

УДК 532.546

© 1991 г.

**Ю. А. ЗАРУБИН**

## **ОБМЕННАЯ МОДЕЛЬ ВЫТЕСНЕНИЯ В ПОРИСТЫХ СРЕДАХ**

Задачи несмешивающегося вытеснения в пористых средах лежат в основе моделирования процессов вытеснения нефти водой. Физической базой классических моделей являются представления о фазовых проницаемостях компонент и обобщенный закон Дарси. Поэтому распределение компонент в поровом пространстве, размеры, положение и структура скачка насыщенности количественно и качественно определяются главным образом зависимостями фазовых проницаемостей от насыщенности [1–5]. Учет капиллярных явлений [2], неравновесности [3] глубже раскрывает структуру скачка насыщенности, но вследствие усложнения модели производится для простейших течений и не исключает осложнений при численном моделировании процесса вытеснения [4, 6].

Альтернативная модель вытеснения в пористых средах, в первом приближении не требующая введения понятия о фазовых проницаемостях, может быть построена, исходя из следующих представлений о механизме несмешивающегося вытеснения. Насыщающее поровое пространство вытесняемые и вытесняющая компоненты распределены между двумя фазами – подвижной и неподвижной. Соответственно в поровом пространстве выделяются два объема: один, заполненный подвижной, фильтрующейся в направлении вытеснения фазой, и другой, в котором движение компонент в направлении вытеснения не происходит. Между фазами осуществляется обмен компонентами, скорость которого определяется распределением компонент между фазами и физико-химическими условиями вытеснения. Заметим, что идея разделения порового пространства на подвижную и неподвижную фазы предлагалась в [7] и развивалась в [8]. Попытки экспериментального определения объема фаз предпринимались в [9–11].

Ниже рассматривается модель вытеснения, построенная на предположении об обмене компонентами между подвижным и неподвижным в направлении вытеснения объемами порового пространства. Показано хорошее совпадение теоретического решения с фактическими результатами вытеснения нефти водой. На основании серии экспериментов в несцементированных пористых средах построены критериальные уравнения для прогнозирования коэффициента межфазного обмена и соотношения между неподвижным и подвижным объемами порового пространства.

1. Рассмотрим модель вытеснения, для которой в сделанных предположениях уравнения сохранения масс вытесняемых и вытесняющих компонент в фазах формулируются следующим образом:

$$\frac{\partial}{\partial \tau} [\rho_i (m - m_v) s_{1i}] = J_i, \quad \frac{\partial}{\partial \tau} [\rho_i m_v s_{2i}] + \operatorname{div} (\rho_i v_i m_v s_{2i}) = -J_i$$

$$\sum_{i=2}^n \frac{J_i}{\rho_i} = 0, \quad \sum_{i=2}^n \left( \frac{m - m_v}{m} s_{1i} + \frac{m_v}{m} s_{2i} \right) = 1, \quad i = \overline{2, n} \quad (1.1)$$

где  $m$  – коэффициент пористости;  $m_v$  – занятый подвижной фазой объем пор, отнесенный к всему объему элемента пористой среды;  $\rho_i$  – плотность  $i$ -й компоненты;  $s_{1i}$ ,  $s_{2i}$  – насыщенность  $i$ -й компонентой неподвижной и подвижной фазы соответственно;  $v_i$  – средняя скорость движения  $i$ -й компоненты;  $J_i$  – массовый поток  $i$ -й компоненты между фазами.

Принципиально нет препятствий и для использования модели, аналогичной (1.1), применительно к смешивающемуся вытеснению, что потре-

бует лишь дополнительно учесть диффузионный поток в уравнении сохранения для подвижной фазы.

