



**МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗВИТИЯ ТРЕЩИНЫ ГИДРОРАЗРЫВА ПРОДУКТИВНОГО ПЛАСТА  
В ПОЛЕ СЖАТИЯ С ПОМОЩЬЮ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ**

**И. В. Колыхалов**

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

Приведены результаты экспериментального исследования развития трещины гидроразрыва пласта вязкой жидкостью, образующейся изначально из зародышевой дисковой трещины, в условиях сжатия. Получены экспериментальные зависимости формы трещины от скорости нагнетания и вязкости рабочей жидкости. Проанализировано ее влияние на параметры развивающихся трещин.

*Физическое моделирование, трещина гидроразрыва, форма трещины, вязкая жидкость, горное давление*

**MODELING OF HYDRAULIC FRACTURING CRACK DEVELOPMENT  
BY VISCOUS FLUID IN THE COMPRESSION FIELD**

**I. V. Kolykhalov**

*Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,  
E-mail: ikolykhalov@mail.ru, Krasny pr. 54, Novosibirsk 630091, Russia*

The paper presents results of the experimental study of hydraulic fractures formed by viscous liquid, which is initially generated from an initiating disk crack under compression stress conditions. Experimental dependences of crack geometries on injection velocity and viscosity of working fluid are obtained. The influence of working fluid properties on parameters of the developing cracks is analyzed.

*Physical modeling, hydraulic fracturing crack, crack form, viscous fluid, rock pressure*

Гидроразрыв пласта (ГРП) — один из высокоэффективных методов интенсификации добычи углеводородов из газовых и нефтяных скважин и увеличения приемистости нагнетательных скважин. Метод заключается в создании системы высокопроводимых трещин в продуктивном пласте для обеспечения притока добываемого флюида к забою скважины. ГРП позволяет увеличить дебит скважин, на которых добыча нефти и газа традиционными способами малорентабельна [1]. Кроме того, с помощью гидроразрыва можно осваивать месторождения некоторых полезных ископаемых без строительства шахт, рудников, вести добычу углеводородов из низкопроницаемых, неоднородных коллекторов, высоковязких нефтей и проводить дегазацию угольных пластов [2, 3]. Данная технология нашла также достаточно широкое применение в методах оценки компонент природного поля напряжений в массиве горных пород [4].

Эффективность ГРП зависит от множества факторов, главными из которых являются пространственная ориентация, форма и геометрические размеры трещины, эксплуатационная характеристика скважин до ГРП, характеристики призабойной зоны пласта, свойства пласта (степень

неоднородности, объем продуктивной части пласта, геометрия распределения непроницаемых прослоев) [5]. Только на первый из перечисленных факторов можно повлиять на стадии проектирования ГРП. Для достижения наилучшего результата требуется создание трещины нужной формы и размера. Особенно это необходимо в случае применения технологии многостадийного гидроразрыва пласта в низкопроницаемых и неоднородных коллекторах, а также при добыче высоковязких нефтей, когда зоны дренирования трещин должны охватить весь продуктивный пласт. На геометрию развивающейся трещины существенное влияние оказывают разность главных напряжений, вызванных горным давлением, наличие вблизи искусственно созданных или естественных трещин, так как ее раскрытые порождения вокруг себя дополнительные поля напряжений, режим нагнетания и свойства рабочей жидкости [6]. Причем режим нагнетания и свойства жидкости могут играть определяющую роль [7]. В работе проводится экспериментальное моделирование криволинейного развития изначально дисковой трещины гидроразрыва, нагружаемой вязкой жидкостью, в поле одноосного сжатия. Особое внимание уделяется влиянию скорости нагнетания и вязкости рабочей жидкости на геометрию и симметричность формы образующейся трещины.

**Методика эксперимента.** Эксперименты по изучению процесса развития трещины гидроразрыва проводились на специально созданном стенде одноосного нагружения. Стенд состоит из трех металлических плит с восемью равномерно распределенными смотровыми щелями, две из которых параллельно жестко закреплены между собой металлическими шпильками, а третья может свободно двигаться между ними (рис. 1).

