

УДК 532.546

© 1990 г.

О. Б. БОЧАРОВ, О. В. ВИТОВСКИЙ, В. В. КУЗНЕЦОВ

СТРУКТУРА СКАЧКОВ НАСЫЩЕННОСТИ ПРИ НЕРАВНОВЕСНОМ ВЫТЕСНЕНИИ В ПОРИСТЫХ СРЕДАХ

В основе классической теории равновесного вытеснения нефти водой лежат экспериментально определяемые из опытов по стационарному вытеснению функции относительных фазовых проницаемостей $k_i(s)$ и функция Леверетта $J(s)$, характеризующая капиллярный скачок давления на межфазных менисках. Нестационарный процесс вытеснения характеризуется наличием зон резкого изменения водонасыщенности s в пористой среде (скачков водонасыщенности), в которой равновесная модель двухфазной фильтрации несмешивающихся жидкостей Маскета — Леверетта может нарушаться [1, 2]. В простейшей схеме учета неравновесности [1, 2] предполагается, что функциональные параметры $J(s)$ и $k_i(s)$ в неравновесном потоке те же, что и в равновесном, но зависят не от истинной водонасыщенности s , а от фиктивной $\alpha(s)$. Для определения α в [1, 2] предложено кинетическое уравнение

$$\alpha = s + \tau \frac{\partial s}{\partial t^0}$$

где t^0 — время, а τ — характерное время замещения жидкостей в пористой среде. Решения уравнений неравновесной фильтрации исследовались в [2] при малых τ/t_1 , где t_1 — время вытеснения, методом сращения асимптотических разложений и в [3] численно при умеренных $\tau/t_1 < 1$. Показано, что длина стабилизированной зоны в этом случае возрастает с ростом скорости вытеснения, что подтверждается экспериментальными данными [4]. Вместе с тем экспериментальные данные по структуре скачков насыщенности жидкостей при умеренных значениях $\tau/t_1 < 1$ в настоящее время отсутствуют, нет также и методики определения характерного времени замещения жидкостей τ при неравновесном вытеснении.

В данной работе экспериментально и путем численных расчетов уравнений неравновесной фильтрации исследуются характеристики неравновесного вытеснения при различных условиях смачивания пористой среды вытесняющей и вытесняемой жидкостями. Предложена схема расчета параметра неравновесности.

1. Схема расчета параметра неравновесности. Равновесная модель двухфазной фильтрации Маскета — Леверетта основана на предположении того, что относительные фазовые проницаемости $k_i(s_1)$ и функция Леверетта $J(s_1)$ определяются только насыщенностью порового канала вытесняющей жидкостью s_1 . При стационарном двухфазном потоке эксперименты по определению $k_i(s_1)$ для различных пористых сред показали, что при капиллярных числах N_{c1} меньше 10^{-4} они действительно определяются в основном структурой порового канала и насыщенностями жидкостей [4, 5]. Величина капиллярного числа $N_{c1} = v_0 \mu_1 / \sigma$ определена через суммарную скорость фильтрации v_0 , вязкость вытесняющей жидкости μ_1 и межфазное натяжение σ . Капиллярные силы в этом случае велики по сравнению с гидродинамическим перепадом давления на масштабах порядка длины пор и определяют ту часть порового канала, которую может занимать смачивающая пористую среду жидкость, например вода при ее насыщенности s_1 .

При нестационарном вытеснении формирование равновесной структуры двухфазного потока при заданной величине s_1 в элементарном объеме, занимающем много пор, происходит только при малой скорости изменения насыщенности $\partial s_1 / \partial t^0$. В этом случае заполнение пор происходит равномерно. Вначале заполняются мелкие каналы и области на стенках пор с малыми средними радиусами кривизны межфазных менисков r_1 .

