

ЛИТЕРАТУРА

1. Веригин Н. Н. Некоторые вопросы химической гидродинамики, представляющие интерес для мелиорации и гидротехники. Изв. АН СССР, ОТН, 1953, № 10.
2. Шестаков В. М. К теории фильтрации растворов в грунтах. В сб.: «Вопросы формирования химического состава подземных вод». М., Изд-во МГУ, 1963.
3. Левич В. Г., Письмен Л. М., Кучанов С. И. О гидродинамическом перемешивании в зернистом слое. Физическая модель застойных зон. Докл. АН СССР, 1966, т. 168, № 2.
4. Дворкин Л. Б. К теории конвективной диффузии солей в пористых средах. Ж. физ. хим., 1968, т. 42, № 4.
5. Баренблатт Г. И., Желтов Ю. П., Кочина И. Н. Об основных представлениях теории фильтрации однородных жидкостей в трещиноватых породах. ПИММ, 1960, т. 24, вып. 5.
6. Boulton N. Analysis of data from non equilibrium pumping tests allowing for delayed yield from storage. Proc. Inst. Civil. Engs., 1963, vol. 26, pp. 469—482.
7. Бочевер Ф. М. Теория и практические методы гидрогеологических расчетов эксплуатационных запасов подземных вод. М., «Недра», 1968.
8. Бочевер Ф. М., Орадовская А. Е. Конвективная диффузия солей в радиальном потоке подземных вод в связи с защитой их от загрязненных стоков. Тр. ин-та ВОДГЕО, вып. 13, 1966.
9. Louwerier H. A. The transport of heat in an oil layer caused by the injection of hot fluid. Appl. Sci. Res., 1955, vol. 5, No. 2, 3.
10. Малофеев Г. Е. Сравнительная оценка формул расчета нагревания пласта при нагнетании горячей жидкости. Нефт. хоз-во, 1962, № 4.

ФИЛЬТРАЦИЯ АСФАЛЬТЕНО-СМОЛИСТЫХ НЕФТЕЙ В ПОРИСТЫХ СРЕДАХ

А. Т. ГОРБУНОВ, Н. А. ЕФРЕМОВА, Я. ХОРНЕШ

(Москва, Будапешт)

На основе лабораторных исследований [1] устанавливается зависимость коэффициента подвижности асфальтено-смолистых нефтей от градиента давления. Указывается на необходимость учета этой зависимости в гидродинамических расчетах по определению дебитов нефтяных скважин. Показано, что если для таких нефтей считать коэффициент подвижности не зависящим от градиента давления, то при этом можно допустить существенные ошибки при проведении необходимых расчетов.

Для исследования кажущейся вязкости асфальтено-смолистых нефтей была сконструирована специальная установка, которая позволяла осуществлять течение нефти при заданном перепаде давления в пределах от 0.07 до 20 ат и заданной температуре в пределах от 96 до 105°С. В качестве модели жидкости использовалась нефть с содержанием асфальтенов от 19.0 до 20.0% и смолистых соединений от 23.4 до 41.0%. Опыты проводились на круглых капиллярах диаметром от 0.07 до 0.3 мм, длиной 100 мм, плоских щелях разной раскрытости длиной 100 мм и естественных образцах пористых пород.

Результаты опытов, обработанные по формулам Гагена — Пуазейля и Дарси, показали существенную зависимость кажущейся вязкости нефти от градиента давления. Результаты эти приведены на фиг. 1 и 2. Зависимость вязкости μ , *спз* асфальтено-смолистых нефтей от градиента давления $y = dp/dx$ ат/см на капиллярах разного диаметра представлена на фиг. 1, где точкам 1, 2, 3, 4, 5, 6 соответствуют значения радиуса капилляра $r = 0.182, 0.118, 0.109, 0.071, 0.038, 0.037$ мм, p — давление, x — расстояние. Зависимость кажущейся вязкости асфальтено-смолистых нефтей от градиента давления на естественных пористых средах представлена на фиг. 2, где точкам 1 соответствует первый образец, длина $l = 4.4$ см, диаметр $d = 2.1$ см, константы жидкости $a = 4.6$, $b = 2.3$ см/ат; 2 — второй образец, $l = 4.0$ см, $d = 2.1$ см, $a = 5.4$, $b = 2$ см/ат.

