МЕХАНИКА

ЖИДКОСТИ И ГАЗА

№ 4 • 2005

УДК 532.546

© 2005 г. М. Н. ДМИТРИЕВ, Н. М. ДМИТРИЕВ

К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ФИЛЬТРАЦИОННОГО ЧИСЛА РЕЙНОЛЬДСА И ХАРАКТЕРНОГО ЛИНЕЙНОГО РАЗМЕРА ДЛЯ ИДЕАЛЬНЫХ И ФИКТИВНЫХ ПОРИСТЫХ СРЕД

Рассматриваются различные варианты представления фильтрационного числа Рейнольдса для пористых сред, проявляющих изотропные и анизотропные фильтрационные свойства. Вывод формул и анализ вариантов производится на примере модельных пористых сред с периодической микроструктурой, образованной системами капилляров и упаковками шаров с постоянным диаметром (идеальные и фиктивные пористые среды соответственно). Дается обобщение формулы Козени для определения диаметра капилляра в идеальной пористой среде эквивалентной по проницаемости и пористости фиктивной и показывается, что диаметр капилляра определяется неоднозначно. Приводятся соотношения для пересчета значений числа Рейнольдса, определенных с помощью ранее предложенных формул и показывается, что предложенный в [1, 2] учет микроструктуры пористых сред может позволить объяснить большой разброс численных значений числа Рейнольдса при обработке экспериментальных данных.

Ключевые слова: число Рейнольдса, характерный линейный размер, идеальная пористая среда, фиктивный грунт, пористость, просветность, проницаемость.

Многочисленными экспериментальными данными [3–7] установлено, что основное уравнение теории фильтрации – линейный закон Дарси, имеет верхнюю границу применимости. В качестве критерия применимости закона Дарси по аналогии с трубопроводной гидромеханикой используется критическое значение фильтрационного числа Рейнольдса, тем более, что изначально отклонение от закона Дарси связывалось с переходом от ламинарного режима фильтрации к турбулентному [4]. В дальнейшем было установлено, что отклонение от закона Дарси обусловлено влиянием инерционных сил [3].

Для написания выражения, определяющего фильтрационное число Рейнольдса, необходимо было определить характерный линейный размер пористой среды и перейти от трудно определяемой для реальных пористых сред "истинной" средней скорости течения v к скорости фильтрации w. При выводе первых соотношений, предложенных для определения фильтрационного числа Рейнольдса, использовались экспериментальные данные для искусственных насыпных (фиктивных) пористых сред и в качестве характерного линейного размера принимали эффективный диаметр частиц (шара) [8]. Однако подобное определение характерного размера для реальных и идеальных пористых сред теряет смысл ввиду совершенно иной геометрии и структуры пустотного пространства. Поэтому в дальнейшем характерный линейный размер для пористых коллекторов нефти и газа определялся еще и с помощью теории размерности, и как эффективный диаметр капилляров в модели жестких трубок [9, 10], а для спеченных металлических материалов кроме перечисленных представлений использовались еще и иные соображения [11, 12]. Однако все предложенные формулы относятся к изотропным средам и не учитывают особенностей структуры пустотного пространства. Более того, разные формулы дают для числа Рейнольдса значительно отличающиеся численные значения, которые часто не могут быть пересчитаны без установления дополнительных соотношений эквивалентности. Для разных типов пористых сред даже одна и та же формула дает значения, которые отличаются на два порядка. Поэтому проанализируем определение фильтрационного числа Рейнольдса для наиболее часто используемых моделей идеальных и фиктивных пористых сред, для которых установлены связи между фильтрационно-емкостными параметрами в работах [5, 13–15].

