

ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ / ORIGINAL PAPERS

DOI: 10.17073/2500-0632-2019-3-160-171

**Разработка способа дегазации газонасыщенных пологих угольных пластов
гидродинамическим воздействием**

Гаврилов В. И.

Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины, Днепр, Украина,
✉gawrilov.slawick@yandex.ru

Аннотация: Ухудшение горно-геологических условий подземной разработки угольных месторождений с глубиной приводит к значительному газовыделению в горные выработки, которое на отдельных шахтах достигает 45 м^3 и выше на 1 т добытого угля. Существующие нормативные способы дегазации напряженных угольных пластов часто не обеспечивают необходимой для ритмичной работы очистных забоев эффективности дегазации 50 % и выше. В некоторых условиях можно достичь эффективности скважинной дегазации 30 %, что позволяет увеличить нагрузку на лаву до 1 000 т/сут при газовыделении из пласта до $5 \text{ м}^3/\text{мин}$. Однако на глубинах 1 000–1 300 м при высокопроизводительной работе очистных комплексов выделение газа может достигать $170 \text{ м}^3/\text{мин}$, что приводит к остановкам забоев по газовому фактору и сдерживает темпы ведения очистных и подготовительных работ. Кроме того, предварительная дегазация пластов осуществляется довольно продолжительное время. Современные достижения в области гидроразрушения горных пород являются основой для разработки малоэнергоёмких безопасных и экологически чистых технологий дегазации напряженных газонасыщенных угольных пластов. В статье приведены результаты исследований влияния гидродинамического воздействия (ГДВ) на газонасыщенный пологий угольный пласт и разработки способа дегазации и снижения газодинамической активности напряженных угольных пластов в горные выработки ГДВ. Установлено химическое взаимодействие части свободных радикалов угля с молекулами воды и продуктами ее гидролиза, в результате которого образуются устойчивые соединения, что приводит к снижению концентрации парамагнитных центров (ПМЦ) в угле, и соответственно к уменьшению сорбционного взаимодействия. Шахтными экспериментами впервые установлено влияние гидродинамического воздействия на протекание геомеханических и газодинамических процессов в угольном массиве при образовании зоны интенсивного газовыделения. Разработаны технология и схема дегазации газонасыщенных пологих угольных пластов гидродинамическим воздействием, предусматривающие разделение в пространстве и времени процессов добычи угля и дегазации пластов.

Ключевые слова: буровые скважины, напряженно-деформированное состояние пласта, гидродинамическое воздействие, интенсификация дегазации угольного пласта, параметры ГДВ, схемы дегазации напряженных пластов.

Для цитирования: Гаврилов В. И. Разработка способа дегазации газонасыщенных пологих угольных пластов гидродинамическим воздействием. *Горные науки и технологии*. 2019;4(3):160-171. DOI: 10.17073/2500-0632-2019-3-160-171.

**Development of a Hydrodynamic Method for Degassing
of Gas-Saturated Flat-Lying Coal Seams**

V. I. Gavrilo

Geotechnics Institute named after N.S. Polyakov, NAS of Ukraine, Dnipro, Ukraine,
✉gawrilov.slawick@yandex.ru

Abstract: Deterioration of geological and mining conditions for underground extraction of coal deposits with increasing depth leads to significant gas release into mine workings, reaching 45 m^3 or more per 1 ton of coal mined at some mines. Existing standard methods for degassing of stressed coal seams often do not provide required degassing efficiency of 50 % and more for rhythmic operation of production faces. In some conditions, open-hole degassing efficiency of 30 % can be achieved, which allows to increase output per face up to 1,000 tpd with gas release from seam up to $5 \text{ m}^3/\text{min}$. However, at depths of 1,000–1,300 m and high-performance operation of longwall sets of equipment, gas release can reach $170 \text{ m}^3/\text{min}$ that causes face stoppages due to gas hazard and slows down the



pace of stope development and stoping. In addition, preliminary seam degassing requires rather long time. Modern achievements in the field of rock hydraulic fracturing are the basis for the development of low-energy safe and environmentally friendly technologies for degassing of stressed gas-saturated coal seams. The paper presents the findings of our studies on hydrodynamic action (HDA) on a gas-saturated flat-lying coal seam and the developed method for degassing and reduction of gas-dynamic activity of stressed coal seams in mine workings. Chemical interaction of some coal free radicals with water molecules and hydrolysis products has been revealed, resulting in formation of stable compounds. This leads to decreasing concentration of coal paramagnetic centers (PMC) and sorption activity. Our mine tests have for the first time found hydrodynamic effects on geotechnical and gas-dynamic processes in a coal mass during formation of a zone of intense gas release. Technology and layout for hydrodynamic action-based degassing of gas-saturated flat-lying coal seams have been developed, providing for spatial and time separation of seam degassing and coal extraction processes.

Keywords: boreholes, seam stress-strain state, hydrodynamic effects, coal seam degassing intensification, HDA parameters, stressed seam degassing layout.

For citation: Gavrilov V. I. Development of a hydrodynamic method for degassing of gas-saturated flat-lying coal seams. *Mining Science and Technology*. 2019;4(3):160-171 (In Russ.). DOI: 10.17073/2500-0632-2019-3-160-171.

Введение

Увеличение глубины и интенсивности горных работ сопровождается повышением газообильности шахт, что приводит к росту затрат, снижению производительности и безопасности труда. Неблагоприятная динамика травматизма от взрывов газа и пыли, проявления разного рода газодинамических явлений вызывают тяжелые социальные и экономические последствия [1–3].

