

УДК 532.546+539.217

ГЛУШКО С. П., КАДЕТ В. В., СЕЛЯКОВ В. И.

ПЕРКОЛЯЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ДВУХФАЗНОЙ РАВНОВЕСНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ В СРЕДЕ С МИКРОГЕТЕРОГЕННОЙ СМАЧИВАЕМОСТЬЮ

На основе перколяционной модели двухфазной фильтрации [1, 2] рассматривается задача о поведении характеристик двухфазного равновесного потока в пористой среде для случая, когда капилляры имеют распределение по радиусам и различаются по свойствам смачиваемости их поверхностей. Получены аналитические выражения, описывающие зависимость коэффициентов относительных фазовых проницаемостей от насыщенности среды вытесняющей фазой и параметров микрогетерогенной смачиваемости. Проведено качественное сравнение теоретических результатов с данными прямых численных расчетов сеточной модели на ЭВМ [3], показывающее их согласие. В рамках развитого подхода анализируется характер влияния на фазовые проницаемости параметров микрогетерогенности и вида функции плотности распределения капилляров по радиусам.

1. Модель среды и постановка задачи. Рассмотрим пористую среду, образованную какой-либо регулярной сеткой капилляров в непроницаемом скелете. Пусть распределение капилляров по радиусам характеризуется функцией плотности распределения $f(r)$ (фиг. 1, а), нормированной на единицу. Двухфазное равновесное фильтрационное течение в такой среде будет определяться капиллярными силами на границе раздела фаз, которые в свою очередь зависят от коэффициента поверхностного натяжения на межфазной поверхности σ и угла смачивания на линии контакта обеих фаз с поверхностью капилляров θ .

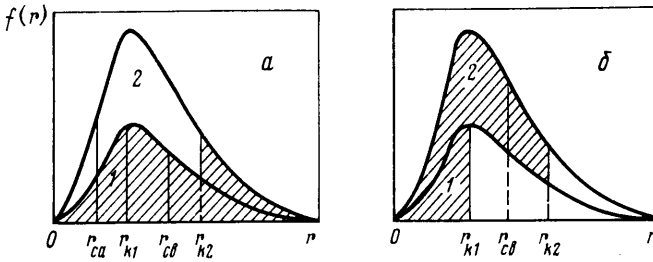
В гомогенных средах, рассмотренных в [2], параметры σ и θ постоянны. Здесь предположим микрогетерогенный характер среды: пусть σ и θ принимают одно из значений — σ_1 , или σ_2 , θ_1 , или θ_2 — с некоторой вероятностью κ или $(1-\kappa)$ соответственно. Это означает, что доля κ всех капилляров сетки (условная область 1 на фиг. 1, а) характеризуется величинами σ_1 , θ_1 при прохождении в них межфазной границы, а оставшаяся доля $(1-\kappa)$ (условная область 2 на фиг. 1, а) — соответственно величинами σ_2 и θ_2 .

Будем для определенности говорить о капиллярном вытеснении фазы a , занимающей первоначально все капилляры, фазой b при повышении капиллярного давления $p_k = p_a - p_b$ от $-\infty$ до $+\infty$. При капиллярном давлении p_k вытесняющая фаза b может занять лишь капилляры с радиусами, большими критического, определяемого формулой Лапласа. В данном случае для каждого типа капилляров имеет свой критический радиус

$$r_{ki} = 2\sigma_i \cos \theta_i / p_k, \quad i=1, 2 \quad (1.1)$$

Из (1.1) видно, что параметры σ_i и θ_i фигурируют только в виде произведения $\sigma_i \cos \theta_i$. Поскольку $\sigma_i > 0$, а $-1 \leq \cos \theta_i \leq 1$, естественно сократить число внешних параметров, положив $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma$ и учитывая в дальнейшем лишь зависимость r_{ki} от $\cos \theta_i$, что использовалось также в [3].