Возникающий капиллярный скачок давления в жидкостях $p_2 - p_1 = \sigma/r_1$ препятствует заполнению более крупных каналов до тех пор, пока гидродинамические перепады давления в жидкостях на масштабах порядка длины области вытеснения не приведут к увеличению разности давлений в фазах до $p_2 - p_1 > \sigma/r_1$, что дает возможность заполнения более крупных каналов. Так как любое поровое пространство образовано системой каналов, то их заполнение происходит пошагово, а время шага t_1 определяется капиллярным скачком давления в жидкостях $p_c(s_1) = \sigma/\sqrt{k/m}J(s_1)$ и гидравлическим сопротивлением канала для жидкостей $k_i^*(s_1)$. Записывая уравнения движения жидкостей по капилляру согласно закону Дарси под действием только капиллярного скачка давления, можно определить время заполнения канала вытесняющей жидкостью, равное времени одного шага

$$t_1 = \frac{l^2}{2} \frac{\mu_2}{\sigma\sqrt{k/m}j(s_1)k_1^*(s_1)} \left(1 + \mu_0 \frac{k_2^*}{k_1^*} \right) \quad (1.1)$$

где $\mu_0 = \mu_1/\mu_2$, μ_1 — вязкость вытесняющей (вода) и μ_2 — вытесняемой жидкостей, $k_i^*(s_1)$ — относительные проницаемости заполняемого канала, l — длина порового канала, k — абсолютная проницаемость пористой среды. Проницаемости поровых каналов при заданной величине s_1 могут существенно отличаться от относительных фазовых проницаемостей $k_i(s_1)$, так как последние определяются в значительной степени числом поровых каналов, по которым движутся жидкости. В особенности это важно вблизи предельных значений насыщенности.

При большой скорости изменения водонасыщенности в элементарном объеме даже при малых капиллярных числах $N_{c1} < 10^{-4}$ пошаговое равновесное заполнение поровых каналов не может обеспечить необходимую величину $\partial s_1/\partial t^\circ$, определяемую внешними условиями. Это приводит к локальному увеличению перепадов давления между жидкостями и одновременно открытию нескольких поровых каналов на одном шаге, близких по величине пробойного капиллярного давления. При этом относительные фазовые проницаемости для вытесняющей жидкости при заданном значении s_1 возрастут по сравнению с равновесным вытеснением, а для вытесняемой — уменьшатся и будут соответствовать большему значению водонасыщенности α_1 , чем реальное — s_1 . Эффективное значение водонасыщенности α_1 определяется величиной s_1 и числом одновременно открываемых на одном шаге пор n_s в единице объема пористой среды: $\alpha_1 = \alpha_1(s_1, n_s)$. Для малых n_s разложим эффективную водонасыщенность в ряд по малому параметру n_s вблизи равновесного состояния

$$\alpha_1(s_1, n_s) = s_1 + \left. \frac{\partial \alpha_1}{\partial n_s} \right|_{n_s=0} n_s \quad (1.2)$$

Число одновременно открываемых на одном шаге пор n_s связано со скоростью изменения водонасыщенности в единице объема соотношением

$$\frac{\partial s_1}{\partial t^\circ} = \frac{n_s \beta(s_1)}{t_1} \quad (1.3)$$

где t_1 — время одного шага, определяемое (1.1), $\beta(s_1)$ — доля порового канала, заполняемая водой на одном шаге (определяется равновесной формой межфазных менисков в поровом канале при заданном капиллярном давлении). Определяя величину n_s из соотношения (1.3) с учетом (1.1), получим выражение для эффективной насыщенности

$$\alpha_1 = s_1 + \left. \frac{\partial \alpha_1}{\partial n_s} \right|_{n_s=0} \frac{l^2 \mu_2}{2\sigma\sqrt{k/m}JF^*k_2^*\beta(s_1)} \frac{\partial s_1}{\partial t^\circ} \quad (1.4)$$

где $F^* = (1 + \mu_0 k_2^*/k_1^*)$ — функция Баклея — Леверетта для относительных проницаемостей поровых каналов. В случае зернистых пористых сред

