

ГЕОМЕХАНИКА, РАЗРУШЕНИЕ ПОРОД ВЗРЫВОМ, РУДНИЧНАЯ АЭРОГАЗОДИНАМИКА И ГОРНАЯ ТЕПЛОФИЗИКА

DOI: 10.26730/1999-4125-2019-4-5-16

УДК 622.831.31

ЭКСПРЕСС-МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ГИДРООБРАБОТКИ УГОЛЬНО-ПОРОДНОГО МАССИВА ПО АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

EXPRESS-METHOD FOR DETERMINATION OF OPTIMUM PARAMETERS FOR COAL AND ROCK MASS HYDRAULIC MINING USING THE RESULTS OF ACOUSTIC EMISSION

Шадрин Александр Васильевич,
доктор техн. наук, главный научный сотрудник, e-mail: avsh-357@mail.ru
Alexander V. Shadrin, Dr. Sc. in Engineering, senior researcher
Телегуз Александр Сергеевич,
младший научный сотрудник, e-mail: alexanderteleguz@rambler.ru
Alexander S. Teleguz, junior researcher

Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского Отделения Российской академии наук, 650065, Россия, г. Кемерово, пр. Ленинградский, 10.
Federal Research Center of Coal and Coal chemistry, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 10, Leningradsky Ave., Kemerovo, 650065, Russian Federation

Аннотация:

В работе обосновывается экспресс-метод определения акустико-эмиссионным методом оптимальных параметров способов (режимов) гидрообработки угольных пластов, применяемых для борьбы с динамическими явлениями. Оптимальными приняты такие параметры (температура и давление закачки жидкости), при которых цель гидрообработки достигается за минимальное время. Целесообразный способ гидрообработки пласта определяется его фильтрационными свойствами. При высоком значении коэффициента фильтрации наиболее эффективным способом борьбы с динамическими явлениями является режим низконапорного увлажнения. При этом режиме трещины не развиваются и активность акустической эмиссии (АЭ) равна фоновой, замеренной до нагнетания. При среднем значении коэффициента фильтрации эффективным является режим гидрорыхления пласта. При гидрорыхлении пласта активность АЭ должна быть такой, чтобы к моменту прорыва жидкости в выработку в скважину поступило проектное количество жидкости. При низком значении коэффициента фильтрации целесообразно применять гидроотжим пласта. При этом режиме регистрируется непрерывная активность АЭ. Обоснованы функциональные зависимости, связывающие темп и время нагнетания с требуемым объемом закачки жидкости в скважину.

Ключевые слова: угольный пласт, способ гидрообработки, акустическая эмиссия, параметры нагнетания, направленный гидроразрыв кровли.

Abstract:

The article gives reasons for using express method for determination by means of acoustic emission method of optimum parameters (regimes) for coal seam hydraulic treatment, which are used to control the dynamic phenomena. Optimum parameters are the parameters (speed and pressure of liquid pumping), using which one can reach the purpose of the hydraulic treatment at a minimum time. Efficient way of coal seam hydraulic treatment is determined by its filtration properties. When the filtration coefficient is high, the most efficient way to cope with dynamic phenomena is to use a low-pressure hydrotreatment regime. When using this regime, cracks are not developed and acoustic emission (AE) activity equals the background one, which had been measured before the

pumping. When the filtration coefficient obtains average values, coal seam hydraulic loosening becomes an efficient regime. When using coal seam hydraulic loosening, AE activity must get such values that by the moment when the liquid bursts into the mine working the estimated amount of liquid has already been pumped into the borehole. When the filtration coefficient is low, it is advisable to use coal seam hydraulic squeezing. Using this regime, continuous AE activity is recorded. The functional dependences linking the rate and time of pumping with the required volume of injected into the borehole fluid is proved.

Key words: coal seam, hydraulic treatment method, acoustic emission, pumping parameters, directional roof hydraulic fracturing.

Введение

В качестве региональных способов гидрообработки угольных пластов предлагаются региональное увлажнение из подготовительных горных выработок, а также глубинное и низконапорное увлажнение угольных пластов. В качестве локальных способов гидрообработки предложены нагнетание воды в пласт, низконапорная пропитка и низконапорное увлажнение угольного пласта, а также гидрорыхление [1]. В действующей «Инструкции ...» [1] в отличие от предыдущей не упоминается гидроотжим пласта, хорошо зарекомендовавший себя для газонасыщенных угольных пластов с низкими характеристиками прочности и водопроницаемости угля [2]. Другое отличие действующей Инструкции состоит в том, что этот документ лишь перечисляет названия способов гидрообработки и указывает области их применения.

Технологии осуществления указанных способов гидрообработки и параметры нагнетания (давление и объем закачанной жидкости) изложены в другом нормативном документе – «Рекомендациях по безопасному ведению горных работ на склонных к динамическим явлениям угольных пластах» [3]. В соответствии с этим документом для различных способов гидрообработки пластов рекомендуются давления нагнетания, указанные в таблице и увязанные с гидростатическим давлением $\gamma_{пор}H$. Здесь $\gamma_{пор}$ - удельный вес породы, H – глубина залегания пласта от земной поверхности.

Связь режима гидрообработки призабойного пространства с АЭ

Несмотря на многообразие названий способов гидрообработки, указанных в нормативных документах, вызванное главным образом отличием

технологических параметров: расположением скважин, из которых ведется гидрообработка; их количеством и размерами; глубиной герметизации, - цель у них одна: увлажнение угольного пласта до величины, при которой внезапные выбросы и горные удары никогда не происходили. Эта величина составляет 5-6% [3-11]. При этой влажности жидкость закупоривает газ в микротрещинах и порах угля, не допуская его десорбцию и переход в свободное состояние. Уголь становится более пластичным, что приводит к уменьшению максимума опорного давления и отодвиганию его в глубь массива, тем самым уменьшая запасенную упругую энергию и энергию газа под давлением, в итоге устраняя опасность проявления любых типов динамических явлений (ДЯ). Следует добавить, что жидкость, внедряясь в пласт, производит поршневое вытеснение метана из пор и трещин [12-13].

Увлажнение угля возможно двумя режимами [12, 14]. В первом (режим фильтрации) жидкость распространяется из скважины по существующим трещинам и из них в микротрещины и далее в поры. Этот режим возможен в том случае, если темп нагнетания не превышает природную приемистость угольного пласта (без принудительного роста трещин). В этом режиме осуществляются способы: низконапорное увлажнение и низконапорная пропитка пласта, и, вероятнее всего, региональное и глубинное увлажнение пласта.

