

УДК 532.546

© 2003 г. Д. Н. МИХАЙЛОВ, Г. С. СТЕПАНОВА

## **О ВЛИЯНИИ АДСОРБЦИИ – ДЕСОРБЦИИ МИКРОЗАРОДЫШЕЙ ГАЗА НА ХАРАКТЕР ФИЛЬТРАЦИИ ГАЗИРОВАННОЙ ЖИДКОСТИ**

Теоретически рассматривается задача о течении газированной жидкости в пористой среде. Наблюдаемые в экспериментах периодические колебания расхода жидкости и газа объясняются процессами сорбции – десорбции микророзродышей газа на стенках порового пространства и их диффузией. При этом используется кинетическое уравнение, в котором скорость десорбции прямо пропорциональна концентрации адсорбированных микророзродышей и величине скорости фильтрации, а скорость адсорбции – прямо пропорциональна произведению концентрации подвижных микророзродышей на “концентрацию свободных мест” на поверхности пор. Исследованы стационарные решения данного уравнения. Показано, что периодические колебания расхода могут проявляться только при преобладании процессов адсорбции микророзродышей над их десорбцией.

*Ключевые слова:* однофазная фильтрация, микророзродыши газа, газированная жидкость, колебания расхода, адсорбция-десорбция.

При проведении экспериментов по течению газированных жидкостей через пористую среду при нестационарном течении отмечались периодические колебания расхода газа и жидкости [1–4].

Например, в экспериментах [3, 4] с газированным трансформаторным маслом обнаружено, что и при установившемся движении и постоянном перепаде давления на выходе наблюдаются колебания газового фактора и расхода жидкости. Эти колебания противоположны по знаку: максимуму газового фактора отвечает минимум расхода жидкости, а минимуму газового фактора – максимум расхода. С ростом газового фактора колебания усиливаются.

Возникновение колебаний объяснялось [4] процессами сорбции и десорбции микророзродышей газа на поверхности порового пространства. Дело в том, что газ растворяется в нефти не в виде отдельных молекул, а образуя микророзродыши из нескольких молекул газа, окруженных сольватной оболочкой, в состав которой входят поверхностно-активные вещества (ПАВ), содержащиеся также и в нефти [5]. Эти микророзродыши в процессе фильтрации частично сорбируются на поверхности пористой среды, меняя тип смачиваемости и, тем самым, приводя к проскальзыванию жидкости относительно стенок пор (эффект “газового подшипника”, см., например, [6, 7]). Именно поэтому газовый фактор в потоке снижается, а расход жидкости возрастает. Однако после того как вся удельная поверхность пористой среды покрыта микророзродышами, наступает процесс десорбции. Теперь газовый фактор будет повышаться, а расход жидкости – снижаться.

В экспериментах [2] также отмечалась неоднородность потока по сечениям модели при вытеснении газированной жидкости, что интерпретируется как перемещение отдельных пузырей газа по пласту.

В работе [1] утверждается, что движение газа через жидкость в объеме пористой среды происходит в виде отдельных струек, проскальзывающих между неподвижными пульсирующими пузырьками. После прорыва очередной струйки интенсивное выделение газа временно прекращается и на выходе образца фиксируется жидкость.

Известны также экспериментальные данные о влиянии скорости фильтрации, ультразвукового воздействия, а также типа пористой среды на фазовое равновесие и, следовательно, на количество микророзродышей газа (например, [8–10]).

Хотя существуют и иные объяснения нестационарных явлений при фильтрации газированных жидкостей, рассмотрим процесс сорбции-десорбции подробнее.

**1. Исходные предпосылки** Рассмотрим одномерный случай фильтрации жидкости вдоль оси  $X$ . Пусть жидкость содержит микророзродыши газа, размер которых много меньше характерного размера поровых сужений. Кроме того, примем, что микророзродыши движутся с той же скоростью, что и несущая фаза [11].

