

## ГЕОМЕХАНИКА

УДК 622.234.573:622.831.1

### К ВОПРОСУ ОБ ИЗМЕРЕНИИ НАПРЯЖЕНИЙ В ПОРОДНОМ МАССИВЕ МЕТОДОМ ГИДРОРАЗРЫВА

С. В. Сердюков, М. В. Курленя, А. В. Патутин

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

Экспериментально установлено, что давление запираения трещины гидроразрыва соответствует давлению распространения при равномерном нагружении ее берегов рабочей жидкостью. Показано, что приравнивание минимального напряжения давлению запираения локальных разрывов ведет к завышенным оценкам. Ошибка зависит от длины устройства разрыва и значительна при малом сжатии горных пород (менее 5–10 МПа). Предложены решения, направленные на повышение точности и информативности измерения напряжений методом гидроразрыва.

*Массив горных пород, напряженное состояние, скважинные исследования, метод гидроразрыва, трещина, измерение напряжений, давление запираения, устройство гидроразрыва, ошибка измерений*

Гидроразрыв используется в основном для интенсификации добычи нефти и газа. Составной частью этой технологии является определение сжатия создаваемой трещины горными породами. Его значение рассчитывают по характерным точкам изменения давления рабочей жидкости  $P(t)$  в процессе выполнения работ [1]. Этот же метод применяют и для измерения напряжений в породном массиве при решении задач подземного строительства и разработки месторождений твердых 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. Несмотря на это, для обработки данных используются одинаковые методики определения минимального сжимающего напряжения  $\sigma_{\min}$ . Параметры трещины и устройства разрыва в расчетные формулы не входят, соответственно не оценивается их влияние на точность определения напряжений методом гидроразрыва.

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 [2]. На графике  $P(t)$  выделяют характерные точки, называемые давлениями раскрытия  $P_r$  и запираия  $P_S$  трещины, регистрируемые соответственно при повторной подаче и остановке закачки рабочей жидкости в созданную трещину [3]. При этом предполагается, что давление  $P_S$  “достаточно длинной” трещины равно эффективному сжатию трещины вмещающими горными породами  $\sigma_{\min}$ . Начиная с 70-х годов XX в. распространение получила следующая схема интерпретации регистрируемых данных [3]:

$$P_S = \sigma_{\min}, \quad (1)$$

$$P_r = 3\sigma_{\min} - \sigma_{\max}. \quad (2)$$

Известна также ее модификация, учитывающая радиальный фильтрационный поток рабочей жидкости из скважины в породу. В ней правая часть уравнения (2) поделена на коэффициент, зависящий от свойств пороупругой среды, известных обычно с недостаточной точностью [4]. Распространения такой подход не получил.

Позже было установлено, что при повторной закачке рабочей жидкости в интервал разрыва она проникает и заполняет трещину до начала ее раскрытия [5–7]. Из-за этого  $P_r \approx P_S$  и уравнение (2) применять нельзя, поскольку оно дает ошибочную оценку  $\sigma_{\max} \approx 2\sigma_{\min}$ , на которую накладывается погрешность выделения точки  $P_r$  на графике  $P(t)$ . Многочисленные экспериментальные подтверждения этого факта привели к современному пониманию, что методом гидроразрыва можно определить только одно напряжение – сжатие трещины горными породами [8–11].

При использовании уравнения (1) возникают две взаимосвязанные проблемы. Первая из них — выделение точки  $P_S$  на графике  $P(t)$ , вторая — ее интерпретация. Для анализа используется кривая падения давления рабочей жидкости в интервале разрыва с момента начала образования трещины и остановки закачки. Точка  $P_S$  разделяет эту кривую на две области с различными зависимостями давления от времени  $t$ . На участке  $P > P_S$  спад давления обусловлен процессом трещинообразования, при  $P < P_S$  — фильтрацией жидкости во вмещающие породы.

