

ЛИТЕРАТУРА

1. Stern S. C., Zeller H. W., Schekman A. I. The aerosol efficiency and pressure drop of a fibrous filter at reduced pressures. J. Colloid Sci., 1960, vol. 15, No. 6, p. 546.
2. Петрянов И. В., Огородников Б. И., Сунцов А. С. О некоторых свойствах волокнистых фильтров ФП в разреженном воздухе. В сб. «Радиоактивные изотопы в атмосфере и их использование в метеорологии», М., Атомиздат, 1965.
3. Kuwabara S. The forces experienced by randomly distributed parallel circular culinders or spheres in a viscous flow at small Reynolds numbers. J. Phys. Soc. Japan, 1959, Vol. 14, No. 4, p. 524—532.
4. Фукс Н. А., Стечкина И. Б. К теории волокнистых аэрозольных фильтров. Докл. АН СССР, 1962, т. 147, № 5, стр. 1144.
5. Кирш А. А., Фукс Н. А. Исследования в области волокнистых аэрозольных фильтров. Коллоидн. ж., 1968, т. 30, вып. 6, стр. 836.
6. Натансон Г. Л. Влияние скольжения на эффект касания при захвате амикроскопических аэрозольных частиц цилиндром из потока. Коллоидн. ж., 1962, т. 24, вып. 1, стр. 52.
7. Pich J. Die Filtrationstheorie hochdisperser Aerosole. Staub, 1965, Bd 25, H. 5, S. 186.
8. Ziering S. Flow of a gas near a solid surface. AJAA Journal, 1963, vol. 1, No. 3, p. 661.
9. Albertoni S., Cercignani C., Gotusso L. Numerical evaluation of the slip coefficient. Phys. Fluids, 1963, vol. 6, No. 6.
10. Девиен М. Течение и теплообмен разреженных газов. М., Изд-во иностр. лит., 1962.
11. Чепмен С., Каулинг Т. Математическая теория неоднородных газов. М., Изд-во иностр. лит., 1960.

**РАСЧЕТ ОСТАТОЧНОЙ НАСЫЩЕННОСТИ В НЕОДНОРОДНОМ ПЛАСТЕ
ПРИ ВЗАИМНОМ ВЫТЕСНЕНИИ ЖИДКОСТЕЙ С ВЯЗКО-ПЛАСТИЧЕСКИМИ
СВОЙСТВАМИ**

Г. В. Кудрявцев, А. Х. Фаткуллин

(Бугульма)

В связи с существованием нефтей, обладающих в пластовых условиях предельным напряжением сдвига [1], практический интерес представляет оценка остаточной нефтенасыщенности при вытеснении их жидкостями с вязко-пластическими свойствами из пористой среды. На примере линейного пласта, состоящего из двух участков различной проницаемости, исследуется влияние вязко-пластических свойств жидкостей, капиллярных и гидродинамических сил на распределение остаточной насыщенности в неоднородном пласте. Уравнения движения для каждой фазы записаны с учетом предельного градиента давления сдвига. По полученным соотношениям проведены расчеты. Приводится обсуждение результатов вычислений.

Пусть одна вязко-пластическая жидкость вытесняет другую в горизонтальном пласте длиной L , состоящем из двух участков. На каждом участке абсолютная проницаемость k_i и пористость m_i постоянны, при переходе через границу участков — меняются скачком ($i = 1, 2$ — номер участка, отсчитываемый от входа в пласт).

Одномерная фильтрация двух несмешивающихся и несжимаемых вязко-пластических жидкостей может быть описана уравнением типа Дарси с поправкой на градиент давления сдвига [2]. В общем случае относительные фазовые проницаемости и капиллярное давление предполагаются зависимыми от насыщенности, скорости течения и реологических свойств жидкостей

$$v_{ji} = -k_i \frac{k_{ji}(\rho_i, \pi_i)}{\mu_j} \left(\frac{\partial p_{ji}}{\partial x} + \tau_{ji} \right), \quad \pi_i = \frac{k_i \Delta \tau_i}{v \mu_1}, \quad p_{ci}(\rho_i, \pi_i) = p_{1i} - p_{2i} \quad (1)$$

Здесь x — координата в направлении движения; v_{ji} — скорость фильтрации фазы j на участке i ; μ_i — вязкость, k_{ji} — относительная фазовая проницаемость; ρ_i — насыщенность среды вытесняемой жидкостью; τ_{ji} — градиент давления сдвига; π_i — безразмерный параметр, выражающий соотношение сил пластичности и гидродинамических сил; $\Delta \tau_i = \tau_{2i} - \tau_{1i}$, $V = V_{1i} + V_{2i}$ — суммарная скорость фильтрации; p_{ji} — давление в фазе; p_{ci} — капиллярное давление. Считается, что индекс $j = 1$ относится к вытесняющей, а $j = 2$ — к вытесняемой жидкости.