Тогда скорость фильтрации газированной жидкости  $w$  описывается обычным законом Дарси

$$w = -\frac{k}{\mu_{\text{mix}}} \frac{\partial P}{\partial x} \quad (1.1)$$

Здесь  $k$  – абсолютная фазовая проницаемость;  $P$  – давление;  $\mu_{\text{mix}} = \mu_0 = \text{const}$  – вязкость газированной жидкости.

Согласно гипотезе [4], часть микророзродышей газа адсорбируется на поверхности порового пространства и, тем самым, приводит к частичному проскальзыванию жидкости относительно стенок пор. При этом истинная скорость течения жидкости на стенке  $v_s$  не равна нулю, а определяется [6] некоторым коэффициентом проскальзывания  $b$

$$v_s = b \frac{\partial v}{\partial y} \quad (1.2)$$

Здесь  $v$  – истинная скорость течения жидкости в объеме,  $y$  – координата, нормальная к стенке порового канала. Данный эффект приводит к зависимости фазовой проницаемости  $k$  от концентрации микророзродышей газа, адсорбированных на стенках пор [12].

Предположим, что коэффициент проскальзывания  $b$  зависит от концентрации микророзродышей  $C^a$ , адсорбированных на твердой поверхности поровых каналов. Тогда, используя выражение для проницаемости при течении с проскальзыванием [7, 13], получаем

$$k \equiv k(C^a) = k_0 \left( 1 + \frac{4b(C^a)}{r} \right) \quad (1.3)$$

где  $r$  – средний радиус порового канала.

Максимальное проскальзывание соответствует ситуации, когда вся поверхность порового пространства покрыта микророзродышами газа.

Оценим максимально возможную концентрацию микророзродышей, адсорбированных на стенках пор [14]. Обычно удельная поверхность пористой среды составляет  $10^3$ – $10^4$   $\text{см}^2/\text{см}^3$ . Средний размер микророзродышей –  $10^{-6}$   $\text{см}$  [15]. Следовательно, при плотной упаковке пузырьков на поверхности поровых каналов для покрытия 1  $\text{см}^3$  порового объема понадобится  $10^{15}$ – $10^{16}$  пузырьков, а их объем составит  $\sim 10^{-3}$ – $10^{-2}$   $\text{см}^3$ .

Ранее авторами [16, 17] рассматривалась задача о фильтрации двух несмешивающихся взаимонерастворимых жидкостей с учетом адсорбции жидких компонент на скелет и диффузии компонент. Причем концентрация компонента на стенках порового пространства связывалась изотермой адсорбции с долей этого же компонента в эмульсии. В работе [18] на основе экспериментов [19] вводилось уравнение кинетики накопления неподвижных (задерживаемых в поровом пространстве) капель эмульсии,

и считалось, что эффективная проницаемость сосуществующей фазы линейно уменьшается с ростом величины объемной концентрации заземленных капель.

Подобное кинетическое уравнение использовалось также авторами [20] при описании двухфазной фильтрации с наличием микроэмульсии в потоке. Однако в этом случае в качестве динамического параметра выступала не концентрация удержанных капель микроэмульсии, а пороговая насыщенность сосуществующей фазы. Более сложное кинетическое уравнение применялось в работах [21, 22], где с его помощью учитывался как процесс суффозии, так и процесс кольматации при фильтрации суспензий.

**2. Математическая модель.** Согласно экспериментальным данным [3, 4], преобладающее влияние на процессы адсорбции – десорбции оказывают три параметра: скорость фильтрации жидкости, газовый фактор и площадь порового пространства, доступная для адсорбции микророзродышей.

Исходя из этого, предположим, что скорость десорбции прямо пропорциональна концентрации адсорбированных микророзродышей газа  $C^a$  и величине скорости фильтрации  $w$ , а также обратно пропорциональна эффективному размеру микророзродышей  $d$ .

Скорость адсорбции прямо пропорциональна произведению концентрации подвижных микророзродышей в объеме жидкости  $(C - C^a)$  на “концентрацию свободных мест” на поверхности пор  $(C^s - C^a)$ .