Для определения положения этой точки на графике  $P(t)$  предложены несколько методик, обзор которых представлен в [12, 13]. В нефтедобыче широкое распространение получил метод РСА (Pre-Closure Analysis), основанный на анализе безразмерной  $G$  функции, учитывающей время (объем) закачки рабочей жидкости до разрыва пласта [14]. Разброс оценок  $P_S$ , получаемых разными методиками, значителен и по данным работы [13] составляет 14–42 %. К этому следует добавить субъективность выбора интервалов времени для построения касательных линий к графику  $P(t)$ , а также ошибки измерения  $P$  и  $t$ . Неоднозначность выделения  $P_S$  связана также с непостоянством  $dP/dt$  в обеих указанных областях кривой падения давления. До запираия трещины на значение  $dP/dt$  влияет отставание движения жидкости от фронта разрыва, зависимость скорости ее течения от длины участка трещины, заполненного жидкостью, и упругого объема гидравлической системы оборудования гидроразрыва. На участке  $P < P_S$  по мере падения давления и закрытия трещины фильтрационный поток в породу меняет свой характер с линейного на радиальный. В результате помимо точки собственно  $P_S$  на графике  $P(t)$  выделяют также и другие точки изменения зависимости  $P$  от  $t$ , например мгновенное давление запираия  $P_{ISIP}$ , точку смены режима фильтрационного потока и др. Выбор “правильной” точки  $P_S$  является актуальной задачей.

Другая проблема — это интерпретация  $P_S$ . Одни исследователи считают, что  $P_S$  соответствует остановке трещины в условиях равномерного давления жидкости на ее берега [15], другие полагают, что точка  $P_S$  связана с моментом смыкания берегов трещины гидроразрыва при  $P(t) = \sigma_{\min}$

[16]. Для трещин большой длины, таких как технологические гидроразрывы, эти давления практически совпадают и вопрос интерпретации  $P_s$  не возникает. При локальных разрывах это не так, и размер трещины, а значит, и геометрические параметры устройства разрыва могут иметь значение [17]. Влияние этих параметров на точность определения напряжений в породном массиве является одним из вопросов, которым посвящена данная статья. В ней рассмотрены результаты модельных гидроразрывов в оргстекле, имитирующих короткие трещины в монолитной среде с небольшими утечками рабочей жидкости, а также разрывы, пересекающие трещины большой длины. Представлены результаты анализа кривых падения давления, полученных в экспериментах с помощью высокочастотного датчика давления с временным разрешением 1 мс. Даны рекомендации по развитию технических и методических средств измерительного гидроразрыва.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Лабораторные исследования проведены в блоке оргстекла на установке, схема которой показана на рис. 1. Ее гидравлическая система состоит из устройства гидроразрыва А1, насоса Н с баком Б и обратным клапаном К на выходе, пресса П, дросселя Д и соединительных рукавов высокого давления (РВД). Измерительная система содержит датчик давления ЛХ-412/400 (ОАО «Тензоприбор», Краснодар), электронное согласующее устройство А2 типа SCC-SG04 (National Instruments, США) для преобразования выходного сигнала тензометрического датчика, АЦП типа NI DAQPad-6015 (National Instruments, США) и компьютер А4 для регистрации и обработки данных. Тензометрический датчик измеряет давление рабочей жидкости до 40 МПа на частотах до 1500 Гц с погрешностью  $\pm 0.8\%$ .

