

НОВЫЕ МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ В ГОРНОМ ДЕЛЕ

УДК 622.831.325.3+622.234.573

ЗАЩИТА ДЕЙСТВУЮЩИХ ДЕГАЗАЦИОННЫХ СКВАЖИН ОТ ПОСТУПЛЕНИЯ ВОЗДУХА ИЗ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК

Т. В. Шилова, С. В. Сердюков

*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, E-mail: ss3032yandex.ru,
Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия*

Рассмотрены способ восстановления герметичности действующих дегазационных скважин без их остановки и схема поперечного гидроразрыва призабойной зоны с использованием механического якоря. Показано преимущество схемы с якорем по сравнению с известным способом направленного разрыва на основе щелевого инициатора. Приведены технические решения по защите зоны отбора метана от поступления воздуха из горных выработок.

Угольный пласт, дегазационная скважина, направленный гидроразрыв, непроницаемый экран, предотвращение подсосов воздуха, давление разрыва, скважинное оборудование

Подготовка угольных пластов к выемке предусматривает их долговременную дегазацию с помощью скважин, пробуренных из горных выработок. Эффективность работ снижается при поступлении воздуха в зону отбора метана через горные породы. Для борьбы с этим явлением используют противодиффузионные экраны. Известные решения направлены на обустройство новых скважин в проницаемых пластах, когда другие способы герметизации не дают требуемых результатов [1–3].

В низкопроницаемых углях применяют скважины обычной конструкции, что вполне оправдано в большинстве случаев. Проблемы возникают при нарушении герметичности отдельных скважин, доработка конструкции которых невозможна по техническим или экономическим причинам.

В данной статье предложены способ и средства защиты действующих дегазационных скважин от поступления воздуха без остановки и внесения изменений в их конструкцию.

Способ восстановления герметичности действующей скважины. Дегазационная скважина состоит из зон герметизации и отбора метана. Типовое обустройство ее герметизации включает разбуривание части скважины около устья до диаметра 115–132 мм, установку обсадной трубы внутренним диаметром 75–100 мм, заполнение затрубного пространства твердеющим составом, перекрытие обсадной трубы фланцем с отводом для подключения к системе дегазации шахты (рис. 1).

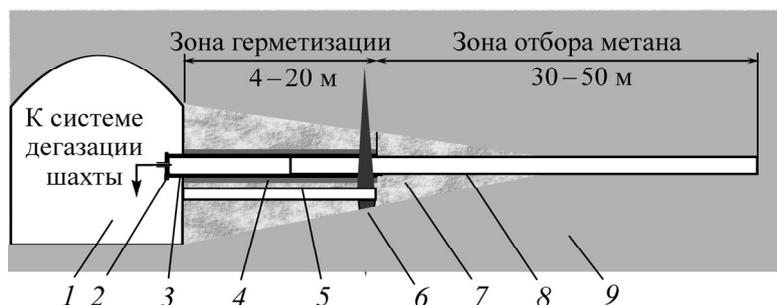


Рис. 1. Схема действующей дегазационной скважины и ее защиты от поступления воздуха: 1 — горная выработка; 2 — фланец с отводом к системе дегазации шахты; 3 — обсадная труба; 4 — затрубное пространство, заполненное изоляционным составом; 5 — дополнительный шпур; 6 — противоздушный экран; 7 — область фильтрации воздуха через горные породы в зону отбора метана; 8 — зона депрессионного воздействия на пласт (зона отбора метана); 9 — породный массив

Глубина обсаженного участка зависит от трещиноватости пород вокруг горной выработки и составляет в ненарушенном массиве 4–10 м с увеличением до 20 м и более вблизи выработанных пространств [4].

Создать в действующей дегазационной скважине противофильтрационный экран по технологии [1–3] технически сложно. Для этого необходимо остановить и заглушить скважину, перфорировать обсадную трубу, провести гидроразрыв, вновь запустить скважину в работу. Поэтому при значительных подсосах воздуха скважину, как правило, останавливают или поверхность горной выработки вокруг ее устья покрывают изолирующим составом [4]. И то и другое снижает рентабельность работ. Так, отключение скважины, рассчитанной на эксплуатацию в течение 6–12 мес, ведет к финансовым потерям в объеме буровых работ и стоимости ее обустройства. Изоляция большой площади поверхности горной выработки требует дополнительных материалов, к тому же не всегда эффективна.