В современных условиях газовыделение из отрабатываемых пластов может достигать 45 м³/т и выше. Без кардинального снижения выделения газа в выработки и в первую очередь из угольного пласта невозможно обеспечить высокий уровень угледобычи. Для рентабельной работы механизированного комплекса эффективность дегазации должна быть не менее 50 %. Применение традиционных способов дегазации и снижения газодинамической активности угольных пластов, основанных на бурении дегазационных скважин, с увеличением глубины разработки резко сократилось в связи с уменьшением радиуса эффективного влияния скважин. Эффективность дегазации пласта может быть несколько повышена за счет проведения активных воздействий на углегазонасыщенную толщу, таких как, например, поинтервальный гидроразрыв, двухкаскадное нагнетание жидкости, гидроимпульсное воздействие и др.,

однако эти локальные технологии крайне редко применяются в связи со сложностью их реализации в ограниченных подземных условиях, большой вероятностью прорывов воды в горные выработки и, главное, недостатком времени на кропотливую и масштабную работу [4–7].

Учеными ИГТМ НАН Украины разработан и внедрен на шахтах Донбасса экологически чистый и малоэнергоёмкий метод гидродинамического воздействия (ГДВ) на угольный пласт рабочим агентом (водой), что приводит к перераспределению сил горного и газового давления, разупрочнению угля и, таким образом, десорбции метана. На базе метода разработаны и внедрены способы вскрытия выбросоопасных угольных пластов квершлагами и предупреждения выбросов газа и угля в нижней части полос, отрабатываемых щитовыми агрегатами, которые являются нормативными [8].

Разгрузка гидродинамическим воздействием газонасыщенного угольного пласта, содержащего сорбированный метан в замкнутых изолированных между собой порах, а в зонах максимальных сжимающих напряжений пласт переходит в нарушенную структуру V типа, в которой радиусы пор сравнимы с размерами сорбированных молекул, приводит к увеличению проницаемости, появлению трещин и объединению их в фильтрационные

каналы, по которым свободный и сорбированный метан движется в направлении скважины. Вследствие гидродинамического воздействия разрушается угольный пласт и часть угля извлекается из массива. Это приводит к уменьшению несущей способности пласта и ослаблению межслоевых контактов в породах кровли, что при отработке пласта обеспечивает равномерное (без задержек) развитие деформаций и исключает проявление внезапных выбросов угля и газа [9].

Основная идея работы заключается в использовании установленных закономерностей протекания геомеханических и газодинамических процессов при гидродинамическом воздействии на газонасыщенный угольный пласт через подземные скважины и особенностей процессов газовыделения из пласта в подземные горные выработки после проведения профилактических работ для установления эффективных параметров способа ГДВ на пологие угольные пласты и схемы его реализации в промышленных условиях.

Для достижения поставленной цели осуществляется решение следующих задач:

– изучить причины недостаточной эффективности существующих способов дегазации углепородного массива и обосновать перспективность гидродинамического воздействия;

– установить закономерности протекания геомеханических и газодинамических процессов при гидродинамическом воздействии на пласт через подземные скважины и особенности процесса газовыделения из пластов в подземные горные выработки после проведения профилактических работ;

– установить технологические параметры способа ГДВ для пологих пластов и разработать перспективную технологическую схему дегазации пластов гидродинамическим воздействием.

Методы исследования. Анализ эффективности традиционных способов и средств

дегазации шахт; лабораторные, шахтные исследования и промышленные испытания гидродинамического способа дегазации угольных пластов с использованием метода статистической обработки данных; механические и геофизические методы шахтных инструментальных измерений.

Результаты исследования. Основные способы дегазации, их недостатки и преимущества подробно изложены в работах А. Т. Айруни, Г. Д. Лидина и других авторов [10–13].

По результатам анализа эффективности традиционных способов и средств дегазации угольных пластов установлено следующее:

– дальнейший рост нагрузки на очистные забои возможен только при эффективном решении проблемы управления газодинамическим состоянием углепородного массива;

– традиционные средства борьбы с метаном в угольных шахтах в условиях постоянной интенсификации горных работ и перехода на все более глубокие горизонты часто уже не могут обеспечить одновременно высокий уровень угледобычи и безопасные условия труда. Эффективность пластовой подземной дегазации ограничивается величиной коэффициента дегазации 0,2 и может быть несколько повышена путем проведения активных воздействий на углегазонасыщенную толщину (например, поинтервальный гидроразрыв, газогидроимпульсное воздействие и др.), однако эти локальные технологии крайне редко применяются из-за сложности их реализации в стесненных подземных условиях, большой вероятности прорывов воды в горные выработки и недостатка времени на кропотливую и масштабную работу;

– гидродинамический способ дегазации газонасыщенных пологих угольных пластов требует теоретических и экспериментальных обоснований, а также широкой проверки на шахтах.

Любое, в том числе и техногенное, нарушение равновесия в системе «уголь–газ»

приводит к диффузным, фильтрационным, сорбционно-десорбционным процессам и, что наиболее существенно, к генерации метана в угольном пласте [14]. Выход системы из состояния равновесия сводится к повышению или понижению давления. При этом изменяется соотношение свободного и сорбированного газа. Переход газа из сорбированного состояния в свободное и наоборот может осуществляться с разной скоростью. Информация об изменении кинетических параметров имеет большую практическую ценность для дегазации угольного пласта и снижения его газодинамической активности.

Влияние гидродинамического воздействия на степень дегазации угольных пластов исследовалось методом электронного парамагнитного резонанса (ЭПР). Использование вычислительной техники во время проведения экспериментов и регистрации сигнала позволили выйти на значительно более высокий уровень информативности, точности и достоверности полученной информации.