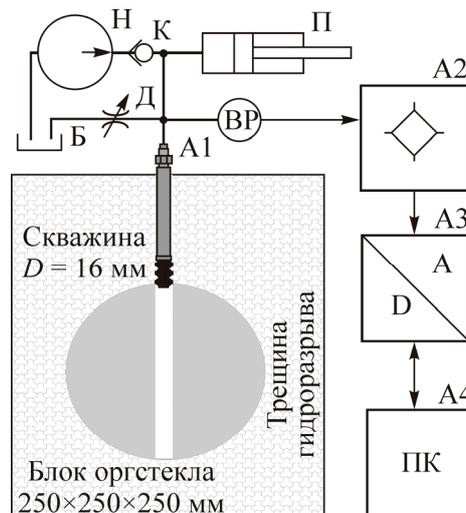


Рис. 1. Схема лабораторной установки: Н — насос; П — гидравлический пресс; К — обратный клапан; Б — бак; Д — дроссель регулятор утечек; ВР — датчик давления; А1 — устройство гидроразрыва; А2 — аналоговый преобразователь сигнала; А3 — аналогово-цифровой преобразователь (АЦП); А4 — регистратор (компьютер)

В ходе экспериментов устройство А1 вставляли в скважину диаметром 16 мм, пробуренную в блоке оргстекла (см. рис. 1). Рабочую жидкость подавали в интервал разрыва прессом П или ручным насосом Н. Пресс использовали для получения трещин без выхода на поверхность блока оргстекла, насос — для формирования разрывов, выходящих в борт модели. Это имитировало их пересечение с бесконечно длинной трещиной. Нагружение модели не применяли ( $\sigma = 0$ ). Утечки рабочей жидкости в породу моделировали с помощью регулируемого дросселя Д. Замеры давления выполняли дискретно по времени  $P(t_i)$  с шагом  $\Delta t = 1$  мс.

На рис. 2 приведены графики давления  $P(t)$  двух разрывов, один из которых достиг в своем развитии поверхности оргстекла (а), а другой — нет (б). В первом случае давление быстро стремится к нулевому значению, во втором — лежит существенно выше.

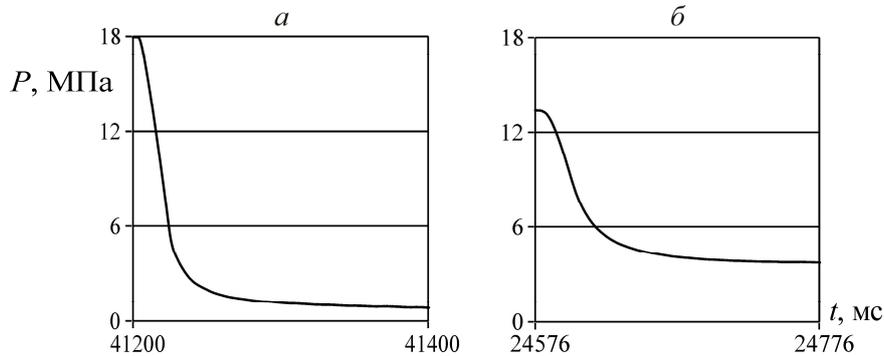


Рис. 2. Кривые падения давления рабочей жидкости в интервале гидроразрыва: а, б — для трещин радиусом 94 и 86 мм соответственно с выходом и без выхода в борт модели

Обработка кривых падения давления выполнена в координатах  $\frac{P(t_i) - P(t_{i+1})}{\Delta t} = -\frac{dP}{dt}$  и минус  $P$  (обратная шкала). Нисходящие ветви полученных графиков приведены на рис. 3. Их аппроксимация кусочно-линейной функцией дает точки излома, из которых практический интерес представляет точка с наибольшим значением давления. Полученные результаты вместе с радиусом трещин, близких по форме к диску (рис. 4), приведены в таблице.