Во втором режиме (режим гидрорыхления) темп нагнетания превышает природную приемистость пласта, в результате происходит скачкообразный рост имеющихся в пласте трещин (в том числе трещин кливажа), заполнение полостей которых приводит к увеличению расхода жидкости, ее

Таблица. Рекомендуемые величины давления нагнетания для способов гидрообработки угольных пластов с целью снижения выбросо- и удароопасности

Рекомендуемые величины давления нагнетания	
Способ нагнетания	Давление нагнетания, МПа
1. Региональное глубинное увлажнение	$P_n = 10^{-2}(0,6-0) \gamma_{пор}H$
2. Нагнетание в режиме увлажнения	$P_n \leq 10^{-2}0,75\gamma_{пор}H$
3. Гидрорыхление: <ul style="list-style-type: none"> • пластов, склонных к горным ударам • пластов, склонных к внезапным выбросам 	$P_n \leq 10^{-2}(0,8-0,9)\gamma_{пор}H$ $P_n = 10^{-2}(0,75-2,0)\gamma_{пор}H$

фильтрацию в микротрещины и поры угля. В этом режиме осуществляется гидрорыхление пласта.

Очевидное первое отличие названных режимов: оно состоит в отсутствии или наличии принудительного роста трещин под действием нагнетаемой жидкости. Поскольку трещины в угле развиваются скачкообразно, регистрировать «скачки» наиболее удобно методом АЭ, т.к. трещина в процессе скачкообразного роста излучает акустический импульс [15]. Отсюда и способ разграничения режимов нагнетания: нет импульсов АЭ - осуществляется режим фильтрации, регистрируются импульсы АЭ – осуществляется режим гидрорыхления (или гидроотжим).

Второе отличие режимов гидрообработки состоит в том, что при длительном поступлении жидкости в пласт в режиме фильтрации достигается высокая равномерность увлажнения, тогда как при относительно кратковременном гидрорыхлении пласта равномерность увлажнения тем ниже, чем быстрее завершено гидрорыхление. Поэтому можно предположить, что надежность обеспечения выбросоударобезопасности увлажнением в режиме фильтрации выше, чем в режиме гидрорыхления.

Рассматриваемые способы гидрообработки массива горных пород включают в себя большое число разнородных параметров. Это параметры, характеризующие эффективность способа, технологию ведения работ и насосную установку. Назовем эти группы параметров соответственно контрольными, технологическими и гидравлическими [16].

Контрольными параметрами являются:

- При направленном гидроразрыве труднообрушаемой кровли – необходимая длина и направление распространения трещины, при которых обеспечивается обрушение и снижение площади зависания пород кровли.

- При гидрообработке угольного пласта с целью снижения опасности проявления динамических явлений: необходимые для устранения опасности влажность угля - при низконапорном увлажнении, низконапорной пропитке и гидрорыхлении пласта, и величина выдвигания угольного забоя - при гидроотжиме пласта.

В настоящее время контрольные параметры определяются согласно «Инструкции...» [2] или «Руководству...» [3], поскольку в последней редакции «Инструкции...» [1] этих сведений нет.

Технологическими параметрами являются: количество одновременно подключаемых к нагнетательной установке скважин (шпуров), их длина, направление и диаметр, глубина герметизации, расположение искусственно инициирующих щелей относительно горных выработок, а также время гидрообработки. Технологические параметры при гидрообработке угольных пластов также выбираются в соответствии с указанными «Инструкцией...» [2] или «Руководством...» [3] и

согласуются с принятым циклом проходки или выемки угля. При обосновании технологических параметров направленного гидроразрыва труднообрушаемой кровли руководствуются нормативным документом [17] и могут дополнительно использовать рекомендации по применению этого способа гидрообработки применительно к конкретному шахтопласту (см., например, [18]).

Гидравлическими параметрами являются давление и скорость (темп) нагнетания.

Оптимальными гидравлическими параметрами гидрообработки будем считать такие величины давления и темпа нагнетания, при которых контрольный параметр достигается за минимальное время.

Как угольный пласт, так и его кровля, подверженные гидрообработке, являются твердыми телами, нагруженными горным давлением и работающими упруго. Отличие их состоит в прочностных характеристиках и фильтрационно-коллекторских свойствах. Однако в обоих случаях жидкость расходуется на заполнение полости растущей трещины и фильтрацию в ее стенки. Поэтому подход к использованию акустической эмиссии (АЭ) для контроля процесса как гидрообработки угольного пласта, так и гидроразрыва кровли может быть общим [16].

В настоящее время, большинство применяемых насосных установок без гидроаккумуляторов имеют жесткую рабочую характеристику, т.е. для них темп нагнетания сохраняется практически постоянным вне зависимости от фильтрационно-коллекторских свойств массива (см. Рис. 1). К ним относятся насосные установки типа НВУ-30М, УНВ-2, УН-35, 2УГН, посредством которых осуществляется гидрообработка угольного пласта, и насосы типа Т, предназначенные для питания секций механизированной крепи водомасляной эмульсией и используемые для направленного гидроразрыва труднообрушаемой кровли. В частности, для этой цели находят широкое применение насос типа Т-200/32 Ex-Z, также имеющий жесткую рабочую характеристику [19].

Для этих насосов в работе [16] приведено решение задачи использования метода АЭ для определения оптимальных гидравлических параметров гидрорыхления угольного пласта и гидроразрыва кровли. Решение было получено в предположении, что при гидрообработке угольного пласта в режиме гидрорыхления и гидроразрыва кровли жидкость в скважину будет поступать до тех пор, пока вершина растущей трещины не достигнет поверхности ближайшей выработки или скважины, пробуренной из нее. Данное предположение обусловлено тем, что оба способа гидрообработки по существующим технологиям заканчиваются, когда давление нагнетания существенно снижается относительно достаточно продолжительного начального периода. Это вызвано прорывом жидкости в выработку, что подтверждено шахтными наблюдениями. При

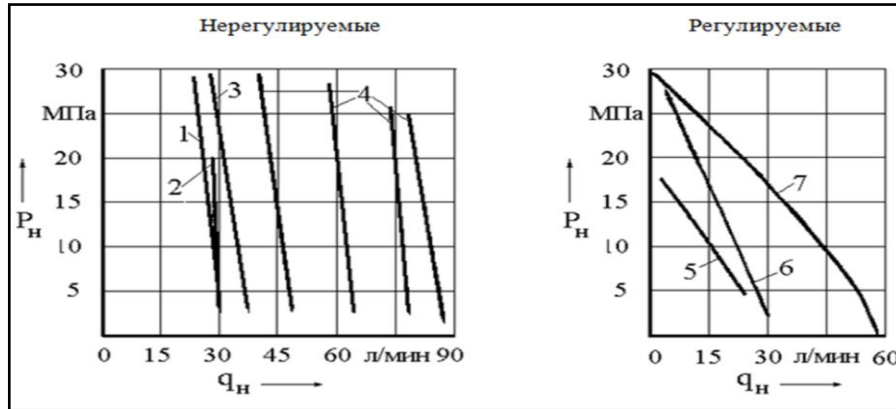


Рис. 1. Рабочие характеристики насосных установок: 1 – НВУ-30М; 2 – УНВ-2; 3 – УН-35; 4 – 2 УГН; 5 – УНВ-2 (с пневмоприводом); 6 – НВУ30М (с пневмоприводом); 7 – УНР-50. P_n и q_n – соответственно давление и темп нагнетания.
 Fig. 1. Pumping units operational characteristics: 1 – NVU-30M; 2 – UNV-2; 3 – UN-35; 4 – 2 UGN; 5 – UNV-2 (with pneumatic drive); 6 – NVU 30M (with pneumatic drive); 7 – UNR-50. P_n and q_n – pressure and speed of pumping respectively

гидрорыхлению угольного пласта этим минимальным расстоянием, на которое может возрасти трещина, приближенно является глубина герметизации скважины. При гидроразрыве кровли пласта это расстояние зависит от технологии его осуществления, и за минимальную величину было принято расстояние до ближайшей обнаженной поверхности выработки или до пробуренного из нее шпура для анкерной крепи.