Эффективность использования модели (1.1) обуславливается возможностью определения связей и взаимосвязей доли порового объема, занятого подвижной фазой, скоростей движения компонент, интенсивности межфазного обмена с условиями фильтрации и насыщенностями. В простейшем случае можно предположить, что фазы несжимаемы, скорости движения компонент одинаковы, соотношение между объемами подвижной и неподвижной фаз постоянно, а поток компоненты между фазами пропорционален разнице насыщенностей компоненты в фазах. При таких допущениях для двухкомпонентной фильтрации, например при вытеснении нефти водой, система (1.1) сводится к двум уравнениям, которые в случае линейного вытеснения с постоянным расходом имеют вид

$$\rho(m-m_v)\frac{\partial s}{\partial \tau} = \alpha(f-s), \quad \rho m_v \frac{\partial f}{\partial \tau} + \rho m_v v \frac{\partial f}{\partial x} + \alpha(f-s) = 0 \quad (1.2)$$

где  $f$  — доля воды в потоке подвижной фазы (при равенстве скоростей движения компонент она совпадает с водонасыщенностью в подвижной фазе);  $s$  — водонасыщенность неподвижной фазы;  $\alpha$  — коэффициент скорости межфазного обмена;  $\rho$  — плотность воды.

В безразмерных координатах система уравнений (1.2) представляется следующим образом:

$$\frac{1}{a} \frac{\partial s}{\partial Mi} = f-s, \quad \frac{\partial f}{\partial Mi} + \frac{\partial f}{\partial X} + f-s = 0 \quad (1.3)$$

$$a = \frac{m_v}{m-m_v}, \quad Mi = \frac{\alpha \tau}{\rho m_v}, \quad X = \frac{\alpha x}{\rho m_v v}$$

При краевых условиях  $f(X=0, Mi) = 1$ ,  $f(X, Mi=0) = f_0$ ,  $s_0(X, Mi=0) = s_0$  система (1.3) имеет решение

$$s = \int_x^{Mi} \left[ a - \frac{(s_0-f_0)a}{a+1} e^{-(a+1)(Mi-\xi)} - \frac{a(af_0+s_0)}{a+1} \right] B(X, \xi) d\xi +$$

$$+ \frac{a(s_0-f_0)}{a+1} e^{-(a+1)Mi} + \frac{af_0+s_0}{a+1}$$

$$f = s + \frac{(a-1)(s_0-f_0)}{a+1} \left[ \int_x^{Mi} e^{-(a+1)(Mi-\xi)} B(X, \xi) d\xi - e^{-(a+1)(Mi-\xi)} \right] +$$

$$+ (1-f_0)B(X, Mi) \quad (1.4)$$

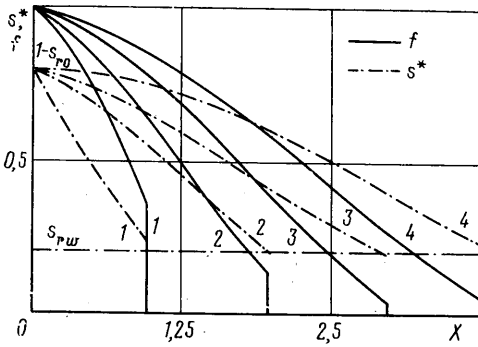
$$B(X, t) = \exp[-at + (a-1)X] \cdot I_0[2\sqrt{aX(t-X)}]$$

где  $X$  — безразмерная координата;  $Mi$  — безразмерное время (аналог числа Михеева в теории теплопроводности [12]);  $I_0(\cdot)$  — модифицированная функция Бесселя первого рода нулевого порядка.

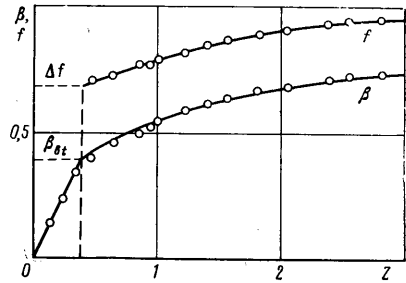
Решение (1.4) существенно упрощается для нулевых начальных условий  $f(X, Mi=0) = s(X, Mi=0) = 0$

$$s = a \int_x^{Mi} B(X, \xi) d\xi, \quad f = s + B(X, Mi) \quad (1.5)$$

Для приведения обычно реализуемого в опыте исходного насыщения пористой среды к нулевым начальным условиям из общего порового объ-