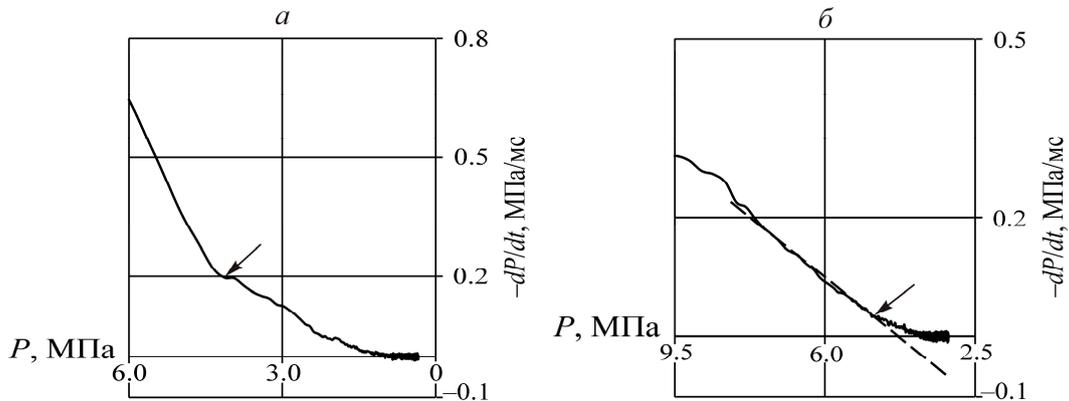


Рис. 3. Определение  $P_S$  по скорости падения давления от его значения: а, б — соответственно с выходом и без выхода трещины в борт модели

Замеры и расчеты давлений запирания и распространения трещин, МПа

Средний радиус трещины, см	Характеристика трещины	$P_S$ (замеры)	$P_F$ (расчет при $K_{IC} = 1.20 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$ )	$P_F$ (расчет при $K_{IC} = 1.47 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$ )
8.6	Продольная без выхода в борт модели	4.84	3.63	4.44
8.8	Продольная без выхода в борт модели	4.82	3.58	4.39
9.4–12.1	Под углом 10–15° к оси скважины, вышла в борт модели	3.93–4.13	3.06–3.47	3.75–4.25
12.5	Продольная с выходом в борт модели	3.39	3.01	3.68

Несмотря на то что блок оргстекла не нагружен внешними силами ( $\sigma_{\min} = \sigma_{\max} = 0$ ), обработка полученных данных с помощью любой известной методики дает значение  $P_S$  не менее нескольких десятков атмосфер. Анализ результатов показал, что наиболее информативными являются точки излома зависимости минус  $dP/dt(p)$  от  $P$ , отмеченные на рис. 3. Они дают значение  $P_S$  близкое к давлению распространения дискообразной трещины (таблица), равномерно нагруженной жидкостью [18]

$$P_F = \frac{1}{2} K_{IC} \sqrt{\frac{\pi}{R}} + |\sigma_{\min}|, \quad (3)$$

где  $K_{IC}$  — критический коэффициент интенсивности напряжений трещин отрыва, который для оргстекла составляет 1.20–1.47 МПа·м<sup>1/2</sup> [19]. При использовании методик на основе графиков  $P(t)$ ,  $P(\lg t)$ ,  $\lg P(\lg t)$ , точки, претендующие на соответствие  $P_S$ , выделяются менее уверенно. Получаемые при этом значения  $P_S$  либо в большей степени соответствуют уравнению (3), чем (1), либо их связь с  $\sigma_{\min}$  установить не удастся.

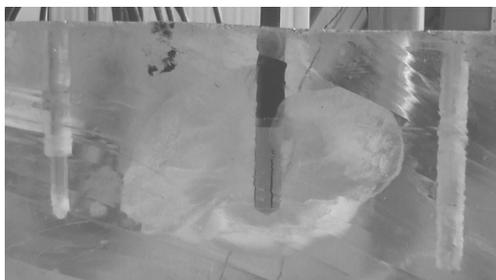


Рис. 4. Трещина дискообразной формы без выхода в борт модели, полученная в эксперименте

Приведенные в таблице данные показывают, что для определения минимального напряжения методом гидроразрыва не обязательно, чтобы трещина формировалась строго вдоль скважины. Выход разрыва на свободную поверхность (в том числе в скважину) и вызванная этим разгерметизация трещины также не критичны для измерений. Основной вывод из полученных результатов состоит в том, что применение формулы  $P_S = \sigma_{\min}$  для обработки данных локальных гидроразрывов ведет к завышенным оценкам минимального напряжения, действующего в породном массиве.