Для определения остаточной насыщенности [3] вытесняемой фазы в (1) полагаем $V_{2i} = 0$. Это может быть достигнуто в двух случаях

$$k_{2i} = 0 \text{ или } \frac{\partial p_{2i}}{\partial x_i} + \tau_{2i} = 0$$

Рассмотрим второй случай, принимая $V = \text{const}$. Тогда из (1) получим следующую задачу:

$$\frac{d\rho_i}{dx} = \frac{1}{dp_{ci}/d\rho_i} \left[\Delta\tau_i - \frac{v\mu_1}{k_i k_{1i}(\rho_i)} \right] \quad (2)$$

$$\rho_2 = \rho_0, \quad x = L; \quad p_{c1}(\rho_-) = p_{c2}(\rho_+), \quad x = l \quad (3)$$

Граничные условия (3) устанавливают постоянную насыщенность на выходе из пласта и непрерывность капиллярного давления на границе раздела участков пласта (ρ_- , ρ_+ — насыщенность на границе участков соответственно слева и справа).

Введем переменную $\xi = x/L$ и функцию Леверетта

$$[\Phi_i(\rho_i) = \frac{p_{ci}}{\sigma} \left(\frac{k_i}{m_i} \right)^{1/2}$$

(σ — межфазное натяжение). Преобразуем уравнение (2) и условия (3) к безразмерному виду

$$\frac{d\rho_i}{d\xi} = - \frac{C_i}{\Phi_i'(\rho_i)} [\kappa_{1i}(\rho_i) - \pi_i] \quad (4)$$

$$\rho_2 = \rho_0, \quad \xi = 1$$

$$\Phi_1(\rho_-) = \left(\frac{k_1 m_2}{k_2 m_1} \right)^{1/2} \Phi_2(\rho_+), \quad \xi = \xi_* = l/L \quad (5)$$

$$\Phi_i' = \frac{d\Phi_i}{d\rho_i} < 0, \quad \bar{c}_i = \frac{v\mu_1 L}{\sigma \sqrt{k_i m_i}}, \quad \kappa_{1i}(\rho_i) = \frac{1}{k_{1i}(\rho_i)} \quad (6)$$

Как следует из (4), безразмерный параметр π_i может быть положительным, равным нулю и отрицательным. Уравнение (4) формально может иметь три решения $\rho_i(\xi)$, для которых

$$d\rho_i/d\xi < 0, \quad d\rho_i/d\xi = 0, \quad d\rho_i/d\xi > 0$$

Если $\pi_i \leq 0$, то

$$\kappa_{1i}(\rho_i) - \pi_i > 0, \quad d\rho_i/d\xi > 0$$

т. е. остаточная насыщенность возрастает к выходу из каждого участка. Когда $\pi_i > 0$ должно соблюдаться условие

$$\kappa_{1i}(\rho_i) - \pi_i \geq 0 \quad (7)$$

так как в противном случае $d\rho_i/d\xi < 0$, что лишено физического смысла.

Корень $\rho_i = \rho_i^0$ уравнения $\kappa_{1i}(\rho_i) - \pi_i = 0$ представляет собой величину предельной остаточной насыщенности при данном значении параметра $\pi_i > 0$. Равномерное распределение ($d\rho_i/d\xi = 0$) физически возможно, если на выходе из каждого участка устанавливается насыщенность, равная ρ_i^0 . Для всех $\rho_i > \rho_i^0$ будем иметь интегральные кривые $\rho_i(\xi)$ с производными $d\rho_i/d\xi > 0$, которые и представляют основной интерес.

Изложенное, а также экспериментальные исследования [1] указывают на зависимость фазовых проницаемостей и капиллярного давления для вязко-пластических жидкостей от параметра π .

Однако надежных данных об эмпирических функциях $k_1(\rho, \pi)$, $\Phi(\rho, \pi)$ в настоящее время не имеется. Поэтому, основываясь на известных представлениях о характере кривых $k_1(\rho)$ и $\Phi(\rho)$, в рассматриваемых расчетах указанные зависимости могут выбираться аналогичными найденным для вязких жидкостей, при этом для заданных значений параметра π должно выполняться соотношение (7).

