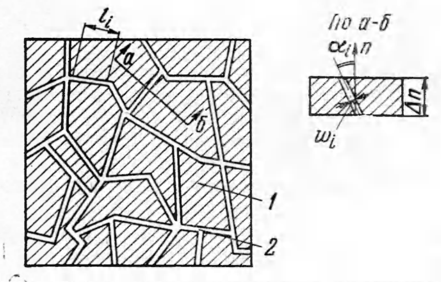
О ДВИЖЕНИИ ОДНОФАЗНОЙ ЖИДКОСТИ В ДЕФОРМИРУЕМЫХ ТРЕЩИНОВАТЫХ ПОРОДАХ С ЧИСТО ТРЕЩИННОЙ ПОРИСТОСТЬЮ

Ю. П. Желтов

(Москва)

Основные физические представления теории фильтрации однофазной жидкости в трещиноватых породах изложены в работах [1,2]. В них изучено главным образом явление обмена жидкостью между системой трещин и системой пористых и проницаемых блоков породы. Деформация пород, слагающих трещиноватый пласт, рассматривалась лишь в связи с учетом изменения емкости трещиноватого пласта при неустановившемся движении жидкости. Однако деформация пород приводит не только к изменению объема трещин, но и к изменению эффективной проницаемости трещиноватой породы, о чем свидетельствуют искривления зависимостей дебита скважин от разности между пластовым и забойным давлением (индикаторных кривых). В предлагаемой работе рассматривается влияние деформации трещиноватого пласта, блоки породы в котором являются практически непористыми и непроницаемыми, на процесс движения в нем однофазной жидкости.



Фиг. 1. Схема среды с сильно развитой трещиноватостью: *1* — блоки породы, *2* — трещины

§ 1. Уравнение движения однофазной жидкости в деформируемых трещиноватых породах. При рассмотрении процессов движения однофазной жидкости в трещиноватых породах в качестве модели трещиноватой среды будем принимать среду с сильно развитой трещиноватостью [1,2], используя методы механики сплошных сред.

Рассмотрим пласт с чисто трещинной пористостью, т. е. содержащий практически непористые и непроницаемые блоки породы.

В качестве закона движения жидкости в трещиноватой среде примем известную [3] формулу, которую согласно фиг. 1 для расхода жидкости q, через систему трещин между двумя сечениями трещиноватого пласта площадью ΔS, расположенными одно от другого на расстоянии Δn перпендикулярно к n, можно представить в виде [4]

$$q = -\frac{1}{12\mu}\sum_{\Delta S} w_i^3\, l_i \cos\alpha_i\ \lambda_i \frac{\Delta p}{\Delta n} \qquad (1.1)$$

Здесь μ — вязкость жидкости, p — давление жидкости в системе трещин, w_i, l_i — соответственно ширина отдельной трещины и ее длина в сечении ΔS, а α_i — угол между плоскостью i-й трещины и направлением n; величина $\lambda_i = 0$ или 1 в зависимости от того, будет ли трещина проточной или непроточной [4].

Произведя осреднение ширины трещины в пределах ΔS, имеем

$$\sum_{\Delta S} w_i^3 l_i \cos\alpha_i\lambda_i \approx w_*^3 \sum_{\Delta S} l_i \cos\alpha_i\lambda_i \qquad (1.2)$$

Здесь w_* — средняя ширина трещин. Введем обозначение

$$\sigma = \frac{1}{\Delta S}\sum_{\Delta S} l_i \cos\alpha_i\lambda_i \qquad (1.3)$$

Считая ΔS достаточно большой величиной по сравнению с сечениями блоков породы и в то же время малой по сравнению с рассматриваемыми сечениями пласта в целом, а также полагая трещиноватую среду изотропной, получаем, устремляя Δn к нулю, следующее выражение для скорости фильтрации в окрестности каждой точки трещиноватого пласта

$$\mathrm{v} = -\frac{\sigma w_*^3}{12\mu}\operatorname{grad} p \qquad (1.4)$$

или полагая $w_* = w_{*0} f(p)$

$$\mathrm{v} = -\frac{\sigma w_{*0}^3}{12\mu} f^3(p)\operatorname{grad} p \qquad (1.5)$$

где w_{*0} — начальная средняя ширина трещин в сечении ΔS.