1. Фильтрационное число Рейнольдса для идеальной пористой среды. Рассмотрим модель идеальной пористой среды, которая представляется в виде периодической решетки, образованной тремя взаимно перпендикулярными системами трубок (капилляров) кругового сечения. Каждую систему трубок наделим своим линейным размером (диаметром) d_α и периодом укладки a_α, $\alpha = 1, 2, 3$. Наличие в идеальной модели периодической структуры с фиксированными размерами позволяет легко вычислить геометрические и фильтрационные характеристики пористой среды [1]. Для идеальной модели пористость m, удельная поверхность пор, рассчитанная на единицу объема среды, Σ, просветность s_α и проницаемость k_α равны

$$m = \frac{\pi}{4}\frac{d_i^2 a_i}{a_1 a_2 a_3}, \quad \Sigma = \frac{\pi d_i a_i}{a_1 a_2 a_3}, \quad s_\alpha = \frac{\pi d_\alpha^2}{4 a_\beta a_\gamma}, \quad k_\alpha = \frac{\pi d_\alpha^4}{128 a_\beta a_\gamma} \tag{1.1}$$

Здесь и далее греческие индексы, которые, как правило, обозначают номер системы трубок, образуют циклическую перестановку из чисел 1, 2, 3; по повторяющимся латинским индексам подразумевается суммирование, по греческим индексам суммирование не производится. Число Рейнольдса для одного капилляра в α-й системе капилляров определяется выражением

$$\mathrm{Re}_\alpha = \frac{v_\alpha d_\alpha \rho}{\mu} \tag{1.2}$$

где v_α – средняя скорость в капилляре (истинная скорость фильтрации), ρ и μ – плотность и вязкость жидкости соответственно.

Для перехода от гидравлического числа Рейнольдса (1.2) к фильтрационному необходимо заменить v_α на w_α и выразить характерный линейный размер d_α через геометрические и фильтрационные характеристики. Связь между v_α и w_α задается [2]

$$w_\alpha = s_\alpha v_\alpha = \frac{m}{\varphi_\alpha} v_\alpha, \quad \varphi_\alpha = \frac{m}{s_\alpha} \tag{1.3}$$

где φ_α – структурный коэффициент для α-й системы капилляров.

При определении d_α можно воспользоваться различными комбинациями из соотношений (1.1). Обычно используется представление через проницаемость и пористость

$$k_\alpha = \frac{\pi d_\alpha^4}{128 a_\beta a_\gamma} = \frac{d_\alpha^2}{32} s_\alpha = \frac{d_\alpha^2 m}{32 \varphi_\alpha} \tag{1.4}$$

откуда

$$d_\alpha = \sqrt{\frac{32 \varphi_\alpha k_\alpha}{m}} \tag{1.5}$$

Но для представления диаметра капилляра через фильтрационно-емкостные свойства можно воспользоваться и другими связями. В частности с помощью обобщенной формулы Козени – Кармана [2]:

$$k_\alpha = m^3/(f_\alpha \varphi_\alpha \Sigma^2) \tag{1.6}$$

где f_α – коэффициент формы для α-й системы капилляров, который определяется из равенства [2]

$$\frac{m^2}{f_\alpha \Sigma^2} = \frac{d_\alpha^2}{32} \tag{1.7}$$

откуда

$$d_\alpha = \sqrt{\frac{32}{f_\alpha}\frac{m}{\Sigma}} \tag{1.8}$$

Подстановка соотношений (1.3), (1.5) или (1.8) в выражение (1.2) дает следующие формулы для вычисления фильтрационного числа Рейнольдса в капиллярной модели:

$$\mathrm{Re}_\alpha = \frac{\sqrt{32k_\alpha}\varphi_\alpha^{1.5} w_\alpha \rho}{m^{1.5}\mu}, \quad \mathrm{Re}_\alpha = \frac{\sqrt{32}w_\alpha \varphi_\alpha \rho}{\sqrt{f_\alpha}\Sigma\mu} \tag{1.9}$$

Формулы (1.9) эквивалентны, так как получаются одна из другой с помощью обобщенной формулы Козени – Кармана [2] (1.6) и связи (1.7).

