РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ РАЗРАБОТКИ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

2019 № 4

УДК 622.234.573 + 622.831.325.3 + 622.831.1

ТЕХНОЛОГИИ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗРАБОТКИ ТВЕРДЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГИДРОРАЗРЫВА ГОРНЫХ ПОРОД

С. В. Сердюков, А. В. Патутин, Т. В. Шилова, А. В. Азаров, Л. А. Рыбалкин

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН,
E-mail: ss3032@yandex.ru, *Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия*

Разработаны новые способы и технические решения для интенсификации дегазации угольных пластов на основе несъемных мостов и формирования непроницаемых защитных экранов в окрестности подземной выработки. Исследованы особенности применения метода локального гидроразрыва для измерения напряжений, действующих в массиве. Созданы прототипы устройств для доставки оборудования вдоль горизонтального участка пластовой скважины и реализации поперечного гидроразрыва за счет касательной нагрузки, приложенной вблизи изолированного интервала.

Гидравлический разрыв пласта, горный массив, напряженное состояние, противофильтрационный экран, интенсификация дегазации, трещина

DOI: 10.15372/FTPRPI20190410

Основные научные вопросы, решаемые в рамках лаборатории физических методов воздействия на массив горных пород ИГД СО РАН, связаны с повышением эффективности операции гидравлического разрыва пласта, выполняемого в шахтных условиях.

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ДЕГАЗАЦИИ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ

Главная проблема при извлечении метана — малая продуктивность дегазационных скважин из-за низкой проницаемости угля, малого давления газа в пласте и его сорбции. В мировой практике угледобычи применяется веерно-кустовое бурение большого числа близкорасположенных необсаженных скважин диаметром 80 – 150 мм и длиной 300 – 1000 м, пробуренных из горных выработок через 2 – 5 м друг от друга [1, 2]. Помимо высоких затрат, недостаток этого способа — образование в породе вблизи буровых ниш многочисленных трещин, через которые воздух из горных выработок поступает в интервал вакуумирования скважин. Это снижает содержание метана в извлекаемом газе на 40 – 60 %, приводит к падению депрессии на пласт и продуктивности скважин. Значительное содержание воздуха в добываемом газе усложняет использование метана угольных пластов в качестве сырья для химической переработки. Сжигание метановоздушной смеси с получением тепловой или электрической энергии для нужд угледобывающего предприятия лишь частично решает проблему утилизации метана.

Для преодоления недостатков существующих технологий предварительной дегазации в развитых угледобывающих странах ведутся научные исследования по созданию эффективных способов и средств стимулирования газоотдачи угольных пластов. Основное направление исследований — совершенствование приемов создания в угольном пласте методом гидроразрыва дренажных каналов, увеличивающих площадь дегазации.

Для интенсификации дренирования породного массива системой скважин достаточно создать вокруг них трещины радиусом до половины расстояния между скважинами. Применительно к близкорасположенным дегазационным скважинам требуемый радиус составляет до 10 м, что существенно меньше, чем при гидроразрыве нефтепродуктивных пластов и газоносных сланцев, трещины в которых достигают сотен метров. Высокопроизводительное насосное оборудование для проведения небольших разрывов не требуется. Это упрощает и удешевляет проведение работ в шахтных условиях, но создает проблемы с переносом расклинивающего материала (проппанта) рабочей жидкостью.

Экспериментальные исследования показали, что без заполнения создаваемых трещин проппантом гидроразрыв угольных пластов неэффективен, дает лишь кратковременное увеличение дебита газа до 3 раз, но не оказывает значимого влияния на извлечение метана скважиной за весь период ее эксплуатации. Напротив, множественный интервальный гидроразрыв дегазационной скважины (примерно 60 разрывов на 300 – 400-метровую скважину) с закачкой по 100 кг проппанта (кварцевого песка) на один разрыв повышает извлечение метана в 5 раз и более из пластов проницаемостью выше 0.02 – 0.03 мкм^2 и до 180 раз при меньшей проницаемости [3].

Во время проведения интервальных разрывов в угле возникают дополнительные сложности с доступом в необсаженную скважину и герметизацией рабочего интервала из-за осыпания стенок, отклонения ее сечения от круговой формы и номинального размера, заданного диаметром буровой коронки (рис. 1) [3].