Оказалось, что чем больше диаметр капилляра или ширина щели, тем меньше величина кажущейся вязкости зависит от градиента давления. На всех опытах с увеличением градиента давления значение кажущейся вязкости уменьшалось и стремилось к постоянному ее значению.

Когда из проб нефтей были удалены асфальтены и смолистые соединения, значение вязкости в опытах на тех же капиллярах, щелях и естественных образцах оказалось равным постоянной величине. Зависимость кажущейся вязкости безасфаль-

тено-смолистых нефтей от градиента давления для капилляра длиной 10 см и диаметром 0.07 мм представлена на фиг. 3, где точкам 1, 2, 3, 4, 5 соответствуют значения температуры 105, 70, 70, 105, 105° С. Из этих опытов вытекает вывод о том, что существенная зависимость кажущейся вязкости нефти от градиента давления объясняется, в основном, наличием в нефти асфальтено-смолистых соединений и размерами каналов течения (размерами пор).

Можно предположить, что асфальтены и смолы оседают на стенках каналов, что увеличивает их гидравлическое сопротивление. Это оседание существеннее при малых диаметрах и меньшей скорости (градиентах давления). В данных опытах не было установлено для асфальтено-смолистых нефтей наличие сколько-нибудь существенного начального градиента давления (характерного для структурных жидкостей [2, 3]).

Результаты экспериментов хорошо аппроксимируются экспоненциальной зависимостью

$$\mu = \mu_0(1 + ae^{-bv}) \quad (y = dp/dr)$$

Здесь μ_0 — вязкость асфальтено-смолистой нефти при бесконечном градиенте давления, a и b — некоторые константы жидкости, r — расстояние от скважины.

Пусть k — проницаемость пласта, тогда эту зависимость можно отнести

$$\frac{k}{\mu} = \frac{k_0}{\mu_0} \frac{1}{1 + ae^{-bv}} \quad (1)$$

Для определения стационарного дебита скважины по формуле Дарси с учетом (1) имеем

$$q = - \frac{k_0}{\mu_0(1 + ae^{-bv})} 2\pi r h y = \text{const} \quad (2)$$

Здесь q — расход жидкости, p^0 — давление на скважине, h — мощность пласта. Решение уравнения (2) в параметрической форме имеет вид [5]

$$\begin{aligned} \Delta p = p - p^0 &= \int_{p^0}^p y r'(y) dy = \\ &= \frac{q \mu_0}{2\pi k h} \left\{ a(e^{-bv} - e^{-bv^0}) - \ln \frac{y}{y^0} + a[-\text{Ei}(-by) + \text{Ei}(-by^0)] \right\} \quad (3) \end{aligned}$$

Для практических расчетов можно привести приближенные формулы. Для этого зависимость (1) аппроксимируем кривой вида

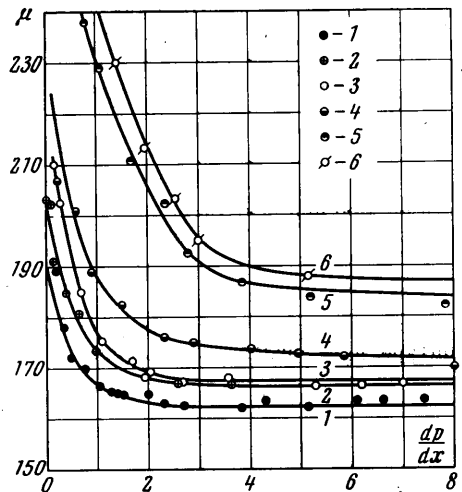
$$\frac{k}{\mu} = \frac{k_0}{\mu_0' - b'y}, \quad \mu_0' = \mu_0(1 + a), \quad b' = ab\mu_0 \quad (4)$$