Эксперименты проводились по ранее отработанным методикам, содержащим регистрацию спектра поглощения сверхвысоко-частотной энергии (СВЧ) парамагнитными центрами (ПМЦ) угля при нормальных условиях и на момент стабилизации при повышении давления до 6 МПа [15–18]. Использование системы «ЭПР-ПК» дало возможность с высокой точностью зарегистрировать переходный процесс во времени и исследовать его параметры.

Исследование кинетических параметров взаимодействия угля и газа проводилось на угольных пробах, отобранных с пластов l_4 ПАО «Шахта им. А.Ф. Засядько» и l_3^1 ш/у «Суходольское-Восточное» в процессе проведения гидродинамического воздействия.

Аппроксимация переходного процесса проводилась по экспоненциальному закону, характерному для быстротекающих

газодинамических явлений в угольных пластах [19]:

$$I = I_{\text{исх}} - K_N \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right),$$

где I – интегральная интенсивность спектра ЭПР угольного образца; $I_{\text{исх}}$ – интегральная интенсивность исходного спектра ЭПР угольного образца; K_N – коэффициент пассивации, отражающий процентное содержание в угле парамагнитных центров, способных к взаимодействию с газом, %; t – текущее время, с; T – постоянная времени переходного процесса, с.

Лабораторными исследованиями установлено, что в результате гидродинамического воздействия в вынесенном струей воды угле концентрация парамагнитных центров примерно в 3 раза меньше по сравнению с первоначальными значениями. Гидролиз угля приводит к разрыву различных связей и изменению компонентного состава. Под действием циклических механических воздействий осуществляется деструкция угольных связей в ароматическом ядре молекулы угля. Очевидно, что в процессе ГДВ происходит взаимодействие угля с молекулами воды и продуктами ее гидролиза, при этом образуются устойчивые соединения, что приводит к снижению концентрации ПМЦ в угле и соответственно к уменьшению сорбционного взаимодействия (табл. 1).

Таким образом, гидродинамическое воздействие влияет на межмолекулярное механохимическое взаимодействие угля и газа, сорбционные свойства угля и увеличивает его нарушенность, что повышает степень дегазации пласта.

Реализация в промышленных условиях гидродинамического способа дегазации и снижения газодинамической активности газонасыщенных пологих угольных пластов l_4 ПАО «Шахта им. А.Ф. Засядько» и l_3^1 ш/у «Суходольское-Восточное» достаточно полно освещена в работах [20–22].

Таблица 1

Кинетические параметры переходного процесса взаимодействия угля и газа после ГДВ на пласте l_4 (3-й западный конвейерный штрек)

Kinetic parameters of transient process of coal and gas interaction after HDA in l_4 seam (3rd western belt heading)

Номер пробы	Выход летучих веществ $V^{лет}$, %	Зольность A , %	Концентрация ПМЦ $N^c \times 10^{19}$, $г^{-1}$	Коэффициент пассивации K_N , %	Постоянная времени T_N , с	Пределная сорбционная способность Q , мл/г	Ширина линии ΔH , Э	Изменение ширины линии $K_{\Delta H}$, %
592	33,20	1,24	3,79	35,5	94,7	9,96	7,2	4,3
593	30,15	2,91	3,24	38,1	61,7	9,13	7,4	9,0
594	27,33	3,72	3,70	37,0	79,3	10,13	6,8	13,2
595	29,17	2,00	3,34	35,2	81,4	8,70	7,5	5,1
596	31,15	1,50	3,94	35,2	94,7	10,26	7,4	5,4
597	28,20	3,00	3,43	37,5	72,1	9,52	7,2	6,5

