

© А.В. ТАТОСОВ

atatosov@utmn.ru

УДК 539.3

РАЗВИТИЕ ТРЕЩИНЫ В ОГРАНИЧЕННОМ ПОРИСТОМ ОБЪЕМЕ

АННОТАЦИЯ. Теории развития и формирования трещины гидроразрыва нефтяного пласта посвящено значительное число работ отечественных и зарубежных авторов. Данная технология используется с целью повышения дебита добывающих скважин. При интенсивном режиме работы нагнетательных скважин возможен непреднамеренный гидравлический разрыв пласта. В данной работе рассмотрен процесс вытеснения флюида из пористой среды путем подачи другой жидкости в раскрывающуюся трещину. Форма пласта принята в виде прямоугольного параллелепипеда неограниченной длины. Трещина гидроразрыва направлена по центру вдоль пласта. Пласт первоначально пропитан вязкой жидкостью, гидроразрыв производится менее вязкой жидкостью. Считалось, что на боковых гранях параллелепипеда внутрипластовое давление остается неизменным и равным первоначальному значению. Это может быть связано с изменением коэффициента фильтрации и геометрии слоев породы. Показано, что в некоторых случаях наблюдается расширение и последующее сужение трещины при сохранении интенсивности закачки.

SUMMARY. There has been a lot of domestic and foreign research done on the theories to develop hydraulic fracturing of oil formation. This technology is used to increase the production rate of wells. But the intensive operation of injection wells can lead to unintended fracturing. This paper describes the process of displacement of fluid from a porous medium by filing in another liquid in the new crack. For the purposes of the present research the oil formation is modeled as a cuboid of unlimited length. The hydraulic fracture is directed along its center seam. Initially the formation is saturated with a viscous fluid, the hydraulic fracturing is achieved with a less viscous liquid. It was believed that the internal pressure at the faces of the parallelepiped remains unchanged and equal to the original value. This may be due to the change of rock layers filter factors and their hydraulic geometry. It is shown that in some cases one can expect the expansion and subsequent contraction of cracks while maintaining the intensity of pumping.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА. Пористая среда, фильтрация, жидкость.

KEY WORDS. Porous media, filtration, fluid.

Математическая постановка задачи.
Схематическое представление задачи дано на рис. 1.

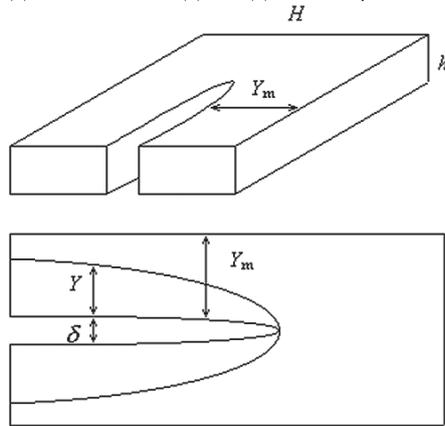


Рис. 1. Схематическое представление задачи о развитии трещины в пласте ограниченного размера

На основании гипотезы Перкинса [1] с учетом формы плоских трещин в упругой среде [2] вводится связь избыточного давления P со средней шириной трещины δ . Процесс развития трещины определяется уравнениями [3, 4]

$$\begin{aligned} \frac{\partial \delta}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} &= -2\beta v_r, \\ q &= -\frac{b}{12\eta_1} \delta^3 \frac{\partial \delta}{\partial x}, \\ \frac{\partial Y}{\partial t} &= v_r; \end{aligned} \quad (1)$$

где Y — глубина зоны проникновения воды в пласт, $q = \delta u$, u — скорость вдоль трещины (оси абсцисс), $\eta_{1,2}$ — вязкости вытесняющей и вытесняемой жидкостей, β — пористость грунта, b — постоянная.

