УДК 622.831.1

ОСОБЕННОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МИНИМАЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ МЕТОДОМ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ГИДРОРАЗРЫВА

Андрей Владимирович Патутин
Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, тел. (383)335-96-42, e-mail: andrey.patutin@gmail.com

Леонид Алексеевич Рыбалкин
Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, аспирант, младший научный сотрудник, тел. (383)335-96-42, e-mail: leonid.rybalkin@gmail.com

В работе рассмотрены вопросы интерпретации экспериментальных данных измерительного гидроразрыва. Показано, что в случае использования локального разрыва с радиусом трещины 1–2 метра применение классического подхода к оценке минимального действующего напряжения даёт завышенные результаты.

Ключевые слова: измерительный гидроразрыв, напряженное состояние, минимальное напряжение, скважинные исследования.

PECULIARITIES IN MINIMUM STRESS ESTIMATION BY MEASUREMENT HYDRO-FRACTURING METHOD

Andrey V. Patutin
Chinakal Institute of Mining SB RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Ph. D., Senior Researcher, tel. (383)335-96-42, e-mail: andrey.patutin@gmail.com

Leonid A. Rybalkin
Chinakal Institute of Mining SB RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Research Student, Junior Researcher, tel. (383)335-96-42, e-mail: leonid.rybalkin@gmail.com

Interpretation of experimental measurement hydrofracturing data is considered. It is justified that the classical approach to evaluation of the minimum effective stress gives overestimated results provided that the local fracturing with 1–2 m fracture radius is applied.

Key words: measurement hydrofracturing, stress state, minimum stress, borehole measurements.

Измерение действующих в горном массиве напряжений является одной из основных задач геомеханики. Получение достоверных данных о напряженно-деформированном состоянии (НДС) позволяет успешно решать вопросы эффективной разработки месторождений полезных ископаемых, строительства и эксплуатации подземных объектов. К наиболее распространённым методам оценки напряжений относится гидравлический разрыв пласта (ГРП), при этом используются данные измерений давлений раскрытия и закрытия единичной трещины [1].

Особенностью используемого в горном деле и подземном строительстве метода является масштаб формируемых трещин. В этом случае ГРП проводят малогабарит-

ными устройствами с созданием трещин радиусом 1–2 метра. Развитие теории гидроразрыва на начальном этапе происходило в связи с оптимизацией разработки нефтегазовых месторождений, при этом размеры создаваемых трещин достигали десятки и сотни метров. Несмотря на это, для обработки и тех, и других данных используются одинаковые подходы и 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 [2].

Интерпретация получаемых данных основана на предположениях, что разрыв образуется вдоль скважины в направлении максимального сжимающего напряжения $\sigma_{\max}$, действующего по нормали к ее оси, не выходит в скважину вне интервала герметизации, и оба крыла трещины симметричные и плоские. На графике $P(t)$ выделяют характерные точки, называемые давлениями раскрытия P_r и запирания P_S, 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 $\sigma_{\min}$.Широкое распространение получила следующая схема интерпретации регистрируемых данных [3]:

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

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

При использовании уравнения (1) возникают следующие вопросы. Первый из них связан с определением точки P_S на графике $P(t)$, второй – в ее интерпретации.

Для определения положения этой точки на графике $P(t)$ предложены несколько методик; разброс оценок P_S, получаемых разными подходами, может достигать 14–42 % [4]. 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.

Другим вопросом является интерпретация P_S. Одни исследователи считают, что P_S соответствует остановке роста трещины в условиях равномерного давления жидкости на ее берега, другие полагают, что значение P_S связано с моментом смыкания берегов трещины гидроразрыва при $P(t) = \sigma_{\min}$. Для разрывов большого размера 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 скважинного устройства могут иметь значение [5]. Влияние этих параметров на точность определения напряжений в породном массиве исследовалось в ходе проведения лабораторных экспериментов.

Схема лабораторной установки включала устройство гидроразрыва, насос с баком и обратным клапаном на выходе, пресс, дроссель и соединительные рукава высокого давления. Измерительная система содержала датчик давления ЛХ-412/400, электронное согласующее устройство для преобразования выходного сигнала тензометрического датчика, АЦП и компьютер для регистрации и обработки данных.

В ходе экспериментов устройство гидроразрыва вставляли в скважину диаметром 16 мм, пробуренную в блоке оргстекла. Рабочую жидкость подавали в интервал разрыва. Внешнее нагружение модели не применяли. Утечки рабочей жидкости в породу моделировали с помощью регулируемого дросселя. Замеры давления выполняли дискретно по времени $P(t_i)$ с шагом $\Delta t = 1$мс.

На рисунке 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.

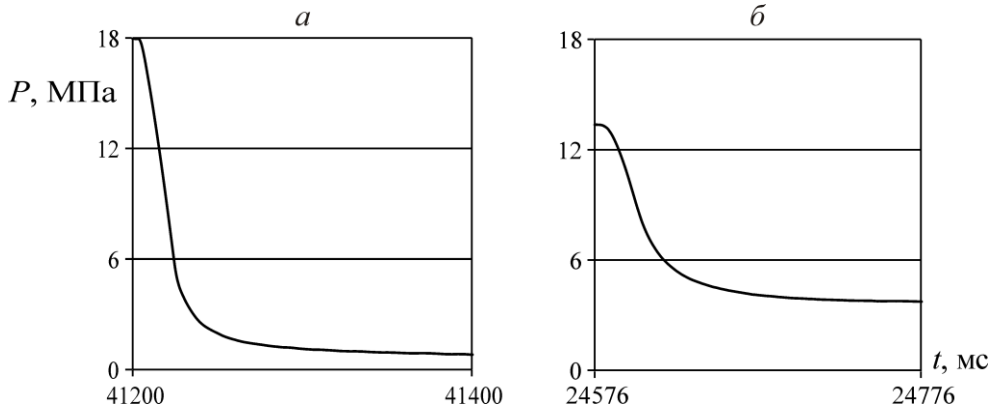


Рис. Кривые падения давления рабочей жидкости в интервале гидроразрыва:

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). Аппроксимация полученных нисходящих ветвей 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, и давлением разрыва материала P_F, приведены в таблице.

Таблица

Замеры и расчеты давлений запирания и распространения трещин

Средний радиус трещины, см	Характеристика трещины	P_S (замеры)	P_F (расчет при $K_{IC} = 1.20$ МПа·м$^{1/2}$)	P_F (расчет при $K_{IC} = 1.47$ МПа·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

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.

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

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Hubbert M.K., Willis D.G. Mechanism of hydraulic fracturing // Trans. AIME. – 1957. – Vol. 210. – P. 153–168.

2. Сердюков С.В., Курленя М.В., Патутин А.В. К вопросу об измерении напряжений в породном массиве методом гидроразрыва // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2016. – № 6. – С. 6–14.

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 // Geological Society of American Bulletin. – 1976. – Vol. 87. – No. 2. – P. 250–258.

4. Рубцова Е. В., Скулкин А. А. О методах косвенного определения величины давления запирания трещины при измерительном гидроразрыве // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2016. XII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология» : сб. материалов в 4 т. (Новосибирск, 18–22 апреля 2016 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2016. Т. 3. – С. 265–269.

5. Choi S.O. Interpretation of shut-in pressure in hydrofracturing pressure-time records using numerical modeling // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2012. – Vol. 50. – P. 29–37.

© А. В. Патутин, Л. А. Рыбалкин, 2017