С помощью равенств (1.9) можно вычислить фильтрационное число Рейнольдса при течении вдоль α-й системы капилляров как при изотропных, так и анизотропных фильтрационных свойствах. Так как лабораторное измерение k и m на реальных пористых средах гораздо проще, чем определение Σ, то обычно фильтрационное число Рейнольдса представляется формулами типа первого соотношения (1.8). Но обычно пористость отождествлялась с просветностью и принималось предположение $\varphi = 1$, которое справедливо только для одномерной модели, образованной одной системой капилляров [2] (при $\varphi_\alpha = 1$ выражение (1.8) дает формулу Ф.И. Котяхова), или не учитывалась форма фильтрующего канала и диаметр определялся из соображений размерности (без множителя $\sqrt{32}\varphi_\alpha^{1.5}$ выражение (1.8) дает формулу М.Д. Миллионщикова [3]).

2. Фильтрационное число Рейнольдса для фиктивной пористой среды. Для упаковок шаров постоянного диаметра D формула для числа Рейнольдса, построенная по предложенной выше схеме: замена в "гидравлической" формуле (1.2) v на w и d_α на D, имеет вид:

$$\mathrm{Re}_D = \frac{vD\rho}{\mu} = \frac{wD\rho}{s\mu} = \frac{\varphi w D\rho}{m\mu}, \quad \varphi = \frac{m}{s} \tag{2.1}$$

где φ – структурный коэффициент.

Для плотных регулярных упаковок шаров пористость и просветность определяются путем простых геометрических вычислений [16, 18], при этом интервалу теоретической пористости $0.259 \le m \le 0.476$ соответствует интервал теоретической просветности $0.0931 \le s \le 0.2146$. Пористость и просветность не зависят от диаметра шаров и связаны между собой. Для аппроксимации зависимости s от m в [5] и [16] соответственно предложены выражения

$$s = 0.61m^{1.4}, \quad s = 0.56m - 0.052 \tag{2.2}$$

Подстановка (2.2) в выражение (2.1) приводит к следующим формулам:

$$\mathrm{Re}_D = \frac{wD\rho}{0.61m^{1.4}\mu}, \quad \mathrm{Re}_D = \frac{wD\rho}{(0.56m - 0.052)\mu} \tag{2.3}$$

Вторая формула в равенствах (2.3) аналогична формуле для числа Рейнольдса, предложенной в [3].

Обе формулы (2.3) можно использовать для вычисления фильтрационного числа Рейнольдса при течении в фиктивном грунте, но используя дополнительные связи между фильтрационно-емкостными параметрами, формулы (2.3) могут быть преобразованы к иному виду, в котором используется проницаемость.

С помощью формулы, связывающей в фиктивном грунте удельную поверхность, пористость и диаметр шара [12] $\Sigma = 6(1 - m)/D$ формулу Козени – Кармана (1.6) можно представить в виде

$$k = \frac{m^3 D^2}{36 f\varphi (1-m)^2} \tag{2.4}$$

где $f\varphi = C$ и f – коэффициент формы фиктивного грунта, который определяется из соотношения $f = C/\varphi$, C – число Кармана.

Из (2.4) можно выразить D через k и m и формулу (2.1) переписать иначе:

$$\mathrm{Re}_D = \frac{6(1-m)\varphi^{1.5}\sqrt{fk}w\rho}{m^{2.5}\mu} \tag{2.5}$$

Дальнейшее преобразование формулы (2.5) связано с определением эмпирических связей для коэффициентов φ и f. Из соотношений (2.2) можно получить представление структурного коэффициента для фиктивной пористой среды

$$\varphi = 1.64m^{-0.4}, \quad \varphi = \frac{m}{0.56m - 0.052} \tag{2.6}$$

Линейная аппроксимация связей (2.2) является более точной, но представление структурного коэффициента в фиктивной пористой среде (2.6) для нее получается более громоздким и неудобным, поэтому в дальнейшем будет использовано только первое представление зависимости между просветностью и пористостью.