Из уравнений фильтрации [5-7]

$$\begin{aligned} \frac{\partial p_r}{\partial y} &= -\frac{\eta_1}{k} v_r, & 0 < y < Y; \\ \frac{\partial p_r}{\partial y} &= -\frac{\eta_2}{k} v_r, & Y < y < Y_m; \end{aligned}$$

с учетом граничных условий

$$p_r(0) = P = b\delta, \quad p_r(Y) = 0;$$

определим скорость жидкости в грунте, как

$$v_r = \frac{kb}{\eta_1} \frac{\delta}{Y \left[1 + \frac{\eta_2}{\eta_1} \left(\frac{Y_m}{Y} - 1 \right) \right]}.$$

При достижении функцией Y значения Y_m , ее дальнейший рост прекращается.

Безразмерная форма.

Введем безразмерные переменные [8-10]

$$\bar{x} = \frac{x}{L^*}, \quad \bar{t} = \frac{t}{t^*}, \quad \bar{\delta} = \frac{\delta}{\delta^*}, \quad \bar{q} = \frac{q}{q^*}, \quad \bar{v} = \frac{v_r}{v^*}, \quad \bar{Y} = \frac{Y}{Y^*};$$

положив

$$L^* = \frac{1}{4\beta} \sqrt{\frac{k}{6}} \frac{P_0^2}{kb^2}, \quad t^* = \frac{1}{4\beta^2} \frac{\eta_1 P_0}{kb^2}, \quad \delta^* = \frac{P_0}{b},$$

$$q^* = 2\beta \sqrt{\frac{k}{6}} \frac{P_0^2}{\eta_1 b}, \quad Y^* = \frac{1}{2\beta} \frac{P_0}{b}, \quad v^* = 2\beta \frac{kb}{\eta_1}.$$

Здесь P_0 — параметр, в качестве которого примем характерное избыточное давление на входе в трещину, такой величине давления будет соответствовать $\bar{\delta}(0, t) = 1$.

Система уравнений движения принимает следующую безразмерную форму (черта опущена)

$$\frac{\partial \delta}{\partial t} + 2 \frac{\partial q}{\partial x} = -v,$$

$$q = -\delta^3 \frac{\partial \delta}{\partial x},$$

(2)

$$\frac{\partial Y}{\partial t} = v;$$

скорость течения в грунте

$$v = \frac{\delta}{Y + \frac{\eta_2}{\eta_1} (Y_m - Y)}, \quad 0 \leq Y \leq Y_m.$$

Рассмотрим процесс развития трещины гидроразрыва при закачивании в пласт жидкости с постоянным расходом на входе. Начальные и граничные условия имеют вид

$$\delta(x, 0) = q(x, 0) = Y(x, 0) = 0;$$

$$q(0, t) = q_0, \quad q_0 = const.$$

Некоторые результаты расчетов.

На рис. 2 приведен пример решения системы уравнений (2) при $q_0 = 0.5$, $Y_m = 2$, $\eta_2/\eta_1 = 10$. Форма трещины изменяется несколько необычно. До некоторого момента времени трещина растет в длину и в ширину, плавно сужаясь к своему носику.

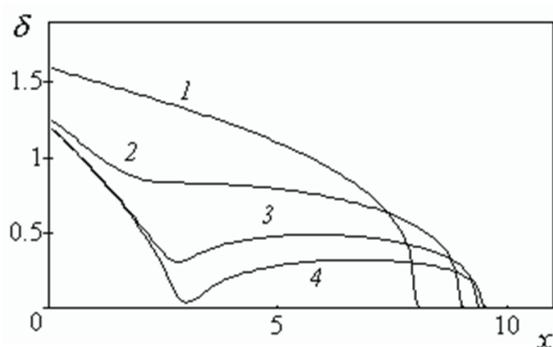


Рис. 2. Распределения безразмерной ширины по длине трещины в моменты времени $t=15, 20, 25, 30$ — кривые 1, 2, 3, 4

В дальнейшем происходит быстрое уменьшение до нуля ширины трещины в ее средней части. Из образовавшейся закрытой полости жидкость постепенно просачивается в грунт и исчезает. В результате формируется устойчивый профиль трещины, раскрытая часть которой заметно меньше ее полной длины. Дальнейшее закачивание жидкости не приводит ни к росту трещины, ни к изменению ее формы.