типа кварцевого песка или песчаника с малым содержанием связующего цемента длина одиночной поры l близка к среднему размеру зерен d . Используя известное выражение Козени — Кармана для проницаемости таких пористых сред $k = d^2 m^2 / 180(1-m)^2$ и обезразмеривая (1.4) по характерному времени вытеснения $t_* = mL\Delta S/v_0$, получим

$$\alpha = s + DR(s) \frac{ds}{dt} \quad (1.5)$$

$$D = \frac{90(1-m)^2}{m^4 \sqrt{m}} N_{c2} \frac{\sqrt{k}}{L} \max \left[\frac{1}{JF^*k_2^*\beta} \frac{\partial \alpha}{\partial n_s} \Big|_{n_s=0} \right] \quad (1.6)$$

$$R(s) = \left[\frac{1}{F^*k_2^*\beta} \frac{\partial \alpha}{\partial n_s} \Big|_{n_s=0} \right] \left[\max \frac{1}{JF^*k_2^*\beta} \frac{\partial \alpha}{\partial n_s} \Big|_{n_s=0} \right]^{-1}$$

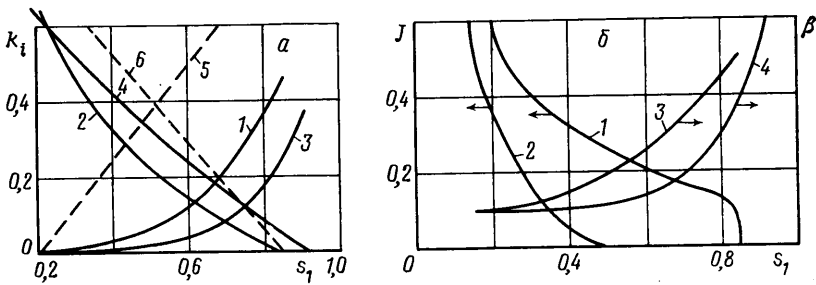
$$s = \frac{s_{1,i} - s_{1,i}}{s_{1,f} - s_{1,i}}, \quad \alpha = \frac{\alpha_{1,i} - s_{1,i}}{s_{1,f} - s_{1,i}}, \quad N_{c2} = \frac{v_0 \mu_2}{\sigma}$$

где D — параметр неравновесности, $R(s)$ — функция неравновесности, нормализованная на единицу, s — нормализованная водонасыщенность, α — нормализованная эффективная насыщенность, $s_{1,i}$ и $s_{1,f}$ — начальная и конечная предельные водонасыщенности.

В силу сложности структуры порового пространства соотношения (1.6) имеют оценочный характер и в действительности функция неравновесности является эмпирическим функциональным параметром подобно относительным фазовым проницаемостям и функции Леверетта. Вместе с тем из (1.6) следует, что функция неравновесности определяется видом функций $J(s)$, $F^*(s)$, $k_2^*(s)$, $\beta(s)$ и $\partial \alpha / \partial n_s$, зависящих от условий смачивания пористой среды жидкостями. Предположим, что функция $\partial \alpha / \partial n_s$ слабо зависит от величины водонасыщенности во всем диапазоне s и близка к нулю вблизи предельных водонасыщенностей. Это позволяет оценить вид функции $R(s)$ при различных условиях смачивания пористой среды вытесняющей и вытесняемой жидкостями.

На фиг. 1, а, б приведены равновесные фазовые проницаемости в кварцевом песке с $k = 6 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2$ для смачивающей (1, 2) и несмачивающей (3, 4) пористую среду жидкостей (фиг. 1, а) и функции Леверетта (1, 2, фиг. 1, б) при пропитке с краевыми углами натекания θ равными ~ 20 и $\sim 75^\circ$ соответственно. Краевые углы натекания измерялись на шероховатой пластине с шероховатостью, близкой к шероховатости кварцевого песка. В качестве жидкостей использовались вода и углеводородная жидкость — трансформаторное масло. Изменение краевого угла достигалось добавлением в воду фиолетовых чернил, содержащих этиленгликоль.