При построении эмпирической связи для числа Кармана воспользуемся экспериментальными данными [17], согласно которым при изменении пористости от 0.34 до 0.45 число Кармана изменяется от 4.5 до 5.1. Вид зависимости примем таким же, как для структурного коэффициента: $C = am^{\alpha}$. Тогда для параметров структуры в фиктивном грунте получим следующие соотношения [15]:

$$C = 7.3m^{0.45}, \quad f = 4.45m^{0.85} \tag{2.7}$$

Выражение (2.5) для числа Рейнольдса в фиктивном грунте с учетом соотношений (2.7) преобразуется в формулу

$$\mathrm{Re}_D = \frac{26.6(1-m)\sqrt{k}w\rho}{m^{2.675}\mu} \tag{2.8}$$

Полученное выражение для определения числа Рейнольдса в фиктивном грунте по своей структуре напоминает и другие формулы, предложенные в [3], но полученные при отождествлении пористости и просветности и для числа Кармана равного пяти.

3. Обобщенная формула Козени. Соотношения типа (1.2), в которых в качестве характерного линейного размера используется диаметр капилляра и его представление через пористость и проницаемость, и соотношения типа (2.1), в которых за характерный линейный размер пористой среды принимается диаметр частиц, дают разные численные значения критического числа Рейнольдса. Если положить, что критические скорости и пористости сред одинаковы, то $\mathrm{Re}_\alpha/\mathrm{Re}_D = \varphi_\alpha d_\alpha/\varphi D$. Поэтому для пересчета значений чисел Рейнольдса, вычисленных с применением того или иного подхода, необходимо установить связь между $\varphi_\alpha d_\alpha$ и φD, или d_α и D, если положить $\varphi_\alpha = \varphi$.

Связь между d_α и D обычно определяется с помощью формулы Козени [12]

$$d = \frac{2m}{3(1-m)}D \tag{3.1}$$

Формула (3.1) получается при отождествлении пористости и просветности и для числа Кармана, равного пяти. Отказ от универсальности числа Кармана и учет того, что в общем случае $f \neq f_\alpha \neq 2$ и $\varphi \neq \varphi_\alpha$, приводят к обобщению формулы (3.1), и формула принимает вид [15]:

$$d_\alpha = \frac{2}{3}\sqrt{\frac{2\varphi_\alpha}{f\varphi}}\frac{m}{1-m}D \tag{3.2}$$

а после подстановки в (3.2) формулы (2.7) и первого из соотношений (2.6) обобщенная формула Козени (3.1) примет вид:

$$d_\alpha = \frac{0.35\varphi_\alpha^{0.5}m^{0.775}}{1-m}D \tag{3.3}$$

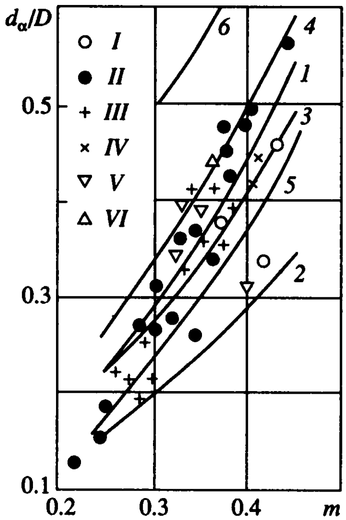
Заметим также, что из (2.4) и (3.2) следует, что в двух фиктивных грунтах при равной пористости имеем $\sqrt{k_1/k_2} = D_1/D_2$. Этот результат ранее теоретически был получен в [10] и был обоснован при обработке экспериментальных данных [6, 7].

Таким образом, гидравлическая формула для числа Рейнольдса, модифицированная на фильтрационные течения в идеальных средах, задается формулами (1.9), а в фиктивных – формулами (2.3) и (2.8). Для установления правила пересчета фильтрационных чисел Рейнольдса необходимо рассмотреть условия эквивалентности идеальных и фиктивных пористых сред [15].