Фиг. 1



Фиг. 2

ема должны быть исключены объемы, занимаемые связанной водой  $s_{rw}$  и остаточной нефтью  $s_{ro}$ . Это требует введения понятия коэффициента активной пористости  $m_a$  как доли объема пористой среды, занимаемой участвующими в обмене объемами компонент. Если первоначально пористая среда содержала воду, находящуюся только в связанном состоянии, то коэффициент активной пористости определяется через конечный коэффициент вытеснения  $\beta$ :  $m_a = m(1-s_{rw})\beta$ . Соответственно коэффициент  $a = m_v / (m_a - m_v)$  и истинная водонасыщенность  $s^*$  вычисляются через расчетную по (1.5) как  $s^* = s_{rw} + [s(m_a - m_v) + m_v f] / m$ .

Одной из особенностей решения (1.5) является то, что вследствие конечности скорости межфазного обмена, заложенной в системе уравнений (1.2), на фронте вытеснения при  $X = Mi$  в подвижной фазе существует скачок насыщенности  $\Delta f$ , величина которого экспоненциально убывает во времени  $\Delta f = \exp(-Mi)$ .

На фиг. 1 в безразмерных координатах показаны распределения истинной водонасыщенности и доли воды в потоке, рассчитанные для случая вытеснения нефти водой при  $s_{rw} = 0,2$  и  $s_{ro} = 0,2$ . Цифры у кривых соответствуют значениям безразмерного времени. Характер кривых совпадает с имеющимися представлениями о вытеснении нефти водой, что указывает на приемлемость сделанных предположений и допущений.

Для сопоставления с фактическими данными по вытеснению нефти водой решение (1.5) необходимо продолжить до определения накопленной добычи и соответственно коэффициента вытеснения в зависимости от объема промывки. Интегрирование приводит к следующим зависимостям:

$$\beta = \frac{Z}{1-s_{rw}} - \frac{a(1-s_{rw}-s_{ro})\rho w}{(a+1)(1-s_{rw})\alpha} F_w \quad (1.6)$$

$$F_w = \int_x^{Mi} B(X, \xi) d\xi + a \int_x^{Mi} (Mi - \xi) B(X, \xi) d\xi, \quad Mi = \frac{mXZ}{m_v}$$

где  $\beta$  — коэффициент вытеснения;  $w$  — скорость фильтрации;  $Z$  — объем промывки, выраженный в поровых объемах.

Фигура 2 иллюстрирует хорошее совпадение расчетных и экспериментальных данных по вытеснению нефти водой. Остаточное среднеквадратическое отклонение расчетных и фактических коэффициентов вытеснения составляет 0,0075, что примерно соответствует доверительному интервалу экспериментальных точек.

В отличие от классической модели, требующей для построения характеристики вытеснения зависимостей фазовых проницаемостей от насыщенности, рассматриваемая модель, которую удобно называть обменной мо-