В этом случае уравнение (2) принимает вид

$$q = - \frac{k_0}{\mu_0' - b'y} 2\pi r h y \quad (5)$$

Интегрируя (5) в пределах от p^0 до p_0 и от r^0 до r_0 , получим приближенную формулу притока асфальтено-смолистой нефти к скважине

$$p_0 - p^0 = \frac{q \mu_0'}{2\pi k_0 h} \ln \frac{r_0 + qb'/2\pi k_0 h}{r^0 + qb'/2\pi k_0 h} \quad (6)$$



Фиг. 1

Получим формулу притока асфальтено-смолистой нефти к галерее. Закон Дарси с учетом (1) имеет вид

$$q = - \frac{k_0}{\mu_0(1 - ae^{-bz})} hSz, \quad z = \frac{q\mu_0}{Sk_0h} + \frac{qa\mu_0}{Sk_0h} e^{-bz}, \quad z = \frac{dp}{dx} \quad (7)$$

где x — расстояние от галереи.

Величина z , найденная из уравнения (7), при $q = \text{const}$

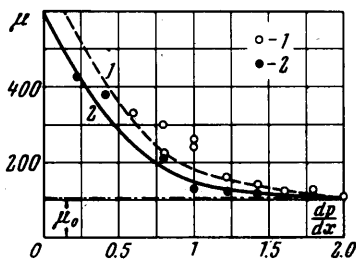
$$z = \frac{q\mu_0}{Sk_0h} + q' = Q' \quad (8)$$

есть постоянная величина.

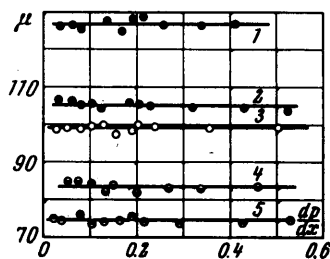
Решение задачи по формулам (7), (8) производится графически; в результате получим

$$p_0 - p_1 = Q'L$$

Здесь L — расстояние галереи от контура, S — ширина галерей, p_0 — давление на контуре, p_1 — давление на галерее.



Фиг. 2



Фиг. 3

Приближенная формула притока асфальтено-смолистой нефти к галерее с учетом (4) имеет вид

$$p_0 - p_1 = \frac{Q\mu_0'L}{Sk_0h + Qb'}, \quad Q = \frac{Sk_0h}{\mu_0'} \frac{p_0 - p_1}{L[1 + (b/\mu_0')(p_0 - p_1)/L]} \quad (9)$$

Следуя рекомендациям работы [4], можно записать систему уравнений для трех рядов скважин с контуром питания для определения перепадов давления асфальтено-смолистой нефти в полосообразной залежи

$$p_0 - p_1 = \frac{(Q_1 + Q_2 + Q_3)\mu_0'L_1}{Sk_{01}h_1 + b'(Q_1 + Q_2 + Q_3)} + Q_1^*\mu_0' \ln \frac{\sigma_1/\pi + Q_1^*b'}{r_1 + Q_1^*b'} \quad (10)$$

$$p_1 - p_2 = -Q_1^*\mu_0' \ln \frac{\sigma_1/\pi + Q_1^*b'}{r_1 + Q_1^*b'} + \frac{(Q_2 + Q_3)\mu_0'L_2}{Sk_{02}h_2 + b'(Q_2 + Q_3)} + Q_2^*\mu_0' \ln \frac{\sigma_2/\pi + Q_2^*b'}{r_2 + Q_2^*b'} \quad (11)$$

$$p_2 - p_3 = -Q_2^*\mu_0' \ln \frac{\sigma_2/\pi + Q_2^*b'}{r_2 + Q_2^*b'} + \frac{Q_3\mu_0'L_3}{Sk_{03}h_3 + b'Q_3} + Q_3^*\mu_0' \ln \frac{\sigma_3/\pi + Q_3^*b'}{r_3 + Q_3^*b'} \quad (12)$$

$$Q_1^* = \frac{Q_1\sigma_1}{\pi k_{01}h_{1s}}, \quad Q_2^* = \frac{Q_2\sigma_2}{\pi k_{02}h_{2s}}, \quad Q_3^* = \frac{Q_3\sigma_3}{\pi k_{03}h_{3s}}$$