#### ПАРАМЕТРЫ УСТРОЙСТВА РАЗРЫВА И ОШИБКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ

Устройства измерительного гидроразрыва состоят из двух пакеров, соединенных между собой. Длина пакеров и интервала разрыва между ними обычно составляет 500–1000 мм, всего зонда — 2000–2500 мм (рис. 5).



Рис. 5. Двухпакерное устройство гидроразрыва (компания GeoPro, ЕС): 1 — надувной пакер с закрепленными концами; 2 — интервал разрыва

В большинстве устройств используются надувные пакеры с одним или двумя закрепленными концами. Исключением является зонд ИВК “Гидроразрыв” (ИГД СО РАН, Россия), в котором установлены нажимные пакеры с рабочей частью около 200 мм при общей длине устройства 800–900 мм.

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

Скорость роста дается выражением  $V_f = A \left( \frac{K_I - K_{IC}}{K_{IC}} \right)^\eta$ , где  $A$  и  $\eta$  — константы, зависящие от свойств среды [20]. В итоге трещина быстрее растет вглубь породного массива, чем вдоль скважины и приобретает форму диска, максимальный диаметр которого ограничен расстоянием  $L$  между внешними концами пакеров. Если больше, то происходит разгерметизация интервала разрыва, и дальнейший рост трещины останавливается. Полагая, что  $P_S = P_F$ , из (3) получаем оценку относительной ошибки определения  $\sigma_{\min}$  по формуле (1), зависящую от длины устройства  $L$ :

$$\delta = \frac{50K_{IC}}{|\sigma_{\min}|} \sqrt{\frac{2\pi}{L}}. \quad (4)$$

На рис. 6 приведены графики  $\delta$  для разных  $L$  при  $K_{IC} = 1.5 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$ . Если ограничиться допустимым уровнем ошибки в 10 %, то устройство гидроразрыва длиной 2.5 м применимо для измерения напряжений от 11–12 МПа и выше. Зонд ИВК “Гидроразрыв” с таким же уровнем ошибки позволяет определять напряжения только свыше 20 МПа. При меньших значениях минимального сжатия использование формулы (1) ведет к значительным ошибкам, которые в области малых значений  $\sigma_{\min} < 10 \text{ МПа}$  составляют более 20 %.

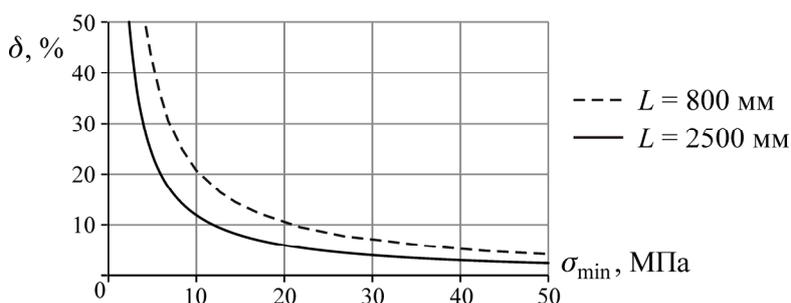


Рис. 6. Относительная ошибка (завышение) оценки  $\sigma_{\min}$  по формуле  $\sigma_{\min} = P_S$

Покажем на конкретном примере, к чему приводит использование короткого зонда ( $L = 800 \text{ мм}$ ) и формул (1), (2) при оценке малых напряжений. Пусть поровое давление в окрестности горной выработки равно нулю, а измеренное значение  $P_S$  составляет 5 МПа. Близкое значение к нему (немного ниже) будет иметь и  $P_r = 4–5 \text{ МПа}$ . Тогда по формулам (1), (2)  $\sigma_{\min} = 5 \text{ МПа}$ ,  $\sigma_{\max} = 10–11 \text{ МПа}$ . Принимая во внимание  $P_F = P_S = P_r$ , при тех же замерах получаем корректную оценку  $\sigma_{\min} = 3.6 \text{ МПа}$ ,  $\sigma_{\max} \geq \sigma_{\min}$ .

