, выпускается в выработку у устья скважины, где она смешивается с основным потоком воздуха в выработке. При использовании этого способа в наиболее опасной части скважины создается инертная среда с содержанием кислорода не более 12%, что обеспечивает полную взрывобезопасность. В пользу данного способа обеспечения взрывобезопасности можно привести также следующие соображения. В процессе бурения скважины метан в основном выделяется из угля, разрушаемого коронкой. При повышении концентрации метана в скважине повышается его парциальное давление, происходит сорбция метана углем. Это ослабляет молекулярные связи и снижает механическую прочность угля, что приводит к образованию вывалов в стенках скважин и повышает выделение буровой мелочи. Следует отметить, что насыщение угля любым газом приводит к снижению его прочностных характеристик. Но так как газы, входящие в состав воздуха (азот, кислород; диоксид углерода), по сравнению с метаном имеют энергию сорбции на несколько порядков ниже, то в целях сохранения устойчивости стенок скважин целесообразно удалять из нее метан путем продувки инертной МВС, что и создается шахтной мембранной газоразделительной установкой.

Следует отметить, что теоретические исследования [17] процесса формирования МВС в скважинах при использовании мембран для обеспечения ее взрывобезопасности позволили создать алгоритм вычисления концентрации газа в любой точке скважины в заданный момент времени от начала бурения.

Исследования в этом направлении целесообразно продолжить с целью проведения стендовых и промышленных испытаний технологических схем использования газоразделительных аппаратов для предупреждения воспламенений и взрывов метановоздушных смесей от фрикционного искрения при бурении скважин в газовых шахтах.

В зарубежной практике для обеспечения взрывозащиты дегазационных сетей используют огнепреградители и быстродействующие автоматические системы. Установленные на многих угольных шахтах России огнепреградители предназначались для защиты объектов нефтеперерабатывающей промышленности и средств для перевозки нефтепродуктов (цистерны, танки и т. д.) или были изготовлены по отдельным проектам, не

всегда отвечающим предъявляемым требованиям.

При загорании метана на выхлопных трубах (свечах) шахтных вакуум-насосных станций (ВНС) возможен проскок пламени в газопровод диаметром 200-300 мм навстречу потоку МВС при его скорости 6,5-8,0 м/с. При попадании газопровода в зону пожара транспортируемая МВС может воспламениться нагретой поверхностью труб, пламенем, проникающим через щель более 1,25 мм между фланцами или отверстием в гофрированном рукаве, а также при воспламенении прокладок и горючих отложений внутри трубопровода.

Разгерметизация газопроводов из-за прогорания прокладок и гофрированных подсоединительных рукавов происходит практически через 10–15 минут после начала воздействия на них пламени пожара. Это приводит к подсосам кислорода воздуха, образованию горючей МВС в трубопроводе и проникновению в него пламени.

Скорость распространения пламени в дегазационных трубопроводах может изменяться от нескольких до 1000 и более м/с. В последнем случае возможно выбивание прокладок между фланцами и поджигание через образовавшуюся щель отложившейся угольной пыли и скоплений метана.

С учетом многообразия условий эксплуатации дегазационных систем на угольных шахтах, а также отечественного и зарубежного опыта создания устройств подавления взрывов были проведены исследования по разработке следующих средств взрывозащиты: устройства тушения пламени на свече дегазационной станции; автоматической быстродействующей системы взрывозащиты; компактного огнепреградителя для стесненных условий горных выработок; автономного автоматического пламеподавителя.

Исследования по указанным направлениям разработки проводились на специальных экспериментальных установках с последующей проверкой их эффективности на аттестованном стенде МакНИИ.

Действующие нормативные документы при воспламенении МВС на свече ВНС предусматривают немедленное закрывание задвижки и выключение вакуум-насосов. При наличии в трубопроводе смеси с содержанием метана более 25% выполнение этих операций приводит к тушению пламени.

