

## О КАПИЛЛЯРНОЙ ПРОПИТКЕ ГИДРОФОБНЫХ НЕФТЕНАСЫЩЕННЫХ ПОРОД РАСТВОРОМ АКТИВНОЙ ПРИМЕСИ

В. М. Ентов, Н. Шыганаков  
(Москва, Алма-Ата)

Как известно (см., например, [1—3]), капиллярная пропитка играет важную роль в извлечении нефти из гетерогенных (слоисто-неоднородных, трещиновато-пористых и т. д.) пластов. Именно благодаря капиллярной пропитке вода проникает в менее проницаемые элементы пласта, в которых нефть оказывается невытесненной при фронтальном заводнении. Такой механизм предполагает, что вода обладает лучшей смачивающей способностью, чем нефть (т. е. породы являются гидрофильными), и потому в условиях капиллярного равновесия преимущественно заполняет участки с мелкими порами. В ряде случаев породы оказываются гидрофобизированными в результате адсорбции на их поверхности активных компонентов нефти, и процесс капиллярной пропитки не может идти, что приводит к снижению нефтеотдачи пласта.

Одним из средств повышения нефтеотдачи в таких условиях является добавление к закачиваемой воде поверхностно-активных веществ (ПАВ) [4, 5], которые, адсорбируясь на поверхности пористого скелета, гидрофилизуют ее. Поскольку процесс гидрофилизации поверхности должен предшествовать пропитке, гидрофилизующее поверхностно-активное вещество должно обладать некоторой (пусть небольшой) растворимостью в нефти.

В данной работе рассматривается простейшее описание такого процесса пропитки первоначально гидрофобной породы водным раствором гидрофилизующей активной примеси. От рассмотренной ранее [6] задачи о противоточной капиллярной пропитке пористой среды раствором активной примеси данный случай отличается тем, что необходимо учитывать растворимость активной примеси в нефти и изменение знака капиллярного давления (гидрофилизация среды); как будет видно из результатов, скорость пропитки в рассматриваемом случае определяющим образом зависит от скорости диффузии активной примеси.

1. Запишем уравнения двухфазного течения в пористой среде при наличии активной примеси, считая, что между растворенной в воде и нефтью и адсорбированной пористой средой примесью локально выполняются условия термодинамического равновесия:

$$(1.1) \quad ms_{,t} + \operatorname{div} \mathbf{u}_1 = 0, \quad \operatorname{div}(\mathbf{u}_1 + \mathbf{u}_2) = 0;$$

$$(1.2) \quad [mc_1s + m(1-s)c_2 + a]_{,t} + \operatorname{div}(c_1\mathbf{u}_1 + c_2\mathbf{u}_2) + \operatorname{div} \mathbf{q} = 0;$$

$$(1.3) \quad c_1 = c, \quad c_2 = \varphi(c), \quad a = a(c, s), \quad \mathbf{q} = -D\nabla c, \quad D = D(c, s);$$

$$(1.4) \quad \mathbf{u}_1 = -\frac{k}{\mu_i} f_i(s, c) \nabla p_i \quad (i = 1, 2);$$

$$(1.5) \quad p_2 - p_1 = P_c(s, c),$$

где  $s$  — водонасыщенность;  $m$  — пористость;  $k$  — проницаемость пористой среды;  $\mathbf{u}_i$  — скорости фильтрации фаз;  $c_i$  — концентрации примеси в фазах;  $a$  — адсорбированное количество примеси;  $\mathbf{q}$  — диффузионный перенос примеси;  $D$  — коэффициент диффузии;  $p_i$  — фазовые давления;  $f_i$  — фазовые проницаемости;  $\mu_i$  — вязкости фаз;  $P_c$  — капиллярное давление; индекс 1 относится к воде, индекс 2 — к нефти. От соответствующих уравнений работы [6] приведенные уравнения отличаются лишь учетом растворимости примеси в нефти ( $c_2 \neq 0$ ), характеризуемой равновесной зависимостью ( $c_2 = \varphi(c)$ ).