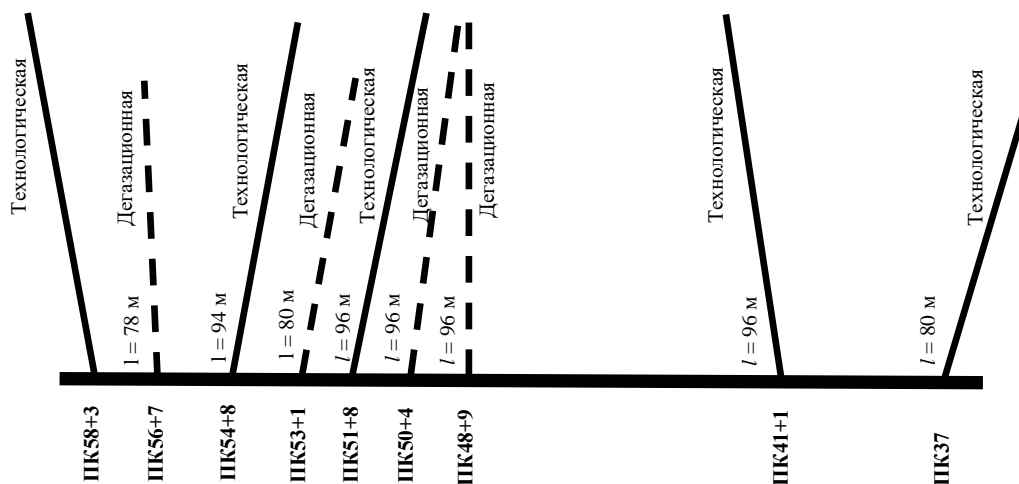


Рис. 1. Схема расположения скважин в 23-й восточной уклонной лаве

Fig. 1. Drilling pattern in the 23rd eastern inclined longwall



Рис. 2. Изменение дебита дегазационной скважины на ПК53+1 м после ГДВ

Fig. 2. Change in degassing borehole flow rate at Picket53+1 m after HDA

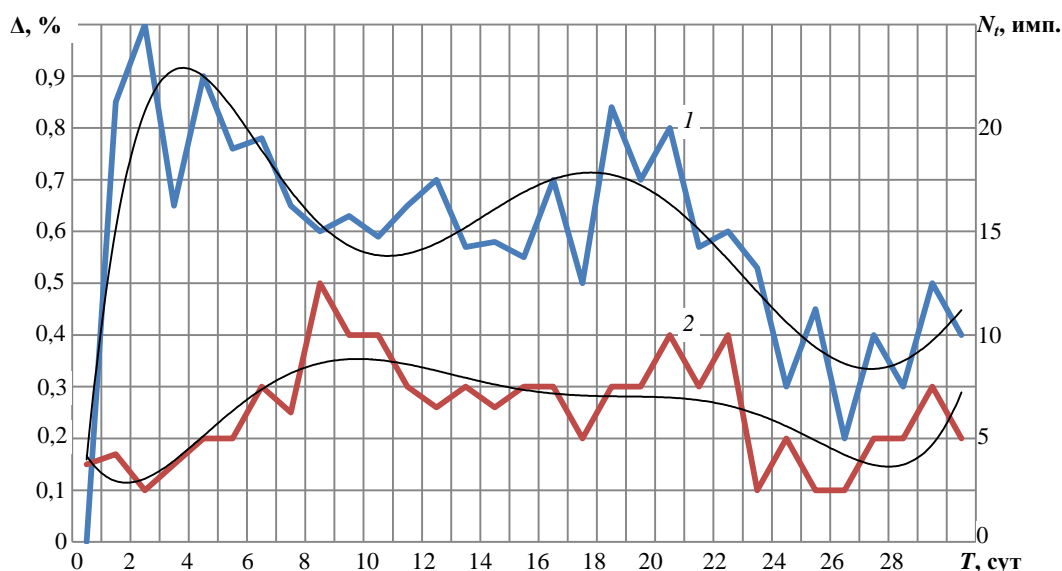


Рис. 3. Характер изменения геомеханических и газодинамических характеристик пласта I_1 при производстве ГДВ:

1 – акустическая эмиссия; 2 – прирост концентрации метана

Fig. 3. Trends of geotechnical and gas-dynamic characteristics for I_1 seam in the process of HDA:

1 – acoustic emission; 2 – methane concentration increment

В конвейерном штреке 23-й восточной уклонной лавы ш/у «Суходольское-Восточное» бурились пять технологических и четыре дегазационные скважины. Схема расположения скважин представлена на рис. 1.

Наблюдения показали, что во время работы подземных скважин метановыделение из них происходит неравномерно. После гидродинамического воздействия наблюдается повышенное выделение метана, которое на 60–100 сут достигает максимума, а затем происходит постепенное его снижение. На рис. 2 приведены результаты замеров дебита дегазационной скважины после ГДВ на различном расстоянии до лавы.

После гидродинамического воздействия через технологическую скважину метановыделение в дегазационной скважине постепенно снижается, достигая минимального значения при подходе лавы к скважине на расстояние 120–100 м. Это объясняется снижением содержания свободного метана в пласте и влиянием опорного давления.

При дальнейшем приближении лавы к скважинам метановыделение из них постепенно растет в связи с перераспределением сил горного давления и развитием дополни-

тельной системы трещин в результате обрушения пород кровли.

Максимальные значения метановыделения из скважин зафиксированы при нахождении лавы на расстоянии 15–20 м. После этого выход газа из скважин снижается вплоть до пересечения их забоем лавы из-за быстро увеличивающегося объема трещин, соединяющих скважины с очистным забоем, снижения количества свободного газа в угле и выделением метана непосредственно в лаву.

Всего из технологических скважин выделилось более 199 тыс. м^3 метана. Срок работы таких скважин в среднем составлял 60 сут со средним дебитом $416 \text{ м}^3/\text{сут}$, количество выделившегося метана из одной скважины – более 25 тыс. м^3 .

Проведение гидродинамического воздействия на газонасыщенный угольный пласт с периодическим извлечением метана и части дезинтегрированного угля из подземных скважин приводит к перераспределению напряжений в горном массиве, которое описывается статистическими характеристиками динамики активности акустической эмиссии (АЭ) [23]. В свою очередь, изменение напряженно-деформированного состоя-

ния угля и пород оказывает существенное влияние на изменение интенсивности газовыделения [24].

Изменение геомеханического состояния углепородного массива оценивали по акустической эмиссии с помощью звукоулавливающей аппаратуры (ЗУА). Способ установки сейсмоприемника и радиус его действия определяли согласно [25].

На рис. 3 приведены результаты мониторинга характера изменения геомеханических и газодинамических процессов пласта l_1 при трехкратном гидродинамическом воздействии через технологическую скважину, пробуренную на ПК42+5 м.

Анализ графиков показывает согласованную динамику процессов на отдельных участках. Просматривается общая тенденция к запаздыванию локальных максимумов прироста концентрации метана по отношению к локальным максимумам АЭ. Так, в результате первого цикла локальный максимум активности акустической эмиссии зафиксиро-

ван на третьи сутки, а локальный максимум прироста концентрации метана в воздушной струе выработки – на шестые сутки. Аналогично после второго цикла воздействия, осуществленного через 15 сут от времени первого воздействия, зафиксированы локальные максимумы прироста концентрации метана и активности АЭ на 17-е и 21-е сутки соответственно. После третьего цикла воздействия на 24-е сутки локальные максимумы Δ и АЭ зафиксированы на 27-е и 28-е сутки соответственно.

Таким образом, по результатам исследований в одних и тех же горно-геологических условиях влияния ГДВ на взаимодействие геомеханических и газодинамических процессов установлено запаздывание локальных максимумов концентрации метана во времени от максимумов акустической эмиссии на 1–5 сут. Характер изменения процессов описывается полиномом шестой степени.