Существенно в рассматриваемой задаче то, что если $\cos \theta_1$ и $\cos \theta_2$ имеют разные знаки, то p_k для двух указанных типов капилляров должно иметь разные знаки, поскольку критический радиус (1.1) не может быть



Фиг. 1

отрицательным. Фактически это означает, что с увеличением p_h от $-\infty$ до 0 заполняются те капилляры, для которых $\cos \theta < 0$, и лишь затем, при $0 < p_h < \infty$, — капилляры второго типа с $\cos \theta > 0$. При этом для капилляров с $\cos \theta < 0$ вместо вытеснения имеет пропитку — в этом случае формула (1.1) дает максимальный, а не минимальный радиус заполнения фазой b (незаштрихованная часть области 1 на фиг. 1, а). В случае, когда $\cos \theta_1, \cos \theta_2 > 0$, капилляры обоих типов заполняются одновременно, имея лишь различные критические радиусы, согласно (1.1).

2. Расчет относительных фазовых проницаемостей. Перейдем к вычислению коэффициентов относительных фазовых проницаемостей k_a и k_b в такой микрогетерогенной среде. Вначале рассмотрим поведение величины k_b . Начнем со случая, когда $\cos \theta_1 > 0$, $\cos \theta_2 > 0$, $\cos \theta_1 \leq \cos \theta_2$. Последнему требованию всегда можно удовлетворить простым переобозначением индексов 1 и 2. Введем обозначение $\alpha = \cos \theta_1 / \cos \theta_2$. Тогда из (1.1) имеем $r_{k1} = \alpha r_{k2}$, причем $0 \leq \alpha \leq 1$. Функция распределения капилляров, заполненных фазой b (заштрихованная область на фиг. 1, а), имеет вид

$$f_b(r) = \begin{cases} 0, & r < r_{k1} \\ \alpha f(r), & r_{k1} \leq r \leq r_{k2} \\ f(r), & r > r_{k2} \end{cases} \quad (2.1)$$

Согласно [1], проницаемость сетки капилляров с заданной $f(r)$ при однофазной фильтрации определяется формулой

$$K_0 = A \int_0^{r_c} \left[\int_{r'}^{r_c} f(r) dr \right]^\nu f(r') \int_{r'}^{\infty} f(r) dr \left(\int_{r'}^{\infty} f(r) \frac{dr}{r^4} \right)^{-1} \quad (2.2)$$

где A — некоторая комбинация известных констант, ν — индекс радиуса корреляции [4], а величина r_c находится из условия [1]

$$\int_{r_c}^{\infty} f(r) dr = P_c \quad (2.3)$$

Здесь P_c — порог протекания для данного типа капиллярной решетки. Согласно [2], $k_b(r)$ есть K_b/K_0 , где величина K_b определяется из (2.2) и (2.3) заменой $f(r)$ на $f_b(r)$ с учетом разрывного характера функции $f_b(r)$.

Проанализируем вначале формулу (2.1). При повышении p_h от $-\infty$ до 0 все капилляры остаются заполненными фазой a и величины r_{k1} и r_{k2} равны ∞ . После перехода в область $p_h > 0$ r_{k1} и r_{k2} вычисляются по формуле (1.1). С ростом p_h величины r_{k1} и r_{k2} уменьшаются, пока в некоторый момент не достигнут значений r_{c2} и $r_{c1} = \alpha r_{c2}$ (фиг. 1, а), где r_{c2} находится из условия

$$\alpha \int_{\alpha r_{c2}}^{r_{c2}} f(r) dr + \int_{r_{c2}}^{\infty} f(r) dr = P_c \quad (2.4)$$

В этот момент впервые образуется бесконечный кластер из капилляров обоих типов, заполненных фазой b (БКВ). При дальнейшем повышении p_k r_{k1} и r_{k2} продолжают уменьшаться, и подстановка $f_b(r)$ в (2.3) дает условие для определения величины r_{cb}

$$\kappa \int_{r_{cb}}^{r_{k2}} f(r) dr + \int_{r_{k2}}^{\infty} f(r) dr = P_c \quad (2.5)$$

Величина r_{cb} является аналогом r_c , но теперь это уже не константа, а функция r_{k2} . Она меняется в пределах $r_{c1} \leq r_{cb} \leq r_c$, причем $r_{cb} = r_c$, когда $r_{k2} = r_c$. Дальнейшее повышение p_k уменьшает значения r_{k2} и r_{k1} , но не меняет значение $r_{cb} = r_c$.