Для больших значений Y_m характер движения повторяется. Данный эффект связан с постепенным увеличением по всей длине способности протекания жидкости из трещины в грунт, вследствие расширения глубины зоны пропитки, и возможно с нелинейностью коэффициентов при производных в уравнениях движения. При значениях $Y_m < 0.5$, указанная особенность не наблюдается.

Заключение. Рассмотрен процесс вытеснения флюида из ограниченной по ширине пористой среды путем подачи другой жидкости в раскрывающуюся трещину. Показано, что рост трещины может остановиться. В некоторых случаях наблюдается смыкание уже раскрытой трещины при сохранении интенсивности закачки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Perkins, T.K., Kern, L.R. Widths of hydraulic fractures // J. Petrol. Technol., Paper SPE 89. 1961. Vol. 13, № 9. Pp. 937-949.
2. Новацкий В. Теория упругости. М.: Мир, 1975. 429 с.
3. Ивашнев О.Е., Смирнов Н.Н. Формирование трещины гидроразрыва в пористой среде // Вестник Московского университета. Сер. I. 2003. № 6. С. 28-36.
4. Татосов А.В. Заполнение пропантом трещины гидроразрыва // Вестник Тюменского государственного университета. 2004. № 4. 256-261.
5. Басниев К.С., Кочина И.Н., Максимов В.М. Подземная гидромеханика. М.: Недра, 1993. 414 с.
6. Ентов В.М., Заковский А.Ф. Гидродинамика процессов повышения нефтеотдачи. М.: Недра, 1989. 232 с.
7. Баренблатт Г.И., Ентов В.М., Рыжик В.М. Движение жидкости и газов в природных пластах. М.: Недра, 1984. 530 с.
8. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика. М.: Физматлит, 2006. 731 с.
9. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. М.: Дрофа, 2003. 847 с.
10. Седов Л.И. Методы подобия и размерности в механике. М.: Наука, 1987. 430 с.

REFERENCES

1. Perkins, T.K., Kern, L.R. Widths of hydraulic fracturesю *J. Petrol. Technol.*, Paper SPE 89. 1961. Vol. 13. № 9. Pp. 937-949.
2. Novackij, V. *Teorija uprugosti* [Elasticity Theory]. М.: Mir, 1975. 429 p. (in Russian).
3. Ivashnev, O.E., Smirnov, N.N. Hydrolytic crack development in porous media. *Vestnik Moskovskogo universiteta — Moscow University Herald*. Series 1. 2003. № 6. Pp. 28-36. (in Russian).
4. Tatosov A.V. Filling in proppant into the crack of hydrolytic fractures. *Vestnik Tjumenskogo gosudarstvennogo universiteta — Tyumen State University Herald*. 2004. № 4. Pp. 256-261. (in Russian).
5. Basniev, K.S., Kochina, I.N., Maksimov, V.M. *Podzemnaja gidromehanika* [Underground hydromechanics]. М.: Nedra, 1993. 414 p. (in Russian).
6. Entov, V.M., Zazovskij, A.F. *Gidrodinamika processov povyshenija nefteotdachi* [Hydrodynamics of the procedures aimed to increase well productivity]. М.: Nedra, 1989. 232 p. (in Russian).
7. Barenblatt, G.I., Entov, V.M., Ryzhik, V.M. *Dvizhenie zhidkosti i gazov v prirodnyh plastah* [Liquid and gaz movement in natural soil layers]. М.: Nedra, 1984. 530 p. (in Russian).
8. Landau, L.D., Lifshic, E.M. *Gidrodinamika* [Hydrodynamics]. М.: Fizmatlit, 2006. 731 p. (in Russian).
9. Lojczanskij, L.G. *Mehanika zhidkosti i gaza* [Liquid and Gas Mechanics]. М.: Drofa, 2003. 847 p. (in Russian).
10. Sedov, L.I. *Metody podobija i razmernosti v mehanike* [Similarity and dimension in mechanics]. М.: Nauka, 1987. 430 p. (in Russian).