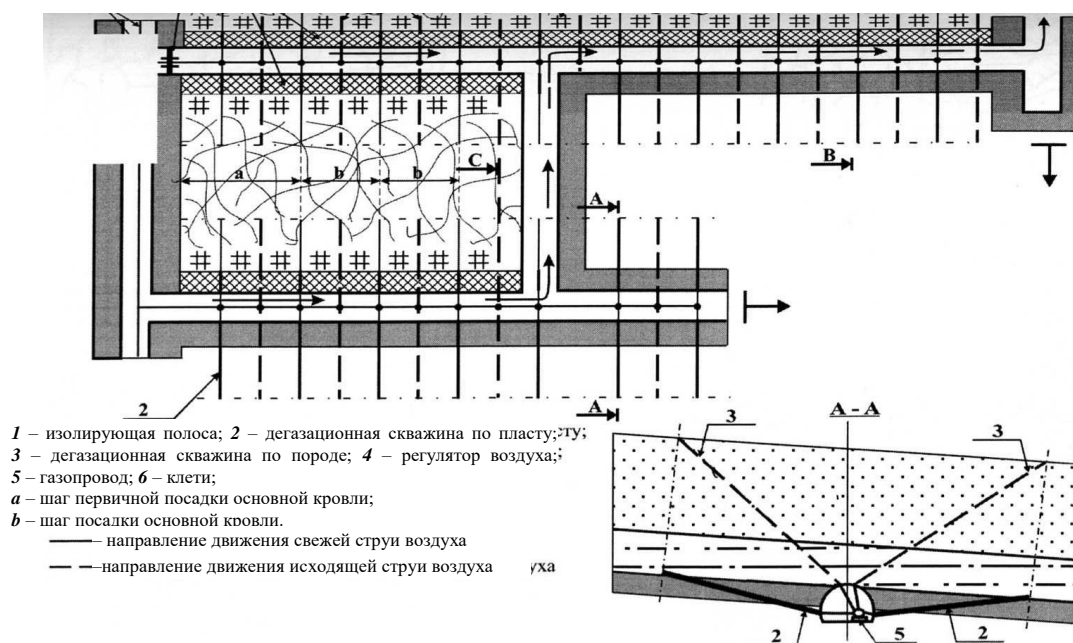


Рис. 4. Технологическая схема дегазации пологого угольного пласта с применением гидродинамического воздействия

Fig. 4. Arrangement of flat-lying coal seam degassing using hydrodynamic action

1 – separating strip; 2 – degassing borehole in a seam; 3 – degassing borehole in host rock; 4 – air governor; 5 – gas pipeline; 6 – cages; a – initial spacing of main roof breaks; b – spacing of main roof breaks; — — direction of intake air; - - - - direction of return ventilation air

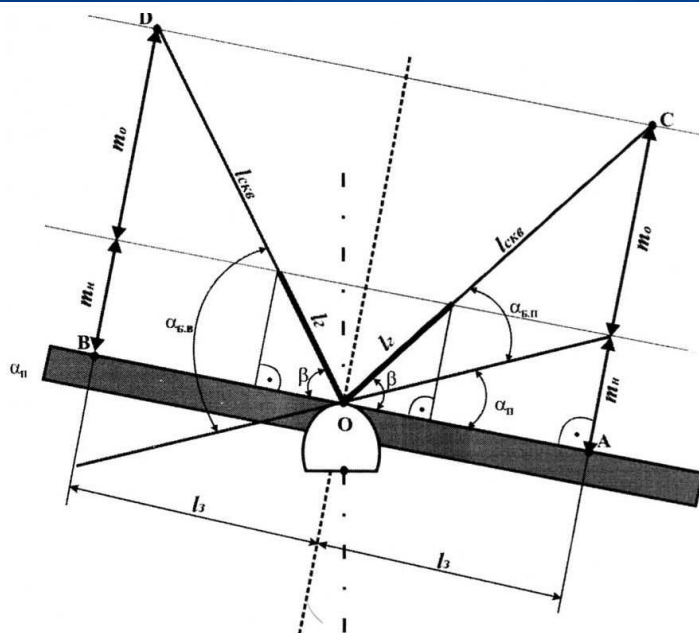


Рис. 5. Расчетная схема определения параметров дегазационных скважин

Fig. 5. Calculation pattern for degassing borehole parameter determination

На базе анализа условий отработки газонасыщенных угольных пластов и проведенных исследований разработана перспективная технологическая схема дегазации пластов гидродинамическим воздействием. Технологическая схема предусматривает бурение из подготовительной выработки или специальных ниш технологических скважин по углу и дегазационных – по породе (рис. 4).

Бурение скважин в угольный пласт осуществляется через породы почвы. Длина породной части скважины должна составлять не менее 10 м. Параметры заложения технологической скважины определяются графически с учетом мощности и угла падения пласта, расстояния до максимума опорного давления и расстояния от подошвы выработки до устья скважины. Бурение дегазационных скважин производится по породам кровли пласта. Длина герметизации дегазационной скважины определяется ее длиной в породах непосредственной кровли, но не меньше 6 м. Параметры бурения дегазационных скважин определяются расчетным способом (рис. 5).

Угол между кровлей пласта и дегазационной скважиной

$$\beta = \arctg \frac{m_o + m_n}{l_3}, \text{ град.}$$

где m_o – мощность основной кровли, м; m_n – мощность непосредственной кровли, м; l_3 – расстояние до зоны максимума опорного давления, м.

Длина скважины:

$$l_{\text{скв}} = \sqrt{(m_o + m_n)^2 + l_3^2}, \text{ м.}$$

Угол дегазационной скважины по восстанию:

$$\alpha_{\text{с.в.}} = \beta + \alpha_n = \arctg \frac{m_o + m_n}{l_3} + \alpha_n, \text{ град.}$$

где α_n – угол падения пласта, град.