Применение в расчетах формулы (3) вместо (1) возможно, но нежелательно, поскольку она содержит параметр, связанный со свойствами среды. Это нивелирует самую привлекательную черту метода гидроразрыва, а именно возможность прямого измерения напряжений без привлечения информации о свойствах вмещающих пород.

#### НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ МЕТОДА

Выявлено, что метод гидроразрыва дает значительную ошибку измерений в области малых напряжений. Чтобы ее снизить, необходимо увеличивать длину устройства разрыва. Поскольку это нужно не всегда, создавать прибор с большой фиксированной длиной межпакерного интер-

вала вряд ли целесообразно. По нашему мнению, предпочтительнее устройство модульной конструкции, состоящее из двух отдельных пакеров и сменных соединителей: короткого (0.5 м) и длинного (8–10 м), собираемого из нескольких секций по 1.5–2 м каждая. Чтобы не утяжелять комплект оборудования, длинный соединитель предлагается выполнить в расчете на невысокое давление рабочей жидкости. Такая возможность появляется, если работы проводить в следующей последовательности:

— сначала выполняется гидроразрыв устройством с коротким соединителем между пакерами и дается грубая оценка напряжения в породном массиве;

— если напряжение мало и точность полученной оценки не устраивает, удлиняется соединитель и проводится повторный гидроразрыв, охватывая интервал предыдущего. Такой подход уменьшает давление разрыва и позволяет использовать облегченный соединитель пакеров.

Увеличение длины межпакерного интервала и размеров трещины ведет к росту закачки рабочей жидкости, ее утечек и, как следствие, к необходимости применения более производительного насосного оборудования. Объем дисковой трещины, заполненной маловязкой жидкостью под давлением  $P_F$ , дается выражением [17]

$$V_0 = \frac{8}{\sqrt{\pi}} \frac{K_{IC}(1-\nu^2)}{E} R^{5/2}, \quad (6)$$

где  $E$ ,  $\nu$  — модуль Юнга и коэффициент Пуассона среды. Пример зависимости  $V_0(R)$  для  $E = 3.5 \cdot 10^{10}$  Н/м<sup>2</sup>,  $\nu = 0.15$ ,  $K_{IC} = 1.5$  МПа·м<sup>1/2</sup> приведен на рис. 7. При использовании 10–20 л рабочей жидкости можно создавать трещины радиусом 5–10 м, что обеспечит уровень ошибки оценки напряжений в 10 % для  $\sigma_{\min} \geq 4–5$  МПа. Дальнейшее повышение размеров разрыва идет в ущерб автономности работ (большой объем жидкости, высокопроизводительный тяжелый насос с пневматическим или электрическим приводом). Трещину радиусом примерно 5 м можно принять в качестве предельной для локального измерительного гидроразрыва.

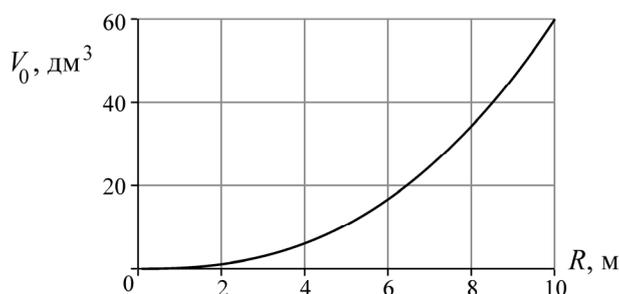


Рис. 7. Зависимость объема трещины от ее радиуса при давлении  $P_F$ ,  $E = 3.5 \cdot 10^{10}$  Н/м<sup>2</sup>,  $\nu = 0.15$ ,  $K_{IC} = 1.5$  МПа·м<sup>1/2</sup>

Что касается самого устройства, то в нем предпочтительнее применять пакеры надувного типа. Это позволяет исключить из конструкции прибора гидроцилиндры и использовать для выполнения работ техническую воду вместо гидравлического масла или водомасляной эмульсии. Кроме того, надувные пакеры имеют большую длину, что обеспечивает лучшую герметизацию интервала разрыва. Увеличение длины нажимных пакеров ведет к нарушению их контакта со стенкой скважины, и по качеству герметизации они хуже.