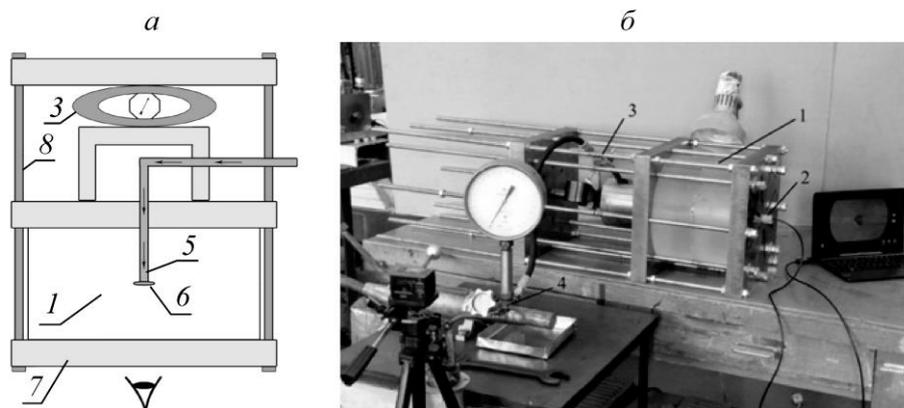


Рис. 1. Схема лабораторного стенда (а), внешний вид стенда (б): 1 — образец из оргстекла; 2 — смотровые щели, видеокамера для съемки проекции формы трещины на плоскость зародышевой трещины; 3 — динамометр; 4 — нагнетающее устройство; 5 — скважина; 6 — зародышевая трещина; 7 — металлические плиты; 8 — шпилька

Нагружение проводилось с помощью винтового механизма через динамометр ДОСМ-3-50. В качестве рабочей среды взяты блоки из полиметилметакрилата (оргстекло марки ТОСН, ГОСТ 17622-72) цилиндрической формы размером 260×260×110 мм. В центре блока сверлилось отверстие, имитирующее скважину, посредством резьбы оно соединялось с гидравлической системой для подачи жидкости гидроразрыва. В качестве рабочей жидкости использовались водные растворы глицерина CAS No 56-81-5 и колеровочной пасты, изготовленной по ТУ 2332-014-76174671-2005. Жидкость с известной вязкостью подавалась с заданным расходом. Вязкость измерялась вискозиметрами ВПЖ-4. В ходе эксперимента фиксировались величина давления закачиваемой жидкости и форма трещины.

Испытуемый образец представлял собой блок с пробуренным отверстием на глубину 55 мм и выточенной зародышевой трещиной радиусом 6 мм, которая при помощи пластического материала удлинялась до радиуса 12–14 мм. Такое удлинение необходимо для того, чтобы при

последующей подаче жидкости не образовалась продольная трещина. Гидроразрыв проводился до момента, пока фронт трещины не вышел на поверхность образца. Величина, сдавливающего блок напряжения, составляла  $\sigma_z = 0.57$  МПа.

**Анализ результатов.** На рис. 2 показаны примеры образцов после испытаний. Получившиеся трещины имеют подобный вид, их крылья ориентированы в разные стороны. Если разбить блок вдоль скважины двумя взаимоперпендикулярными друг к другу плоскостями, то можно подобрать такое их расположение, что крылья трещины на одной из них будут иметь траектории, загибающиеся вдоль действия максимального напряжения внешнего поля сжатия, а на второй плоскости траектории будут практически прямолинейными (пунктирная линия на рис. 2). Если сравнить формы трещин, полученные для разных вязкостей жидкости и скорости закачки, относительно пунктирной линии, то для маловязкой жидкости характерна выраженная асимметрия. Площадь трещины над линией на рис. 2а значительно превышает площадь ниже линии. На рис. 2б эта разница меньше.