Угол дегазационной скважины по падению:

$$\alpha_{\text{б.п.}} = \beta - \alpha_n = \arctg \frac{m_o + m_n}{l_3} - \alpha_n, \text{ град.}$$

Глубина герметизации дегазационной скважины:

$$l_r = \frac{l_n}{\sin \beta}, \text{ м.}$$

После обсадки скважины металлическими трубами диаметром 102–114 мм и ее герметизации устанавливается на крепежный фланец обсадной трубы модифицированная задвижка ЗВД200/4 с механизмом управления и дистанционным пультом. Гидродинамическое воздействие осуществляется с параметрами, приведенными в табл. 2.

Таблица 2

Параметры способа интенсификации дегазации пологого угольного пласта
Parameters of the method for flat-lying coal seam degassing intensification

Наименование	Количество
Диаметр дегазационной скважины, мм	≥ 76
Диаметр части скважины для герметизации, мм	≥ 150
Длина дегазационной скважины по углю, м	≥ 20
Длина дегазационной скважины по породе, м	Расчетная
Глубина герметизации дегазационной скважины, м	≥ 6
Давление подачи рабочей жидкости, МПа	≤ 5
Остаточное давление в скважине после сброса, МПа	0
Объем сброса жидкости в конце каждого цикла, м ³	0,3–1,0
Коэффициент извлечения угля	$\geq 0,01$
Коэффициент дегазации	0,3–0,8

При закрытой задвижке ЗВД200/4 основным насосом через скважину в пласт подается вода до создания рабочего давления, затем задвижка открывается и производится сброс давления до величины, обуславливающей необходимую разницу давлений в угольном пласте. В результате из скважины выбрасывается вода вместе с разрушенным углем, свободным и десорбированным газом. Повторение циклов создания давления и его сброса производят до прекращения выхода из скважины частиц разрушенного угля или при достижении необходимого количества угля и газа, извлекаемых из зоны обработки. После окончания ГДВ на крепежный фланец обсадной трубы устанавливается фланец гофрированного газоотводящего шланга дегазационной системы.

Выводы

По результатам проведенных шахтных исследований способа дегазации газонасыщенных пологих угольных пластов гидродинамическим воздействием установлено следующее.

1. Применяемые в настоящее время нормативные способы дегазации газонасыщенных угольных пластов на больших глубинах зачастую не обеспечивают необходимую для ритмичной работы очистных забоев эффективность дегазации 50 % и выше, что снижает темпы ведения очистных и подготовительных работ.

2. Впервые установлено влияние гидродинамического воздействия на степень дегазации газонасыщенных пластов. Под дейст-

вием давления снижается содержание в угле активных, способных к взаимодействию с метаном парамагнитных центров, в результате чего снижается граничная сорбционная способность угольного вещества. Для оценки длительности сорбционного и десорбционного взаимодействия в системе «уголь–газ» предлагается использовать показатель времени протекания переходного процесса T_N , характеризующий нарушенность вещества.

3. Установлен синхронный характер изменения геомеханических и газодинамических процессов в угольном пласте после проведения гидродинамического воздействия. При этом положение максимумов прироста концентрации метана в воздушной струе выработки запаздывает по времени на 1–5 суток от максимумов акустической эмиссии.

4. На интенсивное газовыделение из подземных скважин после ГДВ влияет временное опорное давление приближающейся лавы. При приближении лавы дебит скважин вначале снижается, а затем резко возрастает, достигая максимума на расстоянии 25–15 м до скважин. В дальнейшем при подработке скважин выход газа снижается из-за выделения метана непосредственно в лаву и выработанное пространство.

5. Разработаны технология и способ интенсификации дегазации пологих газонасыщенных угольных пластов, определены параметры способа, позволяющие достичь эффективности дегазации на обработанных участках 30–70 %.