Предполагалось также, что при нагнетании жидкости в угольный пласт в режиме гидрорыхления в нем одновременно могут развиваться несколько трещин, имеющих примерно одинаковую начальную длину и ориентацию. Назовем это число n . В результате решения задачи было получено следующее выражение для определения суммарного количества импульсов АЭ I при развитии n трещин от начальной длины l_0 до l за время t [16]:

$$I = nk \ln \left[\frac{q(2\sqrt{mK\Delta P\mu t - \mu b})}{2\pi h l_0 m K \Delta P} \right], \quad (1)$$

где: k – коэффициент, описывающий связь между l_0 и l [15]; q – скорость (темп) нагнетания; h – средняя ширина поверхности трещин; m , K – соответственно пористость и проницаемость горного массива; $\Delta P = P_1 - P_2$, P_1 – давление жидкости на стенке трещины; P_2 – пластовое давление жидкости, примерно равное давлению свободного газа в трещине, если он имеется; b – среднее раскрытие трещин; μ – динамическая вязкость нагнетаемой жидкости.

Выражение (1) справедливо для времени t , превышающего некоторую предельную минимальную величину t_l , величина которой лежит в пределах 1 минуты – при развитии трещин в угле и 2 минут – в кровле. Ограничение связано с упрощениями, сделанными при выводе формулы (1) [16]:

$$t > t_l \approx \frac{2\mu b^2}{mK\Delta P}. \quad (2)$$

В квадратных скобках выражения (1) приведено отношение длины скачкообразно подросшей

трещины l к моменту времени t . Поскольку при направленном гидроразрыве кровли нагнетание ведется, как правило, в одну трещину, сделанную щелеобразователем, выражение (1) для мониторинга гидроразрыва кровли методом АЭ можно записать в виде:

$$I = k \ln \frac{l}{l_0}, \quad (3)$$

$$\text{где [15]: } k = \frac{1}{\ln \left[1 + \frac{\pi^2(\psi-1)}{8\psi^2} \right]}; \quad \psi = \frac{\sigma_1 B + \sqrt{\frac{k_b D^2}{\pi l_0} \frac{D^2}{\pi^2}}}{\sigma_3 B + \sqrt{\frac{k_f D^2}{\pi l_0} \frac{D^2}{\pi^2}}}; \quad B =$$

$\sin^2 \vartheta + \cos^2 \vartheta$; здесь ϑ – угол ориентации трещины; $D = 0.5\pi\sigma_1 \sin 2\vartheta(1 - \eta)$; здесь σ_1 и σ_3 – соответственно вертикальная и горизонтальная компоненты горного давления (рассматривается плоская задача); $\eta = \frac{\sigma_1}{\sigma_3}$; $k = \frac{E\gamma_b}{1-\nu}$ – коэффициент интенсивности напряжений; E – модуль упругости; ν – коэффициент Пуассона; γ_b – плотность энергии на разрыв; k_b и k_f – коэффициенты интенсивности напряжений соответственно в начальной и конечной фазах скачка трещины.

Видно, что рассчитать коэффициент k практически невозможно из-за сложности измерения определяющих его параметров. Ниже рассмотрим метод определения этого коэффициента экспериментальным путем.

Для организации контроля режима гидрообработки по акустической эмиссии было предложено разбить все время нагнетания жидкости t на j равных интервалов контроля длительностью T , таких, что $\tau_i < T < \tau_s$, где τ_i – длительность i -го импульса АЭ, τ_s – суммарное время нагнетания в скважину до окончания способа гидрообработки, и характеризовать режим нагнетания параметром ΔI , называемым активностью АЭ, равным числу импульсов АЭ в интервал контроля T :

$$\Delta I = \frac{qkT\sqrt{\mu}}{2\pi h \sqrt{mK\Delta P} t}. \quad (4)$$

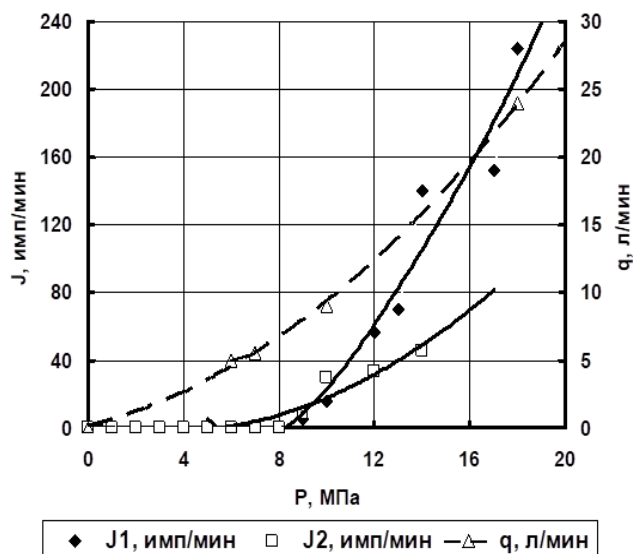


Рис. 2. Зависимость темпа нагнетания q и активности АЭ J от давления нагнетания

Fig. 2. Relation between pumping speed q and AE activity J and pumping pressure

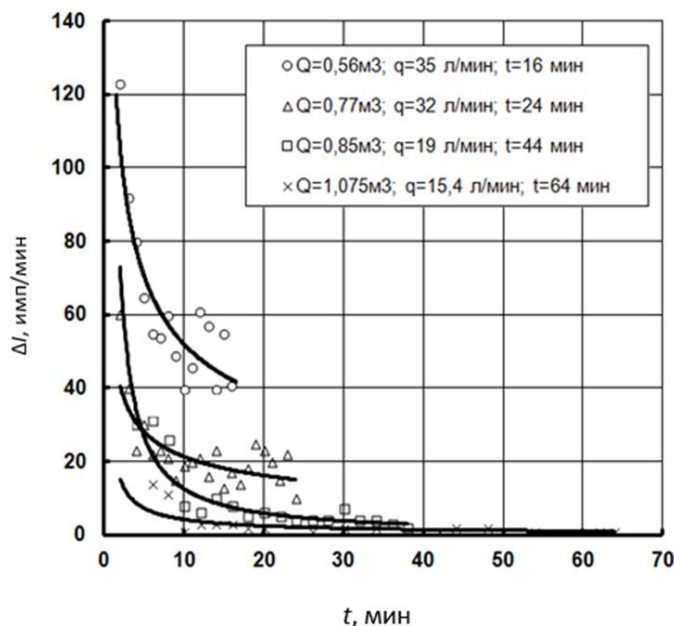


Рис. 3. Зависимости активности АЭ ΔI для различных значений темпа нагнетания q (объема жидкости Q , поступившей в шпур до ее прорыва на забой) от времени t

Fig. 3. Relation between AE activity ΔI for different values of pumping speed q (volume of liquid Q , which has been delivered into the borehole before its burst to the face) and time t

Из (4) видно, что активность АЭ при постоянном темпе нагнетания является монотонно убывающей функцией времени. Это обусловлено тем, что по мере роста трещин увеличивается их поверхность и возрастает поток фильтрующей через них жидкости.

