

ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗВИТИЯ БЛИЗКО РАСПОЛОЖЕННЫХ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ ТРЕЩИН ГИДРОРАЗРЫВА

Игорь Владимирович Колыхалов

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, младший научный сотрудник, тел. (383)335-96-54, e-mail: ikolykhalov@mail.ru

Евгений Николаевич Шер

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, тел. (383)335-96-54, e-mail: ensher@sibmail.ru

Открытая трещина гидроразрыва нефтесодержащего пласта создает вокруг себя дополнительное поле напряжений, которое влияет на развитие соседних трещин при поинтервальном гидроразрыве. В работе приведены результаты экспериментального исследования воздействия одной из двух последовательно создаваемых осесимметричных трещин, перпендикулярных скважине, на вторую. Поле напряжений от первой трещины в образце моделируется нагружением его эллипсоидным штампом с заданными полуосями. Проведена серия экспериментов для различных расстояний между трещинами и раскрытий первой. Полученные результаты сопоставлены с данными численных расчетов.

Ключевые слова: поинтервальный гидроразрыв пласта, трещина гидроразрыва, осесимметричная трещина, физическое моделирование.

PHYSICAL MODELING OF CLOSELY SPACED AXISYMMETRIC HYDRAULIC FRACTURES

Igor V. Kolykhalov

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Junior Researcher, tel. (383)335-96-54, e-mail: ikolykhalov@mail.ru

Evgeny N. Sher

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Doctor of Physico-Mathematical Sciences, Principal Researcher, tel. (383)335-96-54, e-mail: ensher@sibmail.ru

An open hydrofracture creates surrounding field of secondary stresses in an oil reservoir, which influences growth of neighbor fractures in multistage hydraulic fracturing. This paper describes the experimental study of influence exerted by one of two sequentially created axially symmetric fractures perpendicular to the well on the second fracture. The stress field due to the first fracture in the specimen is simulated by loading of the specimen by an ellipsoid die block with the preset axes. A series of tests have been carried out for various spacing of the fractures and different opening of the first fractures. The experimental and calculation results show good correspondence.

Key words: multistage hydraulic fracturing, hydrofracture, axisymmetric fracture, physical simulation.

Поинтервальный гидроразрыв пласта является одним из наиболее эффективных методов интенсификации добычи углеводородов из слабопроницаемых коллекторов, а также широко применяется при добыче сланцевой нефти и газа [1-2]. Суть метода заключается в создании серии трещин гидроразрыва перпендикулярно скважине через определенный интервал с целью максимально увеличить площадь поступления углеводородов. Интервал между трещинами гидроразрыва значительно влияет на добычу и данный параметр должен быть оптимизирован для максимизации дебитов углеводородов и охвата пласта дренированием. С совершенствованием методов диагностики трещин становится очевидным сложность геометрии трещин гидроразрыва. Одним из ключевых факторов, объясняющим геометрию распространения трещин, является наличие искусственно созданных и естественных трещин. Каждая созданная и заполненная пропантом трещина создает дополнительное поле напряжений в окружающей породе, которое влияет на траектории развития новых трещин, их раскрытия и, как следствие, на продвижение жидкости и пропанта внутри развивающихся трещин [3-5].

Результаты теоретических исследований распространения трещин гидроразрыва вблизи существующих приведены в работах [6-8], где в плоской и осесимметричной постановках задачи разработаны алгоритмы расчета траектории развития трещин при поинтервальном гидроразрыве. В данной работе проводится моделирование распространения поперечной к скважине осесимметричной трещины гидроразрыва, формируемой рядом с существующей раскрытой трещиной. Целью такого исследования является проверка соответствия форм трещин, полученных в эксперименте и теоретическими расчетами.