Библиографический список

1. Булат А. Ф. Проблемы горного дела, энергетики и экологии / А. Ф. Булат, М. С. Четверик; ИГТМ НАН Украины. Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. тр. Днепропетровск, 2013. № 110. С. 3–14.
2. Ильяшов М. А. Влияние производительности и скорости подвигания забоя на газовый баланс выемочного участка. Горный журнал. 2010. № 7. С. 100–102.
3. Горные работы в сложных условиях на выбросоопасных пластах. С. П. Минеев, А. А. Рубинский, О. В. Витушко, А. Г. Радченко. Донецк: Східний видавничий дім, 2010. 603 с.
4. Забурдяев В. С. Способы интенсификации газоотдачи неразгруженных пластов в подземных условиях. В. С. Забурдяев, Г. С. Забурдяев. Современные проблемы шахтного метана: Сб. науч. тр. М.: МГТУ, 1999. С. 106–117.
5. Звягильский Е.Л. Управление метановыделением на выемочных участках угольных шахт / Е. Л. Звягильский, Б. В. Бокий, О. И. Касимов. Донецк: Ноулидж, 2013. 124 с.
6. Чурадзе М. В. Способы гидравлического воздействия на угольные пласты для борьбы с внезапными выбросами угля и газа. ГИАБ. 2000. №7. С. 219–222.
7. Софийский К. К. Безопасность и эффективность метаноугольных шахт: [монография]. К. К. Софийский, Р. К. Стасевич, Б. В. Бокий, А. В. Шейко, В. И. Гаврилов, О. В. Московский, Е. Е. Дудля. К.: ФЛП Халиков Р. Х., 2017. 308 с.
8. Правила ведення гірничих робіт на пластах, схильних до газодинамічних явищ: СОУ 10.1.0017.4088.011-2005. Чинний від 2005-12-30. К.: Мінвуглепром України, 2005. 222 с.
9. Софійський К. К. Концептуальна сутність способу комплексної профілактичної обробки напружених газонасичених та викидонебезпечних вугільних пластів гідродинамічною дією / К.К. Софійський, С.Г. Барадулін, А.В. Аксенов. Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. тр. ИГТМ НАН Украины. Днепропетровск, 2001. Вып. 27. С. 144–150.
10. Айруни А. Т. Экономическая эффективность борьбы с рудничными газами методами вентиляции и дегазации. А. Т. Айруни, Ю. Н. Бессонов. – М., 1971. – 55 с.
11. Лидин Г.Д. Борьба со скоплениями метана в угольных шахтах. Г. Д. Лидин, А. Т. Айруни, Ф. С. Клебанов [и др.]. М.: Госгортехиздат, 1961. 140 с.
12. Забурдяев В. С. Дегазация пологих угольных пластов. Уголь. 1978. № 5. С. 57–60.
13. Дегазація вугільних шахт. Вимоги до способів та схеми дегазації. К.: Мінпаливенерго України, 2004. 161 с.
14. Скипочка С. И. Механизмы генерации метана в угольных шахтах. С. И. Скипочка, Т. А. Паламарчук. Уголь Украины. 2013. № 2. С. 30–34.
15. Саранчук В. И. Надмолекулярная организация, структура и свойства угля. В. И. Саранчук, А. Т. Айруни, К. Е. Ковалев. К.: Наук. думка, 1988. 192 с.
16. Гончаренко В. А. Автоматизация процесса обработки и расчета сорбционных и структурных свойств угля, определяемых методом ЭПР. В. А. Гончаренко, А. В. Бурчак, В. В. Котляров. Науковий вісник НГАУ: Зб. наук. пр. НГАУ. Дніпропетровськ, 2001. № 4. С. 69–71.
17. Бурчак А. В. Исследование системы «уголь–газ» и разработка способов оценки метаморфизма и нарушенности углей методом ЭПР: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.15.11. А. В. Бурчак. Днепропетровск: НГУ, 1994. 14 с.
18. Лукинов В. В. Исследование структурных особенностей выбросоопасных углей методом ЭПР. В. В. Лукинов, А. В. Бурчак; ИГТМ НАН Украины. Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. тр. Днепропетровск, 2005. Вып. 57. С. 35–40.
19. Кузнецов С. В. К вопросу о кинетике десорбции при газодинамических явлениях в угольных шахтах. С.В. Кузнецов, В.А. Бовин. ФТПРПИ. 1980. № 1. С. 58–65.
20. Софийский К. К. Способы интенсификации дегазации угольных пластов и предотвращения выбросов угля и газа: монография. К. К. Софийский, Д. М. Житленок, В.И. Гаврилов [и др.]. Донецк: ТОВ «Східний видавничий дім», 2014. 460 с.
21. Софийский К. К. Гидродинамические способы воздействия на напряженные газонасыщенные угольные пласты: монография. К. К. Софийский, В. И. Гаврилов, Д. М. Житленок [и др.]. Донецк: ТОВ «Східний видавничий дім», 2015. 364 с.
22. Гаврилов В. И. Интенсификация газовой выделению из низкопроницаемого угольного пласта гидродинамическим воздействием. В. И. Гаврилов, К. К. Софийский. Горный журнал. 2019. № 2. С. 83–87.
23. Топчій С. Є. Обґрунтування параметрів способу оперативного контролю та управління станом гірничого масиву із застосуванням звукоуловлючої апаратури : автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.15.02. С. Є. Топчій. Донецьк: ІФГП НАН України, 2007. 20 с.

24. Черняк И. Л. Управление состоянием массива горных пород / И.Л. Черняк, С.А. Ярунин. М.: Недра, 1995. 395 с.

25. КД 12.01.05.101-99. Прогноз динамических проявлений горного давления по активности акустической эмиссии: методика. Горловка: ДонНИИ, 1999. 21 с.

References

1. Bulat A. F. Problems of mining, energy and ecology / A.F. Bulat, M.S. Chetverik; IGTM NAS of Ukraine. Geotechnical Mechanics: Proceedings (collection of scientific papers), Dnepropetrovsk, 2013, No. 110, pp. 3-14 (in Russ.).

2. Ilyashov M. A. The influence of productivity and the advance rate on gas balance of extraction district. Mining Journal, 2010, No. 7, pp. 100–102 (in Russ.).

3. Mineev S. P., Rubinsky A. A., Vitushko O. V., Radchenko A. G. Outburst-dangerous seam mining operations in heavy conditions. Donetsk: Skhidni vidavnychy dim (East Publishing House), 2010, 603 p. (in Russ.).

4. Ziburdaev V. S. Methods of gas recovery intensification in unrelieved seams in underground conditions. V. S. Ziburdaev, G. S. Ziburdaev. Current issues of mine methane: Proceedings, Moscow, MGGU, 1999, pp. 106–117 (in Russ.).

5. Zvyagilsky E. L. Methane release control in coal mine mining districts / E.L. Zvyagilsky, B.V. Boki, O.I. Kasimov. Donetsk: Knowledge Publ., 2013, 124 p. (in Russ.).

6. Churadze M. V. Methods of hydraulic action on coal seams to prevent sudden coal-and-gas outbursts. GIAB, 2000, No. 7, pp. 219–222 (in Russ.).

7. Sofiysky K. K. Safety and effectiveness of methane-coal mines [monography] (*Bezopasnost' i effektivnost' metanougol'nykh shakht*). K. K. Sofiysky, R. K. Stasevich, B. V. Boki, A. V. Sheiko, V. I. Gavrilov, O. V. Moscow, E.E. Dudlya. Kiev: FLP Khalikov R. Kh., 2017, 308 p. (in Russ.).