Однако использование такого способа транспортировании смеси с концентрацией горючего в пределах взрываемости (5-15%) вызывает серьезные возражения, так как в процессе закрывания задвижки происходит постепенное снижение скорости газового потока и при определенной ее величине может произойти проскок пламени в трубопровод.

Эта возможность подтверждена результатами экспериментов на натурной модели. Учитывая точность и состояние метанометров на дегазационных станциях, можно утверждать, что такая опасность реально существует при транспортировании смесей с содержанием метана до 20%.

На некоторых шахтах предпринимались попытки использовать для тушения блок из нескольких углекислотных стандартных огнетушителей, устанавливаемый на выходе МВС из выхлопной трубы и включаемый при необходимости машинистом. Однако такие устройства не получили распространения из-за их сравнительной сложности и недостаточной эффективности. Последнее можно объяснить тем, что скорость подачи углекислого газа была сравнительно небольшой и концентрация его в потоке МВС была ниже огнетушащей.

Устройство крепится на патрубке каналом, сообщающимся с полостью трубопровода. При монтаже канал перекрывается разрывной мембраной, а камера заполняется инертным газом (азот, углекислый газ и др.)

Размеры устройства (высота камеры, ее диаметр, размеры канала и разрывной мембраны) выбираются близкими по величине к диаметру защищаемого трубопровода. Разрывная мембрана должна разрушаться в зависимости от параметров потока МВС при давлении инертного газа в камере от 1,0 до 1,5 МПа.

Цель второго направления исследований — создание быстродействующих автоматических устройств обнаружения и подавления взрыва МВС в дегазационных трубопроводах. Такие устройства разработаны и используются для взрывозащиты газопроводов на угольных шахтах западных стран.

Устройства обнаружения в таких системах основаны на регистрации одного из явлений, сопровождающих взрыв: излучение, давление и температура продуктов горения. Одним из наиболее надежных способов обнаружения считается регистрация ИК-излучения продуктов взрыва, который и был реализован в экспериментальных образцах на отечественной элементной базе.

Основой устройств подавления взрывов большинства таких систем является баллон высокого давления, заполненный порошкообразным и (или) газообразным огнетушащими веществами. При получении сигнала о появлении пламени баллон открывается с помощью взрыва электродетонатора и огнетушащее вещество выбрасывается на фронт пламени.

Учитывая затруднения, связанные с использованием взрывчатых веществ на отечественных шахтах (специальный режим, специальные требования и т. д.), было

предложено использовать для открывания баллонов электрогидравлический эффект.

Исследования макетных образцов электрогидравлического клапана позволили определить: объем и форму гидрокамеры; состав рабочей жидкости; форму, размеры и расположение электродов, а также оценить рациональные размеры выходного канала и конструкцию запирающего узла клапана.

Разработанные экспериментальные образцы обоих устройств (комплекса КВП) успешно прошли исследовательские испытания, основной целью которых было: выбор огнетушащего вещества, давления инертного газа в баллоне, оценка надежности запирающего газа, определение эффективной длины инертной газовой среды, а также установлены эффективности обнаружения и подавления взрывов при различных параметрах газового потока и скорости распространения пламени по трубопроводу.

На основании полученных результатов были созданы опытные образцы устройств, успешно прошедшие межведомственные приемочные испытания на угольных шахтах.

Комплекс КВП рекомендован к серийному производству.

Для защиты объектов дегазационных систем, находящихся в стесненных условиях (устья скважин, участковые газопроводы и т. п.) или на отдаленных участках, где не используется электроэнергия, были разработаны компактные огнепреградители ОПС-1. Такой огнепреградитель представляет собой цилиндрический корпус с фланцами для подсоединения к трубопроводу, внутри которого размещены два конических пакета сеток.

Лабораторными и полигонными исследованиями [18] подобраны размеры ячеек сетки, которые обладают достаточной эффективностью тушения пламени и имеют приемлемое аэродинамическое сопротивление. Испытание экспериментальных и опытных образцов огнепреградителя показали его надежность при тушении пламени. Межведомственной комиссией он рекомендован к серийному изготовлению и использованию в дегазационных системах угольных шахт.