Таким образом, рассчитав значения r_{k1} , r_{k2} и r_{cb} , и используя (2.1), из (2.2) получаем

$$k_b(r_{k2}) = 0, \quad r_{k2} > r_{c2}, \quad -\infty < p_k < p_{c2b} \quad (2.6)$$

$$k_b(r_{k2}) = A \frac{\kappa^2}{K_0} \int_{\alpha r_{k2}}^{r_{cb}} \int_{r'}^{r_{cb}} f(r) dr \Big]^v f(r') \times \quad (2.7)$$

$$\times \left(\kappa \int_{r'}^{r_{k2}} f(r) dr + \int_{r_{k2}}^{\infty} f(r) dr \right) \left(\kappa \int_{r'}^{r_{k2}} f(r) \frac{dr}{r^k} + \int_{r_{k2}}^{\infty} f(r) \frac{dr}{r^k} \right)^{-1} dr'$$

$$r_c < r_{k2} \leq r_{c2}, \quad p_{c2b} \leq p_k < p_c$$

$$k_b(r_{k2}) = \frac{A}{K_0} \left\{ \kappa \int_{\alpha r_{k2}}^{r_{k2}} \int_{r'}^{r_{k2}} f(r) dr + \int_{r_{k2}}^{r_c} f(r) dr \right\}^v f(r') \times \quad (2.8)$$

$$\times \left(\kappa \int_{r'}^{r_{k2}} f(r) dr + \int_{r_{k2}}^{\infty} f(r) dr \right) \left(\kappa \int_{r'}^{r_{k2}} f(r) \frac{dr}{r^k} + \int_{r_{k2}}^{\infty} f(r) \frac{dr}{r^k} \right)^{-1} dr' +$$

$$+ \int_{r_{k2}}^{r_c} \int_{r'}^{r_c} f(r) dr \Big]^v f(r') \int_{r'}^{\infty} f(r) dr \left(\int_{r'}^{\infty} f(r) \frac{dr}{r^k} \right)^{-1} dr' \Big\}$$

$$0 < r_{kb} \leq r_c, \quad p_c \leq p_k < \infty$$

Теперь рассмотрим случай $\cos \theta_1 \cos \theta_2 < 0$. Пусть для определенности $\cos \theta_1 < 0$, $\cos \theta_2 > 0$. В этом случае заполнение области 2 не начнется до тех пор, пока не заполнится целиком область 1, причем заполнение последней будет происходить в сторону увеличения радиусов капилляров, как отмечено выше. В зависимости от величины κ здесь возможны различные варианты двухфазной фильтрации.

Если $\kappa < P_c$, то при повышении p_k от $-\infty$ до 0 фильтрация 2-й фазы не может начаться, так как при этом ею могут быть заполнены лишь капилляры 1-го типа, а их не хватает для образования БКВ. При дальнейшем повышении p_k наступит момент, когда впервые образуется БКВ из суммы капилляров 1-го и 2-го типов. Если в первом слагаемом (2.4) при $\alpha < 0$ нижний предел положить равным нулю и учесть условие нормировки $f(r)$, то (2.4) преобразуется к виду

$$\kappa + (1 - \kappa) \int_{r_{c2}}^{\infty} f(r) dr = P_c$$

Функция $r_{cb}(r_{k2})$ по-прежнему определяется из условия (2.5) и с изменением r_{k2} от r_{c2} до 0 пробегает значения от 0 до r_c . Таким образом, в данном случае процесс замещения фазы a фазой b в точности совпадает с описанным выше случаем $\cos \theta_1 > 0$, $\cos \theta_2 > 0$, и формулы (2.6)–(2.8) для k_b остаются верными. Следует лишь заметить, что, так как $\alpha < 0$, нижние пределы интегралов в формулах (2.7) и (2.8) формально оказываются в области $r < 0$, где, естественно, полагается $f(r) = 0$.

