

УДК 556.314

ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ ПРОЦЕССОВ МАССОПЕРЕНОСА В КВАЗИОДНОРОДНЫХ ПОРИСТЫХ СРЕДАХ

В.Г.РУМЫНИН, В.УЛЬМАН, Н.С.ПЕТРОВ

Миграция динамически нейтральной примеси в пористых (дисперсных) средах - внешне гомогенных по емкости и проницаемости - чаще всего рассматривается на базе расчетной схемы микродисперсии (называемой также иногда диффузионной моделью); в одномерном варианте ей отвечает следующее исходное дифференциальное уравнение [6]:

$$n \frac{\partial c}{\partial t} + v \frac{\partial c}{\partial x} - (D_M + D_D) \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} = 0, \quad (I)$$

где c - текущие значения концентрации вещества в порах; x и t - пространственная и временная координаты; n - коэффициент активной пористости (эффективный объем порового пространства, принимающий участие в формировании расхода фильтрационного потока); v - скорость фильтрации; D_M и D_D - коэффициенты молекулярной диффузии и продольной механической дисперсии, $D_D \approx \delta_1 v$; δ_1 - параметр микродисперсии.

Считается, что диффузионная модель (I) хорошо согласуется с характером экспериментальных зависимостей; если учесть, что она наиболее проста и в математическом отношении, то понятно, почему она получила преимущественное распространение среди моделей переноса в пористых средах. Основные сомнения относительно универсальности диффузионной модели появились сравнительно недавно и были вызваны исследованиями влияния внутрипоровой структуры фильтрационного потока на расчетный коэффициент дисперсии [1, 3, 4]; возникли разногласия и в понимании емкостной природы дисперсных сред. Значимость этого аспекта для задач гидрогеологического плана и его связь с требованиями к достоверности экспериментальной оценки миграционных параметров стала очевидной лишь в самое последнее время [5].

Немногочисленные теоретические и экспериментальные исследования показывают, что реальному механизму внутрипоровой миграции ближе отвечает модель, в основу которых положены представления о гетерогенном строении водонасыщенного порового пространства. При этом гетерогенность чаще всего

связывается с наличием в породе обособленных в фильтрационном отношении зон, активных (проточных) и пассивных (застойных), причем включение последних в общий процесс переноса обуславливается массообменом на контакте областей с различной концентрацией под действием молекулярной диффузии и поперечной дисперсии.

Не принимая непосредственного участия в гидравлическом переносе вещества в направлении вектора средней скорости фильтрации, пассивные области тем не менее и играют определенную роль в формировании общего массового потока. Поэтому можно предположить, что достаточно общепринятое в теории миграции [2, 6, 7] отождествление скорости массопереноса с действительной скоростью движения частиц воды по проточным порам, с учетом только диффузионно-дисперсионных явлений в них по уравнению (I), не отражает всей специфики процесса.

Для оценки влияния пассивных областей на общий характер массопереноса в поровом пространстве обратимся к той называемой гетерогенной модели с застойными зонами: она, помимо известных эффектов микродисперсии в трещинных порах, учитывает также «потери» вещества из них за счет массообмена с нефiltrующими областями. Отмеченные выше особенности структуры массового потока позволяют записать следующее уравнение сохранения массы переносимого вещества:

$$n \frac{\partial c}{\partial t} + v \frac{\partial c}{\partial x} - (D_M + D_D) \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + (n^0 - n) \frac{\partial c_K}{\partial t} = 0, \quad (2)$$

где c и c_K — концентрации мигрирующих компонентов соответственно в проточных и тупиковых зонах; n^0 — общая пористость^х.

Первый и последний члены в уравнении (2) отражают накопление вещества в активных и пассивных порах, а второй и третий отвечают конвективному и диффузионно-дисперсионному переносу. С другой стороны, для описания механизма массообмена между выделенными элементами пористой среды при действии следующее кинетическое уравнение [1, 9]:

$$(n^0 - n) \frac{\partial c_K}{\partial t} = \alpha_K (c - c_K), \quad (3)$$

где α_K — параметр массообмена между активными и пассивными зонами.