Стандартный метод гидроразрыва позволяет определять в единичной скважине только одно напряжение, действующее в породном массиве. Если не рассматривать не всегда применимые решения, основанные на измерениях в разнонаправленных скважинах [5], то для повышения информативности метода есть две возможности:

— проведение направленных разрывов вдоль и поперек скважины и измерение давления  $P_S$  нескольких разнонаправленных трещин заданной ориентации, созданных, например, с помощью технологичных безщелевых способов [21–23];

— комбинирование гидроразрыва и прессиометрических исследований скважины гидравлическим датчиком [24], функцию которого может выполнять импрессионный пакер. Датчик измеряет зависимость давления от объема закаченной в него жидкости. При установке совмещенного датчика-пакера в интервал, содержащий заранее созданную протяженную трещину гидроразрыва, можно определять не только ориентацию, но и давление ее раскрытия  $P_r$ , исключив проникновение в нее рабочей жидкости. Тогда регистрируемое  $P_r$  будет соответствовать уравнению (2) и может быть использовано для получения  $\sigma_{\max}$ .

Реализация этих подходов позволит создать гибкий комплекс приборов, обеспечивающий повышение информативности и точности скважинных геомеханических измерений, основанных на методе гидроразрыва.

### ВЫВОДЫ

Экспериментально 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 (менее 5 МПа) и для коротких зондов длиной менее 1 м достигает десятков процентов.

Для повышения точности измерений напряжений предложены модульная конструкция скважинного устройства с изменяемой длиной интервала разрыва и порядок выполнения работ, обеспечивающий снижение требований к прочности межпакерного соединения.

Для повышения информативности измерений напряжений рекомендовано определять давление открытия созданной трещины, нагружая интервал разрыва гидравлическим датчиком по зависимости давления от объема закаченной жидкости. В качестве такого датчика предлагается использовать импрессионный пакер, а сами измерения совмещать с определением ориентации полученной трещины.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Hubbert M. K., Willis D. G.** Mechanism of hydraulic fracturing, Trans. AIME, 1957, Vol. 210. — P. 153–168.
2. **Haimson B. C., Fairhurst C.** Initiation and extension of hydraulic fracture in rocks, Soc. Petr. Engrs. J., 1967. — P. 310–318.
3. **Bredehoeft J. D., Wolf R. G., Keys W. S., and Shutter E.** Hydraulic fracturing to determine the regional in situ stress field in the Piceance Basin, Colorado, J. Geological Society of American Bulletin, 1976, Vol. 87, No. 2. — P. 250–258.
4. **Haimson B. C.** Near surface and deep hydrofracturing stress measurements in the Waterloo quartzite, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 1980, Vol. 17, No. 2. — P. 81–88.
5. **Cornet F. H., Valette B.** In-situ stress determination from hydraulic injection test data, J. Geophys. Res., 1984, Vol. 89. — P. 11527–11537.
6. **Ito T., Sato A., and Hayashi K.** Two methods for hydraulic fracturing stress measurements needless the ambiguous reopening pressure, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 1997, Vol. 34, No. 3. — Paper No. 143.