Задаче о противоточной капиллярной пропитке отвечает одномерное прямолинейно-параллельное движение с нулевой суммарной скоростью фильтрации:

$$s = s(x, t), \quad c = c(x, t), \quad \mathbf{u}_i = (u_i, 0, 0), \quad u_1 = -u_2 = U(x, t).$$

При этом из уравнений (1.1)—(1.5) следует

$$m \frac{\partial s}{\partial t} + \frac{\partial u}{\partial x} = 0,$$

$$[ms + m(1-s)\varphi'(c)] \frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial a(c, s)}{\partial t} + u[1 - \varphi'(c)] \frac{\partial c}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D \frac{\partial c}{\partial x} \right),$$

$$u = \frac{k}{\mu_1} \frac{f_1 f_2}{\mu f_1 + f_2} \frac{\partial P_c}{\partial x}, \quad P_c = P_c(s, c), \quad \mu = \mu_2/\mu_1.$$

При естественных начальных и граничных условиях

$$s(x, 0) = s_0, \quad c(x, 0) = c_0, \quad s(0, t) = s^0, \quad c(0, t) = c^0$$

задача имеет автомодельное решение вида

$$s = S(\xi), \quad c = C(\xi), \quad \xi = x/a_* \sqrt{t}, \quad a_*^2 = k\Pi/\mu,$$

где функции  $S$  и  $C$  являются решением задачи

$$(1.6) \quad \frac{d}{d\xi} \left[ \alpha \frac{dP_c}{d\xi} \right] + \frac{\xi}{2} \frac{ds}{d\xi} = 0, \quad \alpha = - \frac{f_1 f_2}{m(\mu f_1 + f_2)};$$

$$(1.7) \quad \frac{d}{d\xi} \left( \frac{D}{a_*^2 m} \frac{dc}{d\xi} \right) + \left[ \frac{\xi}{2} (s + (1-s)\varphi'(c)) \frac{dc}{d\xi} + \frac{\xi}{2} \frac{d\tau}{d\xi} + \right. \\ \left. + (1 - \varphi'(c)) \alpha \frac{dP_c}{d\xi} \right] \frac{dc}{d\xi} = 0, \quad \frac{dP_c}{d\xi} = \frac{\partial P_c}{\partial c} \frac{dc}{d\xi} + \frac{\partial P_c}{\partial s} \frac{ds}{d\xi}, \\ s(0) = s^0, \quad s(\infty) = s_0, \quad c(0) = c^0, \quad c(\infty) = c_0.$$

2. Задача (1.6), (1.7) решалась численно методом установления при модельных функциях фазовых проницаемостей и капиллярного давления, описываемых выражениями

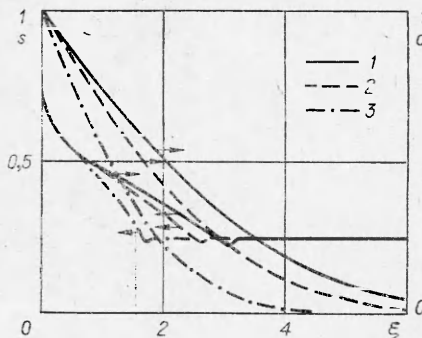
$$a(c) = \Gamma\varphi(c), \quad \varphi(c) = bc, \\ f_1 = \left( \frac{s-0,2}{0,8} \right)^3 \left( \frac{l}{a(c)+l} \right)^3, \quad f_2 = \left( \frac{0,8-s}{0,6} \right)^3, \\ P_c = \begin{cases} A(c-c^*)(s-0,2)^{-2}, & c > c^*, \\ A(c-c^*)(0,8-s)^{-2}, & c < c^*, \end{cases}$$

причем в расчетах принимались следующие значения параметров:

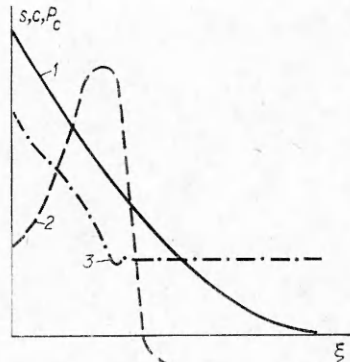
$$\beta = 1, \quad m = 0,2, \quad l = 200, \quad \Gamma = 1, \quad b = 0,5, \quad A = 1, \quad \Pi = 1, \\ k = 1\text{Д}, \quad \mu_1 = 1 \text{сП}, \quad \mu_2 = 3 \text{сП}, \quad c^* = 0,3.$$