При решении задачи были получены

следующие, удобные для практического применения, выражения для определения оптимального времени нагнетания t_{opt} , оптимального темпа нагнетания q_{opt} и оптимальной активности АЭ ΔI_{opt} , при которых в скважину, имеющую фильтрующую часть длиной l_f и загерметизированную на глубину l_g , при постоянном темпе нагнетания до прорыва по трещинам в выработку удастся закачать объем жидкости Q (16):

$$T_{opt} = a(Q \cdot V)^2; \quad (5)$$

$$q_{opt} = \frac{Q}{a(Q \cdot V)^2}; \quad (6)$$

$$\Delta I_{opt} = \frac{\delta_1(q)}{t - \delta_2(q)\sqrt{t}}, \quad (7)$$

где $a = a_1 a_2$; $a_1 = \frac{\mu}{(\pi h n_s)^2 m k \Delta P}$ -

коэффициент, определяемый фильтрационно-коллекторскими свойствами массива и параметрами нагнетания, $c \cdot m^{-2}$; $a_2 = (l_g l_f)^{-2}$ - технологический параметр, m^{-4} ; $V = \frac{\pi}{2} h n_s l_g l_f b$ - коэффициент, пропорциональный суммарному объему растущих трещин, m^3 ; n_s - удельное количество трещин, развивающихся из 1 погонного метра фильтрующей части скважины, m^{-1} .

$$\delta_1(q) = \frac{nkT}{2}; \quad \delta_2(q) = \frac{b}{2} \sqrt{\frac{\mu}{mk \Delta P}}. \quad (8)$$

Достоинством выражений (5) – (7) является то, что входящие в них коэффициенты: a , V , $\delta_1(q)$ и $\delta_2(q)$ можно определить в результате опытных нагнетаний, тогда как их определяющие параметры в шахтных условиях оперативно определены быть не могут.

Справедливость полученных соотношений, характеризующих зависимость активности АЭ от давления нагнетания, и для определения оптимальных параметров нагнетания методом АЭ была проверена экспериментально.

На Рис. 2 приведены зависимости темпа нагнетания q и активности АЭ J от давления нагнетания P , полученные при гидрорыхлении пласта Петровского-Тонкого на шахте «Анжерская» при следующих параметрах: кривая J_1 - при длине скважины 6 м и глубине герметизации 5 м, кривая J_2 - соответственно при 4 и 3,5 м.

Из рисунка видно, что в обоих случаях процесс распространения трещин начался при давлении равном 8 МПа. Однако последующий ход кривых заметно отличается. Отличие, по-видимому,

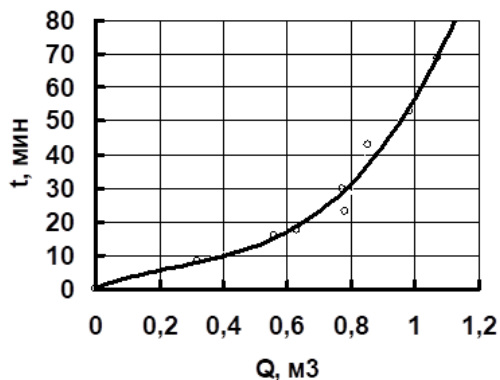


Рис. 4. Зависимость времени t гидрорыхления до прорыва воды в выработку от объема Q поступившей в шпур воды

Fig. 4. Relation between time of hydraulic loosening t before water burst into the working and the volume of water Q which has been supplied into the borehole

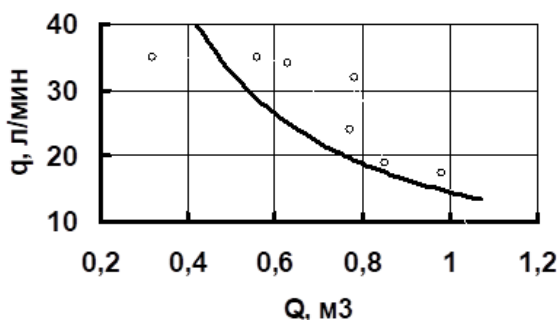


Рис. 5. Зависимость темпа q при гидрорыхлении пласта от объема Q поступившей в шпур воды до ее прорыва в выработку

Fig. 5. Relation between the speed q during the seam hydraulic loosening and the volume Q of water supplied into the borehole before its burst into the working

обусловлено тем, что развивающиеся трещины из скважины, загерметизированной на глубину 3,5 м, быстро достигли трещиноватой призабойной зоны, вследствие чего возросла доля воды, фильтрующейся в эти трещины. Это привело к падению давления воды в трещинах и снижению активности АЭ по сравнению с нагнетанием в скважину, глубина герметизации которой составляет 5 м.

На Рис. 2 представлен график зависимости скорости нагнетания жидкости q насосной установкой УН-35 от давления нагнетания, полученный одновременно со снятием кривой J_1 . Из сравнения радиуса кривизны обеих кривых в области начала принудительного развития трещин ($P = 8$ МПа) следует, что мониторинг гидрообработки методом АЭ позволяет гораздо точнее, чем анализ индикаторной кривой вида $q = q(P)$ определять критическое значение давления нагнетания, при котором начинается процесс развития трещин.

На рис. 3 представлены графики зависимости активности АЭ и объема поступившей в скважину воды до ее прорыва по растущим трещинам на забой от времени при разном темпе нагнетания.

Данные получены при гидрорыхлении пласта Коксового на шахте «Анжерская». Они свидетельствуют, во-первых, о том, что эта зависимость имеет убывающий характер во времени, как это и предсказано полученной аналитическим путем зависимостью вида (4). Во-вторых, видно, что при максимальном темпе нагнетания регистрируется максимальная активность АЭ, но минимальный объем закачанной воды до ее быстрого прорыва на забой. При минимальном темпе нагнетания регистрируется минимальная активность АЭ и максимальные время и объем закачанной воды до ее прорыва по растущим трещинам на забой.

На рис. 4 и рис. 5 показаны зависимости темпа и времени гидрорыхления, построенные по результатам опытных нагнетаний при гидрорыхлении пласта Коксового на шахте «Анжерская».