Таким образом, кинетическое уравнение имеет следующий вид

$$\frac{\partial C^a}{\partial t} = -\alpha \frac{w(C^a)}{d} C^a + \vartheta (C^s - C^a)(C - C^a) + \beta \frac{\partial^2 C^a}{\partial x^2} \quad (2.1)$$

$$C = (4/3)\pi a^3 n$$

Здесь  $C$  – объемная концентрация подвижных микророзродышей в жидкости;  $a$  – радиус пузырьков;  $n$  – число подвижных микророзродышей в единице объема смеси;  $d$  – эффективный размер микророзродышей;  $\alpha$  и  $\vartheta$  – постоянные величины, характеризующие интенсивность адсорбции и десорбции ( $\vartheta$  имеет размерность  $c^{-1}$ , а  $\alpha$  – безразмерный коэффициент);  $C^s = \text{const}$  – максимально возможная концентрация адсорбированных микророзродышей (число “свободных мест” на “чистой” удельной поверхности порового пространства).

Кроме того, в уравнение (2.1) введен член, описывающий диффузию адсорбированных пузырьков по стенкам порового пространства ( $\beta$  – коэффициент диффузии).

Подобное кинетическое уравнение ранее использовалось авторами [21, 22] для описания процессов суффозии – кольматации при фильтрации суспензий. Однако диффузия не учитывалась.

Предположим, что коэффициент проскальзывания  $b$  прямо пропорционален концентрации адсорбированных микророзродышей. При этом закон Дарси примет вид

$$w(C^a) = -\frac{k(C^a)}{\mu_0} \frac{\partial P}{\partial x} = -\frac{k_0}{\mu_0} \left(1 + \frac{4BC^a}{r}\right) \frac{\partial P}{\partial x} \quad (2.2)$$

где  $B = \text{const}$  – коэффициент пропорциональности.

Математическая модель замыкается уравнением баланса массы газа в пузырьках

$$\frac{\partial}{\partial t} m \rho_g C + \frac{\partial}{\partial x} \rho_g C w = -\frac{\partial}{\partial t} m \rho_g C^a \quad (2.3)$$

Здесь скорость движения пузырьков совпадает со скоростью фильтрации жидкости  $w$ ;  $m$  – пористость;  $\rho_g$  – плотность газа в микророзродышах.

Так как микророзродыши образуют тонкий слой на поверхности порового пространства, толщиной которого можно пренебречь, положим  $m = \text{const}$ .

Поскольку в данной статье представляют интерес эффекты, связанные с адсорбцией-десорбцией микророзродышей газа на стенках поровых каналов и рассматриваются процессы при постоянном перепаде давления, будем считать микророзродыши и жидкость несжимаемыми. Кроме того, предположим, что все пузырьки имеют одинаковый эффективный размер.

В рамках сделанных предположений уравнение неразрывности (2.3) перепишем в виде

$$m \frac{\partial C}{\partial t} + w \frac{\partial C}{\partial x} = -m \frac{\partial C^a}{\partial t} \quad (2.4)$$

Итак, получена замкнутая система уравнений (2.1), (2.2), (2.4).

В ходе экспериментов [4] осуществлялось вытеснение чистого трансформаторного масла (которым первоначально под вакуумом заполнялся пласт) тем же трансформаторным маслом, но с растворенным в нем газом. Последнее моделировало реальную пластовую нефть. Начальные и граничные условия задачи поставим в виде

$$t = 0: C^a(x) = 0, \quad C(x) = 0; \quad x = 0: C(t) = C_0 \quad (2.5)$$

Здесь  $C_0$  соответствует начальному содержанию микророзродышей газа в газированном трансформаторном масле, поступающем на вход пласта (внутри пласта в начальный момент времени микророзродышей нет).

**3. Стационарные решения.** Пусть  $L$  – размер модели пласта. Предположим, что к образцу приложен постоянный перепад давления  $\Delta P = \text{const}$  и время фильтрации много больше времени установления давления.

Найдем стационарные решения системы (2.1), (2.2), (2.4) с граничными условиями (2.5). Из уравнения (2.4) следует, что  $C = \text{const} = C_0$ .