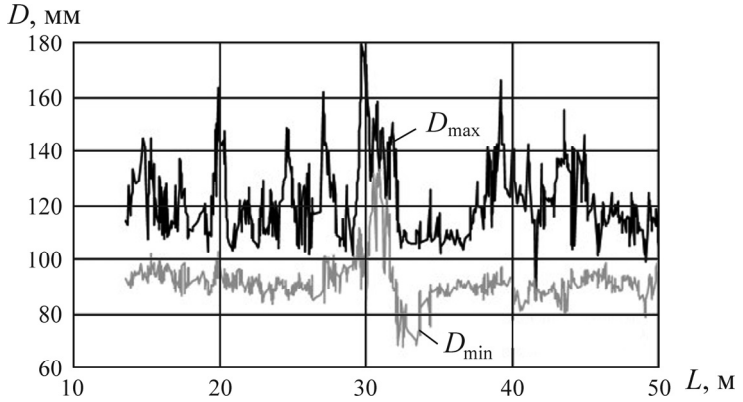

Рис. 1. Изменение сечения пластовой дегазационной скважины номинальным диаметром 98 мм в угле: L — расстояние от устья скважины; D_{max}, D_{min} — максимальный и минимальный диаметр поперечного сечения скважины

Помимо технических проблем, есть экономические причины, препятствующие внедрению гидравлического разрыва пласта на угледобывающих шахтах. Необходимое условие — экономический выигрыш от снижения объемов бурения дегазационных скважин за вычетом затрат на гидроразрыв с сохранением или увеличением степени и темпов дегазации угля. Иначе угледобывающему предприятию технологически проще и дешевле бурить плотную сетку дегазаци-

онных скважин. Это условие не выполняется при заимствовании дорогостоящих технологий и технических средств гидроразрыва из нефтедобывающей отрасли и сланцевой индустрии; закреплении дегазационных скважин обсадными колонами, перфорированными под интервальные разрывы; проведении операции гидравлического разрыва пласта с помощью установок направленного бурения. Последнее связано с тем, что подготовка и проведение множественных разрывов длятся дольше бурения дегазационной скважины. Применение станков направленного бурения для гидравлического разрыва пласта в протяженных скважинах многократно снижает коэффициент целевого использования дорогостоящей буровой техники. По этим причинам, несмотря на успешность интенсификации дренирования угольного пласта, рассматриваемая технология не распространилась пока в мировой угледобывающей промышленности.

Для преодоления указанных проблем разработаны методы и технические решения, предназначенные для создания условий масштабного внедрения гидроразрыва в угледобычу и повышения эффективности предварительной дегазации угольных пластов. Изменчивость сечения дегазационных скважин вдоль ствола приводит к тому, что для герметизации интервала разрыва в угольном пласте требуются надувные пакеры большой длины (5 м и более) с повышенной способностью к несимметричному расширению (в 2.5 – 3.0 раза от начального диаметра с 2-кратной разницей максимального и минимального диаметров). Такие устройства разрыва при сильно изрезанных стенках скважины не гарантируют успешность герметизации ее интервала. Технические сложности, возникающие при таком способе гидроразрыва угольного пласта, в частности необходимость создания в угле щелевых инициаторов поперечного разрыва и низкая надежность герметизации интервала скважины, делают его малоперспективным для масштабного применения в дегазационных технологиях. Работы на шахтах по такому принципу обречены на малый процент успешных операций.

Альтернативным решением выступает герметизация интервала разрыва мостами из твердеющего материала со встроенными инициаторами поперечного гидроразрыва. Отчасти это возврат к методам гидроразрыва, применявшимся в начальный период его истории в нефтедобыче. Для доставки устройства такого разрыва предлагается использовать внутреннее пространство легкой трубной колоны и расположенный в ней транспортер, который может быть реализован на основе известных решений [4, 5]. Схема технического комплекса и последовательность операций выполнения шахтного гидроразрыва таким способом подробно описана в [2].

СОЗДАНИЕ НЕПРОНИЦАЕМЫХ ЭКРАНОВ В ОКРЕСТНОСТИ ВЫРАБОТКИ

Эффективность дегазации зависит от наличия фильтрации воздуха из горных выработок в дегазационные скважины, что приводит к сокращению концентрации метана в откачиваемом газе. Распространенный метод борьбы с поступлением воздуха в зону отбора метана — нанесение на стенки горной выработки специального состава. Недостатками такой технологии являются значительный расход дорогостоящих полимеров и фильтрация воздуха в обход такого покрытия через слой пород повышенной проницаемости вокруг выработки.