4. Об эквивалентности идеальной и фиктивной пористых сред и пересчете фильтрационных чисел Рейнольдса. Введение соотношений (2.7) оставляет модель фиктивной среды двухпараметрической, в то время как модель идеальной изотропной среды может быть двух-, трех- и четырехпараметрической. В самом деле, все фильтрационно-емкостные характеристики фиктивной среды определяются заданием двух параметров (например, m и D), а идеальная среда в общем случае определяется шестью параметрами (например, d_i и a_i, $i = 1, 2, 3$). Требование изотропии накладывает две связи $k_1 = k_2 = k_3$, и идеальная изотропная среда в общем случае четырехпараметрическая. Если диаметры двух капиллярных систем равны, то имеем трехпараметрическую модель изотропной идеальной среды, а если равны все диаметры и все периоды, то модель двухпараметрическая. Двухпараметрическая модель может быть не только трехмерной изотропной, но и предельно-анизотропной двухмерной и даже одномерной. Для двухмерной предельно-анизотропной модели нужно положить равным нулю диаметр одной из капиллярных систем, а для одномерной – для двух систем. Поэтому при установлении эквивалентности между идеальными и фиктивными средами и определении связи между диаметрами капилляров и шаров, проанализируем все перечисленные варианты.

Для анализа условий эквивалентности и установления формулы для пересчета значений фильтрационного числа Рейнольдса, определенного по формулам (1.6) и (3.4), необходимо привлечь формулы для определения в идеальной модели числа Кармана и коэффициента просветности [2]

$$C = f_\alpha\varphi_\alpha = 2\frac{(1+d_{\alpha\beta}^2+d_{\alpha\gamma}^2)^3}{(1+d_{\alpha\beta}^3+d_{\alpha\gamma}^3)^2}, \quad \varphi_\alpha = 1+d_{\alpha\beta}^2+d_{\alpha\gamma}^2, \quad d_{\alpha\beta} = \frac{d_\alpha}{d_\beta} \tag{4.1}$$



Зависимость отношения диаметров капилляра к диаметру шара от пористости: *I* – *VI* – опытные данные [11]. Кривая *1* вычислена по формуле (2.9), кривые *2*, *3* и *4* – по формуле (3.3) для $\varphi = 1, 2$ и 3 соответственно. Кривые *5* и *6* получены для трехпараметрической модели идеальной пористой среды

Из соотношений (4.1) для двухпараметрических моделей значение структурного коэффициента φ_α равно: 1) для одномерной предельно-анизотропной модели ($d_\beta = d_\gamma = 0$), 2) для двухмерной предельно-анизотропной модели ($d_\alpha = d_\beta$, $d_\gamma = 0$) и 3) для трехмерной изотропной модели идеальной пористой среды ($d_\alpha = d_\beta = d_\gamma \neq 0$). Значение коэффициента формы для всех случаев двухпараметрических моделей равно 2. Коэффициент просветности можно интерпретировать как отношение масштабов объемного и поверхностного осреднений. Тогда из приведенных данных следует, что для двухпараметрических моделей идеальной среды отношение зависит от размерности пустотного пространства и равно ей.

В приложениях необходимо определить соотношение между диаметрами капилляров и шаров. Подставляя перечисленные значения φ_α в (3.3), получим формулы для связи между диаметрами капилляра и шара. На фигуре приведено сравнение отношений d_α/D как функций от пористости, вычисленных по разным формулам и для разных моделей, с экспериментальными данными [11].

Для двухпараметрических моделей идеальной среды значения чисел Кармана не совпадают с его значениями для фиктивных сред. Поэтому "эквивалентность" между идеальными и фиктивными моделями в двухпараметрических моделях возможна только по двум (например, пористости и проницаемости), значения удельных поверхностей и чисел Кармана для них не будут совпадать.