Методика эксперимента. Физическое моделирование выполнялось на блоках из полиметилметакрилата (оргстекло) размером 230x160x106 мм и 170x170x36 мм. Имеющаяся заполненная пропантом трещина гидроразрыва моделировалась поверхностной нагрузкой создаваемой круглым штампом эллипсоидной формы со смещением в центре $U = 0,3\text{мм}$ (малая полуось) и диаметром 100 мм (большая полуось). Штамп с помощью болтов диаметром 6 мм с заданным усилием притягивался к наибольшей по площади стороне испытуемого образца (рис. 1). На противоположной стороне блока вдоль оси имеющейся трещины создавалось отверстие диаметром 10 мм, имитирующее добывающую скважину. На дне отверстия, на расстоянии h от имеющейся выфрезеровывалась узкая зародышевая осесимметричная трещина, поперечная скважине. Диаметр такой трещины с учетом диаметра скважины составлял 14 мм. Далее в зародышевую трещину с помощью винтового устройства подавался расклинивающий агент с расходом $0.5 - 0.7\text{см}^3 / \text{мин}$. Трещина в режиме близком к квазиравновесному развивалась до момента, пока проекция её радиуса на плоскость имеющейся трещины не достигала 50-60 мм. В качестве расклинивающего агента использовался пластилин ОСТ 6-15-1525-86 при температуре 24°C . В описанной постановке была проведена серия экспериментов для различных расстояний h от растущей трещины до имеющейся.

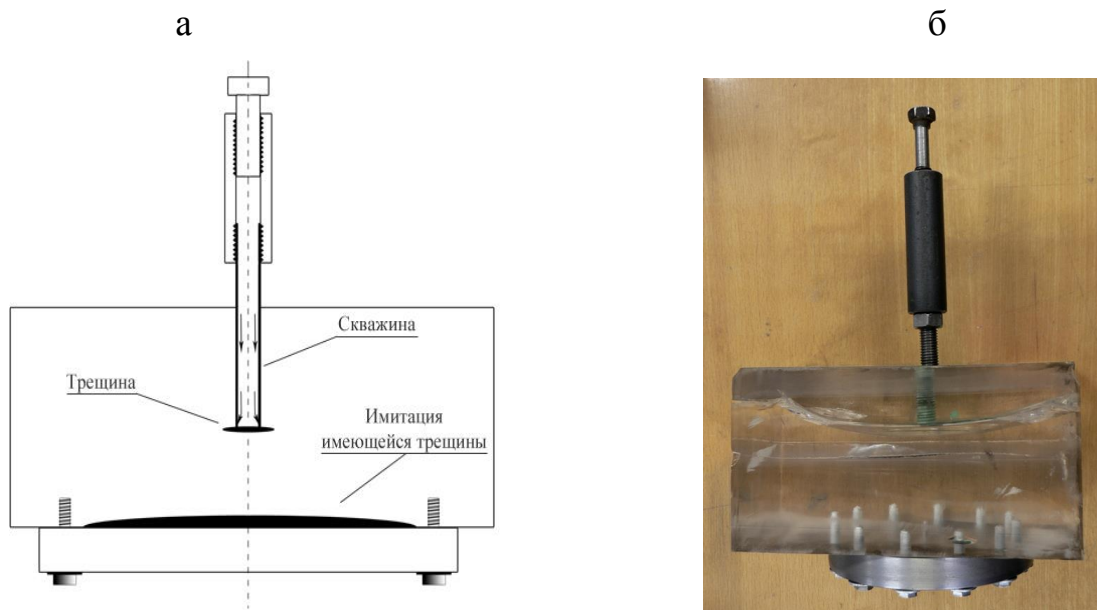


Рис. 1. Схема проведения экспериментов по развитию близко расположенных трещин гидроразрыва (а), вид образца со штампом и нагнетательного устройства (б)

Для сравнения полученных экспериментальных результатов были проведены численные расчеты развития осесимметричной трещины вблизи имеющейся. Алгоритм расчета подробно описан в [7, 8]. Постановка задачи: в упругом пространстве, сжатом на бесконечности главными напряжениями $P_{xx} = P_{yy} = P_{zz} = 0$, перпендикулярно оси z находятся три соосные, параллельные дисковые трещины (рис. 2). Первая трещина имеет радиус Q и граничные условия на берегах $\sigma_n = 0$, $\tau_s = 0$. Данная трещина моделирует свободную от напряжений поверхность блока. Вторая и третья трещины имеют радиусы R и r - имеющаяся и зародышевая соответственно.