Другой способ предотвращения подсосов воздуха через породу — создание трещины гидроразрыва между горной выработкой и зоной отбора метана с ее последующим заполнением твердеющим составом [6]. Этот подход широко не распространен из-за нарушения герметичности создаваемого экрана вследствие неравномерного заполнения трещины вязким составом и его отвердевания. Это ведет к локальному падению давления ниже запирания трещины гидроразрыва, смыканию ее берегов и нарушению сплошности защитного слоя.

Для повышения эффективности герметизации предлагается использовать метод направленного гидроразрыва, но создаваемую из дополнительного шпура трещину планируется заполнять несколькими маловязкими жидкостями, реагирующими между собой в полости создаваемого экрана (рис. 2). Основными элементами предлагаемой технологии экранирования являются трещина гидроразрыва, заполненная вязким составом, и прилегающий к ней слой горных пород, проницаемость которого снижена за счет пропитки изоляционным составом [7]. Последний должен иметь низкую начальную вязкость и хорошо проникать в поры и естественные трещины породы, а также существенно снижать проницаемость среды в окрестности экрана.

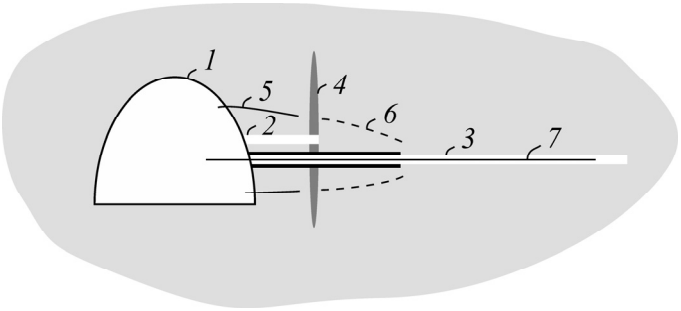

Рис. 2. Схема непроницаемого экрана: *1* — подземная выработка; *2* — вспомогательный шпур; *3* — дегазационная скважина с обсадной трубой; *4* — непроницаемый экран; *5* — поток шахтного воздуха в зону вакуумирования дегазационной скважины; *6* — поток шахтного воздуха, перекрытый экраном; *7* — поток откачиваемой из массива метановой смеси

Для решения указанных проблем разработана изоляционная композиция из трех рабочих жидкостей, одна из которых — жидкость гидроразрыва, а две другие — компоненты полиуретановой смолы (преполимер пониженной вязкости с избытком изоцианата и гидроксилсодержащий пластификатор) [8].

При выполнении работ по формированию изоляционной области горных пород в окрестности трещины гидроразрыва необходимо придерживаться поэтапного порядка закачки (рис. 3):

• в интервал разрыва подают рабочую жидкость до формирования в породе трещины требуемого размера. С течением времени давление в закрытом интервале разрыва снижается до пластового значения, при этом берега трещины смыкаются, а весь закаченный объем рабочей жидкости проникает в породный массив;

• в трещину гидроразрыва закачивают часть пластификатора в объеме 20 – 30 % от планируемого объема подачи преполимера и формируют слой породы, пропитанный этим составом;

• одновременно по двум отдельным рукавам высокого давления в трещину закачивают преполимер и оставшийся пластификатор в объемном соотношении 1 : 1. Они смешиваются друг с другом с ростом вязкости преполимера.

Лабораторные исследования влияния малообъемной закачки разработанного полимерного изоляционного состава на проницаемость пористой среды показали его высокую эффективность. Установлено, что удельная закачка состава на единицу площади экрана, равная 0.28 мл/см^2 без учета жидкости разрыва на водной основе, снижает газопроницаемость пористой среды до 9 раз [8].

В качестве альтернативы трехкомпонентному составу для заполнения трещины может использоваться раскрепляющий материал (проппант) низкой плотности и жидкость (вода), находящиеся в трещине под небольшим давлением. Такой экран должен пересекать основную

группу скважин куста на удалении от борта горной выработки, не превышающем глубину перекрытия скважин обсадными трубами. Это позволит проводить герметизацию действующих скважин избирательно, т. е. в случаях, когда на начальном периоде эксплуатации обнаружены недопустимые по интенсивности подсосы воздуха.