Пусть теперь $\kappa \geq P_c$. Тогда еще во время пропитки возможно образование БКВ из капилляров 1-го типа. При $-\infty < p_k < 0$ $f_b(r)$ имеет вид

$$f_b(r) = \begin{cases} 0, & r < 0 \\ \kappa f(r), & 0 \leq r < r_{k1} \\ 0, & r \geq r_{k1} \end{cases} \quad (2.9)$$

Подстановка (2.9) в (2.3) дает условие для определения $r_{cb}(r_{k1})$

$$\kappa \int_{r_{cb}}^{r_{k1}} f(r) dr = P_c$$

Для того чтобы r_{cb} было больше нуля, необходимо превышение r_{k1} над его предельным значением r_{c1b} , определенным из условия начала протекания фазы b по капиллярам 1-го типа

$$\kappa \int_0^{r_{c1b}} f(r) dr = P_c$$

Таким образом, при $p_k < 0$ из (2.9) и (2.2) находим k_b

$$k_b(r_{k1}) = 0, \quad 0 < r_{k1} < r_{c1b}, \quad -\infty < p_k < p_{c1b}$$

$$k_b(r_{k1}) = A \frac{\kappa^2}{K_0} \int_0^{r_{cb}} \left[\int_{r'}^{r_{cb}} f(r) dr \right]^v f(r') \int_{r'}^{r_{k1}} f(r) dr \left(\int_{r'}^{r_{k1}} f(r) \frac{dr}{r^k} \right)^{-1} dr'$$

$$r_{c1b} \leq r < \infty, \quad p_{c1b} \leq p_k < \infty$$

После того как капиллярное давление превысит ноль, в БКВ начнут включаться заполняемые фазой b капилляры 2-го типа, а все капилляры 1-го типа будут уже ею заняты. Дальнейший расчет изменения $k_b(r_{k2})$ производится так же, как в случае $\kappa < P_c$, по формулам (2.7), (2.8), где $r_{c2} = \infty$, а r_{cb} находится из условия (2.5).

По той же схеме проведем исследование величины k_a . Пусть вначале опять $\cos \theta_1 > 0$, $\cos \theta_2 > 0$, $\cos \theta_2 \geq \cos \theta_1$. Функция распределения для фазы a (заштрихованная область на фиг. 1, б) с учетом того, что $r_{k1} = \alpha r_{k2}$, имеет вид

$$f_a(r) = \begin{cases} 0, & r \leq 0 \\ f(r), & 0 < r < \alpha r_{k2} \\ (1-\kappa)f(r), & \alpha r_{k2} \leq r \leq r_{k2} \end{cases} \quad (2.10)$$

Подставляя (2.10) в (2.3), найдем условие для определения функции $r_{ca}(r_{k2})$, имеющей при анализе формирования БКА тот же смысл, что и $r_{cb}(r_{k2})$ в случае БКВ. Причем в зависимости от соотношения величин r_{ca} и αr_{k2} возможны два варианта записи данного условия

$$\int_{r_{ca}}^{\alpha r_{k2}} f(r) dr + (1-\kappa) \int_{\alpha r_{k2}}^{r_{k2}} f(r) dr = P_c, \quad r_{ca} < \alpha r_{k2} \quad (2.11)$$

$$(1-\kappa) \int_{r_{ca}}^{r_{k2}} f(r) dr = P_c, \quad r_{ca} \geq \alpha r_{k2} \quad (2.12)$$

Случай (2.11) схематично изображен на фиг. 1, а, а (2.12) — на фиг. 1, б. При этом функция $r_{ca}(r_{k2})$ меняется от значения r_c при $r_{k2}=\infty$ ($-\infty < p_k < 0$) до 0 при некотором минимальном значении $r_{k2}=r_{c2a}$, определяемом из условия

$$\int_0^{\alpha r_{c2a}} f(r) dr + (1-\kappa) \int_{\alpha r_{c2a}}^{r_{c2a}} f(r) dr = P_c \quad (2.13)$$