Таблица 1

| Шифр опыта | $\mu_0$ , мПа·с | $\rho_0$ , кг/м <sup>3</sup> | $\sigma_{0w}$ , МН/М | $m$   | $m_a$ | $k$ , 10 <sup>-12</sup> М <sup>2</sup> | $w$ , 10 <sup>-4</sup> м/с | Re 10 <sup>3</sup> | Ng 10 <sup>2</sup> | $\alpha$ | Nu 10 <sup>10</sup> |
|------------|-----------------|------------------------------|----------------------|-------|-------|--|----------------------------|--------------------|--------------------|----------|---------------------|
| B1         | 5,30            | 833                          | 29,0                 | 0,375 | 0,281 | 19,6                                   | 1,157                      | 7,683              | 3,997              | 1,954    | 3,216               |
| B2         | 5,30            | 833                          | 29,0                 | 0,375 | 0,282 | 18,2                                   | 1,157                      | 7,394              | 3,859              | 1,681    | 3,209               |
| B3         | 5,30            | 833                          | 29,0                 | 0,370 | 0,309 | 20,8                                   | 0,477                      | 3,355              | 7,219              | 3,365    | 1,678               |
| B4         | 5,30            | 833                          | 29,0                 | 0,376 | 0,287 | 26,3                                   | 2,793                      | 21,35              | 2,869              | 2,089    | 5,468               |
| B5         | 5,30            | 833                          | 29,0                 | 0,376 | 0,299 | 15,4                                   | 2,458                      | 14,38              | 2,221              | 1,327    | 4,183               |
| B6         | 5,30            | 833                          | 29,0                 | 0,377 | 0,306 | 24,4                                   | 3,352                      | 24,63              | 2,295              | 1,511    | 7,384               |
| B7         | 5,30            | 833                          | 29,0                 | 0,384 | 0,299 | 7,3                                    | 1,124                      | 4,326              | 1,718              | 0,912    | 1,444               |
| B8         | 8,20            | 840                          | 27,6                 | 0,376 | 0,312 | 17,1                                   | 1,768                      | 7,104              | 1,538              | 0,997    | 2,541               |
| B9         | 8,20            | 840                          | 27,6                 | 0,373 | 0,302 | 27,3                                   | 2,963                      | 15,32              | 1,374              | 0,953    | 6,833               |
| B10        | 8,20            | 840                          | 27,6                 | 0,373 | 0,275 | 15,7                                   | 1,999                      | 7,827              | 1,665              | 1,131    | 2,508               |
| B11        | 4,85            | 833                          | 29,2                 | 0,372 | 0,304 | 18,7                                   | 2,411                      | 17,39              | 2,154              | 1,365    | 6,877               |
| B12        | 5,30            | 833                          | 38,6                 | 0,359 | 0,287 | 16,2                                   | 1,417                      | 9,422              | 2,888              | 2,020    | 2,200               |
| B13        | 4,85            | 833                          | 29,2                 | 0,410 | 0,336 | 9,9                                    | 0,531                      | 2,233              | 3,273              | 1,506    | 1,127               |
| C1         | 5,28            | 837                          | 27,6                 | 0,365 | 0,310 | 29,2                                   | 0,527                      | 4,599              | 9,212              | 3,559    | 1,878               |
| C2         | 5,28            | 837                          | 27,6                 | 0,351 | 0,307 | 10,1                                   | 0,327                      | 1,838              | 8,752              | 4,401    | 0,601               |
| C3         | 5,28            | 837                          | 27,6                 | 0,361 | 0,320 | 3,2                                    | 0,293                      | 0,870              | 5,482              | 3,188    | 0,157               |
| C4         | 5,28            | 837                          | 27,6                 | 0,367 | 0,298 | 3,8                                    | 0,316                      | 0,987              | 6,164              | 3,150    | 0,280               |
| C5         | 5,28            | 837                          | 27,6                 | 0,354 | 0,288 | 5,8                                    | 0,341                      | 1,426              | 8,218              | 3,983    | 0,564               |
| C6         | 5,28            | 837                          | 27,6                 | 0,354 | 0,285 | 5,7                                    | 0,341                      | 1,412              | 8,219              | 3,901    | 0,621               |
| C7         | 5,28            | 837                          | 27,6                 | 0,347 | 0,270 | 5,2                                    | 0,344                      | 1,414              | 9,112              | 4,654    | 0,463               |
| C8         | 13,48           | 849                          | 28,7                 | 0,352 | 0,283 | 5,5                                    | 0,361                      | 0,592              | 2,400              | 1,013    | 0,169               |
| C9         | 13,48           | 849                          | 28,7                 | 0,354 | 0,272 | 5,6                                    | 0,365                      | 0,593              | 2,922              | 1,364    | 0,170               |

