

**ВЛИЯНИЕ МЕЖПАКЕРНОГО РАССТОЯНИЯ УСТРОЙСТВА ГИДРОРАЗРЫВА
НА ТОЧНОСТЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МИНИМАЛЬНОГО НАПРЯЖЕНИЯ В МАССИВЕ**

А.В. Патутин

*Научный руководитель профессор С.В. Сердюков
Институт горного дела СО РАН, г. Новосибирск, Россия*

Метод измерительного гидроразрыва применяется для определения напряженного состояния горного массива при решении задач подземного строительства и разработки месторождений твердых полезных ископаемых [1]. При этом исследования проводят малогабаритными устройствами, создающими трещины радиусом 1–2 м и меньше. Это значительно отличается от технологических разрывов, создаваемых на нефтегазовых месторождениях и достигающих десятков и сотен метров в длину. Несмотря на это, для обработки данных используются одинаковые методики определения минимального сжимающего напряжения σ_{\min} . Параметры трещины и устройства разрыва в расчетные формулы не входят, соответственно не оценивается их влияние на точность определения напряжений методом гидроразрыва.

Обработка получаемых данных основана на предположениях, что трещина образуется вдоль скважины в направлении максимального эффективного сжимающего напряжения σ_{\max} , действующего по нормали к ее оси, не выходит в скважину вне интервала герметизации, и что оба крыла трещины симметричные и плоские. На графике $P(t)$ выделяют характерные точки, называемые давлениями раскрытия P_r и запириания P_s трещины, регистрируемые соответственно при повторной подаче и остановке закачки рабочей жидкости в созданную трещину. При этом предполагается, что давление P_s «достаточно длинной» трещины равно её эффективному сжатию вмещающими горными породами σ_{\min} .

Существуют различные подходы при интерпретации давления запириания. Одни исследователи считают, что P_s соответствует остановке трещины в условиях равномерного давления жидкости на ее берега [2], другие полагают, что точка P_s связана с моментом смыкания берегов трещины гидроразрыва при $P(t) = \sigma_{\min}$ [3]. Для трещин большой длины, таких как технологические гидроразрывы, эти давления практически совпадают и вопрос интерпретации давления запириания не возникает. При локальных разрывах это не так, и размер трещины, а значит, и геометрические параметры устройства разрыва могут иметь значение. Влияние этих параметров на точность определения напряжений в породном массиве является одним из вопросов, которые рассмотрены ниже.

Устройства измерительного гидроразрыва состоят из двух пакеров, соединенных между собой. Длина пакеров и интервала разрыва (межпакерное расстояние) между ними обычно составляет 500–1000 мм, всего зонда – 2000–2500 мм (рис. 1).



**Рис.1 Двухпакерное устройство разрыва компании ТАМ (США):
1 – надувной пакер; 2 – интервал разрыва**

В большинстве устройств используются надувные пакеры с одним или двумя закрепленными концами. Трещина гидроразрыва, образующаяся 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 трещины дается выражением

$$V_f = A \left(\frac{K_I - K_{IC}}{K_{IC}} \right)^\eta, \quad (1)$$

где K_{IC} – критический коэффициент интенсивности напряжений трещин отрыва, МПа·м^{1/2}; A и η – константы, зависящие от свойств среды [4]. В результате 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.

Экспериментальные данные на блоках оргстекла показывают, что при обработке результатов измерений и их интерпретации, значение P_s близко к давлению распространения дискообразной трещины, равномерно нагруженной жидкостью [5, 6]

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

где R – радиус трещины разрыва, м. Полагая, что $P_s = P_F$ получаем оценку относительной ошибки определения σ_{\min} , зависящую от длины устройства L

$$\delta = \frac{50 K_{IC}}{|\sigma_{\min}|} \sqrt{\frac{2\pi}{L}} \quad (3)$$

На рис. 2 приведены графики δ 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. Более короткие зонды позволяют определять напряжения с таким же уровнем ошибки только свыше 20 МПа. При меньших значениях минимального сжатия использование классической формулы $P_s = \sigma_{\min}$ ведет к значительным ошибкам, которые в области малых значений $\sigma_{\min} < 10 \text{ МПа}$ составляют более 20 %.

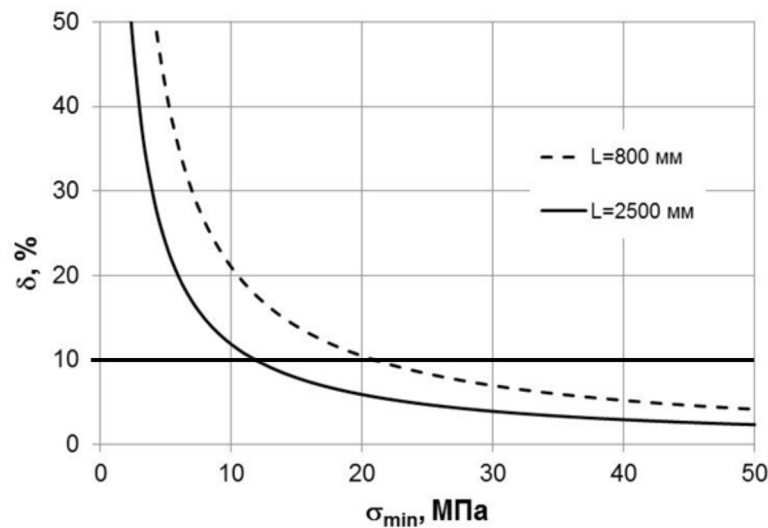


Рис. 2. Завышение оценки σ_{\min} при использовании формулы $P_s = \sigma_{\min}$

Таким образом, получено, 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 интервала нецелесообразно. Предпочтительнее использовать 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, используется удлиненный соединитель и проводится повторный гидроразрыв, охватывая интервал предыдущего.

Подобный подход уменьшает давление разрыва и позволяет использовать облегченный соединитель пакеров.

В ходе выполнения работы показано, что давление запаривания 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 предлагается использовать модульную конструкцию скважинного устройства с изменяемой длиной интервала разрыва.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ), проект 16-35-00161, мола.

Литература

1. Hubbert M.K., Willis D.G. Mechanism of hydraulic fracturing // Petroleum Transactions, AIME. – 1957. – Vol. 210. – P. 153 – 168.
2. Kehle R.O. The determination of tectonic stresses through analysis of hydraulic well fracturing // Journal of Geophysical Research. – 1964. – Vol. 69. – P. 259 – 273.
3. Cornet F.H. Interpretation of hydraulic injection tests for in-situ stress determination // in Proceedings Int. Workshop on Hydraulic Fracturing Stress Measurements. – Washington D. C., 1983. – P. 149 – 158.
4. Mastrojannis E.N., Keer L.M., Mura T. Growth of planar cracks induced by hydraulic fracturing // International Journal for Numerical Methods in Engineering. – 1980. – Vol. 15. – P. 41 – 54.
5. 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.
6. Perkins T.K., Kern L.R. Widths of hydraulic fractures // Journal of Petroleum Technology. – 1961. Vol. – P. 937– 949.