8. The rules for mining of seams with gas dynamic activity manifestations: SOU 10.1.0017.4088.011-2005. Valid from 2005-12-30. Kiev: Minvugleprom of Ukraine, 2005, 222 p. (in Ukrainian).

9. Sofiysky K.K. Conceptual basis of method for comprehensive preventive hydrodynamic treatment of gas-saturated and outburst-dangerous seams with hydrodynamic design / K. K. Sofiysky, S. G. Baradulin, A. V. Aksenov. Geotechnical Mechanics: Proceedings of IGTM NAS of Ukraine, Dnepropetrovsk, 2001, Issue 27, pp. 144-150 (in Ukrainian).

10. Airuni A. T. Economic effectiveness of mine gas control by ventilation and degassing methods (*Ekonomicheskaya effektivnost' bor'by s rudnichnymi gazami metodami ventilyatsii i degazatsii*). A. T. Airuni, Yu. N. Bessonov, Moscow, 1971, 55 p. (in Russ.).

11. Lidin G. D. Methane accumulation control in coal mines (*Bor'ba so skopleniyami metana v ugol'nykh shakhtakh*). G. D. Lidin, A. T. Airuni, F. S. Klebanov et al. Moscow: Gosgortekhzdat Publ., 1961, 140 p. (in Russ.).

12. Ziburdaev V. S. Degassing flat coal seams (*Degazatsiya pologikh ugol'nykh plastov*). Coal (*Ugol'*), 1978, No. 5, pp. 57-60 (in Russ.).

13. Degassing of coal mines. Requirements for methods and arrangement for degassing. K.: Ministry of Fuel and Energy of Ukraine, 2004, 116 p. (in Ukrainian).

14. Skipochnka S. I. Mechanisms of methane generation in coal mines. S.I. Skipochnka, T.A. Palamarchuk. Coal of Ukraine (*Ugol' Ukrainy*), 2013, No. 2, pp. 30–34 (in Russ.).

15. Saranchuk V.I. Supramolecular organization, structure and properties of coal. (*Nadmolekulyarnaya organizatsiya, struktura i svoystva uglya*) Saranchuk V.I., Airuni A.T., Kovalev K.E. K.: Naukova Dumka Publ., 1988, 192 p. (in Russ.).

16. Goncharenko V. A. Automation of processing and calculation of sorption and structural properties of coal determined by EPR method. V. A. Goncharenko, A. V. Burchak, V. V. Kotlyarov. NSAU Scientific Newsletter, Dnipropetrovsk, 2001, No. 4, pp. 69–71 (in Russ.).

17. Burchak A. V. The study of coal-gas system and development of methods for coal metamorphism and broken condition assessing using EPR method (*Issledovanie sistemy «ugol'-gaz» i razrabotka sposobov otsenki metamorfizma i narushennosti ugley metodom EPR*): Extended abstract of Cand. Sci. Dissertation in engineering science, 05.15.2011, A.V. Burchak, Dnepropetrovsk, NSU, 1994, 14 p. (in Russ.).

18. Lukinov V. V. The study of structural features of outburst-hazardous coal by EPR method (*Issledovanie strukturnykh osobennostey vybrosoopasnykh ugley metodom EPR*). V.V. Lukinov, A.V. Burchak, IGTM NAS of Ukraine. Geotechnical Mechanics Proceedings, Dnepropetrovsk, 2005, Issue 57, pp. 35–40 (in Russ.).

19. Kuznetsov S. V. On the kinetics of desorption in gas-dynamic phenomena in coal mines. S.V. Kuznetsov, V.A. Bovin, FTPI, 1980, No. 1, pp. 58–65 (in Russ.).

20. Sofiysky K. K. Methods for intensifying coal seam degassing and preventing coal-and-gas outbursts (*Sposoby intensivifikatsii degazatsii ugol'nykh plastov i predotvrashcheniya vybrosov uglya i gaza*) (monography). K.K. Sofiysky, D.M. Zhitlenok, V.I. Gavrilov et al. Donetsk: LLP Skhidniy Vidavniy Dim Publ., 2014, 460 p. (in Russ.).
21. Sofiysky K. K. Hydrodynamic methods of influencing stressed gas-saturated coal seams (monography) (*Gidrodinamicheskie sposoby vozdeystviya na napryazhennye gazonasyshchennye ugol'nye plasty*) K. K. Sofiysky, V. I. Gavrilov, D. M. Zhitlenok et al. Donetsk: LLP Skhidniy Vidavniy Dim Publ., 2015, 364 p. (in Russ.).
22. Gavrilov V. I. Intensification of gas release from low permeable coal seam by hydrodynamic action. Gavrilov V.I., Sofiysky K.K. Mining Journal (Gornyy Zhurnal), 2019, No 2, pp. 83–87 (in Russ.).
23. Topchy S. E. Substantiation of the parameters of the method for operational control of rock mass conditions using acoustic equipment (*Obgruntuvannya parametriv sposobu operativnogo kontrolyu ta upravlinnya stanom girnichogo massivu iz zastosovannyam zvukoulovlyuchoï aparaturi*): Extended abstract of Cand. Sci. Dissertation in engineering science, 05.15.02, S. E. Topchy, Donetsk: IFGP NAS of Ukraine, 2007, 20 p. (in Ukrainian).
24. Chernyak I. L. Rock mass state control (*Upravlenie sostoyaniem massiva gornyx porod*) / I. L. Chernyak, S. A. Yarunin. Moscow: Nedra Publ., 1995.395 p. (in Russ.).
25. KD 12.01.05.101-99. Forecast of dynamic manifestations of rock pressure based on acoustic emission activity: technique. Horlivka: DonNII, 1999, 21 p. (in Russ.).