Огнепреградители всех конструкций имеют один общий существенный недостаток: они подавляют только пламя, распространяющееся по потоку газовой смеси, а пламя,двигающееся навстречу потоку, лишь задерживается ими. При этом пламя, устойчиво горящее на огнепреграждающем элементе, нагревает последний и через некоторое время (3-30 мин) выводит его из строя: защитный элемент прогорает и пламя свободно распространяется дальше.

Для устранения этого существенного недостатка была предложена оригинальная конструкция пламеподавителя [19],

позволяющая тушить пламя независимо от направления его движения.

Устройство состоит из кольцевой камеры, выполненной из внешней и внутренней цилиндрических оболочек, а также двух фланцев. Один из фланцев соединен герметично с торцами обеих оболочек, а другой — только с внешней, образуя с внутренней кольцевой зазор. Этим зазором камера сообщена с полостью внутренней оболочки..

Устройство устанавливается непосредственно за огнепреградителем таким образом, чтобы кольцевой зазор находился непосредственно у огнегасящего элемента огнепреградителя.

При возникновении и распространении пламени навстречу потоку оно достигает огнегасящего элемента и задерживается на нем. Однако при этом фронт пламени разделится и часть его через кольцевой зазор переместится в камеру. При горении МВС в камере образующиеся инертные продукты сгорания, выходя из нее по кольцевому каналу, потушат пламя, стабилизированное огнепреградителем. Пламя же в камере погаснет, когда сгорит в ней вся МВС.

Через некоторое время за счет газообмена состав газовой смеси в трубопроводе и в камере опять выровняется и устройство опять будет готово к работе.

Проведенными исследовательскими испытаниями экспериментальных образцов установлены эффективные параметры, выявлены соотношения между размерами камеры и параметрами потока МВС.

Таким образом, анализ состояния дегазации на угольных шахтах, средств и способов обеспечения ее взрывобезопасности позволяет сделать следующие выводы.

Основные результаты

1. Выполнены аналитические и экспериментальные исследования неравномерности снижения газоносности угольного пласта вокруг скважин при проведении предварительной дегазации угольному массиву.

Установлена зависимость, описывающая изменение газоносности угольного пласта посредине между двумя соседними скважинами дегазации, на основании которой предложена формула для расчета расстояния между скважинами с учетом неравномерного газоистощения угольного пласта.

2. Установлены факторы, влияющие на основной параметр потенциальной взрывоопасности дегазационной системы — концентрацию метана на выхлопе вакуум-насосной станции (ВНС).

3. Предложена расчетная зависимость для определения предельно допустимых подсосов воздуха в дегазационную систему в зависимости

от метанодобываемости и величины вакуума на всасе вакуум-насоса.

4. Установлена статистическая связь между вероятностью взрывоопасной концентрации метана на ВНС, вакуумом и метанодобываемостью, а также предложены условия безопасной работы дегазационных систем.

5. Аварии, происшедшие при выполнении работ по дегазации (горение МВС в трубопроводах, передача горения из дегазационной сети в выработанное пространство, воспламенение метана в скважинах, выхлопных трубах и др.), подтверждают важность, необходимость и своевременность разработок средств и способов обеспечения безопасности газотранспортных систем угольных шахт.