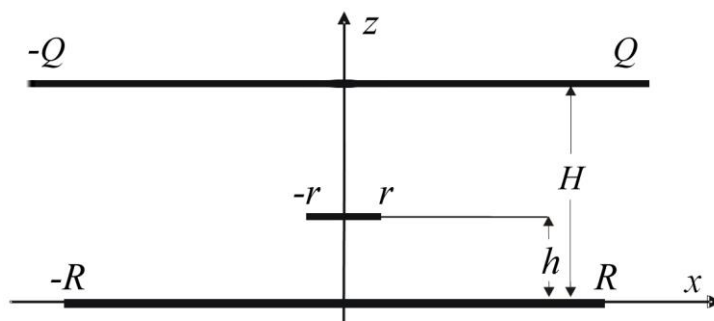


Рис. 2. Начальное расположение трещин в сечении плоскостью $y = 0$

Граничные условия на берегах трещин заданы давлением $p(t)$ в зародышевой трещине и эллипсоидным раскрытием имеющейся трещины, равным $2U_0$ в ее центре. Расстояние между свободной поверхностью и имеющейся трещиной H , между зародышевой и имеющейся - h .

Для численного расчета использовались следующие параметры задачи: модуль Юнга оргстекла $E = 3,3 \cdot 10^3 \text{ МПа}$, критический коэффициент интенсивности напряжений $K_{Ic} = 1,4 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{0,5}$, $R = 50 \text{ мм}$, $2U_0 = 0,6 \text{ мм}$. Развитие трещины рассчиталось в квазиравновесном режиме с использованием в качестве рабочего флюида идеальной жидкости [5]. Направление развития трещины определялось из условия ее распространения по направлению с максимальным тангенциальным растягивающим напряжением.

Анализ результатов. На рис. 3, 4 представлены формы трещин, полученных экспериментально и рассчитанных численно.

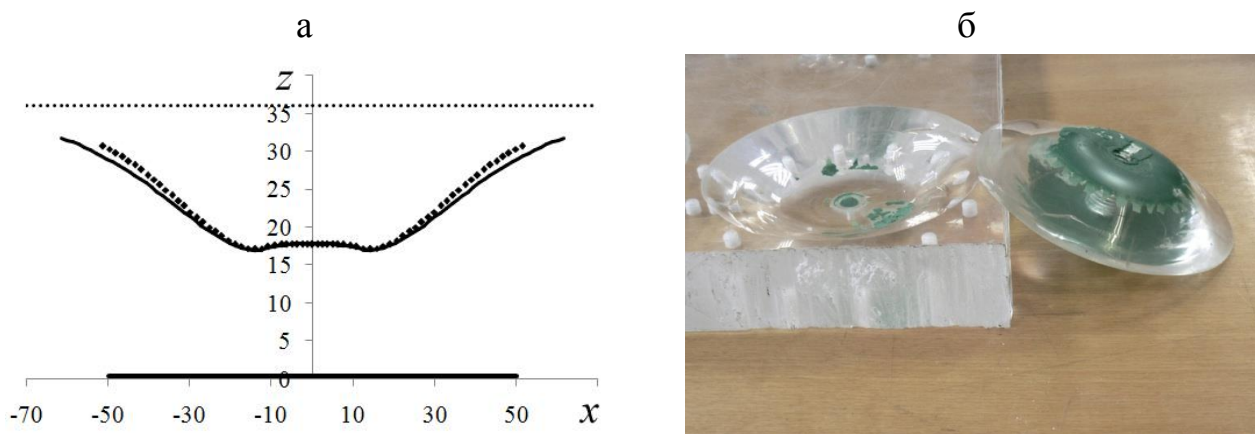


Рис. 3. Результат эксперимента на блоке с размером $H = 36 \text{ мм}$:
 а - траектории осесимметричной трещины, развившейся из начальной, находящейся на расстоянии $h = 18 \text{ мм}$ от имеющейся, с раскрытием в центре $2U_0 = 0,6 \text{ мм}$; б - внешний вид формы получившейся трещины