Здесь L_1 — расстояние между контуром питания и первым рядом эксплуатационных скважин; L_2, L_3 — расстояния соответственно между первым и вторым и вторым и третьим рядами эксплуатационных скважин; p_1, p_2, p_3 — забойные давления скважин соответствующих рядов; Q_1, Q_2, Q_3 — дебиты соответствующих рядов скважин; r_1, r_2, r_3 — приведенные радиусы скважин соответствующих рядов; $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ — половина расстояния между скважинами соответствующих рядов.

Аналогично можно выписать уравнения и для определения дебитов любого количества рядов скважин, в том числе и для круговой формы залежи.

Рассмотрим численный пример при следующих исходных данных: $r^0 = 10$ см, $r_0 = 300$ м, $h = 10$ м, $a = 4.6$, $b = 2.3$ см/ат, $k_0 = 1.0$ дарси, $\mu_0 = 111$ сгз, $q = 20$ м³/сутки. Результаты вычислений безразмерного давления $p = p/p_0$ и градиента давления p_r' от безразмерного радиуса $R = r/r_0$ по формулам (2), (3), а также по линейной формуле Дююки (*) при $\mu = \mu_0$ приведены в таблице.

R	P		P _r '	
	(2), (3)	(*)	(2), (3)	(*)
0.0010	0.0603	0.0261	0.3900	0.1280
0.0033	0.1584	0.0548	0.1690	0.0385
0.0167	0.3454	0.0930	0.0402	0.0077
0.0333	0.4196	0.1095	0.0221	0.0038
0.1667	0.6315	0.1480	0.0045	0.0008
0.3333	0.7173	0.1640	0.0023	0.0004
0.6667	0.8080	0.1810	0.0011	0.0002
1.0000	0.8620	0.1900	0.0008	0.0001

Из таблицы видно, что если принять значение коэффициента подвижности асфальтено-смолистой нефти не зависящим от градиента давления и равным k_0/μ_0 (как это и делается в настоящее время), то ошибка в определении перепада давления (при одном и том же дебите скважины) по сравнению с «точным» решением по формулам (2) и (3) достигает 450%. Очевидно, что для нефтей с меньшим содержанием асфальтенов и смол указанная ошибка будет меньше и для безасфальтеновой нефти она будет стремиться к нулю.

Кроме того, была произведена оценка точности приближенной формулы (6). Оказалось, что максимальная ошибка при этом не превышает 2% по сравнению с точным решением по формулам (2) и (3).

Следует подчеркнуть, что учет зависимости коэффициента подвижности от градиента давления потребует внесения существенных изменений в формулы, описывающие процесс вытеснения нефти водой, а также в формулы неустановившейся фильтрации.

В заключение авторы искренне благодарят А. П. Крылова и В. Н. Николаевского за внимание к работе.

Поступило 2 VI 1969

ЛИТЕРАТУРА

1. Требин Ф. А. Нефтепроницаемость песчаных коллекторов. М.-Л., Гостопиздат, 1938.
2. Гатчек Э. Вязкость жидкостей. М.-Л., Гл. ред. обществ. лит-ры и номогр., 1934.
3. Рейнер М. Деформация и течение. Введение в реологию. М., Гостоптехиздат, 1963.
4. Борисов Ю. П. Определение дебита скважин при совместной работе нескольких рядов скважин. Тр. Моск. нефт. ин-та, 1951, вып. 11.
5. Камке Э. Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям. М., Изд-во иностр. лит., 1950.