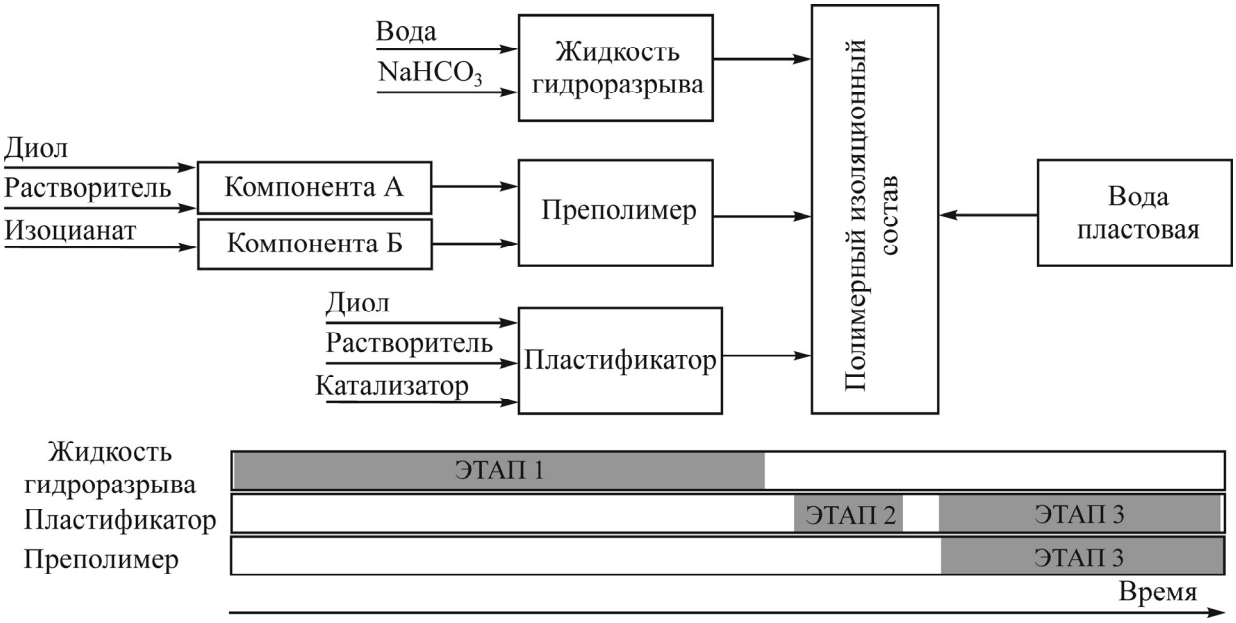

Рис. 3. Схема закачки рабочих жидкостей изоляционного полимерного состава в противофильтрационный экран

Раскрепление трещины проппантом препятствует смыканию ее берегов и обеспечивает создание дренажного канала, заполняемого водой под давлением выше, чем у воздуха в горной выработке, что не позволяет ему поступать в дегазационную скважину. Утечки воды из экрана в массив улучшают герметизацию скважин за счет формирования слоя горных пород между экраном и горной выработкой с градиентом порового давления, который направлен против фильтрации воздуха в зону отбора метана. Если утечки жидкости чрезмерны, то для их снижения экран создается с предварительным пропитыванием прилегающего слоя горных пород полимерным изоляционным составом.

ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЕ МЕТОДОМ ГИДРОРАЗРЫВА

Еще одно применение метода гидроразрыва связано с измерением действующих в массиве напряжений при решении задач подземного строительства и разработки месторождений полезных ископаемых. Такой “измерительный” гидроразрыв проводят малогабаритными устройствами, создающими трещины радиусом $1-2$ м и меньше. Это значительно отличается от технологических разрывов, размеры которых составляют десятки и сотни метров. Для обработки данных используются одинаковые технологии определения минимального сжимающего напряжения $\sigma_{\min}$. Параметры трещины и устройства разрыва в расчетные формулы не входят, т. е. не оценивается их влияние на точность определения напряжений методом гидроразрыва [9].

Интерпретация получаемых данных основана на предположениях, что трещина образуется вдоль скважины в направлении максимального эффективного сжимающего напряжения $\sigma_{\max}$, действующего по нормали к ее оси, не выходит в скважину вне интервала герметизации и что

оба крыла трещины симметричные и плоские. На графике давления $P(t)$ выделяют характерные точки, называемые давлениями раскрытия P_r и запирания P_S трещины, регистрируемые соответственно при повторной подаче и остановке закачки рабочей жидкости в созданную трещину. Предполагается, что давление P_S "достаточно длинной" трещины равно ее эффективному сжатию вмещающими горными породами $\sigma_{\min}$.