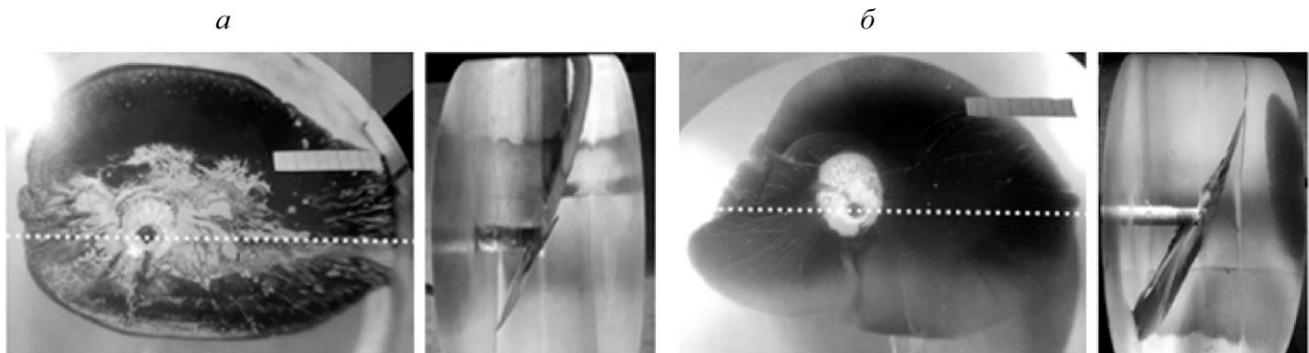


Рис. 2. Внешний вид трещин в образцах после проведения гидроразрыва: а —  $\mu_0 = 70$  МПа·с,  $q_0 = 0.65 \cdot 10^{-6}$  м<sup>3</sup>/с; б —  $\mu_0 = 670$  МПа·с,  $q_0 = 0.75 \cdot 10^{-6}$  м<sup>3</sup>/с

Для трещин гидроразрыва, когда в качестве рабочей жидкости используется идеальная, характерно неустойчивое развитие. Эта неустойчивость состоит в том, что малые отклонения ее начальной формы от круговой в процессе развития не затухают за счет влияния внешних факторов, таких как неоднородность среды, поле напряжений вокруг трещины, и ее симметрия полностью пропадает. Данное явление можно наблюдать при образовании трещин многостадийного гидроразрыва, когда уже созданные трещины порождают вокруг себя неоднородное поле напряжений. Подавить развитие неустойчивости удастся, применяя в качестве рабочего тела пластический материал [8]. Вязкая несжимаемая жидкость занимает по своим свойствам промежуточное положение между идеальной жидкостью ( $\mu_0 = 0$ ) и пластическим материалом. Это демонстрирует рис. 2. В последнем случае вязкость увеличилась по сравнению с первым в 11 раз, эффект стабилизации (подавления неустойчивости) очевиден. Так, расстояния от дальней точки фронта трещины до центра скважины на их проекции с поверхности образца для  $\mu_0 = 70$  МПа·с составляют 96 и 50 мм, для  $\mu_0 = 670$  МПа·с — 71 и 57 мм.

Для сравнения экспериментальных результатов проведены численные расчеты развития осесимметричной и плоской трещин [7] в одноосном поле сжатия. Расчеты выполнялись с помощью программ, разработанных по методу разрывных смещений [9]. Для решения задачи о течении вязкой жидкости вдоль трещины использовалась гипотеза, представленная в работе [10], — эффективные нормальные напряжения, действующие на берегах трещин, пропорциональны их нормальным смещениям. Это приближение в совокупности с уравнением количества движения дает дифференциальное уравнение, позволяющее найти распределение давления в вязкой жидкости, прокачиваемой по трещине:

$$\frac{\partial \Delta p_k(s,t)}{\partial s} - \frac{\partial \sigma_k(s,t)}{\partial s} = -\frac{3\pi^2 \mu_0 q_0 E^3}{4^4 (1-\nu^2)^3} \frac{1}{\Delta p_k^3(s,t) R_k^3(t)s} \quad (\text{осесимметричная постановка}),$$

$$\frac{\partial \Delta p_k(s,t)}{\partial s} - \frac{\partial \sigma_k(s,t)}{\partial s} = -\frac{3 \mu_0 q_0 E^3}{16 (1-\nu^2)^3} \frac{1}{\Delta p_k^3(s,t) R_k^3(t)} \quad (\text{плоская постановка}),$$

где  $\mu_0$  — коэффициент динамической вязкости жидкости;  $q_0$  — расход жидкости;  $\sigma_k(s,t)$  — сумма нормальных напряжений на берегах трещины, порожденных внешним полем сжатия;  $\Delta p_k(s,t)$  — эффективное раскрывающее давление внутри трещины;  $s$  — расстояние по длине линии трещины до точек с максимальным отклонением. Применение такого предположения дает значительную экономию в требуемых расчетных ресурсах и незначительно влияет на точность расчетов при описании динамики течения вязкой жидкости внутри трещины. Для численных расчетов использовались следующие параметры: модуль Юнга оргстекла  $E = 3.3 \cdot 10^3$  МПа, коэффициент Пуассона  $\nu = 0.3$ , критический коэффициент интенсивности напряжений  $K_{Ic} = 14$  МПа·с. В таблице приведены значения полученных величин:  $p(0,0)$  — давление в скважине на момент начала роста трещины,  $\Delta_{\max}^+$ ;  $\Delta_{\max}^-$  — максимальное отклонение трещины вдоль оси сжатия образца от плоскости, перпендикулярной этой оси и проходящей через зародышевую трещину.

Данные, полученные в экспериментах и численных расчетах развития осесимметричной и плоской трещин

Наименование	$\mu_0 = 70 \text{ МПа}\cdot\text{с}, q_0 = 0.65 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$			$\mu_0 = 670 \text{ МПа}\cdot\text{с}, q_0 = 0.75 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$		
	$p(0,0)$ , МПа	$\Delta_{\max}^+(s)$ , мм, $s = 50 \text{ мм}$	$\Delta_{\max}^-(s)$ , мм, $s = 96 \text{ мм}$	$p(0,0)$ , МПа	$\Delta_{\max}^+(s)$ , мм, $s = 57 \text{ мм}$	$\Delta_{\max}^-(s)$ , мм, $s = 71 \text{ мм}$
Эксперимент	13.8	33	-39	20.3	55	-43
Расчетная осесимметричная трещина	13.56	16.3	19	19.74	16.6	17.5
Расчетная плоская трещина	10.61	31.4	-41.7	16.36	50.8	-44.9

Сравнение теоретических и экспериментальных данных показало, что расчеты для осесимметричной трещины, точнее описывают ее развитие в одноосном поле сжатия на начальном этапе, когда она еще не развернулась вдоль действия максимального напряжения. На более поздних этапах расчетная схема для развития плоской трещины дает наиболее приближенные к эксперименту результаты.