Тогда уравнение кинетики (2.1) с учетом (2.2) перепишется в виде

$$\frac{\partial C^a}{\partial t} = (\vartheta - K_B)(C^a)^2 - [\vartheta(C^s + C_0) + K]C^a + \vartheta C^s C_0 + \beta \frac{\partial^2 C^a}{\partial x^2} \quad (3.1)$$

$$K_B = \alpha \frac{k_0 \Psi 4B}{\mu_0 d r}; \quad K = \alpha \frac{k_0 \Psi}{\mu_0 d}; \quad \Psi = \frac{\Delta P}{L} = \text{const}$$

Уравнение (3.1) при отсутствии диффузии может иметь одно или два стационарных положительных решения в зависимости от соотношения коэффициента  $\vartheta$  и комбинации  $K_B$ .

Если преобладают процессы адсорбции ( $\vartheta > K_B$ ), то уравнение (3.1) имеет два стационарных положительных решения

$$C_{\pm}^a = \frac{[\vartheta(C_0 + C^s) + K] \pm \sqrt{[\vartheta(C_0 + C^s) + K]^2 - 4\vartheta C_0 C^s (\vartheta - K_B)}}{2(\vartheta - K_B)} \quad (3.2)$$

В случае очень малых градиентов давления:  $\vartheta \gg K_B$  и  $\vartheta(C_0 + C^s) \gg K$  эти два решения равны соответственно  $C_+^a = C^s$  и  $C_-^a = C_0$ . Иначе говоря, либо вся свободная поверхность порового пространства исчерпана (все “вакантные места” заняты:  $C^s < C_0$ ), либо все подвижные пузырьки адсорбированы ( $C_0 < C^s$ ).

Если преобладают процессы десорбции ( $K_B > \vartheta$ ), то уравнение (3.1) имеет только одно стационарное положительное решение. Причем при очень больших градиентах

давления ( $K_B \gg \vartheta$  и  $K \gg \vartheta(C_0 + C^s)$ ) малыми величинами в скобках можно пренебречь и разложить оставшееся подкоренное слагаемое в ряд Тейлора

$$C_+^a \approx \vartheta C^s C_0 \left( \frac{\alpha k_0 \Psi}{\mu_0 d} \right)^{-1} \quad (3.3)$$

При  $\vartheta \sim K_B$  уравнение (3.1) также имеет одно положительное стационарное решение.

Рассмотрим далее стационарные решения полного уравнения (3.1), включая диффузионный член. Если умножить (3.1) на  $\partial C^a / \partial x$ , то легко получить первый интеграл “энергии”

$$\frac{1}{2} \beta \left( \frac{\partial C^a}{\partial x} \right)^2 + V(C^a) = E \equiv \text{const} \quad (3.4)$$

$$V(C^a) = \frac{1}{3} A_1 (C^a)^3 - \frac{1}{2} A_2 (C^a)^2 + A_3 C^a \quad (3.5)$$

$$A_1 = \vartheta - K_B; \quad A_2 = \vartheta(C^s + C_0) + K; \quad A_3 = \vartheta C^s C_0 \quad (3.6)$$

Здесь  $E$  – аналог полной энергии системы,  $V(x)$  – ее потенциальной, а  $(1/2)(\partial C^a / \partial x)^2$  – кинетической энергии.

В зависимости от вида функции  $V(x)$  система может иметь либо устойчивое положение равновесия, либо неустойчивое. Если  $V(x)$  имеет минимум, то положение равновесия устойчиво, а если максимум или точку перегиба – неустойчиво. Причем первому случаю в пространстве фазовых координат ( $C^a, \partial C^a / \partial x$ ) соответствует особая точка типа центр. Иначе, в окрестности минимума потенциальной энергии  $V(x)$  все кривые “уровней энергии” замкнуты и в системе совершаются периодические колебания с амплитудой, определяемой начальными условиями.