При $-\infty < p_k < 0$ $r_{k2}=r_{k1}=\infty$ и $k_a(r_{k2})=1$.
В случае (2.11) подстановка (2.10) в (2.2) дает

$$k_a(r_{k2}) = AK_0^{-1} \int_0^{r_{ca}} \left[\int_{r'}^{r_{ca}} f(r) dr \right]^\nu f(r') \left(\int_{r'}^{\alpha r_{k2}} f(r) dr + (1-\kappa) \int_{\alpha r_{k2}}^{r_{k2}} f(r) \frac{dr}{r^k} + (1-\kappa) \int_{\alpha r_{k2}}^{r_{k2}} f(r) \frac{dr}{r^k} \right)^{-1} dr' \\ r_{c2a} < r_{k2} < \infty, \quad 0 < p_k < p_{c2a}$$

В случае (2.12) имеем

$$k_a(r_{k2}) = AK_0^{-1} \left\{ \int_0^{\alpha r_{k2}} \left[\int_{r'}^{\alpha r_{k2}} f(r) dr \right]^\nu f(r') \left(\int_{r'}^{\alpha r_{k2}} f(r) dr + (1-\kappa) \int_{\alpha r_{k2}}^{r_{k2}} f(r) \frac{dr}{r^k} \right)^{-1} \times \right. \\ \times \left(\int_{r'}^{\alpha r_{k2}} f(r) \frac{dr}{r^k} + (1-\kappa) \int_{\alpha r_{k2}}^{r_{k2}} f(r) \frac{dr}{r^k} \right)^{-1} dr' + (1-\kappa)^2 \int_{\alpha r_{k2}}^{r_{ca}} \left[\int_{r'}^{r_{ca}} f(r) dr \right]^\nu \times \\ \left. \times f(r') \int_{r'}^{r_{k2}} f(r) \frac{dr}{r^k} \left(\int_{r'}^{r_{k2}} f(r) \frac{dr}{r^k} \right)^{-1} dr' \right\} \\ r_{c2a} < r_{k2} < \infty, \quad 0 < p_k < p_{c2a}$$

Необходимо отметить, что случаи (2.11) и (2.12) не обязательно осуществляются по отдельности во всем диапазоне изменения $0 < p_k < \infty$. При некоторых значениях параметров α и κ они могут переходить один в другой в процессе изменения капиллярного давления.

Теперь пусть $\cos \theta_1 \cos \theta_2 < 0$, $\cos \theta_1 < 0$, $\cos \theta_2 > 0$. При повышении p_k от $-\infty$ до 0 в БКА будет уменьшаться доля капилляров 1-го типа. Функция плотности распределения для них будет иметь вид

$$f_a(r) = \begin{cases} 0, & r < 0 \\ (1-\kappa)f(r), & 0 \leq r < r_{k1} \\ f(r), & r \geq r_{k1} \end{cases} \quad (2.15)$$

где r_{k1} определяется из (1.1). Если $r_{k1} < r_c$, то подстановка (2.15) в (2.3) дает $r_{ca}(r_{k1})=r_c$, а для k_a имеем

$$k_a(r_{k1}) = A \frac{1-\kappa}{K_0} \left\{ \int_0^{r_{k1}} \left[(1-\kappa) \int_{r'}^{r_{k1}} f(r) dr + \int_{r_{k1}}^{r_c} f(r) dr \right]^\nu f(r') \times \right. \\ \times \left(\int_{r'}^{\infty} f(r) dr - \kappa \int_{r'}^{r_{k1}} f(r) dr \right) \left[(1-\kappa) \int_{r'}^{r_{k1}} f(r) \frac{dr}{r^k} + \int_{r_{k1}}^{\infty} f(r) \frac{dr}{r^k} \right]^{-1} dr' + \\ \left. + \int_{r_{k1}}^{r_c} \left[\int_{r'}^{r_c} f(r) dr \right]^\nu f(r') \int_{r'}^{\infty} f(r) \frac{dr}{r^k} \left(\int_{r'}^{\infty} f(r) \frac{dr}{r^k} \right)^{-1} dr' \right\} \\ 0 < r_{k1} < r_c, \quad -\infty < p_k < p_{c1}$$