Начиная с 70-х годов XX в. распространена схема интерпретации регистрируемых данных:

$$P_S = \sigma_{\min}, \tag{1}$$

$$P_r = 3\sigma_{\min} - \sigma_{\max}. \tag{2}$$

Также известна ее модификация, учитывающая радиальный фильтрационный поток рабочей жидкости из скважины в породу. В этом варианте правая часть уравнения (2) поделена на коэффициент, зависящий от свойств пороупругой среды, известных обычно с недостаточной точностью [10]. Этот метод не получил распространения.

На практике геометрические параметры устройства разрыва влияют на определение действующих напряжений. Обычно устройства измерительного гидроразрыва состоят из двух надувных пакеров, соединенных между собой. Длина этих устройств и интервала разрыва между ними составляет 500 – 1000 мм, всего зонда — 2000 – 2500 мм.

Трещина гидроразрыва, образующаяся в межпакерном интервале, по мере своего роста меняет форму. Это объясняется тем, что коэффициент интенсивности напряжений вытянутой в плане трещины K_I достигает наибольшего значения в точке пресечения ее фронта с малой осью. Скорость роста трещины определяется выражением

$$V_f = A\left(\frac{K_I - K_{IC}}{K_{IC}}\right)^{\eta},$$

где A, η — константы, зависящие от свойств среды; K_{IC} — критический коэффициент интенсивности напряжений трещин отрыва [11].

Трещина быстрее растет вглубь породного массива, чем вдоль скважины, и приобретает форму диска, максимальный диаметр которого ограничен расстоянием L между внешними концами пакеров. Если диаметр больше, то происходит разгерметизация интервала разрыва и дальнейший рост трещины останавливается.

Используя уравнение для давления распространения дискообразной трещины

$$P_F = \frac{1}{2}K_{IC}\sqrt{\frac{\pi}{R}} + |\sigma_{\min}|$$

и полагая $P_S = P_F$, получим оценку относительной ошибки определения $\sigma_{\min}$ по формуле (1), зависящую от длины устройства L:

$$\delta = \frac{50K_{IC}}{|\sigma_{\min}|}\sqrt{\frac{2\pi}{L}}. \tag{3}$$

На рис. 4 приведены графики δ для разных L при $K_{IC} = 1.5$ МПа·м$^{1/2}$. Если ограничиться допустимым уровнем ошибки в 10 %, то устройство гидроразрыва длиной 2.5 м приемлемо для измерения напряжений от 11 – 12 МПа и выше. Зонды небольшого размера (800 мм) с таким же уровнем ошибки позволяют определять напряжения только > 20 МПа. При меньших значениях минимального сжатия использование формулы (1) ведет к ошибкам, которые в области малых значений $\sigma_{\min} < 10$ МПа составляют > 20 %.

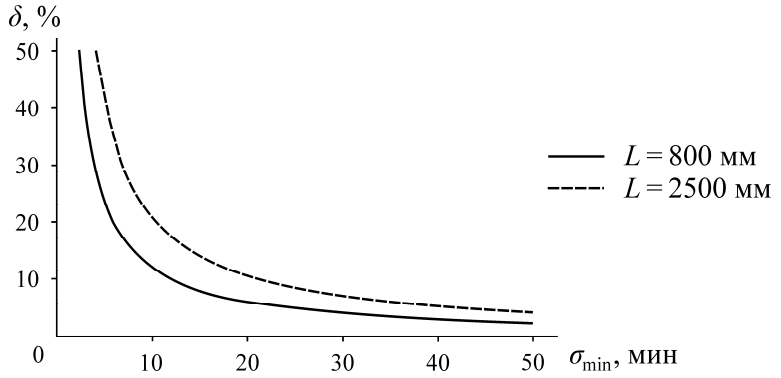

Рис. 4. Относительная ошибка (завышение) оценки $\sigma_{\min}$ по формуле $\sigma_{\min} = P_S$

На конкретном примере покажем, к чему приводит использование короткого зонда длиной 800 мм и формул (1), (2) при оценке малых напряжений. Пусть поровое давление в окрестности горной выработки равно нулю, а измеренное значение $P_S = 5$ МПа. По результатам натурных экспериментов близкое значение будет иметь и $P_r = 4-5$ МПа [12]. Тогда по формулам (1), (2) $\sigma_{\min} = 5$ МПа, $\sigma_{\max} = 10-11$ МПа. Принимая во внимание $P_F = P_S = P_r$, при тех же замерах получим корректную оценку $\sigma_{\min} = 3.6$ МПа, $\sigma_{\max} \geq \sigma_{\min}$.

Применение в расчетах формулы для P_F вместо (1) возможно, но нежелательно, поскольку она содержит параметр, связанный со свойствами среды, что исключает возможность прямого измерения напряжений без привлечения информации о вмещающих породах.