Таблица 2

| Шифр опыта | $\mu_0$ , мПа·с | $\rho_0$ , кг/м <sup>3</sup> | $\sigma_{0w}$ , МН/М | $m$   | $m_a$ | $k$ , 10 <sup>-12</sup> М <sup>2</sup> | $w$ , 10 <sup>-5</sup> м/с | Re 10 <sup>3</sup> | Nc 10 <sup>2</sup> | $\alpha$ | Nu 10 <sup>11</sup> |
|------------|-----------------|------------------------------|----------------------|-------|-------|--|----------------------------|--------------------|--------------------|----------|---------------------|
| D1         | 10,88           | 845                          | 25,6                 | 0,346 | 0,185 | 6,6                                    | 3,698                      | 0,849              | 1,445              | 0,950    | 3,246               |
| D2         | 10,88           | 845                          | 25,6                 | 0,347 | 0,246 | 8,7                                    | 4,210                      | 1,099              | 1,645              | 1,027    | 3,900               |
| D3         | 10,88           | 845                          | 25,6                 | 0,329 | 0,255 | 17,0                                   | 6,948                      | 2,871              | 2,715              | 1,074    | 7,328               |
| D4         | 10,88           | 845                          | 25,6                 | 0,318 | 0,268 | 17,7                                   | 9,407                      | 4,275              | 3,676              | 1,030    | 10,58               |
| D5         | 10,88           | 845                          | 25,6                 | 0,304 | 0,276 | 15,4                                   | 12,22                      | 5,773              | 4,775              | 0,981    | 12,11               |
| D6         | 10,88           | 845                          | 25,6                 | 0,314 | 0,238 | 17,3                                   | 3,909                      | 1,815              | 1,528              | 0,939    | 5,742               |
| D7         | 10,88           | 845                          | 25,6                 | 0,308 | 0,253 | 14,7                                   | 3,702                      | 1,653              | 1,447              | 1,612    | 4,139               |
| D8         | 5,27            | 835                          | 25,5                 | 0,320 | 0,271 | 21,1                                   | 3,733                      | 3,731              | 1,463              | 5,550    | 8,445               |
| D9         | 5,27            | 835                          | 25,5                 | 0,313 | 0,286 | 24,0                                   | 3,844                      | 4,348              | 1,506              | 4,462    | 9,365               |
| D10        | 5,27            | 835                          | 25,5                 | 0,332 | 0,280 | 23,4                                   | 3,797                      | 3,675              | 1,487              | 5,127    | 7,906               |
| D11        | 5,27            | 835                          | 25,5                 | 0,316 | 0,285 | 20,9                                   | 5,023                      | 5,127              | 1,968              | 3,286    | 12,49               |
| D12        | 5,27            | 835                          | 25,5                 | 0,343 | 0,272 | 20,6                                   | 4,800                      | 4,028              | 1,881              | 2,638    | 10,63               |
| D13        | 5,27            | 835                          | 25,5                 | 0,341 | 0,272 | 22,8                                   | 1,659                      | 1,490              | 0,650              | 4,970    | 6,243               |
| D14        | 5,27            | 835                          | 25,5                 | 0,339 | 0,267 | 22,4                                   | 2,224                      | 2,009              | 0,872              | 5,218    | 6,850               |
| D15        | 5,27            | 835                          | 25,5                 | 0,340 | 0,293 | 20,8                                   | 11,37                      | 9,859              | 4,457              | 2,694    | 21,87               |
| D16        | 5,27            | 835                          | 25,5                 | 0,329 | 0,307 | 19,7                                   | 10,42                      | 9,427              | 3,049              | 2,324    | 23,81               |
| E1         | 5,27            | 835                          | 25,5                 | 0,345 | 0,295 | 17,8                                   | 2,855                      | 2,211              | 1,119              | 6,924    | 5,066               |
| E2         | 5,27            | 835                          | 25,5                 | 0,358 | 0,342 | 20,4                                   | 21,55                      | 16,42              | 8,440              | 2,762    | 40,70               |
| E3         | 10,88           | 845                          | 25,6                 | 0,338 | 0,206 | 20,9                                   | 2,293                      | 0,987              | 0,896              | 1,823    | 2,760               |
| E4         | 10,88           | 845                          | 25,6                 | 0,333 | 0,216 | 20,0                                   | 3,800                      | 1,655              | 1,485              | 2,199    | 4,780               |
| E5         | 10,88           | 845                          | 25,6                 | 0,325 | 0,232 | 9,2                                    | 2,460                      | 0,770              | 0,961              | 2,868    | 1,574               |
| E6         | 8,69            | 841                          | 25,6                 | 0,331 | 0,274 | 18,5                                   | 2,798                      | 1,477              | 1,093              | 3,338    | 3,374               |
| E7         | 8,69            | 841                          | 25,6                 | 0,337 | 0,231 | 20,0                                   | 1,742                      | 0,922              | 0,681              | 3,329    | 4,291               |
| E8         | 8,69            | 841                          | 25,6                 | 0,330 | 0,248 | 15,0                                   | 17,79                      | 8,514              | 0,694              | 3,931    | 18,23               |
| E9         | 8,69            | 841                          | 25,6                 | 0,329 | 0,167 | 17,5                                   | 1,179                      | 0,618              | 0,461              | 4,149    | 3,751               |
| E10        | 8,69            | 841                          | 25,6                 | 0,329 | 0,306 | 16,5                                   | 20,45                      | 10,38              | 0,799              | 2,262    | 20,02               |