6. Созданы и рекомендованы к промышленному производству эффективные средства взрывозащиты объектов дегазационных систем в зависимости от условий эксплуатации; необходимо принять действенные меры по широкому их внедрению на шахтах и, в первую очередь, на тех, где каптируют опасные газовые смеси.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Золотых С. С. Заблаговременная дегазация угольных пластов как фактор повышения безопасности на шахтах Кузбасса // Горная промышленность. 2019. № 5. С. 18–22.
2. Плаксин М. С. Технологические особенности выполнения гидроразрыва угольного пласта при проведении подготовительных выработок с целью снижения вероятности проявления газодинамических явлений // Вестник Научного центра. 2022. № 3. С. 16–21.
3. Рогачев В. Ф. Способ дегазации газоносных угольных месторождений при разработке полезного ископаемого // Московский экономический журнал. 2022. № 12. С. 87–95.
4. Ma J., Zhang Y., Wang Y., Gong D. A Multitask Multiobjective Operation Optimization Method for Coal Mine Integrated Energy System // IEEE Transactions on Industrial Informatics. 2024. PP(99):1–12.
5. Палеев Д.Л., Зайнулин С.Б. Комплексный подход к обеспечению снижения риска взрывов голубого топлива на угольных шахтах с одновременной добычей угольного метана // Экономические системы. 2023. Т.16. № 1. С. 109–120.
6. Gao P., Zhao S., Zheng Y. Failure Prediction of Coal Mine Equipment Braking System Based on Digital Twin Models // Processes. 2024. № 12(4). P. 837.
7. Bahrii I. D., Dubosarskyi V. R., Mamyshev I. Ye. Gas-dynamic processes and causes of accidents at mines // Мінеральні ресурси України. 2023. № 3. P. 17–24.
8. Малашкина В. А. Мониторинг эффективности системы дегазации угольной шахты — основа безопасного труда горнорабочих // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2020. № 6-1. С. 38–45.
9. Yehorchenko R., Shyrin L., Stasevych R., Shavarskyi I. Improving the efficiency of the maintenance and monitoring system for mine degassing pipelines // Physical & Chemical Geotechnologies: E3S Web of Conferences 2024. № 567. 01011. Pp. 1–17.
10. Cui H., Cai Z. HPR1000 pressurizer degassing system design and analysis // Energy Research. 2024. № 7. Pp. 01–09.
11. Руководство по дегазации угольных шахт. М. : Недра, 1975. 189 с.
12. Дубов Г. П., Рябченко А. С. Исследование нестационарных параметров режима работы дегазационных газопроводов шахт Кузбасса // Труды ВостНИИ. 1977. № 29. Управление газовой выделением в угольных шахтах. С. 63–69.
13. Дубов Г. П. О критерии оценки возможности утилизации каптируемого метана при проектировании дегазации шахт. Уголь. 1977. № 5. С. 21–22.
14. Оборудование и аппаратура для дегазационных работ в шахтах. Каталог. М., 1978. 100 с.
15. Бурчаков А. С., Айруин Т., Кузнецов С. К., Слепцов Е. И. Технико-экономическая оценка дегазации угольных шахт. М. : Недра, 1979. 200 с.
16. Деев Ю. В., Маркин В. А., Касьянов В. В. Метановыделение при бурении дегазационных скважин // Способы и средства создания безопасных условий труда в шахтах. Макеевка : МакНИИ, 1984. С. 75–80.
17. Лошкарев Л. В., Бодубный А. И., Кошуба В. С. Экспериментальные исследования по выемке угля в инертной метановой среде // Технология очистных работ на угольных шахтах, разрабатывающих тонкие пласты. Донецк : ДонУГИ, 1979. С. 38–43.
18. Кудинов Ю. В. Разработка средств взрывозащиты газопроводов угольных шахт // Тезисы докл. НТК «Взрывобезопасность технологических процессов». Северодонецк : ВНИИТБХП, 1992. С. 69.
19. Пат. РФ 1787448 СССР, СССР. Устройство для тушения пламени в газовой магистрали / Кудинов Ю. В.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:

Лупий Михаил Григорьевич, ген. директор, АО «СУЭК-Кузбасс» (Россия, Кемеровская область – Кузбасс, г. Ленинск-Кузнецкий, ул. Васильева, д. 1),

Трошков Николай Юрьевич, зам. директора, Кемеровский филиал АО «Научно-исследовательский институт горной геомеханики и маркшейдерского дела – Межотраслевой научный центр ВНИМИ», (650002, Россия, г. Кемерово, Проспект им. академика Леонида Барбараша, д. 1, оф. 502), troshkoff1973@mail.ru

Белодедов Андрей Алексеевич, зав. кафедрой, Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М. И. Платова, (346428, Россия, Ростовская обл., г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132), доктор техн. наук, a.a.belodedov@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

Лупий Михаил Григорьевич – сбор и анализ данных

Трошков Николай Юрьевич – обзор соответствующей литературы, концептуализация исследования, обзор соответствующей литературы, написание текста.