ВЫВОДЫ

Предложена технология интенсификации дегазации угольных пластов, основанная на создании дополнительных фильтрационных каналов методом ГРП. Разработаны технические решения реализации способа, в том числе оригинальная трубная система доставки с внутренним транспортером для выполнения работ в скважинах, герметизаторы из твердеющего материала с интегрированным инициатором поперечного разрыва.

Подготовлен полимерный полиуретановый состав, состоящий из трех рабочих жидкостей малой вязкости, и схема их последовательной закачки. Состав обеспечивает создание в породном массиве основных элементов противофильтрационных экранов: трещины гидроразрыва и прилегающего к ней изоляционного слоя горных пород. Исследовано влияние малообъемной закачки разработанного состава на газопроницаемость пористой среды. Установлено, что удельная закачка изоляционного состава на единицу площади экрана, равная 0.28 мл/см^2 без учета жидкости разрыва на водной основе, снижает газопроницаемость пористой среды до 9 раз.

Показано, что давление запирания трещины гидроразрыва соответствует давлению ее распространения при равномерном нагружении берегов рабочей жидкостью. Применение формулы $P_S = \sigma_{\min}$ для обработки данных локальных гидроразрывов ведет к завышенным оценкам минимального напряжения, действующего в породном массиве.

Длина устройства гидроразрыва влияет на погрешность измерения напряжений. Эта ошибка значительна в области малых напряжений (< 5 МПа) и для коротких зондов длиной менее 1 м достигает десятков процентов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Lu S., Cheng Y., Ma J., and Zhang Y.** Application of in-seam directional drilling technology for gas drainage with benefits to gas outburst control and greenhouse gas reductions in Daning coal mine, China, Nat Hazards, 2014, Vol. 73, No. 3. — P. 1419–1437.
2. **Курленя М. В., Сердюков С. В., Патутин А. В., Шилова Т. В.** Интенсификация подземной дегазации угольных пластов методом гидроразрыва // ФТПРПИ. — 2017. — № 6. — С. 3–9.
3. **Mills K., Jeffrey R., Black D., Meyer T., Carey K. and Goddard S.** Developing methods for placing sand-propped hydraulic fractures for gas drainage in the Bulli seam, Underground Coal Operators' Conference, July 7–8, 2006, Wollongong, Australia, 2006. — P. 190–199.
4. **UltraTRAC.** Tractor conveys FMI imager in one-third of the time required for drillpipe logging. https://www.slb.com/resource-library/case-study/fe/ultratrac-spyglass-usa-cs.
5. **Сердюков С. В., Дегтярева Н. В., Патутин А. В., Шилова Т. В.** Технический комплекс для множественного локального гидроразрыва породного массива в необсаженных скважинах // ФТПРПИ. — 2016. — № 6. — С. 180–186.
6. **Пат. 2108464 РФ.** Способ герметизации дегазационных скважин / Г. Я. Полевщиков, С. К. Тризно, П. Н. Мельников // Опубл. в БИ. — 1998. — Бюл. 31.
7. **Курленя М. В., Шилова Т. В., Сердюков С. В., Патутин А. В.** Герметизация дегазационных скважин угольных пластов методом барьерного экранирования // ФТПРПИ. — 2014. — № 4. — С. 189–194.
8. **Сердюков С. В., Шилова Т. В., Дробчик А. Н.** Полимерный изоляционный состав для создания противофильтрационных экранов в породном массиве // ФТПРПИ. — 2016. — № 4. — С. 196–203.
9. **Сердюков С. В., Курленя М. В., Патутин А. В.** К вопросу об измерении напряжений в породном массиве методом гидроразрыва // ФТПРПИ. — 2016. — № 6. — С. 6–14.
10. **Haimson B. C.** Near surface and deep hydrofracturing stress measurements in the Waterloo quartzite, J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 1980, Vol. 17, No. 2. — P. 81–88.
11. **Mastrojannis E. N., Keer L. M., and Mura T.** Growth of planar cracks induced by hydraulic fracturing, J. Num. Meth. Eng., 1980, Vol. 15, No. 1. — P. 41–54.
12. **Рубцова Е. В., Скулкин А. А.** О методах косвенного определения величины давления запирания трещины при измерительном гидроразрыве // Интерэкспо Гео-Сибирь. — 2016. — Т. 2. — № 3. — С. 265–269.

Поступила в редакцию 23/VI 2019
После доработки 25/VI 2019
Принята к публикации 03/VII 2019