Некоторые результаты расчетов показаны на фиг. 1, где парам кривых 1—3 отвечают значения  $D/a_*^2 = 1; 0,7$  и  $0,3$ . При сопоставлении с результатами, известными для «чистой» капиллярной пропитки [1—3] и полученными ранее для пропитки гидрофильного образца раствором активной примеси [6], обращают на себя внимание два обстоятельства: наличие в распределении водонасыщенности минимума и сосредоточение «волны водонасыщенности» в области концентраций активной примеси, превосходящих пороговую  $c^*$  (последнее отражает ведущую роль диффузии при пропитке гидрофобного образца). Качественно оба указанных результата сравнительно просто интерпретировать. Чтобы сделать это, заменим уравнение (1.6) более простым модельным уравнением

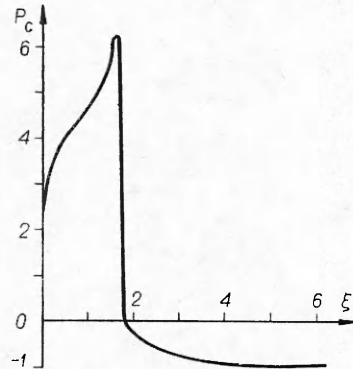
$$(2.1) \quad \xi \frac{ds}{d\xi} = -2\alpha \frac{d}{d\xi} \left( \frac{dP_c}{d\xi} \right).$$



Фиг. 1



Ф и г. 2



Ф и г. 3

Пусть, далее, заметное уменьшение  $s$  по сравнению с  $s^0$  достигается при тех значениях  $\xi$ , при которых  $c > c^*$ . Тогда соответствующие значения  $P_c$  будут превосходить значение капиллярного давления на входе ( $\xi = 0$ ) и тем более в невозмущенной зоне ( $\xi \rightarrow \infty$ ). Таким образом, ожидаемое распределение  $P_c(\xi)$  должно иметь вид фиг. 2 (кривая 2), а тогда распределение насыщенности в соответствии с (2.1) должно иметь минимум (кривая 3), кривая 1 иллюстрирует распределение концентрации. Ту же картину дают и фактические расчеты (на фиг. 3 распределение капиллярного давления, отвечающее на фиг. 1 кривой 3). С физической точки зрения наличие максимума на кривой  $P_c(\xi)$  имеет простой смысл: для того чтобы процесс капиллярной пропитки шел, необходимо, чтобы капиллярное давление внутри образца было выше, чем на его наружной поверхности. Область максимума капиллярного давления работает как своего рода «капиллярный насос», подсасывающий воду и отгоняющий нефть. Именно с действием этого «насоса» связано и появление минимума в распределении насыщенности: вода из глубины образца подсасывается в зону максимума капиллярного давления.

То обстоятельство, что капиллярная пропитка возможна, если капиллярное давление внутри образца превосходит капиллярное давление на входе, показывает, что эффективная глубина капиллярной пропитки гидрофобного образца одного порядка с глубиной проникновения изотермы  $c = c^*$  и потому решающим образом зависит от скорости диффузионного переноса.

Таким образом, при подборе гидрофилизирующих ПАВ (в отличие от ПАВ, просто увеличивающих смачиваемость породы нефтью) следует обращать особое внимание на величину коэффициента диффузии активного вещества.

Поступила 16 V 1980

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Бан А., Богомолова А. Ф. и др. Влияние свойств горных пород на движение в них жидкостей. М.: Гостоптехиздат, 1962.
2. Развитие исследований по теории фильтрации в СССР (1917—1967)/Под ред. П. Я. Кочиной. М.: Наука, 1969.
3. Баренблатт Г. И., Ентов В. М., Рыжик В. М. Теория нестационарной фильтрации жидкости и газа. М.: Недра, 1972.
4. Бабалян Г. А. Физико-химические процессы в добыче нефти. М.: Недра, 1974.
5. Гиматулинов Ш. К. Нефтеотдача коллекторов. М.: Недра, 1970.
6. Ентов В. М., Шыганак Н. О противоточной капиллярной пропитке пористой среды раствором активной примеси в неизотермических условиях. — ДАН СССР, 1979, т. 246, № 4.