Белодедов Андрей Алексеевич – постановка исследовательской задачи, научный менеджмент, выводы.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Original article

CONDITIONS FOR EXPLOSION-PROOF OPERATION OF A DEGASSING SYSTEM

Mikhail G. Lupiy 1, Nikolay Y. Troshkov 2, *,
Andrey A. Belodedov 3

¹ JSC SUEK-Kuzbass,

² Kemerovo Branch of the «Research institute of rock mechanics and mine survey – Inter-branch research center «VNIMI»

³ South-Russian State Polytechnical University (NPI) named after M.I. Platova

* for correspondence: troshkoff1973@mail.ru



Article info

Received:

25 October 2024

Accepted for publication:

10 June 2025

Accepted:

20 June 2025

Published:

26 June 2025

Keywords: degassing system, well, gas content of coal, seam, vacuum pumping station, explosion hazard, air leakage, methane concentration, flame arrester.

Abstract.

The article presents the results of analytical and experimental studies of the unevenness of the decrease in the gas content of the coal massif around degassing boreholes during preliminary degassing. An equation is obtained that describes the change in the gas content of coal in the middle between two adjacent boreholes, on the basis of which a formula is derived for calculating the distances between the boreholes taking into account the uneven gas depletion of coal.

The article presents the factors influencing the main parameter of the potential explosion hazard of the degassing system - the concentration of methane at the exhaust of the vacuum pumping station (VPS). A formula is proposed for calculating the maximum permissible air leaks into the degassing system depending on the methane production capacity and the vacuum value at the vacuum pump suction.

A statistical relationship is established between the probability of an explosive concentration of methane at the VPS, vacuum and methane production, on the basis of which boundary conditions for the safe operation of degassing systems are recommended. The article presents the results of studies aimed at preventing ignition of methane-air mixtures during drilling of degassing wells using gas separation membranes. When using this method, an inert environment with an oxygen content of no more than 12% is created in the most dangerous part of the well, which ensures complete explosion safety. The article considers the results of studies on the development of high-speed automatic devices for detecting and suppressing explosion of methane-

air mixture in degassing pipelines, compact flame arresters OPS-1 are developed. IR sensors for studying explosion products are recommended as a detection device. The flame arrester is structurally a cylindrical body with flanges for connection to the pipeline, inside which two conical packages of grids are placed. The sizes of the grid cells are selected, which have sufficient flame extinguishing efficiency and have acceptable aerodynamic resistance.

For citation: Lupiy M.G., Troshkov N.Yu., Belodedov A.A. Conditions for explosion-proof operation of a degassing system. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*=Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2025; 3(169):127-138. (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1999-4125-2025-3-127-138, EDN: BLVSYD