Для решения проблемы мы предлагаем создавать противоздушный экран в неглубоком шпуре малого диаметра, пробуренном параллельно действующей дегазационной скважине на небольшом расстоянии от нее (рис. 1). Полость экрана формируется направленным гидроразрывом параллельно к поверхности горной выработки.

Что касается глубины заложения экрана, то чем ближе он к зоне отбора метана, тем меньше площадь сечения фильтрационного потока воздуха, который нужно перекрыть, а значит, меньше объем закачки дорогостоящего полимера.

Создание защитного экрана в породном массиве. Формирование трещины поперек ствола дегазационной скважины предполагает применение специальных способов направленного гидроразрыва.

Известен способ поперечного гидроразрыва горных пород за счет создания на стенках скважины кольцевой щели [5]. Дополнительная технологическая операция существенно увеличивает стоимость и трудоемкость работ, но без щелевого инициатора получить поперечный разрыв, как правило, не удастся. Причина — особенности распределения напряжений на стенках скважины.

На рис. 2а показана схема гидроразрыва горных пород современным скважинным устройством, состоящим из двух надувных пакеров, соединенных между собой силовой тягой. На рис. 2б приведена устаревшая схема гидроразрыва с жесткими герметизаторами, например цементными мостами, вклеенными в породу.

Если пренебречь проникновением рабочей жидкости в горную породу, то в отсутствии естественных трещин получить разрыв поперек оси скважины по схеме рис. 2а невозможно, поскольку области растяжения породы вдоль оси расположены вне зоны разрыва.

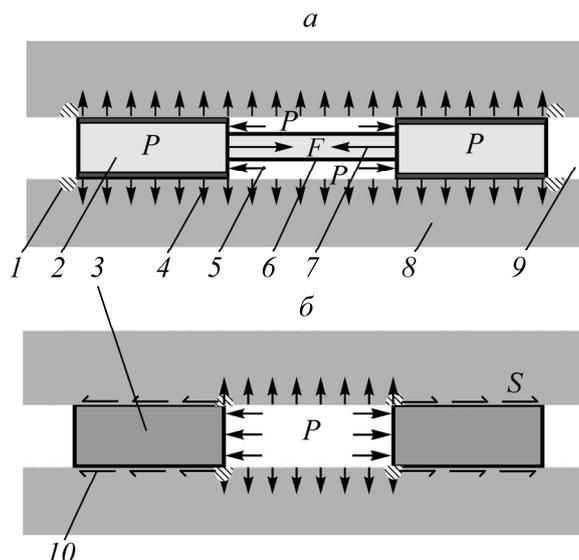


Рис. 2. Схемы гидроразрыва: *a* — устройством с двумя надувными пакерами, соединенными между собой силовой тягой; *б* — устройством с двумя жесткими герметизаторами; 1 — область растяжения породы вдоль оси скважины; 2 — надувной пакер; 3 — жесткий герметизатор; 4 — радиальное нагружение стенок скважины давлением жидкости P ; 5 — осевое нагружение пакера; 6 — силовая тяга, соединяющая пакеры; 7 — реакция тяги F на осевое нагружение пакера; 8 — породный массив; 9 — необсаженная скважина; 10 — касательное нагружение стенок скважины S на контакте породы с герметизатором

Иная ситуация возникает при выполнении работ по схеме рис. 2б. Нагружение стенок скважины в этом случае задается следующими граничными условиями [6]:

1) зона разрыва:

$$\begin{aligned} \sigma_r &= -P \quad \text{для } |z| < L, \quad r = R, \\ \sigma_r &= 0 \quad \text{для } |z| > L, \quad r = R; \end{aligned}$$

2) герметизатор:

$$\begin{aligned} \tau_{rz} &= -P \cdot R / 2L_G \quad \text{для } L + L_G > |z| > L, \quad r = R, \\ \tau_{rz} &= 0 \quad \text{для } L > |z| > L + L_G, \quad r = R, \end{aligned}$$

где R — радиус скважины; L_G — длина герметизатора; $2L$ — длина зоны разрыва; $(z; r; \theta)$ — цилиндрическая система координат с осью z вдоль оси скважины.