Используя уравнение неразрывности и предполагая, как обычно, что зависимости плотности жидкости и трещинной пористости от давления являются линейными, а также осредняя значение плотности жидкости и пористости получаем уравнение движения однофазной жидкости в деформируемых трещиноватых горных породах

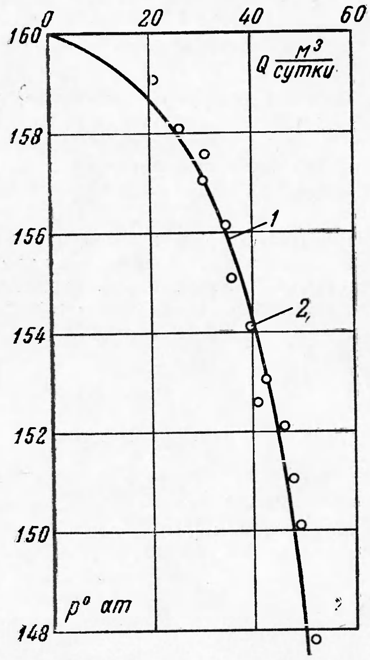
$$\frac{k}{\mu}\operatorname{div} f^3(p)\operatorname{grad} p = \beta\,\frac{dp}{dt} \tag{1.6}$$

Здесь

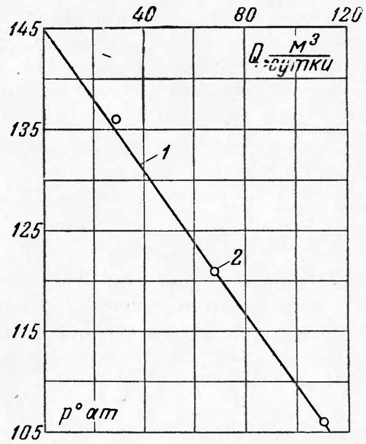
$$k = \frac{\sigma w_{*0}{}^3}{12}, \qquad \beta = \beta_1 + m\beta_2$$

при этом β_1— эффективная сжимаемость пород в системе трещин, β_2— сжимаемость жидкости t — время m — трещинная пористость, равная отношению объема трещин к рассматриваемому объему трещиноватого пласта.

Трещины в начальный момент времени заполнены жидкостью, находящейся под давлением p_0. Пусть в какой-то момент времени давление жидкости в некотором объеме трещиноватого пласта стало равным $p_i(p_i < p_0)$ Тогда поверхности трещин деформируются и ширина трещин уменьшится. При повышении давления жидкости будет наблюдаться обратная картина. Примем следующие предположения. Во-первых, будем считать, что трещинная пористость зависит от давления жидкости линейно. Это предположение, по-видимому, справедливо при сравнительно малых перепадах давления. Во-вторых, будем полагать, что при изменении давления жидкости изменяется в основном ширина трещин w_i, а не их длина l_i, т. е. что величина площадок контактов блоков изменяется незначительно по сравнению с шириной трещин.



Фиг. 2



Фиг. 3

Фиг. 2. Зависимость $Q = f(p°)$ для скважины № 4 месторождения Селли: *1* — теоретическая кривая, *2* — опытные данные

Фиг. 3. Зависимость $Q = f(p°)$ для скважины № 1 месторождения Селли: *1* — теоретическая кривая, *2* — опытные данные

На основе первого предположения получаем соотношение

$$\beta_1 = \frac{dm}{dp} = \frac{d\Delta v}{\Delta V dp} = \frac{\Delta v_0}{\Delta v_0}\,\frac{d\Delta v}{\Delta V dp} = m\,\frac{d\Delta v}{\Delta v_0 dp} \tag{1.7}$$

где Δv — объем трещин, приходящийся на элементарный объем пласта ΔV; Δv_0 — начальный объем трещин, соответствующий начальному давлению p_0.