Функция Леверетта измерялась методом полунепроницаемой перегородки. Фазовые проницаемости измерялись в предельных точках и далее рассчитывались из данных по равновесному вытеснению с использованием измеренной радиоизотопным методом структуры распределения водонасыщенности. Относительные проницаемости заполняемых водой каналов $k_i^*(s_i)$ оценивались из фазовых проницаемостей $k_i(s_i)$ с учетом изменения числа проводящих жидкости каналов с ростом водонасыщенности s_i . Из теории протекания в регулярных решетках [5] следует, что зависимости фазовых проницаемостей решетки с равными проницаемостями поровых каналов от их концентрации близки к линейным (линии 5 и 6 на фиг. 1, а), за исключением областей вблизи предельных насыщенностей. Тогда отношения фазовых проницаемостей для линий 5, 1 и 6, 2 дают нам оценку относительных проницаемостей каналов $k_i(s_i)$ для смачивающей и несмачивающей пористую среду жидкостей в строго гидрофильной среде.



Фиг. 1

На фиг. 1, б приведены также зависимости для доли объема порового канала, заполняемого водой на одном шаге $\beta(s)$, в строго гидрофильной среде (линия 3) и при смачивании, близком к нейтральному (линия 4). Эти зависимости имеют оценочный характер и учитывают особенности измеренных фазовых проницаемостей (фиг. 1, а). При малых s , изменение объема воды в порах происходит главным образом из-за пропитки водой горловин сужений поровых каналов, объем которых мал и величина $\beta(s_1)$ не превышает 0,1. При насыщенностях $s_1 > 0,3$ начинают пропитываться также поровые расширения и величина $\beta(s_1)$ увеличивается, что соответствует увеличению $k_i(s_1)$ (фиг. 1, а). Вблизи предельной водонасыщенности значительная часть несмачивающей пористую среду жидкости уже вытеснена из поровых каналов на предыдущих шагах и оценки показывают, что величина $\beta(s_1)$ не может превышать 0,5–0,6. Для смачивания, близкого к нейтральному, фазовые проницаемости для воды лежат существенно ниже, чем при $\theta \approx 20^\circ$, и доля объема порового канала, заполняемого водой на одном шаге, меньше, чем для строго гидрофильной среды (фиг. 1, б, линия 4).

Значения функции неравновесности для строго гидрофильной пористой среды (кривая 1) и при смачивании, близком к нейтральному (кривая 2), рассчитанные по (1.6) на основе данных фиг. 1, а, б, приведены на фиг. 2. Вид функций неравновесности для различных условий смачивания принципиально различен, что связано главным образом с очень низкими значениями капиллярного давления при $s_1 > 0,5$ для смачивания, близкого к нейтральному (фиг. 1, б).

Соотношения (1.5) и (1.6) замыкают систему уравнений неравновесной фильтрации, которая в переменных насыщенность s , суммарная скорость фильтрации жидкостей v имеет вид [2]

$$m \frac{\partial s_1}{\partial t} + \operatorname{div} \left[v F(\alpha_1) + \frac{\sigma \sqrt{k m}}{\mu_2} F(\alpha_1) k_2(\alpha_1) \operatorname{grad} J(\alpha_1) \right] = 0 \quad (1.7)$$

$$\operatorname{div} v = 0 \quad (1.8)$$

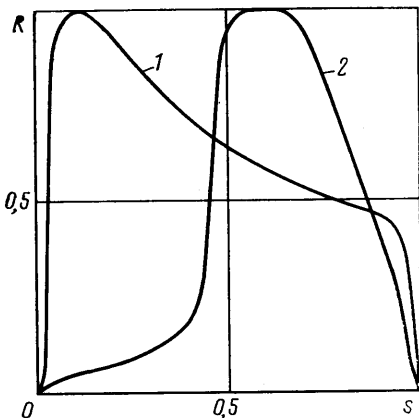
В одномерном случае при постоянной скорости фильтрации воды на входе $v = v_0$ при $x = 0$ уравнения (1.7), (1.8) приводятся к одному эволюционному уравнению, описывающему распределение насыщенности в пространстве