При $r_c < r_{k1} < \infty$ из (2.15) и (2.3) зависимость $r_{ca}(r_{k1})$ получим в виде

$$(1-\kappa) \int_{r_{ca}}^{r_{k1}} f(r) dr + \int_{r_{k1}}^{\infty} f(r) dr = P_c$$

Если $(1-\kappa) < P_c$, то с ростом $p_k < 0$ при некотором $p_k = p_{ca} < 0$ ($r_{k1} = r_{c1a}$) БКА должен исчезнуть, так как капилляров 2-го типа не хватает для образования БКА. Если же $(1-\kappa) > P_c$, то вплоть до $p_k = 0$ ($r_{k1} = \infty$) БКА не исчезнет и фильтрация фазы a прекратится только при $p_k > 0$, т. е. когда $p_{ca} = p_{c2a}$, а $r_{c1a} = \infty$. В результате для k_a в области $r_c < r_{k1} < r_{c1a}$ имеем

$$k_a(r_{k1}) = A \frac{(1-\kappa)^2}{K_0} \int_0^{r_{ca}} \left[\int_{r'}^{r_{ca}} f(r) dr \right]^v f(r') \left(\int_{r'}^{\infty} f(r) dr - \right. \\ \left. - \kappa \int_{r'}^{r_{k1}} f(r) dr \right) \left[(1-\kappa) \int_{r'}^{r_{k1}} f(r) \frac{dr}{r^4} + \int_{r_{k1}}^{\infty} f(r) \frac{dr}{r^4} \right]^{-1} dr' \\ r_c < r_{k1} < r_{c1a}, \quad p_{c1} < p_k < \min \{0, p_{ca}\}$$

Если $(1-\kappa) > P_c$, то в случае $p_k > 0$ заполненными фазой a будут лишь капилляры 2-го типа с $r < r_{k2}$, где r_{k2} находится по p_k из (1.1). С ростом p_k величина $k_a(r_{k2})$ уменьшается, пока не обратится в ноль при $r_{k2} = r_{c2a}$, где r_{c2a} рассчитывается по формуле (2.13). В интервале $0 < p_k < p_{c2a}$, $r_{c2a} < r_{k2} < \infty$ $k_a(r_{k2})$ определяется соотношением (2.14), а функция $r_{ca}(r_{k2})$ — из (2.12).

Таким образом, полученные формулы описывают изменение k_a и k_b для рассматриваемой модели микрогетерогенной среды во всем диапазоне изменения параметров микрогетерогенности $0 \leq \kappa \leq 1$, $-1 \leq \alpha \leq 1$.

3. Результаты расчетов и краткое обсуждение. На основе полученных выше формул были проведены вычисления относительных фазовых проницаемостей $k_a = k_a(S)$ и $k_b = k_b(S)$, где S — насыщенность среды фазой b , для различных функций плотности распределения $f(r)$ и различных значений параметров микрогетерогенности κ и α . При этом значение S аналогично [2] определялось для двух предельных случаев рассмотренной модели. Первый — модель капилляров, когда узлы решетки имеют нулевой объем и вся пористость заключена в объеме капилляров ($S = S_k$). Второй — модель пор, когда в узлах решетки находятся крупные поры и насыщенность среды фазой b определяется долей заполненных ею пор ($S = S_p$), равной, по предположению, доле заполненных капилляров. Таким образом, при заданных значениях r_{k1} и r_{k2} насыщенность фазой b в указанных случаях определялась при $\alpha > 0$ соотношениями