Решение задачи (4), (5) дает распределение остаточной насыщенности соответственно по второму и первому участкам пласта

$$\xi = 1 - \frac{1}{C_2} \int_{\rho_0}^{\rho_2} \frac{\Phi_2'(\rho_2) d\rho_2}{\kappa_{12}(\rho_2) - \pi_2}, \quad \xi = \xi_* - \frac{1}{C_1} \int_{\rho_-}^{\rho_+} \frac{\Phi_1'(\rho_1) d\rho_1}{\kappa_{11}(\rho_1) - \pi_1} \quad (8)$$

По распределениям (8) вычисляется средневзвешенная остаточная насыщенность, характеризующая конечную отдачу по участкам и по пласту в целом

$$\langle \rho_1 \rangle = \frac{1}{\xi_*} \int_0^{\xi_*} \rho_1(\xi) d\xi, \quad \langle \rho_2 \rangle = \frac{1}{1 - \xi_*} \int_{\xi_*}^1 \rho_2(\xi) d\xi, \quad \langle \rho \rangle = \langle \rho_1 \rangle \xi_* + \langle \rho_2 \rangle (1 - \xi_*) \quad (9)$$

На ЭВМ «Наири» по соотношениям (8), (9) проведены расчеты остаточной насыщенности для широкого диапазона изменения параметров C_2 , π_2 , используя их связь с параметрами C_1 и π_1 из (6), (4)

$$C_2 = \left(\frac{k_1 m_1}{k_2 m_2} \right)^{1/2} C_1, \quad \pi_2 = \frac{k_2 \Delta \tau_2}{k_1 \Delta \tau_1} \pi_1 \quad \text{или} \quad \pi_2 = \left(\frac{k_2}{k_1} \right)^{1/2} \pi_1$$

Последнее соотношение получается, если выразить градиент давления сдвига через предельное напряжение сдвига [1].

При вычислениях принималось $k_2/k_1 = 10$, $m_2/m_1 = 2$, $\rho_0 = 0.7$.

Относительные проницаемости первой фазы $k_{1i}(\rho_i)$ для несмачивающей жидкости на обоих участках пласта, $k_{12}(\rho_2)$ для смачивающей жидкости на высокопроницаемом участке, $k_{11}(\rho_1)$ для смачивающей жидкости на малопроницаемом участке задавались соответственно в следующем виде:

$$k_{1i}(\rho_i) = \left(\frac{0.9 - \rho_i}{0.8} \right)^3, \quad k_{12}(\rho_2) = \left(\frac{0.9 - \rho_2}{0.9} \right)^3, \quad k_{11}(\rho_1) = \left(\frac{0.88 - \rho_1}{0.9} \right)^3$$

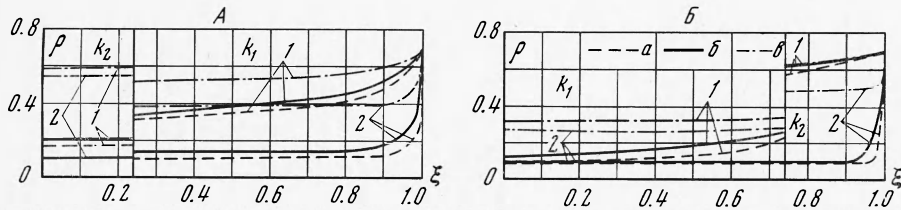
Капиллярные функции в случаях вытеснения несмачивающей жидкостью и вытеснения смачивающей жидкостью имели соответственно следующий вид:

$$\Phi_i(\rho_i) = \frac{0.9072}{\rho_i - 0.09} - 9.2123 \rho_i^{20}, \quad \Phi_i(\rho_i) = 9.2123 (1 - \rho_i)^{20} - \frac{0.9072}{0.91 - \rho_i} \quad (\pi_i \leq 0)$$

$$\Phi_i(\rho_i) = \frac{0.9072}{\rho_i - \rho_i^0} - \delta_i \rho_i^{20}, \quad \Phi_i(\rho_i) = \beta_i (1 - \rho_i)^{20} - \frac{0.9072}{0.9 - \rho_i} \quad (\pi_i > 0)$$

$$\delta_i = \frac{7.462}{0.9 - \rho_i^0}, \quad \beta_i = \frac{0.9072}{(1 - \rho_i^0)^{20} (0.9 - \rho_i^0)}$$

Находились распределения и величина средневзвешенной остаточной насыщенности и зависимости от расположения более и менее проницаемых участков по направлению фильтрации, их относительного размера, смачиваемости пористой среды, соотношения гидродинамических и пластических сил.