REFERENCES

1. Zolotykh S.S. Early degassing of coal seams as a factor in improving safety in Kuzbass mines. *Mining Industry*. 2019; 5:18–22.
2. Plaksin M.S. Technological features of hydraulic fracturing of a coal seam during development workings in order to reduce the likelihood of gas-dynamic phenomena. *Bulletin of the Scientific Center*. 2022; 3:16–21.
3. Rogachev V.F. Method of degassing gas-bearing coal deposits during mineral development. *Moscow Economic Journal*. 2022; 12:87–95.
4. Ma J., Zhang Y., Wang Y., Gong D. A Multitask Multiobjective Operation Optimization Method for Coal Mine Integrated Energy System // *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2024. PP(99):1-12
5. Paleev D.L., Zainulin S.B. An Integrated Approach to Reducing the Risk of Blue Fuel Explosions in Coal Mines with Simultaneous Coalbed Methane Production. *Economic Systems*. 2023; 16(1):109–120.
6. Gao P., Zhao S., Zheng Y. Failure Prediction of Coal Mine Equipment Braking System Based on Digital Twin Models. *Processes*. 2024; 12(4):837.
7. Bahrii I. D., Dubosarskyi V. R., Mamyshev I. Ye. Gas-dynamic processes and causes of accidents at mines. *Mineral resources of Ukraine*. 2023; 3:17–24.
8. Malashkina V.A. Monitoring the efficiency of a coal mine degassing system – the basis for safe work of miners. *Mining information and analytical bulletin*. 2020; 6-1:38–45.
9. Yehorchenko R., Shyrin L., Stasevych R., Shavarskyi I. Improving the efficiency of the maintenance and monitoring system for mine degassing pipelines. *Physical & Chemical Geotechnologies: E3S Web of Conferences*. 2024; 567:01011.
10. Cui H., Cai Z. HPR1000 pressurizer degassing system design and analysis. *Energy Research*. 2024; 7:01–09.
11. Guide to degassing of coal mines. Moscow: Nedra; 1975. 189 p.
12. Dubov G.P., Ryabchenko A.S. Study of non-stationary parameters of the operating mode of degassing gas pipelines of Kuzbass mines. *Proceedings of VostNI*. 1977. № 29. Gas emission control in coal mines. Pp. 63–69.
13. Dubov G.P. On the criteria for assessing the possibility of utilizing captured methane in the design of mine degassing. *Coal*. 1977; 5:21–22.
14. Equipment and apparatus for degassing works in mines. Catalog. Moscow, 1978. 100 p.
15. Burchakov A.S., Ayruin T., Kuznetsov S.K., Sleptsov E.I. Technical and economic assessment of coal mine degassing. Moscow: Nedra; 1979. 200 p.
16. Deev Yu.V., Markin V.A., Kasyanov V.V. Methane emission during drilling of degassing wells. *Methods and means of creating safe working conditions in mines*. Makeyevka: MakNII; 1984. Pp. 75–80.
17. Loshkarev L.V., Bodubny A.I., Koshuba V.S. Experimental studies on coal extraction in an inert methane environment. *Technology of cleaning works in coal mines developing thin seams*. Donetsk: DonUGI; 1979. Pp. 38–43.
18. Kudinov Yu.V. Development of explosion protection means for gas pipelines of coal mines. *Abstracts of the report of the Scientific and Technical Conference "Explosion Safety of Technological Processes"*. Severodonetsk: VNIITBHP; 1992. P. 69.
19. Pat. RF 1787448 USSR, USSR. Device for extinguishing flame in a gas main. Kudinov Yu.V.

© 2025 The Authors. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

The authors declare no conflict of interest.

About the authors:

Mikhail G. Lupiy, General Director, JSC SUEK-Kuzbass, (652507, Kemerovo Region – Kuzbass, Leninsk-Kuznetsky, Vasilyeva Street, Bldg. 1)

Nikolay Yu. Troshkov, Deputy Director, Kemerovo branch of JSC Research Institute of Mining Geomechanics and Mine Surveying – Intersectoral Scientific Center VNIMI, (650002, Russia, Kemerovo, Academician Leonid Barbarash Avenue, Bldg. 1, Office 502), troshkoff1973@mail.ru

Andrey A. Belodedov, Head of Department, South-Russian State Polytechnical University (NPI) named after M.I. Platova, (346428, Russia, Rostov region, Novocherkassk, Prosveshcheniya street, 132), Doctor of Engineering. Sciences, a.a.belodedov@mail.ru

Contribution of the authors:

Mikhail G. Lupiy – data collection and analysis

Nikolay Yu. Troshkov – review of relevant literature, conceptualization of the study, review of relevant literature, writing the text.

Andrey A. Belodedov – formulation of the research problem, scientific management, conclusions.

All authors have read and approved the final manuscript.