Анализ напряжений на стенке скважины при таких граничных условиях выполнен Кехлем [6]. На рис. 3 приведены полученные им графики распределения напряжений σ_z ; σ_θ на контуре $r = R$ при $L = 10R$ и $L_G = 15R$ [6].

Видно, что при выполнении работ по схеме рис. 2б растягивающие напряжения σ_z возникают на краях зоны разрыва и обусловлены они в основном влиянием радиального нагружения. Максимальное значение растяжения σ_z на контуре $r = R$ равно $0.94P$, что немногим меньше значения σ_θ (см. рис. 3). При таком распределении напряжений характер разрыва зависит от соотношения внешнего сжатия пород вдоль и поперек оси z , что в зоне влияния горной выработки ведет к преимущественному формированию трещин параллельно ее поверхности. Используя известный критерий гидроразрыва породного массива [7], получим приближенное условие создания противовоздушного экрана в требуемой плоскости по схеме рис. 2б:

$$1.06|\sigma_3| + 0.06T < 3|\sigma_2| - |\sigma_1|, \quad (1)$$

где T — прочность породы на разрыв [6]; σ_3 — сжатие пород внешним полем напряжений вдоль оси z ; σ_1, σ_2 — поперек нее ($|\sigma_2| \leq |\sigma_1|$). Отметим, что в непрочных породах, например в углях и алевролитах, условие (1) всегда выполняется в окрестности горных выработок. Напротив, формирование поперечной трещины по схеме рис. 2а является редким исключением даже при $|\sigma_3| < |\sigma_2|$ [8].

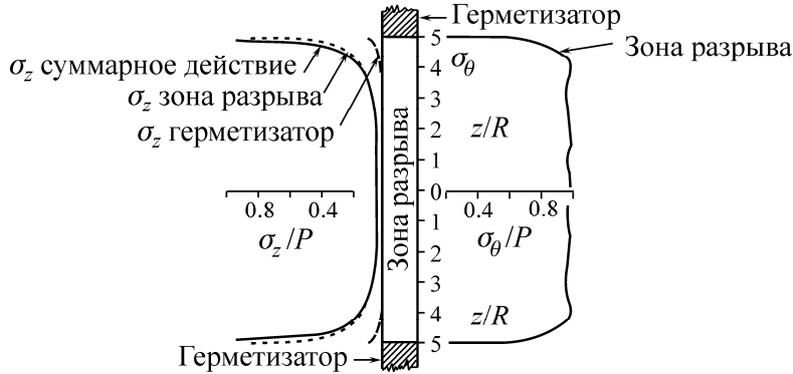


Рис. 3. Распределение напряжений $\sigma_z; \sigma_\theta$ на контуре $r = R$ при гидроразрыве по схеме рис. 2б: $L = 10R; L_G = 15R$ [6]

Таким образом, создание защитного экрана по схеме рис. 2б возможно, но эта схема недостаточно технологична. Необходимо либо клеить герметизатор в глубине скважины, либо формировать его с помощью твердеющего состава.

Нами разработан другой подход, основанный на развитии однопакерных систем гидроразрыва призабойных участков необсаженных скважин. На рис. 4 приведены традиционная и предлагаемая схемы выполнения поперечного гидроразрыва.

Схема со щелевым инициатором (рис. 4а) соответствует известному способу направленного гидроразрыва, применяемому для разупрочнения труднообрушаемой кровли угольного пласта [5]. Опыт работ показывает, что даже при использовании кольцевых щелевых инициаторов радиусом $R_i = 2.5R$ давление разрыва P_C крепких песчаников на глубинах 150–200 м может достигать 30–35 МПа. Для таких пород иницирующая щель может применяться для снижения значения P_C .