По полученным данным методом наименьших квадратов определили коэффициенты a и V в выражениях (5) и (6) и получили следующие упрощенные выражения для определения оптимального времени нагнетания и оптимального темпа нагнетания для гидрорыхления пласта Коксового через шпур длиной 6 м, загерметизированные на глубину от 4,5 до 5 м:

$$t_{opt} = 53,3(Q-0,01)^2, \text{ мин} \quad (9)$$

$$q_{opt} = \frac{q}{53,3(Q-0,01)^2}, \text{ л/мин.} \quad (10)$$

Здесь размерность $Q - \text{м}^3$.

Значения коэффициентов корреляции $r_k = 0,98$ для кривой вида (9), и $r_k = 0,62$ для кривой вида (10) свидетельствуют о том, что полученные функциональные зависимости достаточно хорошо описывают реально существующие связи между рассматриваемыми величинами.

Таким образом, для определения оптимальных гидравлических параметров гидрорыхления пласта при мониторинге процесса гидрообработки методом АЭ сначала необходимо по результатам нагнетания определить коэффициенты в уравнениях (5) и (6). Зная их для требуемого объема закачки жидкости в скважину, с помощью уравнения (6) следует определить оптимальную скорость нагнетания. Затем, с помощью уравнения (7) для оптимального темпа нагнетания определяется оптимальная временная зависимость активности АЭ.

В последующем мониторинг гидрорыхления на данном участке пласта сводится к экспериментальному установлению такого давления и темпа нагнетания, при которых временная зависимость активности АЭ совпадает с оптимальной.

Нам представляется, что изложенная методика может быть применима для организации

мониторинга процесса гидрорасчленения угольного пласта, осуществляемого с земной поверхности через скважину с целью его заблаговременной дегазации [12]. В этом случае величина l_T определяется размерами подвергаемого гидрорасчленению участка угольного пласта по простиранию, а коэффициенты a_1 , a_2 и V могут быть ориентировочно определены по результатам опытного гидрорыхления этого же пласта из выработки, примыкающей к участку, на котором планируется осуществить гидрорасчленение.

Для контроля гидроразрыва кровли методом АЭ на начальном этапе отработки лавы необходимо провести экспериментальный гидроразрыв. При этом контроль процесса нужно осуществлять одновременно путем подсчета числа импульсов АЭ I_3 и регистрации появления жидкости в соседней скважине, пробуренной на расстоянии l_3 от скважины, из которой осуществляется гидроразрыв.

Для обеспечения требуемого для обрушения кровли направления развития трещины с помощью «Методики выбора рациональных параметров заложения «зародышевой» трещины с целью оптимального регулирования процессами посадки труднообрушаемой кровли угольного пласта» определяется местоположение «зародышевой» трещины, направление ее развития и примерная длина до выхода вершины на поверхность выработки, из которой бурился шпур для осуществления гидроразрыва.

По формуле (3) определяют в данном опыте значение коэффициента k для данного участка горного массива k_3 :

$$k_3 = \frac{l_3}{\ln(\frac{\rho l_3}{l_0})}. \quad (11)$$

Здесь параметр $\rho \in (1, 2)$. Если трещина развивается в условиях равномерного гидростатического давления ($\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$), то трещина может одинаково развиваться во всех направлениях. При этом $\rho = 2$. Если же $\sigma_1 \neq \sigma_2 \neq \sigma_3$, то будет существовать область преимущественных направлений роста. В этом случае будет $\rho < 2$.

В дальнейшем в предположении о примерном постоянстве коэффициента k_3 и начальной длины искусственно создаваемой трещины l_0 для кровли над данной лавой можно оценивать длину l произведенной в процессе очередного гидроразрыва трещины по зарегистрированному числу импульсов АЭ I по формуле:

$$l = l_0 e^{I/k_3}. \quad (12)$$

Предположив, что форма растущей трещины близка к круговой, можно следующим образом оценить ее площадь S :

$$S \approx \frac{\pi}{4} l_0^2 \exp(2I/k_3). \quad (13)$$

Полученные результаты явились основанием для разработки экспресс-метода определения наиболее приемлемого способа гидрообработки угольного пласта по акустической эмиссии и методики оценки направления распространения и

площади растущей трещины направленного гидроразрыва по зависимостям параметров АЭ, давления и темпа нагнетания от времени.

Сущность метода определения наиболее приемлемого способа гидрообработки угольного пласта по акустической эмиссии

Время увлажнения в способах гидрообработки, реализующих режимы фильтрации и гидрорыхления, определяется водопроницаемостью угля. Поэтому одним из основных параметров при обосновании способа увлажнения пласта является технологически допустимое время для осуществления способа. При региональной гидрообработке пласта оно может составлять несколько месяцев, при локальной – чаще всего несколько часов, желательно в ремонтную смену.

Будем полагать, что способ противовыбросно-ударной гидрообработки пласта при ведении выработки по углю является приемлемым и его гидравлические параметры (давление и темп нагнетания) будут оптимальными, если соответствующий данному способу контрольный параметр (5÷6-процентная влажность угля - при низконапорном и глубинном увлажнении (пропитке) и гидрорыхлении) достигается за технологически допустимое время.

Выбор приемлемого способа гидрообработки и определение его оптимальных гидравлических параметров удобно осуществить по результатам опытных нагнетаний воды в пласт, в процессе которых осуществляется мониторинг методом АЭ режима гидрообработки и измерение гидравлических параметров.

Исходя из надежности осуществления способов гидрообработки, первоначально целесообразно устанавливать возможность применения за технологически допустимое время (приемлемость) тех из них, которые осуществляются в режиме фильтрации. При неприемлемости этих способов следует установить приемлемость гидрорыхления. При неприемлемости гидрорыхления следует применить иной способ предотвращения ДЯ. Одним из них может быть забытый в настоящее время гидротжим пласта.

Опытное нагнетание следует проводить в ремонтную смену, когда отсутствуют интенсивные акустические шумы от работающего оборудования в выработке, призабойное пространство которой подлежит увлажнению. Осуществляют его следующим образом. В 10-15 м от устья скважины в борт выработки бурится шпур на глубину 1,0-1,5 м, в который устанавливается геофон прибора контроля АЭ. Прибор должен осуществлять как минимум амплитудную и частотную селекцию импульсов АЭ, образующихся при скачкообразном росте трещин под действием нагнетаемой жидкости, на фоне возможных непрерывных акустических шумов, излучаемых работающим горным оборудованием в

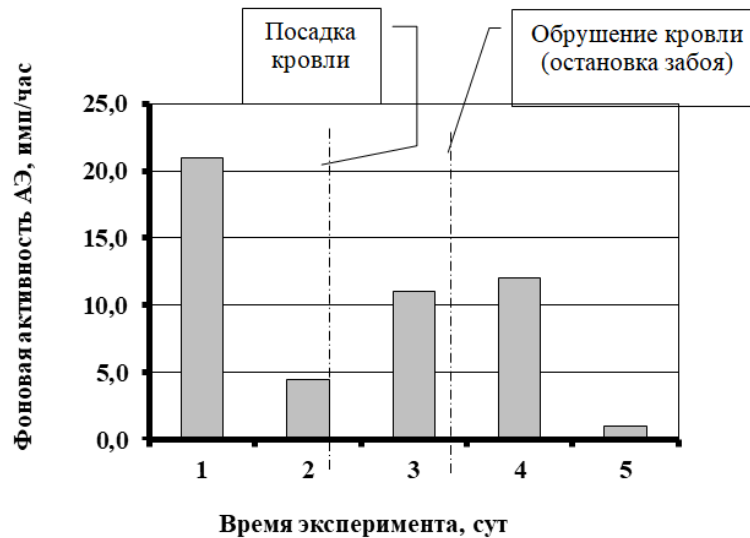


Рис. 6. Фоновая активность АЭ в лаве пласта Андреевского шахты «Анжерская» в процессе управления кровлей
 Fig. 6. AE background activity in the longwall face of seam Andreevsky in "Anzherskaya" mine during roof control