$$\frac{\partial s}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} F(\alpha) + \varepsilon \frac{\partial}{\partial x} a(\alpha) \frac{\partial \alpha}{\partial x} = 0 \quad (1.9)$$

$$\alpha = s + DR(s) \frac{\partial s}{\partial t} \quad (1.10)$$

$$t = \frac{v_0 t^0}{m L \Delta s}, \quad x = \frac{x^0}{L}, \quad \varepsilon = \frac{\sigma \sqrt{k m}}{L v_0 \mu_2}$$

где параметр неравновесности D и функция неравновесности $R(s)$ определяются из (1.6). В задаче имеется два малых параметра при старших производных ε и D и только один из них, параметр неравновесности D , содержится в сильно нелинейной функции $F(\alpha)$, что осложняет анализ решений (1.9). Вместе с тем ясно, что неравновесность будет проявляться главным образом в областях с большими скоростями изменения s , т. е. вблизи фронта вытеснения, что подтверждается численными расчетами [3]. Поэтому характер неравновесного вытеснения может быть принципиально различен для различного вида функций неравновесности, в особенности в областях насыщенных $0 < s < s_c$, где s_c — фронтовая насыщенность в решении задачи Баклея — Леверетта (уравнение (1.9) при $D=0$, $\varepsilon=0$).



Фиг. 2

Наиболее ярко это должно проявляться при сравнении характера неравновесного вытеснения в строго гидрофильной пористой среде и при смачивании пористой среды жидкостями, близкого к нейтральному, так как функции неравновесности в этих случаях принципиально различны (фиг. 2). Для исследования характера неравновесного вытеснения при различных значениях параметра неравновесности и функции неравновесности были проведены эксперименты по вытеснению и сравнение данных экспериментов с результатами численного анализа системы уравнений (1.5), (1.6), (1.9).

2. Экспериментальная установка и методика измерений. Эксперименты проводились на цилиндрической и прямоугольной моделях пористой среды, расположенных горизонтально. Диаметр рабочего участка цилиндрической модели $5,2 \cdot 10^{-2}$ м, длина 1,7 м, размеры прямоугольного рабочего участка $0,01 \times 0,2 \times 0,6$ м. Рабочий участок заполнялся виброуплотненным кварцевым песком с проницаемостью $\sim 10 \cdot 10^{-12}$ м² и пористостью $m \approx 0,4$. Для получения однородной пористой среды засыпка песка и его виброуплотнение проводились в заполненном водой рабочем участке. Затем участок высушивался, виброуплотнялся, вакуумировался и заполнялся водным раствором NaCl с концентрацией 2 г/л или 50%-ным раствором фиолетовых чернил с последующим его вытеснением углеводородной жидкостью с необходимой вязкостью. Такая подготовка пористой среды позволила получить однородную и хорошо повторяющуюся смачиваемость пористой среды вытесняющей жидкостью и моделировать начальную водонасыщенность, характерную для нефтяных пластов. Вытеснение углеводородной жидкости водными растворами проводилось при постоянном расходе, величина которого изменялась в широком диапазоне, что позволило получать как равновесный, так и неравновесный режимы вытеснения. Все опыты проводились при давлении на выходе рабочего участка $p_0 \approx 0,1$ МПа и температуре $\approx 20^\circ\text{C}$.