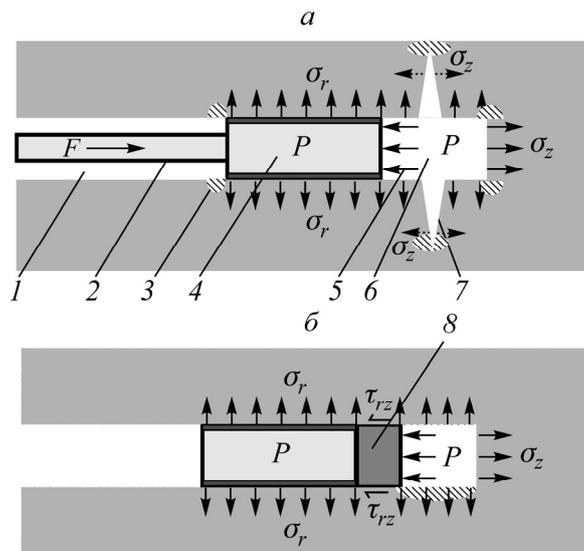


Рис. 4. Схемы призабойного гидроразрыва однопакерным устройством: а — со щелевым инициатором и опорой пакера на колонну труб; б — с якорной системой; 1 — скважина; 2 — колонна труб; 3 — область растяжения породы по оси z ; 4 — надувной пакер; 5 — осевая нагрузка на пакер; 6 — зона разрыва; 7 — кольцевая иницирующая щель; 8 — якорная система

Давление гидроразрыва углей и алевролитов значительно меньше (7–10 МПа), и инициатор для его снижения необязателен.

Чтобы получить поперечную трещину без инициатора, предлагаем выполнять гидроразрыв с использованием якоря, площадь сцепления которого со стенками скважины мала (см. рис. 4б). Это обеспечивает мультипликативный эффект преобразования осевого нагружения пакера силой $\pi R^2 P$ в касательное нагружение стенок скважины $S > P$.

Сравним между собой схемы с иницирующей щелью и якорем по давлению разрыва P_C . Воспользуемся для этого коэффициентами интенсивности напряжений для дисковых трещин, схемы нагружения которых показаны на рис. 5.

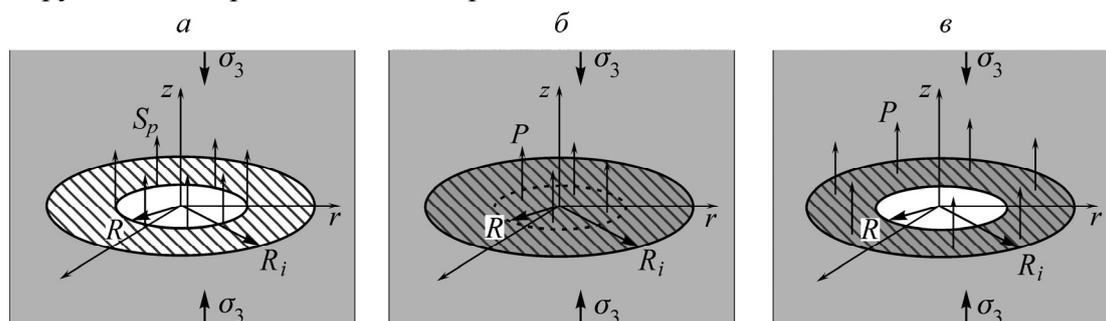


Рис. 5. Схемы нагружения дисковых трещин: *a* — силой, распределенной по окружности; *б* — внутренним давлением, приложенным к поверхности трещины; *в* — внутренним давлением, приложенным к кольцевому участку поверхности трещины.  — трещина;  — нагруженный участок поверхности трещины

Разрыв со щелевым инициатором на забое (рис. 4а) соответствует нагружению трещины по схемам рис. 5б, в. Коэффициент интенсивности напряжений K_I в этом случае дается выражением [9]

$$K_I = 2(P - |\sigma_3|) \left(\sqrt{\frac{R_i}{\pi}} + \sqrt{\frac{R_i^2 - R^2}{\pi R_i}} \right), \quad (2)$$

где R_i — радиус иницирующей щели.