Итак, изменение объемного содержания вещества в системе контролируется уже не только активной пористостью n , как в расчетной схеме микродисперсии, но зависит еще и от степени вовлечения пассивных зон в процесс массопереноса. Кроме того, на молекулярную диффузию и механическую дисперсию накладывается кинетический фактор, вызывающий дополнительное рассеяние вещества в транзитных порах. Описание такой гетерогенной пористой среды (содержащей застойные зоны) в рамках общепринятой модели диффузионного типа равносильно адекватному обращению к некоторой эффективной (эквивалентной) модели с макропараметрами пористости n^* и дисперсии D^* , т.е. формально в диффузионной схеме (I) вместо параметров n и $D_M + D_D$ фигурируют их гетерогенные аналоги.

^х Предполагается, что разность между величинами n^0 и n характеризует емкость системы по отношению к открытым для диффузии тупиковым областям.

Чтобы найти связь эффективных коэффициентов n^* и D^* с истинными параметрами системы n , n^0 , α_K , D_M и D_D достаточно отождествить результаты, даваемые эквивалентной диффузионной моделью с результатами для модели (2)-(3), оценив соответствующую реакцию моделей на равноценные индикаторные возмущения. Такой анализ был выполнен при помощи метода моментов [2].

Оказалось, что если рассматривать миграцию в среде достаточно большой пористости при не слишком высоких значениях скоростей фильтрации, то эффективная пористость n^* близка к суммарной емкости системы, т.е.

$$n^* = n^0 \quad (4)$$

а для коэффициента эффективной дисперсии справедливо соотношение

$$D^* = D_M + D_D + \frac{(\bar{n} v)^2}{\alpha_K} \quad (5)$$

где \bar{n} - относительное содержание пассивных зон в общем объеме порового пространства, $\bar{n} = (n^0 - n) / n^0$

Так как физический смысл первых двух слагаемых в правой части равенства (5) вполне очевиден, остановимся на третьем коэффициенте: он отражает роль кинетики внутрипорового массообмена в общем процессе рассеяния, причем его абсолютные значения зависят от квадрата скорости фильтрации, количественного соотношения между активными и пассивными зонами в пористой среде \bar{n} и, наконец, от абсолютных значений параметра массообмена α_K .

Дадим также феноменологическое представление формулы (5). Для этого положим $\alpha_K = (D^0 + \delta'_1 v) / d_K^2$ (здесь D^0 - коэффициент молекулярной диффузии в межпоровом пространстве; δ'_1 - параметр поперечной микродисперсии; d_K - эффективная длина переноса в пассивных зонах, принимающих участие в массообмене). Допустим также, что параметры δ_1 , δ'_1 линейно связаны с характерным размером минеральных зерен d_3 , $\delta_1 = \mu_1 d_3$, $\delta'_1 = \mu_2 d_3$, $d_K = \mu_3 d_3$ (здесь μ_1 , μ_2 , μ_3 - коэффициенты, зависящие от геометрических характеристик пористой среды). Тогда после несложных преобразований из формулы (5) получим:

$$\eta(\zeta) = \frac{\bar{D}_M}{\zeta} + \mu_1 + \frac{(\mu_3 \bar{n})^2}{\mu_2 + 1/\zeta} \quad (6)$$

где $\eta(\zeta)$ - функция приведенного коэффициента дисперсии от безразмерного аргумента ζ , $\eta = D^* / v d_3$, $\zeta = v d_3 / D^0$, $\bar{D}_M = D_M / D^0$.

Функциональная зависимость (6) довольно хорошо согласуется с характером экспериментальных данных, в чем можно убедиться, например, анализируя графически обобщенные в работе [8] результаты лабораторных опытов с различными грубозернистыми материалами.

Принятое допущение о длительной миграции в среде значительной протяженности гарантирует весьма высокую степень насыщения пассивных зон в пределах всей области адикаторного воздействия, позволяя такой режим миграции отнести к асимптотическому. Эму отвечает критерияльное соотношение

$$\alpha_K L / v \bar{n}^2 > 50 ,$$

(7)

где L - характерная длина переноса.

Критерием (7) можно пользоваться, если удовлетворяется соотношение $vL / (D_M + D_0) > 30$. Исходные предпосылки, положенные в основу схем микродисперсии и асимптотического режима, являются предельными: уравнение (I) априорно пренебрегает влиянием изосвиных зон на процесс массопереноса; наоборот, эквивалентное диффузионное уравнение, где параметры n^* и D^* определяются согласно равенствам (4) и (5), максимально учитывает процесс внутрипорового массосообмена между фильтрующими и застойными зонами.