Регистрация структуры скачков насыщенности при вытеснении проводилась методом гамма-индикаторов. В вытесняющую жидкость вводился промеран, содержащий радиоактивный изотоп ртути. Пространственное распределение гамма-излучения в процессе вытеснения для прямоугольной модели пористой среды измерялось гамма-камерой SEGAMS (ВНР), измерительным элементом которой является сцинтилляционный кристалл NaI с диаметром 0,3 м, который перемещался по длине рабочего участка. Использование стандартного коллиматора высокого разрешения позволило получить разрешающую способность измерительной системы 5×5 мм по площади и 14% по энергии. При обработке изображения на ЭВМ учитывалась неоднородность чувствительности ФЭУ детектора и статистический характер гамма-излучения. Перепад давления на длине рабочего участка измерялся реохордным датчиком давления, в процессе экспериментов измерялись также объемные расходы жидкостей на выходе из рабочего участка. Соответствующие условиям проведенных опытов фазовые проницаемости и капиллярное давление приведены на фиг. 1, а, б.

3. Схема расчетов. Для определения эволюции распределения насыщенности по длине при неравновесном вытеснении система уравнений (1.9), (1.10) решалась численно при начальном условии $s(x, 0) = 0$, граничном условии на входе $x = 0$

$$\varepsilon a(\alpha) \frac{d\alpha}{dx} - F(\alpha) = -1$$

соответствующем отсутствию расхода вытесняющей жидкости и при отборе жидкостей на выходе пропорционально их подвижностям (отсутствие концевго эффекта)

$$\varepsilon a(\alpha) \frac{\partial \alpha}{\partial x} = 0$$

Уравнение для $s(x, t)$ имеет третий порядок и не разрешено относительно старшей производной $\partial s / \partial t$, поэтому сначала, дифференцируя (1.10) по t и подставляя $\partial s / \partial t$ из (1.9), получаем уравнение для α

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon a(\alpha) \frac{\partial \alpha}{\partial x} - F(\alpha) \right) + D \frac{\partial}{\partial t} R(s) \frac{\partial s}{\partial t} \quad (3.1)$$

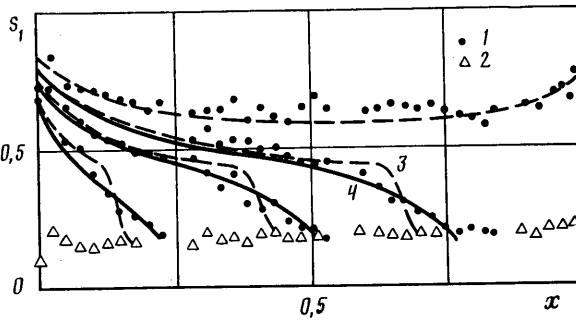
Начальное значение для α в силу $R(0) = 0$ выбирается равным нулю. Для (3.1) интегрирующим методом строилась неявная консервативная разностная схема второго порядка по пространственной координате. Член $R(s) \partial s / \partial t$ на n -м слое аппроксимировался с использованием уравнения (1.10) через α^n и s^n , что позволило сохранить двухслойность схемы. Нелинейное уравнение для α^{n+1} методом квазилинеаризации сводилось к линейному, которое решалось методом трехточечной прогонки. После определения α^{n+1} решалось уравнение (1.10) для s^{n+1} по неявной схеме с итерациями по нелинейности по методу Ньютона. Затем по полученным α^{n+1} , s^{n+1} проводилось уточнение решения до удовлетворения заданной точности. Выбор начального приближения проводился с использованием линейной экстраполяции по времени.

4. Обсуждение результатов. Проведенные эксперименты показали, что в строго гидрофильной пористой среде, $\theta_H = 20^\circ$, при длине рабочего участка $L = 0,6$ м и $\mu_0 = 0,058$ для капиллярных чисел N_{ca} меньше $1,7 \cdot 10^{-6}$ экспериментальные данные по структуре скачков насыщенности хорошо обобщаются данными численных расчетов при $D = 0$ и длина стабилизированной зоны с увеличением скорости вытеснения убывает. Для капиллярных чисел N_{ca} больше $1,7 \cdot 10^{-6}$ наблюдалось увеличение длины стабилизированной зоны с ростом скорости вытеснения, что говорит о неравновесности вытеснения [2].