Для схемы с якорем (рис. 4б) появляется дополнительное нагружение, обусловленное действием силы $P \cdot \pi R^2$, распределенной по окружности радиуса R [9]. В этом случае $S_p = P \cdot \frac{R}{2}$ (см. рис. 5а) и коэффициент интенсивности напряжений равен

$$K_I = (P - |\sigma_3|) \left(\sqrt{\frac{R + l_0}{\pi}} + \sqrt{\frac{(R + l_0)^2 - R^2}{\pi (R + l_0)}} \right) + \frac{PR^2}{\sqrt{\pi (R + l_0)[(R + l_0)^2 - R^2]}}, \quad (3)$$

где l_0 — глубина техногенных трещин, возникающих на стенках скважины при ее бурении. В соответствии с работой [8] глубина таких трещин составляет около 10 мм.

На рис. 6 приведены результаты расчета давления P_C по формулам (2), (3) для скважин диаметром 44–110 мм. Представленные графики показывают, что давление разрыва по схеме с якорем ниже, чем по схеме со щелевым инициатором для всех рассматриваемых значений R . Характер зависимости сохраняется и в прочных породах, для которых $K_{IC} \approx 1.5 \text{ МН}\cdot\text{м}^{-1/2}$.

По мере роста трещины давление, необходимое для ее распространения, меняется. Для трещин малых размеров, низких темпов нагнетания рабочей жидкости и проницаемости пород падением давления рабочей жидкости вдоль трещины можно пренебречь. В этом случае для оценки давления распространения трещины P_f также могут быть использованы формулы (2), (3).

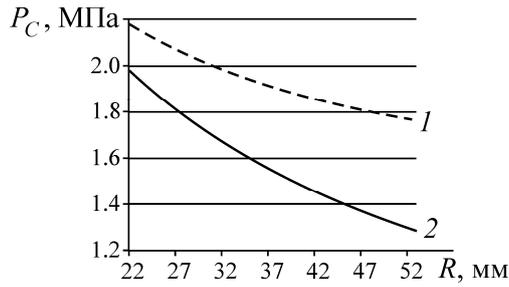


Рис. 6. Зависимость давления разрыва скважины от ее радиуса при $K_{IC} = 0.3 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$, $|\sigma_3| = 1.0 \text{ МПа}$: 1 — разрыв по схеме со щелевым инициатором радиусом $R_i = 2.5R$; 2 — разрыв по схеме с якорем при глубине техногенной трещины 10 мм

При $l_0 \ll R$ надо учитывать влияние свободной поверхности скважины и малую площадь кольцевой трещины. Здесь вместо дисковой трещины можно взять модель краевой трещины, нагруженной либо внутренним давлением P (вместо схемы рис. 5в), либо сосредоточенной силой S_p в точке выхода на поверхность (вместо схемы рис. 5а).

Соответствующие коэффициенты интенсивности напряжений задаются следующими формулами [10, 11]:

$$K_I \approx 1.1215(P - \sigma_3)\sqrt{\pi l_0},$$

$$K_I \approx 0.4118S_p\sqrt{\pi/l_0}.$$

Расчетные графики P_f от радиуса трещины R_C для разных схем поперечного гидроразрыва приведены на рис. 7.

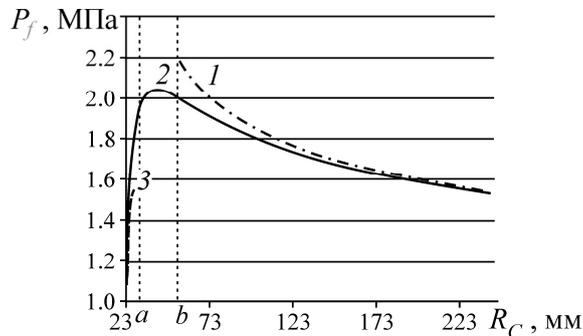


Рис. 7. Давление распространения коротких поперечных трещин в зависимости от их радиуса при $K_{IC} = 0.3 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$, $|\sigma_3| = 1.0 \text{ МПа}$, $R = 22 \text{ мм}$: 1 — разрыв по схеме со щелевым инициатором $R_i = 2.5R$; 2 — разрыв по схеме с якорем; 3 — разрыв по схеме с якорем для модели краевой трещины при $l_0 = 0.2R$; $a = R_C/R + l_0$, $b = R_C/R_i$