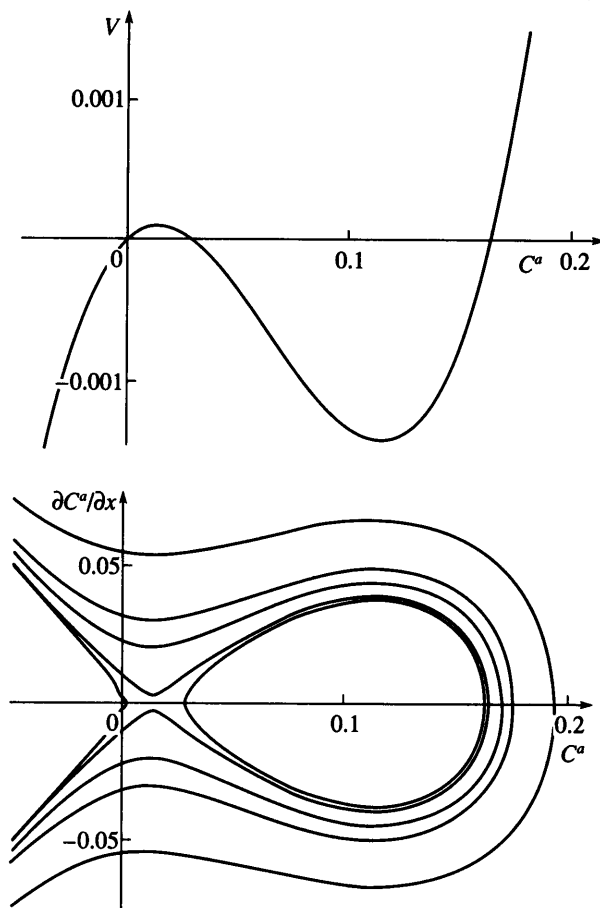
**4. Параметры задачи.** Применим предложенную модель для интерпретации экспериментальных данных [4]. Эксперименты состояли из двух серий. В обоих случаях в пористом образце (набивка песка) осуществлялось вытеснение чистого трансформаторного масла газированным. Однако в первой серии в качестве растворенного газа использовался пропан и параметры экспериментов были следующие: газовый фактор  $G = 40 \text{ м}^3/\text{м}^3$ ; давление насыщения  $p_s = 0.8 \text{ МПа}$ , а перепад давления составил  $\Delta P = 0.0427 \text{ МПа}$ . Во второй серии трансформаторное масло насыщалось углекислым газом  $\text{CO}_2$  ( $G = 5 \text{ м}^3/\text{м}^3$ ,  $p_s = 0.8 \text{ МПа}$ ,  $\Delta P = 0.04 \text{ МПа}$ ).

В соответствии с экспериментами [4] положим  $m = 0.35$ ;  $k_0 = 0.2 \text{ мкм}^2$ . При среднем газовом факторе  $40 \text{ м}^3/\text{м}^3$  для смеси трансформаторное масло – пропан  $\mu_0 = 5 \text{ сПз}$ , а для трансформаторного масла, насыщенного  $\text{CO}_2$  при  $G = 5 \text{ м}^3/\text{м}^3$ ,  $\mu_0 = 13 \text{ сПз}$ . Длина модели пласта  $L = 0.485 \text{ м}$ ,  $\Delta P \approx 0.05 \text{ МПа}$ .

Согласно оценкам, концентрация микророзодышей газа в трансформаторном масле при  $G = 5 \text{ м}^3/\text{м}^3$  составляет  $C_0 \sim 0.3$ ; при  $G = 40 \text{ м}^3/\text{м}^3$  –  $C_0 \sim 0.8$ .

Средний радиус порового канала  $r$  можно приблизительно определить из выражения [23]:  $r \approx \sqrt{k_0/m} \approx 0.8 \text{ мкм}$ .

Далее оценим величину максимально возможной концентрации микророзодышей газа на стенках порового пространства  $C^s$  (при плотной упаковке). Удельная поверхность образца определяется следующим приближенным соотношением [24]:  $\text{Surf} \approx \sqrt{m^3/k_0} \approx 0.5 \cdot 10^6 \text{ м}^2/\text{м}^3$ . Примем радиус газового микророзодыша  $a_0 \sim 10^{-8} \text{ м}$  [15, 25], тогда суммарная поверхность микророзодышей составит  $\sim 10^{-16} \text{ м}^2$ , и при плотной упа-