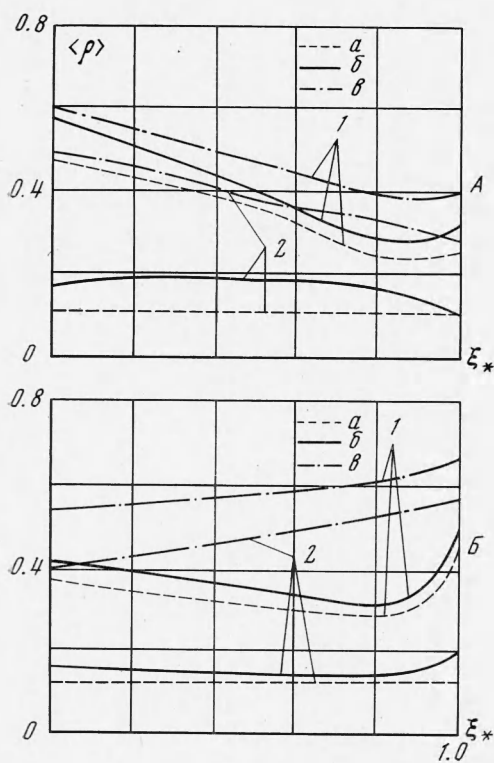


Фиг. 1

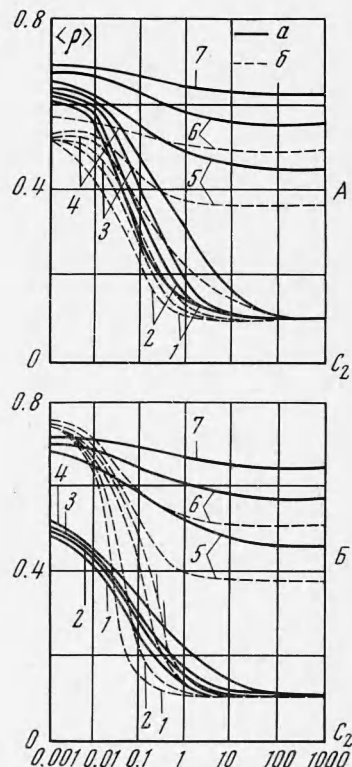
На фиг. 1 представлены распределения остаточной насыщенности при вытеснении несмачивающей (А) и смачивающей (Б) жидкостью, где кривые 1 и 2 соответствуют значениям $C_2 = 0.1$, (кривые а, б, в соответствуют значениям $\pi_2 = -10, 0, 10$). Из фиг. 1 видно, что на границе участков существует скачок остаточной насыщенности причем величина ее со стороны высокопроницаемого участка больше, чем со стороны малопроницаемого, когда $\pi_2 > 0$ (вторая фаза обладает большим напряжением сдвига, чем первая). В случае $\pi_2 < 0$ (у первой фазы напряжение сдвига больше, чем у второй) наблюдается обратная картина, если вытесняемая фаза избирательно лучше смачивает породу. С увеличением параметра C_2 влияние неоднородности пористой среды на распределение остаточной насыщенности уменьшается.

Средневзвешенная остаточная насыщенность $\langle \rho \rangle$ в зависимости от параметра ξ_* и направления фильтрации показана на фиг. 2 (А — нагнетание смачивающей жидкости со стороны малопроницаемого участка, Б — нагнетание несмачивающей жидкости со стороны высокопроницаемого участка, остальные обозначения те же, что и на (фиг. 1).

При определенном сочетании параметров проведения процесса может быть получено наиболее полное замещение одной жидкости другой. С увеличением $\pi_2 > 0$ полнота вытеснения уменьшается.



Фиг. 2



Фиг. 3

На фиг. 3 дана зависимость средневзвешенной остаточной насыщенности от параметров C_2 и π_2 при значении $\xi_* = 0.5$, когда вытеснение осуществляется со стороны малопроницаемого (А) и высокопроницаемого (Б) участков несмачивающей (а) и смачивающей (б) жидкостью. Кривым соответствуют следующие значения π_2 :

кривые	1	2	3	4	5	6	7
$\pi_2 =$	-50	-25	-10	0	10	25	50

Анализ этих зависимостей показывает, что объем невытесненной жидкости уменьшается с ростом параметра C_2 , при этом для каждого $\pi_2 = \text{const}$ существует такое значение C_2 , начиная с которого дальнейшее увеличение этого параметра мало изменяет величину $\langle \rho \rangle$. Последнее проявляется при меньших значениях C_2 , когда вытесняющая фаза — смачивающая. Если менее проницаемый участок расположен у входа в пласт, смачивающей жидкости остается больше по сравнению с несмачивающей. Когда у входа расположен высокопроницаемый участок, влияние смачиваемости на конечную отдачу зависит от C_2 .

Эффективность вытеснения вязко-пластическими жидкостями возрастает при увеличении абсолютной величины параметра $\pi_2 < 0$.

Поступила 13 XII 1969

ЛИТЕРАТУРА

1. Гурбанов Р. С., Касимов А. Ф., Мирзаджанзаде А. Х. Гидродинамика вязко-пластических сред. Изв. АН СССР, МЖГ, 1967, № 3.
2. Бернардинер М. Г., Ентов В. М. О вытеснении несмешивающихся жидкостей при нелинейной фильтрации. ПМТФ, 1968, № 2.
3. Бузинов С. Н. К вопросу об определении остаточной нефтенасыщенности. Докл. АН СССР, 1957, т. 116, № 1.