Для трехпараметрической модели идеальной среды соотношения эквивалентности между идеальной и фиктивной средами можно установить, положив равными k, m, C. Тогда у эквивалентных сред будут равны и удельные поверхности, но эквивалентная изотропная по проницаемости идеальная среда будет иметь различные диаметры капилляров. Положим, что выполняется условие $d_2 = d_3$. Тогда идеальная среда определяется тремя параметрами, и соотношения эквивалентности между идеальной и фиктивной средами сводятся к системе уравнений

$$
m = \frac{\pi d_1^2}{4a_2^2}(1+2d_{12}^2), \quad d_{12}^2 = \frac{a_2}{a_1}, \quad d_{12} = \frac{d_1}{d_2}
$$
$$
\Sigma = \frac{\pi d_1}{a_2^2}(1+d_{12}^2), \quad C = \frac{2(1+2d_{12}^2)^3}{(1+2d_{12}^3)^2} \tag{4.2}
$$

Число Кармана лежит в интервале $2 < C \le 6$ [2]. Последнее уравнение системы (4.2) относительно B_{12} при $2 < C \le 4$ и $C = 6$ имеет один, а при $4 < C < 6$ – два действительных положительных корня, которые могут быть найдены численными методами.

После нахождения этих корней система (4.2) легко разрешается. Таким образом по заданным параметрам фиктивной среды даже в случае $d_1 \ne d_2 = d_3$ для значений $4 < C < 6$ определяется два возможных варианта эквивалентной ей идеальной. Один вариант соответствует корню $d_1/d_2 > 1$, другой – корню $d_1/d_2 < 1$. С помощью соотношений (3.3) и (1.1) на решения системы (4.2) можно определить отношение d_α/D и сопоставить значения чисел Рейнольдса, определенных формулами (1.4) и (3.3). В случае $d_1/d_2 < 1$ отношение $d_\alpha/D < 1$, ($\alpha = 1, 2$) (на фигуре кривые *5* и *6* соответственно), для корня $d_1/d_2 > 1$ $d_1/D > 1$, а отношение $d_2/D < 1$. Случай $d_1/D > 1$ – чисто модельный и не представляет интереса для прикладных исследований.

Аналогично и для четырехпараметрической модели идеальной среды можно сделать равными не только k, m, но и значения структурных коэффициентов φ и f. Однако равенства $\varphi = \varphi_\alpha$ и $f = f_\alpha$ могут быть выполнены только для одной системы капилляров, две другие будут иметь иные значения φ_α и f_α, и другие значения диаметров капилляров. Таким образом для трех- и четырехпараметрических моделей идеальной изотропной среды можно уравнять с параметрами фиктивной среды проницаемость, пористость и удельную поверхность (число Кармана), но в эквивалентных идеальных средах будут разные значения диаметров капилляров и идеальная среда будет анизотропной.

Различие значения диаметров капилляров приводит к противоречию. В самом деле, в фиктивной среде все фильтрационные характеристики априори считаются изотропными, а в эквивалентных идеальных средах пересчитанные параметры будут зависеть от направления. Поэтому естественно установить правило пересчета чисел Рейнольдса между фиктивными и двухпараметрическими трехмерными идеальными пористыми средами. Тогда эквивалентность идеальных и фиктивных сред будет устанавливаться, как прежде [5], равенством у сред проницаемостей и пористостей. Но в этом случае среды будут иметь разные значения удельных поверхностей:

$$
\Sigma_u/\Sigma_ф = 1.1m^{0.225}
$$

где Σ_u и $\Sigma_ф$ – удельные поверхности идеальных и фиктивных пористых сред соответственно.