7. **Ito T., Igarashi A., Ito H., and Sano O.** Problem for the maximum stress estimation in hydrofracturing method and its potential solution, Proc. US Rock Mech. Symp., 2005. — ARMA/USRMS 05-862 (CD-ROM).
8. **Zoback M. D., Rummel F., Jung R., and Raleigh C. B.** Laboratory hydraulic fracturing experiments in intact and pre-fractured rock, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstr., 1977, Vol. 14, — P. 49–58.
9. **Ratigan J. L.** The use of fracture reopening pressure in hydraulic fracturing stress measurements, Rock Mech. Rock Engng., 1992, Vol. 25. — P. 225–236.
10. **Cheung L. S., Haimson B. C.** Laboratory study of hydraulic fracturing pressure data — how valid is their conventional interpretation, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 1989, Vol. 26. — P. 595–604.
11. **Rutqvist J., Chin-Fu Tsang, and Stephansson O.** Uncertainty in the maximum principal stress estimated from hydraulic fracturing measurements due to the presence of the induced fracture, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 2000, Vol. 37. — P. 107–120.
12. **Aggson J. R., Kim K.** Analysis of hydraulic fracturing pressure histories: A comparison of five methods used to identify shut in pressure, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 1987, Vol. 24, No. 1. — P. 75–80.
13. **Рубцова Е. В., Скулкин А. А.** О методах косвенного определения величины давления запираения трещины при измерительном гидроразрыве // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2016. Междунар. науч. конф. “Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология”: сб. материалов в 4 т. Т. 3. — Новосибирск: СГУГиТ, 2016. — С. 266–271.
14. **Mini-frac (DFIT) Analysis for unconventional reservoirs using F.A.S.T. welltest.** [Электронный ресурс]. Режим доступа: [http://www.petroleumengineers.ru/sites/default/files/minifrac\\_analysis\\_for\\_unconventional\\_reservoirs\\_using\\_fast\\_welltest\\_16-aug-2013.pdf](http://www.petroleumengineers.ru/sites/default/files/minifrac_analysis_for_unconventional_reservoirs_using_fast_welltest_16-aug-2013.pdf)
15. **Kehle O. K.** The determination of fracture stresses through analysis of hydraulic well fracturing, J. of Geophys. Res., 1964, Vol. 69. — P. 259–273.
16. **Cornet F. H.** Interpretation of hydraulic injection test for in-situ stress determination, in Proc. Int. Workshop on Hydraulic Fracturing Stress Measurements (Zoback and Haimson, Eds), Monterey, National Academy Press, Washington D. C., 1983. — P. 149–158.
17. **Sung O. Choi.** Interpretation of shut-in pressure in hydrofracturing pressure-time records using numerical modeling, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 2012, Vol. 50. — P. 29–37.
18. **Perkins T. K., Kern L. R.** Widths of hydraulic fractures, Journal of Petroleum Technology, 1961, Vol. 13, No. 9. — P. 937–949.
19. **Атрошенко С. А., Кривошеев С. И., Петров А. Ю.** Распространение трещины при динамическом разрушении полиметилметакрилата // Журн. Техн. физики. — 2002. — Т.72. — Вып. 2. — С. 52–58.
20. **Mastrojannis E. N., Keer L. M., and Mura T.** Growth of planar cracks induced by hydraulic fracturing, Int. J. Num. Meth. Engng., 1980, Vol. 15, No. 1. — P. 41–54.
21. **Сердюков С. В., Курленя М. В., Патутин А. В., Рыбалкин Л. А., Шилова Т. В.** Экспериментальная проверка способа направленного гидроразрыва горных пород // ФТПРПИ. — 2016. — № 4. — С. 3–11.
22. **Курленя М. В., Зворыгин Л. В., Сердюков С. В.** Управление продольным гидроразрывом скважин // ФТПРПИ. — 1999. — № 5. — С. 3–12.
23. **Шилова Т. В., Сердюков С. В.** Защита действующих дегазационных скважин от поступления воздуха из горных выработок // ФТПРПИ. — 2015. — № 5. — С. 179–188.
24. **Руководство по оценке состояния и свойств угольного массива скважинными гидравлическими датчиками.** — Новосибирск: ИГД СО РАН, 1978.

Поступила в редакцию 17/X 2016