делью вытеснения, в безразмерных координатах реализуется при известном коэффициенте  $\alpha$ . Для перехода в размерные координаты необходимо знание величины коэффициента скорости межфазного обмена.

2. Прогнозные качества обменной модели вытеснения во многом зависят от возможности оценки коэффициентов, входящих в модель, по зара-

нее известным, общедоступным характеристикам пористой среды, насыщающих жидкостей и условий вытеснения. Анализ размерностей показывает, что задача сводится к установлению критериальных зависимостей коэффициента  $a$  и числа Нуссельта от безразмерных параметров, характеризующих условия вытеснения, сформулированные, например, в [5].

В табл. 1, 2 представлены результаты и условия проведенных с этой целью опытов по вытеснению нефти водой из насыпных пористых сред, расположенных вертикально (серии  $B$  и  $C$ ) и горизонтально (серии  $D$  и  $E$ ). Модели представляли собой стеклянные трубки внутренним диаметром 3,7 см, длиной 54,7 (серия  $B$ ), 37,4 (серии  $C$  и  $D$ ) и 23,7 см (серия  $E$ ), заполненные кварцевым песком. Модели насыщались смесью товарной дегазированной нефти с неочищенным керосином в соотношении от 3:1 до 1:3. Начальная нефтенасыщенность составляла не менее 95%. Вытеснение нефти производилось водопроводной водой с постоянным расходом. Накопленные объемы нефти и воды измерялись с точностью до 1 см<sup>3</sup>, что соответствовало определению коэффициента вытеснения с точностью от 0,004 до 0,0075 долей единицы, а объема промывки после прорыва воды — с ошибкой, не превышающей 1%.

Задача идентификации двух коэффициентов  $a$  и  $\alpha$  решалась по зависимости коэффициента вытеснения от объема промывки методом покоординатного спирального спуска. Остаточное среднеквадратическое отклонение между расчетными и фактическими коэффициентами вытеснения составляло, как правило, менее 0,01 и не превышало 0,02.

Анализ связей между безразмерными критериями показал, что в условиях вертикального вытеснения критерий Нуссельта  $Nu$  хорошо коррелируется с числом Рейнольдса (фиг. 3), а коэффициент  $a$  — с гравитационным числом  $Ng$  (фиг. 4). Соответствующие критериальные уравнения имеют вид

$$Nu = 1,543 \cdot 10^{-8} Re^{0,8106}, \quad r = 0,952 \quad (2.1)$$

$$a = 0,446 + 0,428 \cdot 10^{-2} Ng, \quad r = 0,965 \quad (2.2)$$

$$Nu = \frac{\alpha k}{\mu_o}, \quad Re = \frac{10 \rho_o w \sqrt{k}}{m^{2,3} \mu_o}, \quad Ng = \frac{\Delta \rho g}{|\text{grad } p|}$$

где  $Re$  — число Рейнольдса [13];  $k$  — коэффициент абсолютной проницаемости пористой среды;  $\rho_o, \mu_o$  — плотность и вязкость нефти, соответственно;  $\Delta \rho$  — разница плотностей нефти и воды;  $|\text{grad } p|$  — максимальный градиент давления в ходе вытеснения;  $g$  — ускорение земного тяготения;  $r$  — коэффициент парной корреляции.