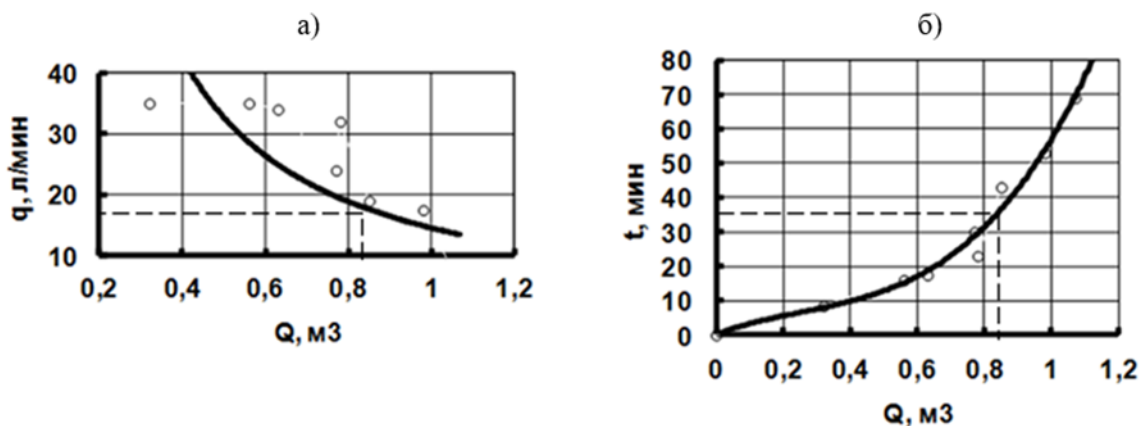


Рис. 7. Пример зависимости темпа q (а) и времени t (б) нагнетания до прорыва воды в выработку от объема Q поступившей в шпур воды при гидрорыхлении пласта Коксового на шахте «Анжерская»
 Fig. 7. Example of relationship between the speed q (a) and time t (б) of pumping before water burst into the working and the volume Q of water supplied into the borehole during hydraulic loosening of Koksovy seam in "Anzherskaya" mine

соседних выработках или производимых в процессе выполнения ремонтных работ в контролируемой выработке. Характеристики прибора могут быть аналогичными УКАЭ-1 [20].

Перед нагнетанием жидкости в течение 20-30 мин осуществляют измерение фоновой активности АЭ (числа импульсов АЭ в интервал времени, например, в 2-х минутный), обусловленной развитием трещин в призабойном пространстве под действием лишь горного давления. Это особенно актуально при гидрообработке призабойного пространства вблизи очистной выработки, где величина фоновой активности АЭ сильно зависит от длины зависающей кровли. В качестве примера на рис. 6 показана активность АЭ до и после посадки кровли,

замеренная в лаве пласта Андреевского шахты «Анжерская» в Кузбассе.

Затем начинают нагнетание с плавным увеличением темпа нагнетания путем слива части жидкости с высоконапорного выхода насоса на его вход (всас). При этом регистрируют возрастающее давление жидкости и активность АЭ. При ее увеличении над фоновым значением на 1-2 имп/инт регистрируют темп нагнетания, который принимают за оптимальный для осуществления способов гидрообработки в режиме фильтрации. В этом убеждаются в течение нескольких последующих минут контроля АЭ.

Зная темп нагнетания, непрерывно контролируемый счетчиком-расходомером, оценивают в

соответствии с [3] время, требуемое для осуществления увлажнения прилегающего к скважине объема угольного пласта. Если оно не превышает технологически допустимое, то гидрообработка в режиме фильтрации в данном забое считается приемлемой, а темп нагнетания - оптимальным.

Если окажется, что оптимальное значение темпа нагнетания меньше производительности насосной установки (у насосов с жесткой рабочей характеристикой темп нагнетания практически сохраняется постоянным), то для исключения слива части жидкости с выхода на всас можно увеличить фильтрующую часть скважины или подключить к насосу одновременно две скважины. Подключение большего числа скважин существенно усложняет процесс нагнетания и поэтому не рекомендуется.

Если установленное время нагнетания в режиме фильтрации превышает технологически допустимое, переходят к определению приемлемости гидрорыхления пласта. Для этого в конкретном забое на данном пласте проводят серию опытных нагнетаний при различном темпе закачки жидкости в скважину. При этом регистрируют темп нагнетания и активность АЭ во времени.

Как показано выше (формулы (4), (7) и рис. 3), зависимость активности АЭ от времени имеет максимальное значение на начальном этапе нагнетания. Если активность АЭ, по крайней мере на начальном этапе нагнетания, превышает фоновое значение, то это свидетельствует о том, что гидрообработка осуществляется в режиме гидрорыхления.

После осуществления серии нагнетаний при различном темпе нагнетания строят зависимости темпа и времени нагнетания до прорыва жидкости от объема поступившей в скважину жидкости. Для выбранной технологической схемы гидрорыхления угольного пласта определяют в соответствии с [2, 3] необходимый объем закачки жидкости в скважину до ее прорыва на забой. На графике зависимости времени нагнетания от объема поступившей в шпур (скважину) жидкости для требуемого объема закачки определяют требуемое время нагнетания. Если оно меньше или равно технологически допустимому времени, то гидрорыхление на данном участке пласта считается приемлемым при темпе нагнетания, соответствующем требуемому объему закачки жидкости в скважину. Соответствующая требуемому объему нагнетания величина максимальной начальной активности АЭ будет являться оптимальной для осуществления гидрорыхления на данном участке пласта. Мониторинг этой величины при последующих нагнетаниях позволит обеспечивать оптимальный режим гидрорыхления.

Пример последовательности операций для определения приемлемости гидрорыхления пласта и его оптимальных параметров приведен на рис. 7.

Допустим, что в соответствии с Рекомендациями [3] нам в загерметизированный шпур для

локального противовыбросного гидрорыхления пласта нужно закачать $0,85 \text{ м}^3$ воды.

По графику Рис. 7б находим, что на это требуется 35 мин. Если это время не превышает технологически допустимое, по графику Рис. 7а определяем соответствующий темп нагнетания. У нас это 15 л/мин.