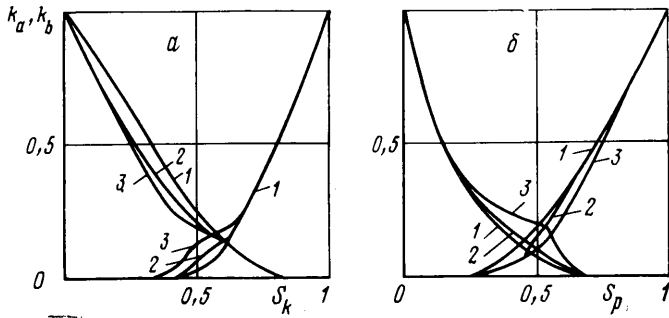
$$S_k = \langle r^2 \rangle^{-1} \left(\kappa \int_{r_{k1}}^{r_{k2}} f(r) r^2 dr + \int_{r_{k2}}^{\infty} f(r) r^2 dr \right) \quad (3.1)$$

$$S_p = \kappa \int_{r_{k1}}^{r_{k2}} f(r) dr + \int_{r_{k2}}^{\infty} f(r) dr \quad (3.2)$$

а при $\alpha \leq 0$ — соотношениями

$$S_k = \langle r^2 \rangle^{-1} \left[\kappa \int_0^{r_{k1}} f(r) r^2 dr + (1-\kappa) \int_{r_{k2}}^{\infty} f(r) r^2 dr \right] \quad (3.3)$$

$$S_p = \kappa \int_0^{r_{k1}} f(r) dr + (1-\kappa) \int_{r_{k2}}^{\infty} f(r) dr \quad (3.4)$$



Фиг. 2

$$\langle r^2 \rangle = \int_0^{\infty} f(r) r^2 dr$$

На фиг. 2, *a* приведены графики зависимостей $k_a(S_k)$ и $k_b(S_k)$ в случае $\kappa=0,5$ для модельной функции плотности распределения

$$f(r) = \varphi(r) = \begin{cases} 0, & r < 1, \quad r > 3 \\ 4,05/r^5, & 1 \leq r \leq 3 \end{cases}$$

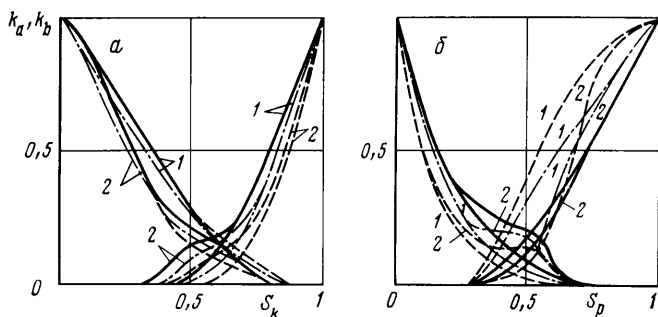
Кривые 1–3 соответствуют $\alpha=1; 0,2; -1$. Видно, что с уменьшением α значения k_a уменьшаются, а k_b растут. Этот же эффект получен в [3] путем численного моделирования процесса капиллярного вытеснения на двумерной сетке капилляров. В [3] $\kappa=0,5$, а в качестве $f(r)$ использовалось логарифмически нормальное распределение и считалось, что длины капилляров находятся в корреляционной зависимости от их радиусов $l=r^q$, где q — варьируемый параметр. Поэтому совпадение отмеченных выше тенденций в изменении зависимостей k_a и k_b при изменении α носит лишь качественный характер. К тому же оно имеет место только при расчете насыщенности по модели капилляров. Если $S=S_p$, то характер изменения k_a и k_b с изменением α меняется на противоположный, как это видно из фиг. 2, *b*, где для сравнения приведены графики $k_a(S_p)$ и $k_b(S_p)$, рассчитанные с той же $f(r)$ и теми же значениями параметров κ и α .