## ВЫВОДЫ

Проведена серия экспериментов криволинейного развития изначально дисковой трещины гидроразрыва, нагруженной вязкой жидкостью, в образцах из оргстекла в условиях одноосного сжатия вдоль оси трещины. Установлено влияние скорости нагнетания и вязкости рабочей жидкости на форму развивающихся трещин: использование высоковязкой жидкости приводит к тому, что их траектории меньше отклоняются от прямолинейного направления и существенно подавляется несимметричность формы относительно скважины по сравнению с идеальным флюидом. Полученные результаты сопоставлены с данными численных расчетов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. **Alukhametova E. M., Vorsina N. A., and Syrtlanov O. V.** Effective application of hydraulic fracturing in Povkhovskoye oilfield, Problems of cathering, treatment, preparation and transportation of oil and oil products, 2013, no. 3, pp. 23–29 [Альмухаметова Э. М., Ворсина Н. А., Сыртланов О. В. Эффективность применения гидроразрыва пласта в условиях Повховского месторождения // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. — 2013. — № 3. — С. 23–29.]
2. **Klishin V. I., Kurlenya M. V., and Pisarenkov M. V.** Perfection of geotechnologies and control method in rock massif based on hydraulic fracturing, Mining Information Analytical Bulletin, 2013, no. S6, pp. 23–35 [Клишин В. И., Курленя М. В., Писаренко М. В. Совершенствование геотехнологий и способов управления состоянием массива горных пород на основе их гидроразрыва // ГИАБ. — 2013. — № S6. — С. 23–35.]
3. **Khalimov I. U. and Tursunova S. U.** Improving the efficiency of in-situ leaching of uranium by hydraulic fracturing, Mining Information Analytical Bulletin, 2016, no. 11, pp. 329–334 [Халимов И. У., Турсунова С. У. Повышение эффективности подземного выщелачивания урана путем гидроразрыва пласта // ГИАБ. — 2016. — № 11. — С. 329–334.]
4. **Panov A. V., Skulkin A. A., Tsibizov L. V., and Rodin R. I.** In situ stress evaluation by solving inverse problem based on hydrofracturing stress measurements, Mining Information Analytical Bulletin, 2016, no. 6, pp. 381–388 [Панов А. В., Скулкин А. А., Цибизов Л. В., Родин Р. И. Оценка природных напряжений на основе решения обратной задачи по данным измерительного гидроразрыва // ГИАБ. — 2016. — № 6. — С. 381–388.]
5. **Cherny S. G., Lapin V. N., Esipov D. V., and Kuranakov D. S.** Methods for modeling fracture generation and propagation, Novosibirsk, Publishing House SB RAS, 2016, 312 pp. [Черный С. Г., Лапин В. Н., Есипов Д. В., Куранакوف Д. С. Методы моделирования зарождения и распространения трещин. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2016. — 312 с.]
6. **Smetannikov O. Y., Kashnikov Y. A., Ashihmin S. G., and Shustov D. V.** Numerical model of crack growth in hydraulic re-fracturing, Computational continuum mechanics, 2015, vol. 8, no. 2, pp. 208–218 [Сметанников О. Ю., Кашников Ю. А., Ашихмин С. Г., Шустов Д. В. Численная модель развития трещины при повторном гидроразрыве пласта // Вычислительная механика сплошных сред. — 2015. — Т. 8. — № 2. — С. 208–218.]
7. **Kolykhalov I. V., Martynyuk P. A., and Sher E. N.** Modeling fracture growth under multiple hydraulic fracturing using viscous fluid, Journal of Mining Science, 2016, vol. 52, no. 4, pp. 662–669 [Колыхалов И. В., Мартынюк П. А., Шер Е. Н. Моделирование развития трещин при последовательном поинтервальном гидроразрыве пласта вязкой жидкостью // ФТПРПИ. — 2016. — № 4. — С. 39–47.]
8. **Kolykhalov I. V.** Physical modeling of axisymmetric hydrofracturing by plastic material injection in elastic medium, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2018, vol. 134.
9. **Crouch S. L. and Starfield A. M.** Boundary Element Methods in Solid Mechanics, London, Allen and Unwin, 1983, 328 pp. [Крауч С., Старфилд А. Методы граничных элементов в механике твердого тела. — М.: Мир, 1987. — 328 с.]
10. **Linkov A. M.** Numerical Modeling of Fluid Flow and a Hydraulically Induced Fracture Propagation, Journal of Mining Science, 2008, vol. 44, no. 1, pp. 24–42 [Линьков А. М. Численное моделирование течения жидкости и продвижения трещины гидроразрыва // ФТПРПИ. — 2008. — № 1. — С. 26–46.]