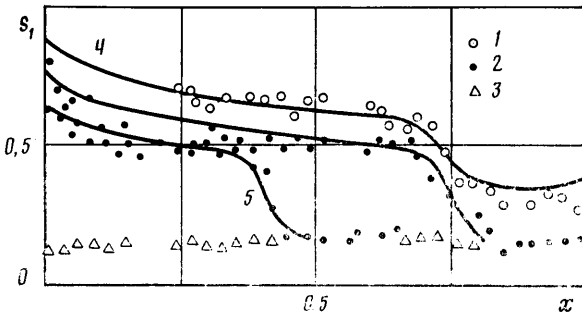
На фиг. 3 приведены экспериментальные профили скачков насыщенности при $\mu_0 = 0,058$, $\sigma = 30 \cdot 10^{-3}$ Н/м, $k = 6 \cdot 10^{-12}$ м², $N_{ca} = 4,7 \cdot 10^{-5}$, $\varepsilon = 0,061$ — точки 1 для четырех моментов времени $t = 0,13, 0,33, 0,53$ и $2,13$. Точками 2 на фиг. 3 приведено начальное распределение водонасыщенности по длине пористой среды. Линией 3 на фиг. 3 приведена структура скачков насыщенности для равновесного вытеснения. В условиях опыта фиг. 3 расчет по равновесной модели показывает, что вблизи фронта вытеснения структура решения принципиально отличается от данных экспериментов. На фиг. 3 линией 4 приведены результаты расчета неравновесного вытеснения, выполненные для функции неравновесности, соответствующей строго гидрофильной пористой среде (кривая 1 на фиг. 2).

Как и в эксперименте, увеличение параметра неравновесности D с увеличением капиллярного числа приводит к выполаживанию переднего фронта. Наилучшее совпадение результатов расчета и эксперимента наблюдалось при $D = 8 \cdot 10^{-3}$, что соответствует величине $\partial \alpha / \partial n_s$ в (1.6), равной 300. Практически такое же значение $\partial \alpha / \partial n_s$ для строго гидрофильной пористой среды получено при сравнении экспериментальных профилей водонасыщенности с расчетом при $\mu_0 = 0,1$ и $N_{ca} = 1,8 \cdot 10^{-5}$. Опыты по вытеснению, выполненные в рабочем участке с $L = 1,7$ м, показали, что при том же капиллярном числе неравновесность проявляется существенно слабее, что прямо следует из (1.6). При увеличении длины рабочего участка величина \sqrt{k}/L уменьшается, снижается величина параметра неравновесности D и соответственно уменьшается длина стабилизированной зоны при неравновесном вытеснении.

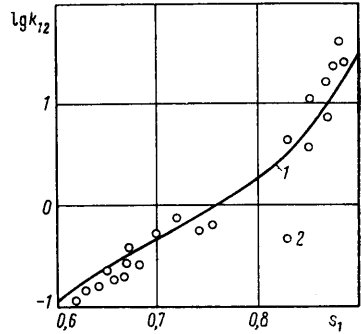
Эксперименты по вытеснению в строго гидрофильной пористой среде показали, что неравновесность проявляется главным образом в стабилизированной зоне на фронте вытеснения, а за фронтом вытеснения ее влияние мало (фиг. 3).