В области малых чисел  $Re < 5 \cdot 10^{-3}$  его связь с критерием Нуссельта хорошо аппроксимируется линейной зависимостью

$$Nu = 4,771 \cdot 10^{-8} Re - 0,137 \cdot 10^{-10}, \quad r = 0,977 \quad (2.3)$$

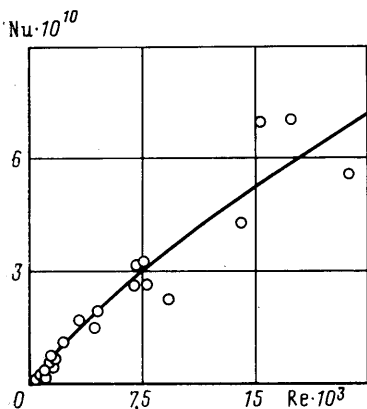
При горизонтальном вытеснении критерий Нуссельта также хорошо коррелируется с числом Рейнольдса (фиг. 5), но коэффициент  $a$  — с капиллярным числом и относительной вязкостью  $\mu_r = \mu_o / \mu_w$ . Причем последняя зависимость (фиг. 6) немонотонная. Четко выделяется критическое капиллярное число, после которого комплекс  $a \mu_r$  постоянен, а при меньших значениях быстро возрастает. Соответствующие критериальные уравнения при горизонтальном вытеснении имеют вид

$$Nu = 2,212 \cdot 10^{-8} Re + 9,69 \cdot 10^{-12}, \quad r = 0,986 \quad (2.4)$$

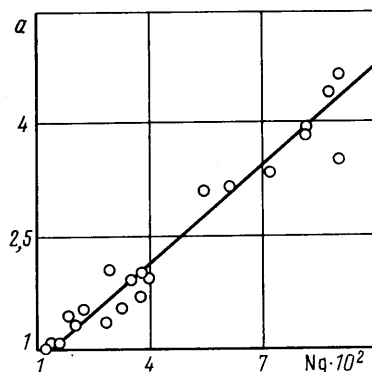
$$a = \left( 28,56 \ln \frac{1}{Nc} - 371 \right) \frac{1}{\mu_r} \quad (Nc \leq 1,5 \cdot 10^{-6}), \quad a = \frac{12}{\mu_r} \quad (Nc \geq 1,5 \cdot 10^{-6}) \quad (2.5)$$

$$Nc = \frac{w \mu_w}{\sigma_{ow}}$$

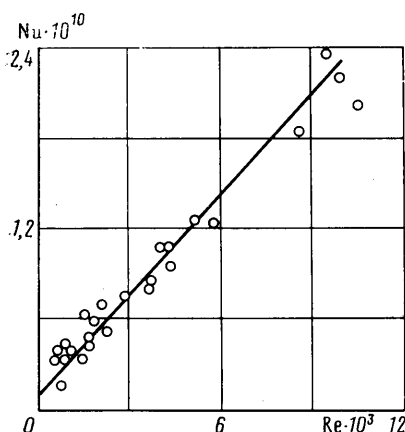
где  $\mu_w$  — вязкость воды;  $\sigma_{ow}$  — поверхностное натяжение.



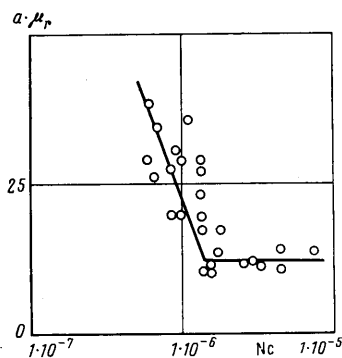
Фиг. 3



Фиг. 4



Фиг. 5



Фиг. 6

Физический смысл зависимостей (2.1), (2.3) и (2.4) очевиден. С ростом скорости потока улучшаются условия для срыва остаточной нефти с поверхности песка. В связи с тем, что опыты проведены в узком диапазоне изменения поверхностного натяжения на границе нефть — вода, корреляция критерия Нуссельта с комплексами, содержащими величину поверхностного натяжения, достоверно не прослеживается.