Учитывая второе предположение, имеем

$$\frac{d\Delta v}{\Delta v_0 dp} \approx \frac{dw_*}{w_{*0} dp} \tag{1.8}$$

Интегрируя (1.8), получаем

$$w_* = w_{*0}[1 - \beta_*(p_0 - p)], \qquad \beta_* = \frac{\beta_1}{m} \tag{1.9}$$

Отсюда

$$f(p) = a + bp, \qquad a = 1 - \beta_* p_k, \qquad b = \beta_* \tag{1.10}$$

§ 2. Установившееся движение однофазной жидкости в деформируемых трещиноватых породах. В случае установившегося движения однофазной жидкости из (1.6) имеем

$$\operatorname{div} f^3(p) \operatorname{grad} p = 0 \tag{2.1}$$

Рассмотрим установившийся приток жидкости к скважине радиуса r°, расположенный в круговом пласте мощности h с радиусом контура питания R_0. Очевидно, для дебита скважины Q можно написать выражение

$$Q = \frac{k}{\mu} 2\pi r h f^3(p) \frac{\partial p}{\partial r} \tag{2.2}$$

Разделяя переменные и интегрируя, получаем

$$\frac{Q\mu}{2\pi kh} \ln r = \int f^3(p)\, dp + \text{const} \tag{2.3}$$

Подставляя (1.9) и (1.10) в (2.3), вычисляя интеграл и выполняя условия $p = p_0$ при $r = R_0$, $p = p^\circ$ при $r = r^\circ$, имеем

$$\frac{Q\mu}{2\pi kh} \ln \frac{R_0}{r^0} = \frac{(a + bp_0)^4 - (a + bp^0)^4}{4b} \tag{2.4}$$

Сравним с фактическими данными полученную выше теоретическую зависимость $Q = f(p^\circ)$ для установившегося притока однофазной жидкости к скважине в трещиноватом пласте. Теоретические зависимости $Q = f(p^\circ)$ для скважин № 1 и 4 трещиноватого месторождения Селли, находящегося в Дагестанской АССР, представлены на графиках фиг. 2 и 3. Там же точками помечены фактические данные, взятые автором из отчетов ЦНИЛ «Дагнефть», составленных М. Е. Раскиной, Е. И. Озериной, Г. М. Гайдаровым др. Блоки породы на этом месторождении состоят из практически непроницаемого известняка, так что движение жидкости происходит в основном по трещинам.

Для расчета по скважине № 4 были взяты следующие исходные данные: $p_0 = 160$ *ат*, $h = 12$ *м*, вязкость нефти в пластовых условиях $\mu = 2.13$ *сп*, объемный коэффициент $b_0 = 1.22$. Оказалось, что для этой скважины теоретическая зависимость $Q = f(p^\circ)$ хорошо совпадает с фактическими данными при $\beta_* = 10^{-1}$ $ат^{-1}$.

При этом

$$k = \frac{\sigma w_{*0}^3}{12} \approx 530 \text{ миллидарси}$$

Соответственно для скважины № 1 в качестве исходных данных были приняты: $p_0 = 145$ *ат*, $\mu = 1.5$ *сп*, $b_0 = 1.16$, $h = 44$ *м*. Теоретическая зависимость $Q = f(p^\circ)$ хорошо согласуется с фактическими данными при $\beta_* = 10^{-3}$ $ат^{-1}$. Проницаемость трещиноватого пласта $k \approx 17$ *миллидарси*.

В заключение автор благодарит Г. И. Баренблатта за ряд ценных советов.

Поступила 14 VI 1961

ЛИТЕРАТУРА

1. Баренблатт Г. И., Желтов Ю. П. Об основных уравнениях фильтрации однородных жидкостей в трещиноватых породах. Докл. АН СССР, 1960, т. 132, № 3.
2. Баренблатт Г. И., Желтов Ю. П., Кочина И. Н. Об основных представлениях теории фильтрации однородных жидкостей в трещиноватых породах. ПММ, 1960, т. XXIV, вып. 5.
3. Кочин Н. Е., Кибель И. А., Розе Н. В. Теоретическая гидромеханика, ч. II, 1948, М., ГИТТЛ.
4. Пилатовский В. П. Об уравнениях фильтрации в трещиноватых горных породах. Научн.-техн. сбор. по добыче нефти. М., Гостоптехиздат, 1960, вып. 10.