Соотношение между числами Рейнольдса для двухпараметрической трехмерной модели идеальной среды и модели фиктивной среды определяется формулой

$$
\mathrm{Re}_\alpha = 1.11\frac{m^{1.175}}{1-m}\mathrm{Re}_D \tag{4.3}
$$

Заключение. Выписаны формулы для определения фильтрационного числа Рейнольдса и показано, что большинство формул, используемых для его вычисления в подземной гидромеханике, представляют собой соотношения, выписанные для идеальных и фиктивных пористых сред, но без учета отличия пористости от просветности и для постоянного значения числа Кармана. Дано уточнение формулы для определения характерного линейного размера в идеальной модели и обобщение формулы Козени для связи между диаметром капилляра и шара. Приводятся соотношения для пересчета значений числа Рейнольдса, определенных по формулам для фиктивных и идеальных сред, и показывается, что учет микроструктуры пористых сред может позволить объяснить большой разброс численных значений числа Рейнольдса при обработке экспериментальных данных с помощью ранее предложенных формул. Практическое приложение полученных результатов к интерпретации экспериментальных измерений на реальных кернах связано с разработкой корректного определения параметра структуры.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (№ 02-01-00369).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Дмитриев Н.М.* Просветность и проницаемость пористых сред с периодической микроструктурой // Изв. РАН. МЖГ. 1995. № 1. С. 79–85.
2. *Дмитриев Н.М.* Тензор коэффициентов проницаемости в капиллярной модели Козени – Кармана // Изв. РАН. МЖГ. 1996. № 4. С. 96–104.
3. *Басниев К.С., Кочина И.Н., Максимов В.М.* Подземная гидромеханика. М.: Недра, 1983. 416 с.
4. *Требин Г.Ф.* Фильтрация жидкостей и газов в пористых средах. М.: Гостоптехиздат. 1959. 158 с.
5. *Лейбензон Л.С.* Движение природных жидкостей и газов в пористой среде. М.: Гостехиздат. 1947. 244 с.
6. *Фенчлер, Льюис, Бернс.* Физические испытания пород нефтяных и газовых пластов // Иностранная нефтяная техника. 1934. Вып. 105.
7. *Жаворонков Н.М., Аэров М.Э., Умник Н.Н.* Гидравлическое сопротивление и плотность упаковки зернистого слоя // ЖФХ. 1949. Т. 23. Вып. 3.
8. *Аравин В.И., Нумеров С.Н.* Теория движения жидкостей и газов в недеформируемой пористой среде. М.: ГИТТЛ, 1953. 616 с.
9. *Котяхов Ф.И.* Физика нефтяных и газовых коллекторов. М.: Недра, 1977. 287 с.
10. *Николаевский В.Н.* О подобии в среднем микроструктур поровых пространств // Изв. АН СССР. ОТН Механика и машиностроение. 1960. № 4. С. 41–47.
11. *Куршин А.П.* О верхней границе области линейного закона фильтрации при течении газа через пористую среду // Изв. АН СССР. МЖГ. 1991. № 1. С. 186–190.
12. *Белов С.В.* Пористые металлы в машиностроении. М.: Машиностроение, 1981. 247 с.
13. *Scheidegger A.E.* The physics of flow through porous media. Toronto: Univ. of Toronto press, 1974. 353 p.
14. *Carman P.C.* Flow of gases through porous media. London: Batterworth, 1956. 182 p.
15. *Дмитриев Н.М., Максимов В.М.* Об эквивалентности идеальных и фиктивных пористых сред // Докл. РАН. 2001. Т. 381. № 4.
16. *Кутателадзе С.С.* Теплопередача и гидродинамическое сопротивление. Справочное пособие. М.: Энергоатомиздат, 1990. 367 с.
17. *Ромм Е.С.* Структурные модели порового пространства горных пород. Л.: Недра, 1985. 240 с.
18. *Хейфец Л.И., Неймарк А.В.* Многофазные процессы в пористых средах. М.: Химия, 1982. 320 с.

Dmitriev.msc@mtu-net.ru

Поступила в редакцию
20.IV.2004