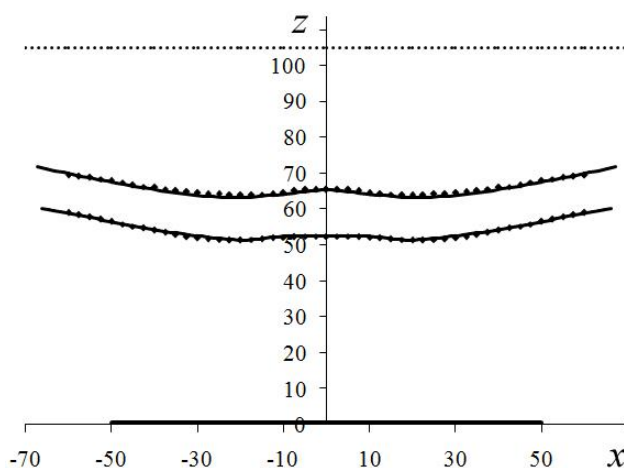


Рис. 4. Траектории осесимметричных трещин, образованных на расстоянии $h = 53 \text{ мм}$ и $h = 67 \text{ мм}$ от имеющейся в образце с размером $H = 106 \text{ мм}$

Прерывистые линии на рис. 3, 4 соответствуют траекториям, полученным экспериментально, сплошные - расчетные. Точками обозначена свободная поверхность.

Сравнение теоретических и экспериментальных траекторий, приведенных на рис.3, 4 показывает, что расчетная схема работы [5] позволяет достаточно хорошо описать форму трещин, образующихся при поинтервальном гидроразрыве. Расхождение между численными и экспериментальными данными не превышает 10%.

Заключение. Разработана схема экспериментального моделирования развития осесимметричной трещины поперечного к скважине гидроразрыва в зоне воздействия уже существующей дисковой трещины. Проведена серия экспериментов для различных расстояний между трещинами. Выявлено влияние существующей раскрытой трещины гидроразрыва на траекторию развития новой. Проведен сравнительный анализ полученных результатов с теоретическими расчетами и показано хорошее их соответствие.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 14-05-00156).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Григорьев Г.А., Афанасьев Т.А. Перспективы промышленного освоения нетрадиционных ресурсов газа в России // Нефтегазовая геология. Теория и практика.-2012.-Т.7.-№2.
2. Deimbacher F.X., Economides M.J., Jensen O.K. Generalized performance of hydraulic fractures with complex geometry intersecting horizontal wells // SPE 25505, Production Operations Symposium.-1993.-Oklahoma, USA.
3. Салимов О.В., Насыбуллин А.В., Салимов В.Г. Влияние множественных трещин в дальней зоне на успешность операций гидроразрыва пластов // Нефтепромысловое дело.-2010.-№10.-С. 24-27.
4. Rahman M.M., Hossain M.M. et al. Analytical, numerical and experimental investigations of transverse fracture propagation from horizontal wells // J. of Petroleum Science & Engineering.-2002.- Vol. 35. 127-150.
5. Kresse O., Weng X., et al. Numerical Modeling of Hydraulic Fractures Interaction in Complex Naturally Fractured Formations // Rock Mechanics and Rock Engineering.- 2013.- Vol. 46.
6. Шер Е.Н., Колыхалов И.В. Особенности последовательного развития близко расположенных трещин гидроразрыва // ФТПРПИ. — 2011. — № 6.-С. 45-55.
7. Шер Е.Н., Колыхалов И.В., Михайлов А.М. Моделирование развития осесимметричных трещин при множественном гидроразрыве // ФТПРПИ.-2013.-№5.-С. 70-79.
8. Шер Е.Н., Колыхалов И.В. Определение форм трещин при поинтервальном гидроразрыве продуктивного пласта // ФТПРПИ.-2014.-№6.-С. 70-78.

© И. В. Колыхалов, Е. Н. Шер, 2016