Фиг. 1. Функция  $V(x)$  (а) и уровни энергии в пространстве фазовых координат  $(C^\alpha, \partial C^\alpha/\partial x)$ , соответствующие  $E = 0; 10^{-5}; 10^{-4}; 5 \cdot 10^{-4}; 10^{-3}$  (б) при больших градиентах давления ( $\partial > K_B$ )

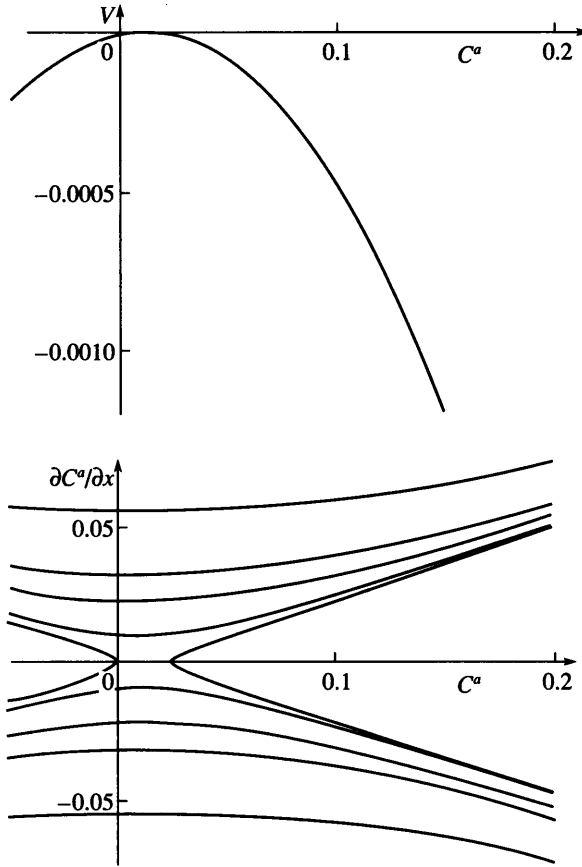
ковке пузырьков на поверхности поровых каналов для покрытия  $1 \text{ м}^3$  порового объема понадобится  $\sim 1 \text{ м}^3 \cdot \text{Surf}/(10^{-16} \text{ м}^2) \approx 0.5 \cdot 10^{22}$  пузырьков, а их объем составит  $0.5 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3$ . Если учесть, что пористость образца  $m = 0.35$ , то  $C^s \approx 1.4 \cdot 10^{-2}$ .

Исходя из величины  $C^s$ , определим коэффициент  $B$ . В экспериментах [7,13] по фильтрации водогазовой смеси при давлениях, близких к давлению насыщения, максимальный коэффициент проскальзывания составил  $b_{\max} = 1.1 \cdot 10^{-6}$  м. Согласно принятой нами концепции, максимум коэффициента проскальзывания соответствует случаю, когда вся поверхность порового пространства покрыта пузырьками газа. Следовательно,  $b_{\max} = B \cdot C^s$ , откуда  $B \approx 10^{-4}$  м.

Коэффициент диффузии, согласно [9], составляет порядка  $\beta = 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ .

Итак, получены оценки для всех используемых в задаче параметров:  $m = 0.35$ ;  $k_0 = 0.2 \text{ мкм}^2$ ;  $\mu_0 = 0.9 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м} \cdot \text{с}$ ;  $\Psi \approx 10^5 \text{ Па/м}$ ;  $r = 0.8 \text{ мкм}$ ;  $d \sim a_0 = 10^{-2} \text{ мкм}$ ;  $C^s = 1.4 \cdot 10^{-2}$ ;  $B = 10^{-4}$  м. Кроме того, примем  $C_0 = 0.2$ .