Видно, что преимущество схемы с якорем (кривая 2) сохраняется и в процессе роста трещины. При $R_C > 150 \text{ мм}$ различия в значениях P_f при выполнении разрыва по схеме со щелевым инициатором (кривая 1) и по схеме с якорем (кривая 2) не существенны.

Для трещин глубиной $< 0.2R$ кривые 2 и 3 на рис. 7 практически совпадают. Отсюда следует, что в рассматриваемой задаче модель дисковой трещины без скважины и модель краевой трещины дают близкие оценки давления разрыва. Таким образом, использование формул (2), (3) вполне приемлемо для технологических расчетов поперечного гидроразрыва при любой глубине трещин.

Экспериментальные исследования и технические средства. Предлагаемая технологическая схема поперечного гидроразрыва с якорем (рис. 4б) испытана в скарных породах на глубине 220 м от дневной поверхности. Эксперименты проведены в короткой горизонтальной необсаженной скважине диаметром 105 мм и глубиной 2 м, пробуренной ортогонально борту горной выработки. Конструкция устройства, применявшегося в экспериментах, показана на рис. 8.

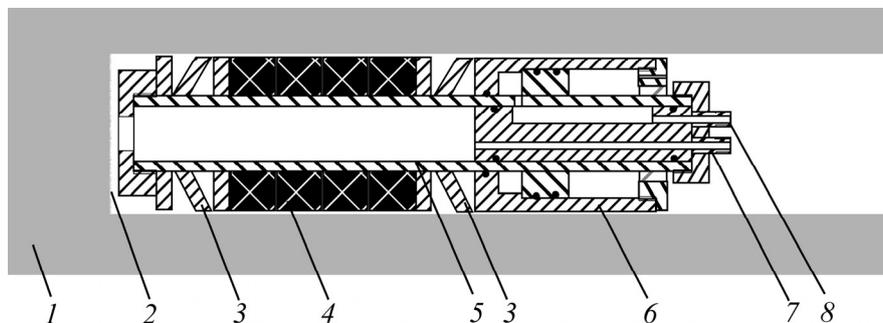


Рис. 8. Схема устройства поперечного гидроразрыва УПГ-105 и его размещения в скважине: 1 — породный массив; 2 — забой скважины; 3 — якорь из разрезного пружинного конического кольца толщиной 3 мм; 4 — резиновые уплотнительные элементы толщиной 30 мм (4 шт.); 5 — силовой шток с плунжером; 6 — гидравлический цилиндр; 7 — вход подачи рабочей жидкости в зону разрыва; 8 — вход гидравлического цилиндра

Испытания проводили следующим образом. Устройство УПГ-105 устанавливали на забой и подключали рукавами высокого давления к насосному оборудованию. В гидравлический цилиндр скважинного устройства подавали масло под давлением 30 МПа и тем самым герметизировали зону разрыва. Затем насосом УН-35 в нее нагнетали воду с расходом до 35 л/мин. Давление контролировали по манометру. Для наблюдений за процессом гидроразрыва использовали контрольные скважины глубиной 10–14 м, пробуренные параллельно рабочей скважине вдоль борта штрека на удалении 2, 5, 10, 15 и 20 м.

В процессе работ получены давление разрыва 8–10 МПа, давление запираия трещины 1–2 МПа. Пересечение контрольных скважин трещиной наблюдалось визуально по возникновению кольца высоконапорных струй воды, бьющих внутрь скважин на глубине около 2 м от борта выработки.