Для изучения влияния вида $f(r)$ на характер зависимостей k_a и k_b были проведены расчеты последних при $\kappa=0,5$, $\alpha=-1$ и 1 для трех модельных $f(r) = \varphi(r)$, а также

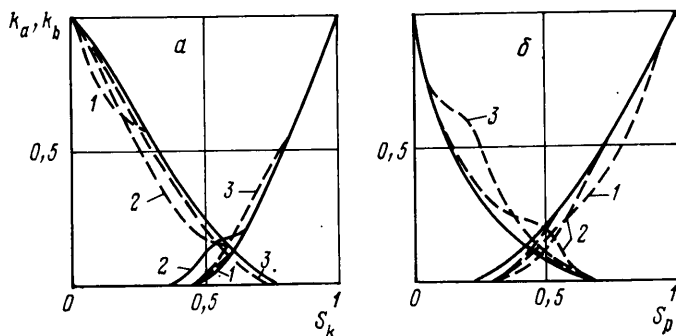
$$\psi(r) = \begin{cases} 0, & r < 1, \quad r > 3 \\ 1,5/r^2, & 1 \leq r \leq 3 \end{cases}$$

$$\omega(r) = \begin{cases} 0, & r < 0, \quad r > 5 \\ 2r \exp(-r^2), & 0 \leq r \leq 5 \end{cases}$$

Во всех случаях вычисления k_a и k_b проводились при $\kappa=0,5$ с использованием обеих указанных моделей (3.1), (3.3) и (3.2), (3.4) для расчета насыщенности S . Для сравнения полученные кривые представлены рядом: для случая (3.1), (3.3) на фиг. 3, *a*, а для случая (3.2), (3.4) — на фиг. 3, *b*. Сплошные линии соответствуют расчетам с $f(r) = \varphi(r)$, штриховые — с $f(r) = \omega(r)$, штрихпунктирные — с $f(r) = \psi(r)$; индексы 1 и 2 отвечают значениям $\alpha=1$ и -1 . Из графиков на фиг. 3, *a* видно, что с увеличением дисперсии $f(r)$ ($D_\varphi < D_\psi < D_\omega$) $k_b(S_k)$ уменьшается, а пороговая насыщенность, определяющая начало фильтрации фазы *b*, растет, причем как для $\alpha > 0$, так и для $\alpha < 0$. При расчете S по модели пор (фиг. 3, *b*) те же самые эффекты наблюдаются для $k_a(S_p)$: с ростом дисперсии $f(r)$ значения $k_a(S_p)$ уменьшаются, а пороговая насыщенность несколько возрастает, хотя и не столь ощутимо, как в первом случае.



Фиг. 3



Фиг. 4

Влияние параметра κ на вид функций k_a и k_b отражено на фиг. 4, где случай *a* соответствует модели капилляров, а *b* — модели пор. Расчеты проводились с $f(r)=\varphi(r)$, $\alpha=-1, 1$. Варианты расчетов с $\alpha=-1$ изображены штриховыми кривыми, а с $\alpha=1$ — сплошными линиями. Индексы 1–3 соответствуют значениям $\kappa=0,2; 0,5; 0,8$ (при $\alpha=1$ от κ , очевидно, ничего не зависит). Представленные данные показывают, что в случае $\alpha=-1$ при любых κ кривые $k_a(S_k)$ лежат ниже соответствующей кривой для $\alpha=1$, а $k_a(S_p)$, наоборот, выше. Причем падение (или возрастание) кривых с $\alpha=-1$ тем круче, чем больше κ . Для k_b эффект обратный. При $\alpha=-1$ линии $k_b(S_k)$ лежат выше, а $k_b(S_p)$ — ниже соответствующего графика для $\alpha=1$. Образующиеся на этих кривых характерные выпуклости с ростом κ в случае $k_b(S_k)$ поднимаются вверх, а для $k_b(S_p)$ опускаются вниз.

ЛИТЕРАТУРА

1. Селяков В. И. Проводимость зернистых и кавернозных сред // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1986, № 12. С. 44–52.
2. Кадет В. В., Селяков В. И. Перколяционная модель двухфазной фильтрации // Изв. АН СССР. МЖГ. 1987, № 1. С. 88–95.
3. Енгов В. М., Зак С. А., Чен Син Э. О двухфазном течении в пористой среде с микрогетерогенной смачиваемостью // Докл. АН СССР. 1984, Т. 274, № 6. С. 1334–1337.
4. Соколов И. М. Размерности и другие геометрические критические показатели в теории протекания // УФН. 1986, Т. 150, Вып. 2. С. 221–255.

Москва

Поступила в редакцию
13.VII.1988