Если окажется, что оптимальное значение темпа нагнетания меньше производительности насосной установки, то, как и в случае с режимом фильтрации, для исключения слива части жидкости с выхода на всас можно увеличить фильтрующую часть шпура или подключить к насосу одновременно два шпура.

Сущность метода оценки направления распространения и площади растущей трещины направленного гидроразрыва по зависимостям параметров АЭ, давления и темпа нагнетания от времени

Направление распространения трещины направленного гидроразрыва определяется большим числом параметров, характеризующих напряженное состояние призабойного пространства в окрестности «зародышевой» трещины. Зная эти параметры, траекторию распространения скачкообразно растущей трещины можно рассчитать с помощью специально разработанных программ для ЭВМ [21, 22]. Определить все эти параметры в шахтных условиях невозможно. Часть из них, таких как глубина залегания пласта, прочность породы и угля, мощность угольного пласта, ложной и основной кровли, угол наклона пласта и «зародышевой» трещины и ряд других известны с определенной погрешностью. Однако такой параметр как плотность энергии на разрыв в окрестности вершины растущей трещины неизвестен и определить его в шахте невозможно. Поэтому для получения недостающих знаний о параметрах горного массива предложено применять опытное нагнетание в «зародышевую» трещину с контролем процесса роста трещины методом АЭ.

Как видно из выражения (3), параметр k , определяющий число «скачков» растущей трещины, зависит от большого числа параметров, измерить которые в шахте невозможно. Однако подсчитать число импульсов АЭ, равное числу «скачков», технически довольно просто. Зная расположение и начальную длину «зародышевой» трещины и определив визуально место появления жидкости на поверхности борта выработки, легко оценить длину произведенной в процессе нагнетания жидкости трещины и с помощью выражения (11) рассчитать параметр k_s для данного участка горного массива. Затем можно с помощью выражений (12) и (13) оценивать длину и площадь произведенной трещины.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №17-17-01143).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Инструкция по прогнозу динамических явлений и мониторингу массива горных пород при отработке угольных месторождений». Утверждены приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 15.08.2016 г. №339. – 129 с.
2. Инструкция по безопасному ведению горных работ на пластах, опасных по внезапным выбросам угля, породы и газа (РД 05-350-00). Предупреждение газодинамических явлений в угольных шахтах (Сборник документов). – М.: Государственное предприятие НТЦ по безопасности в промышленности Госгортехнадзора России, 2000. – С. 120-303.
3. Руководство по безопасности «Рекомендации по безопасному ведению горных работ на склонных к динамическим явлениям угольных пластах». Утверждены приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 21.08.2017 г. №327. –89 с.
4. Купавых К. С., Шипулин А. В. Опробование импульсного способа дегазации угольных пластов // Горный журнал. 2018. №5. – С. 78-82.
5. Cooley W. C. Rock breakage by pulsed high pressure water jets // Proceeding of the 1st International Symposium on Jet Cutting Technology. – Cranfield, 1972. P. 125-132.
6. Сластунов С. В., Ютяев Е. П., Мазаник Е. В., Ермак Г. П. Исследование эффективности усовершенствованной технологии подземного гидроразрыва угольного пласта для его дегазации // Горный журнал. 2018. №1. – С. 83-87.
7. Jeffrey R. G., Boucher C. Sand Propped Hydraulic Fracture Stimulation of Horizontal In-seam Gas Drainage Holes at Dartbrook Coal Mine // Coal Operators' Conference, University of Wollongone & the Australasian Institute of Mining and Metallurgy (Wollongon, February 4-6, 2004). Wollongon: University of Wollongone, 2004. – P. 169-179.
8. Haijun Guo, Yuanping Cheng, Liang Wang, Shougig Lu, Kan Jin. Experimental study on the effect of moisture on low-rank coal adsorption characteristics // Journal of Natural Gas Science and Engineering. 2015. Vol. 24. P.245-251.
9. Курленя В.М., Сердюков С.В. Физико-технические проблемы интенсификации подземной дегазации угольных пластов методом гидроразрыва // 50 лет Российской научной школе комплексного освоения недр Земли. Материалы Международной научно-практической конференции. 13-16 ноября 2017. – М.: ИПКОН РАН, 2017. – С. 191-196.
10. Клишин В.И., Опрук Г.Ю., Тациенко А.Л. Применение поинтервального гидроразрыва угольного пласта для интенсификации пластовой дегазации // Научные технологии разработки и использования минеральных ресурсов: науч. журнал / Сиб. гос. ун-т; под общей ред. В.Н. Фрянова. – Новокузнецк, 2016. – №2. с. 33-39.
11. Чернов О. И, Пузырев В. Н.. Прогноз внезапных выбросов угля и газа. - М.: «Недра», 1979. – 296 с.
12. Ножкин Н. В. Заблаговременная дегазация угольных месторождений. - М.: Недра, 1979. - 271 с.
13. Бирюков Ю.М. Влияние трещиноватости и гидропроводности выбросоопасного угольного пласта на его площадную обработку через скважины гидрорасчленения с поверхности // Безопасность труда в промышленности. – 2017.-№5.-С 8-16.
14. Гельфанд Ф. М., Журавлев В. П., Поелуев А .П., Рыжих Л. И. Новые способы борьбы с пылью в угольных шахтах. - М.: Недра, 1975. - 288 с.
15. Шадрин А. В. Сейсмоакустическая реакция угольного массива на процесс его гидрообработки // Физ.-техн. пробл. разработки полезных ископаемых, 1983, №6. С. 29-34.
16. Шадрин А.В. Установление связи параметров акустической эмиссии с фильтрационно-коллекторскими свойствами массива и характеристиками насосной установки при гидрообработке кровли и угольного пласта / А.В. Шадрин, В.И. Клишин // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. 2018, №1. – С. 77-87.
17. Инструкция по выбору способа и параметров разупрочнения кровли на выемочных участках. [Текст] / колл. авт.// Л.: ВНИМИ. – 1991. – 102 с.

18. Клишин В.И. Опыт применения направленного гидроразрыва основной кровли при выходе механизированного комплекса из монтажной камеры / - В.И. Клишин, Г.Ю. Опрुक, А.В. Сентюрев, А.В. Николаев // Уголь, 2015, № 11.с. 12-16.
19. Насосы типа Т [Электронный ресурс]. URL: <http://promenergochim.ru/static/doc/0000/0000/0217/217186.4fo7ytayvm.pdf> (дата обращения 21.04.2017).
20. Шадрин, А. В., Зыков В. С. Акустическая эмиссия выбросоопасных пластов. Обзорная информация ЦНИЭИуголь. – М., 1991. – 43 с.
21. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018610989. Расчет траектории движения трещины в массиве горных пород под действием внутреннего давления, создаваемого жидкостью / Н.В. Черданцев, А.В. Шадрин // Реестр программ для ЭВМ, дата регистрации 19.01.2018 г.
22. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018619846. Расчет траектории трещины, распространяющейся под действием внутреннего давления жидкости в прочных породах массива, вмещающего выработку, пройденную по угольному пласту / Н.В. Черданцев, А.В. Шадрин // Реестр программ для ЭВМ, дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 13.08.2018 г.