Полученные результаты использованы нами при разработке комплекса технических средств для предотвращения поступления воздуха в зону отбора метана. Комплекс состоит из скважинного оборудования, насосной станции, соединительных линий. Скважинное оборудование обеспечивает выполнение поперечного гидроразрыва в произвольно ориентированных необсаженных скважинах диаметром 44 мм и глубиной до 10 м. Оборудование состоит из неизвлекаемого одноразового пакера нажимного типа с интегрированной в него якорной системой и гидравлической системы многоразового действия. Эта система служит для установки пакера в скважине и подачи в зону разрыва двухкомпонентных полимерных составов на основе промышленной полиуретановой системы российского производства. Объем закачки рабочей жидкости зависит от радиуса создаваемого экрана, его сжатия горными породами, их упругих свойств и составляет обычно от 5 до 40 л. Для подачи жидкости используется серийное насосное оборудование, применяемое в строительстве для водоизоляционных работ. Разработанные решения обеспечивают эффективное выполнение работ по устранению подсоса воздуха в дегазационных скважинах через горные породы.

ВЫВОДЫ

Предложен способ восстановления герметичности действующих дегазационных скважин без их остановки, включающий бурение дополнительного шпура, проведение в нем направленного поперечного гидроразрыва и заполнение образующейся трещины полимерным составом.

Разработана технологическая схема поперечного гидроразрыва призабойной зоны скважин с использованием механического якоря. По результатам выполненного анализа и натурных испытаний показано преимущество данной схемы по сравнению с известным способом на основе щелевого инициатора. Применение якоря вместо иницирующей щели обеспечивает более низкие значения давлений разрыва и распространения поперечной трещины, не требует проведения дополнительных технологических операций по механической резке горных пород специальными устройствами.

Подготовлены технические решения по защите действующих дегазационных скважин от поступления воздуха из горных выработок с использованием промышленной полиуретановой системы отечественного производства. Разработано скважинное оборудование для установки непроницаемых экранов в шпурах диаметром 44 мм, которое состоит из неизвлекаемого пакера нажимного типа с якорной системой и съемного гидравлического устройства многофазового действия для установки пакера и подачи в зону разрыва двухкомпонентных полимерных составов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Курленя М. В., Шилова Т. В., Сердюков С. В., Патутин А. В. Герметизация дегазационных скважин угольных пластов методом барьерного экранирования // ФТПРПИ. — 2014. — № 4.
2. Курленя М. В., Сердюков С. В., Шилова Т. В., Патутин А. В. Технические и методические средства герметизации дегазационных скважин методом барьерного экранирования // ФТПРПИ. — 2014. — № 5.
3. Пат. РФ № 2507378. Способ герметизации дегазационных скважин (приоритет от 27.09.2012) / С. В. Сердюков, А. В. Патутин, А. С. Сердюков, Т. В. Шилова // Опубл в БИ. — 2014. — № 5.
4. Инструкция по дегазации угольных шахт. — М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2011.
5. Леконцев Ю. М., Сажин П. В. Технология направленного гидроразрыва пород для управления труднообрушающимися кровлями в очистных забоях и дегазации угольных пластов // ФТПРПИ. — 2014. — № 5.
6. Kehle O. R. Determination of tectonic stresses through analysis of hydraulic well fracturing, J. Geophys. Research, 1964, Vol. 69, No. 2.
7. Hubbert M. K., Willis D. G. Mechanics of Hydraulic Fracturing, Trans. A.I.M.E, 1957, Vol. 210.
8. Rummel F., Jung R. J. Hydraulic fracturing stress measurements near the Hohenzollern-Graben-structure, SW Germany, Pure appl. Geophys, 1975, Vol. 113, No. 1.
9. Sneddon I. N. Distribution of stress in the neighbourhood of a crack in an elastic solid, Proc. Roy. Soc. London, Ser. A., 1946, Vol. 187.
10. Hasebe N. Edge crack in a semi-infinite plate to rigid stiffener, Proc. Japan Soc. Engrs., 1981, No. 314.
11. Benthem J. P., Koiter W. T. Asymptotic approximations to crack problem, Leyden: Noordhoof Int. Publ., 1972.

Поступила в редакцию 3/VIII 2015