Значение  $\alpha$  определим на основе экспериментальных данных [4], согласно которым период колебаний газового фактора и коэффициента продуктивности имеет



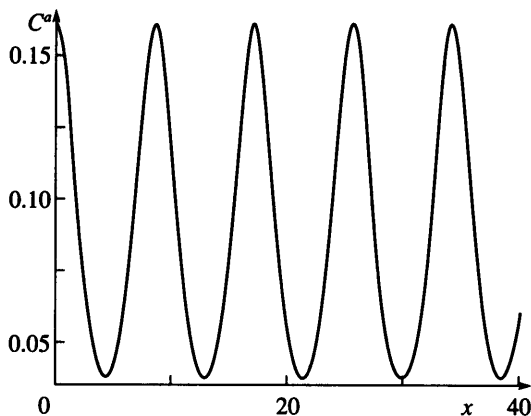
Фиг. 2. То же, что на фиг. 1, но при  $\vartheta < K_B$

порядок  $10^3$ – $10^4$  с. Если бы вся поверхность пористой среды была покрыта газовыми микророзродышами и действовал только механизм десорбции, то тогда время релаксации (без учета зависимости скорости фильтрации от количества адсорбированных микророзродышей) равнялось бы  $d/(\alpha\omega)$ . Считая, что это время по порядку величины совпадает с периодом колебаний, зафиксированным в [4], получим  $\alpha \sim 10^{-3} \cdot (\mu_0 \cdot d/(k_0\Psi)) \cdot 10^{-6}$ . При этих параметрах  $K \approx 2.2 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ ;  $K_B \approx 1.1 \text{ с}^{-1}$ .

Приведем некоторые результаты расчетов. Рассмотрим два варианта: уравнение (3.1) имеет два стационарных положительных решения ( $\vartheta = 10 \text{ с}^{-1} > K_B$ ) или одно ( $\vartheta = 1 \text{ с}^{-1} < K_B$ ). На фиг. 1, 2 изображены функции  $V(x)$  и уровни энергии в пространстве фазовых координат  $(C^a, \partial C^a/\partial x)$  для двух исследуемых случаев.

В первом случае (фиг. 1,а) функция  $V(x)$  имеет локальный минимум. Следовательно, уравнение (3.1) имеет периодические решения. В пространстве фазовых координат  $(C^a, \partial C^a/\partial x)$  периодическим решениям соответствуют замкнутые траектории. Особая точка типа центр – точка равновесия (фиг. 1,б). Во втором случае (фиг. 2) функция  $V(x)$  имеет только локальный максимум, соответствующий неустойчивому положению равновесия, и периодических колебаний в системе не появляется.

На фиг. 3 приведен график периодических колебаний количества адсорбированных микророзродышей, соответствующих виду функции  $V(x)$ , представленному на фиг. 1.



Фиг. 3. Зависимость  $C^a(x)$  для  $\vartheta > K_B$  при граничном условии  $x = 0: C^a = 0,12, \partial C^a / \partial x = 0$

При граничных условиях  $x = 0: C^a = 0,12, \partial C^a / \partial x = 0$ . Поскольку скорость фильтрации жидкости (благодаря эффекту “проскальзывания”) связана с количеством адсорбированных пузырьков (2.2), то будут также происходить и периодические колебания ее расхода, что вполне согласуется с экспериментальными данными [3, 4].