Коэффициент  $a$  определяет соотношение между поровыми объемами, занятыми подвижной и неподвижной фазами. Он однозначно связан с безводным объемом промывки  $Z_{bt}$  и безводным коэффициентом вытеснения  $\beta_{bt}$  соотношениями

$$a = \frac{\beta_{bt}}{\beta_0 - \beta_{bt}}, \quad Z_{bt} = \frac{a\beta_0(1 - s_{rw})}{a + 1}$$

Обратная связь коэффициента  $a$  с градиентом давления, но не со скоростью потока, указывает на то, что доля объема, занятая подвижной фазой, определяется условием формирования межфазной границы раздела при внедрении вытесняющей фазы в поровый канал. Граница раздела будет устойчива в том случае, если перепад давления, действующий на конечной толщине пограничного слоя, уравновешивается капиллярным давлением. Очевидно, что перепад гидродинамического давления напрямую связан с действующим градиентом давления и в условиях вертикального вытеснения частично компенсируется массовыми силами тяжести,

которые при малой толщине пограничного слоя могут быть соизмеримы с перепадом давления на нем. Для уравнивания большего перепада давления на границе раздела фаз при прочих равных условиях требуется меньший радиус кривизны поверхности раздела. Следовательно, больший градиент давления влечет за собой меньшую долю объема поры, занятую движущимся объемом.

Естественно, что в условиях горизонтального вытеснения, когда влиянием силы тяжести на границу межфазного раздела можно пренебречь, ее форма определяется взаимодействием капиллярных сил и скоростного напора. Так как капиллярные силы связаны также с краевым углом смачивания, то появление критического капиллярного числа, видимо, можно объяснить динамическим гистерезисом смачивания.

Таким образом, хорошо согласующаяся с экспериментальными данными и обладающая прогнозными возможностями физически непротиворечивая обменная модель вытеснения может быть эффективно использована для моделирования несмешивающегося вытеснения в пористых средах.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Buckley S. E., Leverett M. C. Mechanism of fluid displacement in sands // Trans. AIME. 1942. V. 146. P. 107–116.
2. Rapoport L. A., Leas W. J. Properties of linear water floods // Trans. AIME. 1963. V. 198. P. 139–148.
3. Баренблатт Г. И. Фильтрация двух несмешивающихся жидкостей в однородной пористой среде // Изв. АН СССР. МЖГ. 1971. № 5. С. 144–151.
4. Коновалов А. Н. Задачи фильтрации многофазной несжимаемой жидкости. Новосибирск: Наука, 1988. 165 с.
5. Эфрос Д. А. Исследования фильтрации неоднородных систем. Л.: Ростоптехиздат, 1963. 351 с.
6. Wright R. J., Dave R. A. An examination of the multiphase Darcy model of fluid displacement in porous media // Rev. Inst. Franc. Petrole. 1980. V. 35. № 6. P. 1011–1024.
7. Булыгин В. Я. Гидромеханика нефтяного пласта. М.: Недра, 1974. 230 с.
8. Нигматулин Р. И. Динамика многофазных сред. Ч. 2. М.: Наука, 1987. 359 с.
9. Плещинский Б. И., Назаровский Г. А., Гимадиев Г. А., Гимадиев Р. М. Экспериментальное определение величины динамической пористости при одновременной фильтрации двух несмешивающихся жидкостей // Уч. зап. Казан. ун-та. 1970. Т. 130. № 1. С. 120–122.
10. Singnal A. K., Somerton W. H. Quantitative modelling of immiscible displacement in porous media // Rev. Inst. Franc. Petrole. 1977. V. 32. № 6. P. 897–920.
11. Sylvestre L., Wilhelm A. M., Maratot G., Casamatta G. Configuration de piégeage dans un milieu poreux à saturation résiduelle en huile // Rev. Inst. Franc. Petrole. 1985. V. 40. № 4. P. 467–485.
12. Лыков А. В. Теория теплопроводности. М.: Гостоптехиздат, 1952. 392 с.
13. Когязов Ф. И. Физика нефтяных и газовых коллекторов. М.: Недра, 1977. 287 с.

Ивано-Франковск

Поступила в редакцию  
20.VII.1989