Фиг. 3



Фиг. 4



Фиг. 5

Эксперименты по вытеснению в случае смачивания пористой среды водой, близкого к нейтральному, показали, что при $L=0,6$ м неравновесность вытеснения проявляется и при $N_{c2}=8,8 \cdot 10^{-7}$, что ниже, чем для строго гидрофильной пористой среды. На фиг. 4 приведено распределение водонасыщенности по длине рабочего участка при $\mu_0=0,058$ и капиллярном числе $N_{c2}=5,4 \cdot 10^{-7}$, $\varepsilon=5,95$, $t=0,56$ — точки 1 и $N_{c2}=1,1 \cdot 10^{-5}$, $\varepsilon=0,248$ — точки 2 для моментов времени $t=0,2$ и $0,42$. Точками 3 на фиг. 4 приведено начальное распределение водонасыщенности. В опыте с $N_{c2}=5,4 \cdot 10^{-7}$ экспериментальный профиль водонасыщенности хорошо обобщается расчетом по равновесной модели — 4, $D=0$. В отличие от строго гидрофильной пористой среды при увеличении скорости вытеснения ($N_{c2}=1,1 \cdot 10^{-5}$) в опытах наблюдалось значительное снижение фронтовой насыщенности и коэффициент вытеснения к моменту прорыва воды снижался с $0,58$ до $0,42$.

Линиями 5 на фиг. 4 приведены расчеты неравновесного вытеснения при параметре неравновесности $D=0,2$, определенном по (1.6) при $da/dn_s=300$, и функции неравновесности, показанной линией 2 на фиг. 2. Результаты расчетов также дают значительное снижение фронтовой насыщенности, как и в эксперименте. Это связано с большой неравномерностью функции неравновесности в диапазоне насыщенностей от нулевой, до фронтовой в равновесном вытеснении: $s_c=0,6$. В диапазоне насыщенностей $0 < s < 0,4$ функция неравновесности мала и она слабо выполаживает передний фронт — (фиг. 4). При $s > 0,4$ функция неравновесности резко возрастает, что приводит при $D=0,2$ к сильному выполаживанию профиля насыщенности и формированию новой фронтовой насыщенности s_c^* . Величина s_c^* близка к значению насыщенности $s \approx 0,5$, при которой функция неравновесности достигает максимума.

Опыты и расчеты в диапазоне отношения вязкостей жидкостей $0,25 < \mu_0 < 0,023$ при смачивании пористой среды водой, близком к нейтральному, показали, что во всех случаях при неравновесном вытеснении про-

исходит значительное снижение фронтальной водонасыщенности и коэффициента вытеснения к моменту прорыва воды.

Принципиальной особенностью неравновесного вытеснения является то, что функциональные зависимости фазовых проницаемостей остаются такими же, как и при равновесном вытеснении. На фиг. 5 приведена зависимость отношения фазовых проницаемостей $k_{12}=k_1/k_2$ для вытесняющей и вытесняемой жидкостей от величины водонасыщенности s_1 для равновесного — (кривая 1) и неравновесного — (точки 2) вытеснений при $\mu_0=0,058$ и условий опыта фиг. 4. Для неравновесного вытеснения отношение фазовых проницаемостей было определено из опытных данных по отношению расходов жидкостей на выходе из рабочего участка после прорыва воды, когда градиенты насыщенности во всей области вытеснения малы (фиг. 4). Данные для равновесного и неравновесного вытеснений на фиг. 5 близки, что подтверждает основную гипотезу модели неравновесного вытеснения [1, 2] о постоянстве функциональных зависимостей относительных фазовых проницаемостей в условиях проведенных опытов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баренблатт Г. И. Фильтрация двух несмешивающихся жидкостей в однородной пористой среде // Изв. АН СССР. МЖГ. 1971. № 5. С. 144–151.
2. Баренблатт Г. И., Винниченко А. П. Неравновесная фильтрация несмешивающихся жидкостей // Успехи механики. 1980. Т. 3. № 3. С. 35–50.
3. Бочаров О. Б., Кузнецов В. В., Чехович Ю. В. Численное исследование неравновесной фильтрации несмешивающихся жидкостей // Инж.-физ. журн. 1989. Т. 57. № 1. С. 91–95.
4. Баренблатт Г. И., Ентов В. М., Рыжик В. М. Теория нестационарной фильтрации жидкости и газа. М.: Недра, 1972. 288 с.
5. Kirkpatrick S. Percolation and conduction // Rev. Mod. Phys. 1973. V. 45. № 4. P. 574–588.

Новосибирск

Поступила в редакцию
3.VII.1989