**Заключение.** Предложено возможное объяснение экспериментально наблюдаемых периодических колебаний расхода жидкости и газа при фильтрации газированной жидкости. Механизм колебаний связан с явлением сорбции-десорбции микроразордышей газа на стенках пор и их постепенной диффузией в поровом пространстве. Периодические колебания расхода могут проявляться только при преобладании процессов адсорбции микроразордышей над их десорбцией.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горбунов В.Е. О свойствах смесей флюидов // Обз. информ. Сер. Разработка и эксплуатация газовых и газоконденсатных месторождений. М.: ВНИИЭгазпром, 1990. 71 с.
2. Мартос В.Н. Некоторые физические закономерности фильтрации газированной жидкости // Фильтрация, теплоперенос и нефтегазоотдача в сложных пластовых системах. М.: Наука, 1978. С. 36–45.
3. Степанова Г.С. Изменение реологических свойств нефти в процессах предфазовых переходов // Газовая промышленность. 1989. № 4. С. 51–53.
4. Степанова Г.С. Механизм вытеснения нефти газом // Газовая промышленность. 2001. № 11. С. 58–63.
5. Сюняев Р.З., Сафиев О.Г. Влияние сил межмолекулярного взаимодействия среды на размеры ядер частиц дисперсной фазы // Ж. физ. химии. 1984. Т. 58. № 9. С. 2301–2304.
6. Виноградова О.И. Гидродинамическое взаимодействие гидрофобного и гидрофильного тел // Коллоид. ж. 1994. Т. 56. № 1. С. 39–44.
7. Сулейманов Б.А. Об эффекте проскальзывания при фильтрации газированной жидкости // Коллоид. ж. 1997. Т. 59. № 6. С. 807–812.
8. Андриасов Р.С., Сахаров В.А., Грон В.Г. Влияние скорости потока на давление начала выделения газа // Тр. Моск. ин-та нефтехим. и газ. пром-сти им. Губкина, 1972. Вып. 99. С. 68–71.
9. Мирзэджанзаде А.Х., Багирзаде Ф.М., Степанова Г.С., Рамамат М.С. Прикладная геохимия нефти и газа. Баку: Азернешр, 1985. 291 с.
10. Рафибейли Н.М. О влиянии пористой среды на давление насыщения // Изв. АН СССР. ОТН. Металлургия и топливо. 1959. № 2. С. 173–174.



11. Лейбензон Л.С. Опыт теории движения газированной нефти в пласте // Собр. соч. М.: Изд-во АН СССР. 1953. Т. 2. С. 152–162.
12. Хасанов М.М. Исследование устойчивости фильтрации жидкостей с зародышами газа // Изв. АН СССР. МЖГ. 1994. № 2. С. 66–72.
13. Сулейманов Б.А. Об эффекте проскальзывания при фильтрации газированной неньютоновской жидкости // Коллоид. ж. 1999. Т. 61. № 6. С. 847 – 851.
14. Аметов И.М., Хавкин А.Я., Бученков Л.Н., Лопухов Г.П., Кузнецов А.М., Давыдов А.В. Повышение нефтеотдачи – новые возможности // Нефтяное хозяйство. 1997. № 1. С. 30–32.
15. Богопольский А.О., Иванов А.Н., Фаткуллин А.А. Закономерности и особенности фильтрации микропузырьковых газожидкостных растворов в пористых средах // Инж.-физ. ж. 2000. Т. 73. № 2. С. 274–282.
16. Бармин А.А., Гарагаиш Д.И. О фильтрации раствора в пористой среде с учетом адсорбции примеси на скелет // Изв. РАН. МЖГ. 1994. № 4. С. 97–110.
17. Бармин А.А., Гарагаиш Д.И. О фильтрации эмульсии в пористой среде с учетом межфазного массообмена компонентами // Изв. РАН. МЖГ. 1997. № 1. С. 77–88.
18. Soo H., Radke C. J. A filtration model for the flow of dilute, stable emulsions in porous media. I. Theory // Chem. Eng. Sci. 1986. V. 41. № 2. P. 263–272.
19. Soo H., Radke C. J. The flow mechanism of dilute, stable emulsions in porous media // Industr. Eng. Chem. Fundam. 1984. V. 23. № 3. P. 342–347.
20. Михайлов Д.Н., Николаевский В.Н. Динамика потока в пористых средах при нестационарных фазовых проницаемостях // Изв. РАН. МЖГ. 2000. № 5. С. 103–113.
21. Худжаеров Б.Х. Модель фильтрации суспензии с учетом коагуляции и суффозии // Инж.-физ. ж. 1992. Т. 63. № 1. С. 72–79.
22. Зубарев А.Ю., Худжаеров Б.Х. К теории релаксационной фильтрации // Инж.-физ. ж. 1988. Т. 55. № 3. С. 442–447.
23. Николаевский В.Н. Геомеханика и флюидодинамика. М.: Недра, 1996. 447 с.
24. Николаевский В.Н., Бондарев Э.А., Миркин М.И. и др. Движение углеводородных смесей в пористой среде. М.: Недра, 1968. 192 с.
25. Френкель Я.И. Кинетическая теория жидкости. Л.: Наука, 1975. 592 с.