REFERENCES

1. Federal'nye normy i pravila v oblasti promyshlennoj bezopasnosti «In-strukciya po prognozu dinamicheskikh yavlenij i monitoringu massiva gornyh porod pri otrabotke ugol'nyh mestorozhdenij». Utverzhdeny prikazom Federal'noj sluzhby po ekologicheskomu, tekhnologicheskomu i atomnomu nadzoru ot 15.08.2016 g. №339. – 129 s.
2. Instrukciya po bezopasnomu vedeniyu gornyh работ na plastah, opasnyh po vnezapnym vybrosam uglya, porody i gaza (RD 05-350-00). Preduprezhdenie gazodina-micheskikh yavlenij v ugol'nyh shahtah (Sbornik dokumentov). – М.: Gosudarstvennoe predpriyatie NTC po bezopasnosti v promyshlennosti Gosgortekhnadzora Rossii, 2000. – S. 120-303.
3. Rukovodstvo po bezopasnosti «Rekomendacii po bezopasnomu vedeniyu gor-nyh работ na sklonnyh k dinamicheskim yavleniyam ugol'nyh plastah». Utverzhdeny prikazom Federal'noj sluzhby po ekologicheskomu, tekhnologicheskomu i atomnomu nadzoru ot 21.08.2017 g. №327. –89 s.
4. Kupavyh K. S., SHipulin A. V. Oprobovanie impul'snogo sposoba degazacii ugol'nyh plastov // Gornyj zhurnal. 2018. №5. – S. 78-82.
5. Cooley W. C. Rock breakage by pulsed high pressure water jets // Proceeding of the 1st International Symposium on Jet Cutting Technology. – Cranfield, 1972. P. 125-132.
6. Slastunov S. V., YUtyaev E. P., Mazanik E. V., Ermak G. P. Issledovanie ef-fektivnosti usovershenstvovannoj tekhnologii podzemnogo gidrorazryva ugol'nogo plasta dlya ego degazacii // Gornyj zhurnal. 2018. №1. – S. 83-87.
7. Jeffrey R. G., Boucher C. Sand Propped Hydraulic Fracture Stimulation of Horizon-tal In-seam GasvDrainage Holes at Dartbrook Coal Mine // Coal Operators' Conference, Uni-versity of Wollongone & the Australasian Institute of Mining and Metallurgy (Wollongon, February 4-6, 2004). Wollongon: University of Wollongone, 2004. – P. 169-179.
8. Haijun Guo, Yuanping Cheng, Liang Wang, Shougig Lu, Kan Jin. Experimental study on the effect og moisture on low-rank coal adsorption characteristics // Journal of Natu-ral Gas Science and Engineering. 2015. Vol. 24. P.245-251.
9. Kurlenya V.M., Serdyukov S.V. Fiziko-tekhnicheskie problemy intensivika-cii podzemnoj degazacii ugol'nyh plastov metodom gidrorazryva // 50 let Rossij-skoj nauchnoj shkole kompleksnogo osvoeniya neдр Zemli. Materialy Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii. 13-16 noyabrya 2017. – М.: IPKON RAN, 2017. – S. 191-196.
10. Klishin V.I., Opruk G.YU., Tacienco A.L. Primenenie pointerval'nogo gidrorazryva ugol'nogo plasta dlya intensivikacii plastovoj degazacii // Naukoem-kie tekhnologii razrabotki i ispol'zovaniya mineral'nyh resursov: nauch. zhurnal / Sib. gos. un-t; pod obshej red. V.N. Fryanova. – Novokuzneck, 2016. – №2. s. 33-39.
11. CHernov O. I, Puzyrev V. N.. Prognoz vnezapnyh vybrosov uglya i gaza. - М.: «Nedra», 1979. – 296 s.
12. Nozhkin N. V. Zablagovremennaya degazaciya ugol'nyh mestorozhdenij. - М.: Nedra, 1979. - 271 s.

13. Biryukov YU.M. Vliyanie treshchinovatosti i gidroprovodnosti vybrosoopas-nogo ugol'nogo plasta na ego ploshchadnyuyu obrabotku cherez skvazhiny gidroraschleneniya s poverhnosti // Bezopasnost' truda v promyshlennosti. – 2017.-№5.-S 8-16.
14. Gel'fand F. M., ZHuravlev V. P., Poeluev A .P., Ryzhih L. I. Novye sposo-by bor'by s pyl'yu v ugol'nyh shahtah. - M.: Nedra, 1975. - 288 s.
15. SHadrin A. V. Sejsmoakusticheskaya reakciya ugol'nogo massiva na process ego gidroobrabotki // Fiz.-tenhn. probl. razrabotki poleznyh iskopaemyh, 1983, №6. S. 29-34.
16. SHadrin A.V. Ustanovlenie svyazi parametrov akusticheskoy emissii s fil'-tracionno-kollektorskimi svojstvami massiva i harakteristikami nasosnoj usta-novki pri gidroobrabotke krovli i ugol'nogo plasta / A.V. SHadrin, V.I. Klishin // Vestnik Nauchnogo centra po bezopasnosti rabot v ugol'noj promyshlennosti. 2018, №1. – S. 77-87.
17. Instrukciya po vyboru sposoba i parametrov razuprochneniya krovli na vye-mochnyh uchastkah. [Tekst] / koll. avt.// L.: VNIMI. – 1991. – 102 s.
18. Klishin V.I. Opyt primeneniya napravlennogo gidrorazryva osnovnoj krovli pri vyhode mekhanizirovan-nogo kompleksa iz montazhnoj kamery / - V.I. Klishin, G.YU. Opruk, A.V. Sentyurev, A.V. Nikolaev // Ugol', 2015, № 11.s. 12-16.
19. Nasosy tipa T [Elektronnyj resurs]. URL: <http://promenergochim.ru/static/doc/0000/0000/0217/217186.4fo7ytayvm.pdf> (data obrashche-niya 21.04.2017).
20. SHadrin, A. V., Zikov V. S. Akusticheskaya emissiya vybrosoopasnyh plastov. Obzornaya informaciya CNIEIugol'. – M., 1991. – 43 s.
21. Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii programmy dlya EVM № 2018610989. Raschet traektorii dvizheniya treshchiny v massive gornyh porod pod dej-stviem vnutrennego davleniya, sozdavaemogo zhidkost'yu / N.V. CHerdancev, A.V. SHad-rin // Reestr programm dlya EVM, data registracii 19.01.2018 g.
22. Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii programmy dlya EVM № 2018619846. Raschet traektorii treshchiny, rasprostranyayushchejsya pod dejstviem vnut-rennego davleniya zhidkosti v prochnyh porodah mas-siva, vmeshchayushchego vyrabotku, projdennuyu po ugol'nomu plastu / N.V. CHerdancev, A.V. SHadrin // Reestr programm dlya EVM, data gosudarstvennoj registracii v Reestre programm dlya EVM 13.08.2018 g.

Поступило в редакцию 22.05.2019
Received 22 May 2019