Однако если на режим массопереноса не накладываются ограничения (7), то значения расчетных коэффициентов пористости n_R^* и дисперсии D_R^* , вычисленные в рамках диффузионной модели, в значительной степени зависят

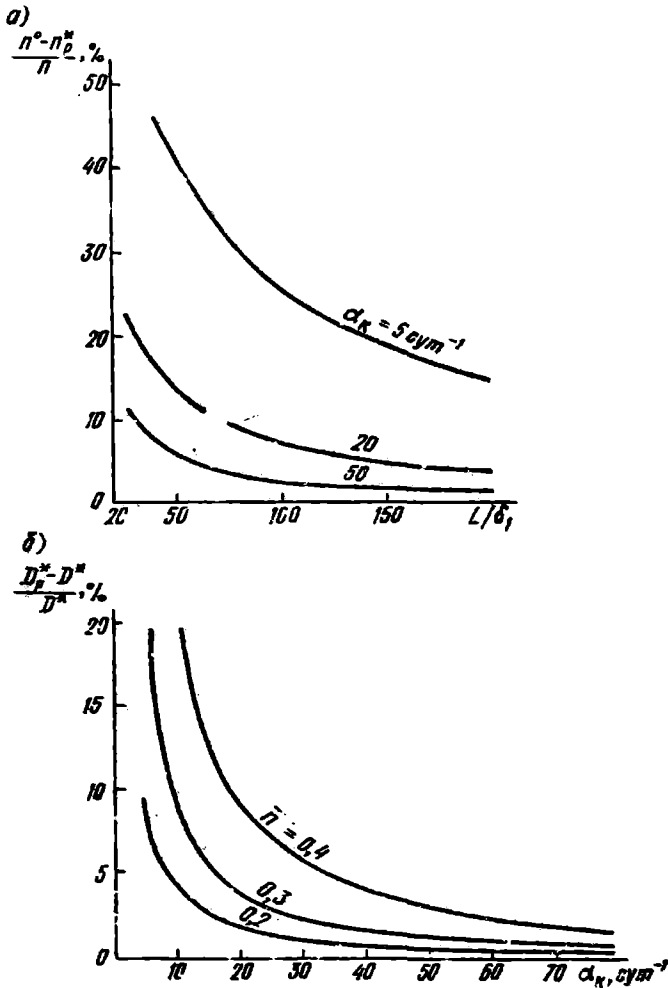


Рис. 1. Характер изменения расчетных значений коэффициентов пористости n_R^* (а) и дисперсии D_R^* (б) при $v = 20$ м/сут, $D_M = 0$, $D_0 = 0,1$ м²/сут

от гетерогенных свойств среды, длины области переноса и скорости фильтрации. Как я следовало ожидать, при весьма больших значениях L коэффициент n_p^* приближается к величине общей пористости n^0 ; наоборот, сокращение длины области фильтрации способствует все большему расхождению между этими показателями (рис. 1, а). Вполне ощутимы и колебания расчетного параметра D_p^* (рис. 1, б).

Кроме того, можно показать [4], что при высоких скоростях фильтрации в среде малой проницаемости и при низких показателях интенсивности межпорового массообмена на характер выходной кривой заметно влияют два механизма миграции, описываемые различными статистическими законами распределения. Первый определяет движение частиц примеси в проточных зонах, и ему отвечает нормальный закон распределения; второй ответственен за насыщение пассивных областей и характеризуется экспоненциально затухающим статистическим распределением. Этот качественный вывод вытекает из результирующего решения для функции c , которое в терминах гетерогенной модели с устойчивыми зонами удобно записать в виде

$$c = \left(1 - \frac{\alpha_K L}{v}\right) \frac{c_m}{\sqrt{4\pi(D_M/v + \delta_1)L}} \exp\left[-\frac{(L - \frac{v}{n}t)^2}{4(D_M/v + \delta_1)L}\right] + \frac{c_m \alpha_K^2 L n}{v^2(n^0 - n)} \exp\left[-\frac{\alpha_K t}{n^0 - n}\right], \quad (8)$$

где C_m - мощность солевого источника, $C_m = M/F$; M - масса вводимого вещества; F - площадь поперечного сечения потока.

Решение (8) можно пользоваться при $\alpha_K L / v \bar{n} < 1$. Вес второго слагаемого в правой части формулы (8) обычно невелик, однако отраженная в нем роль экспоненциально затухающего распределения становится решающей для больших моментов времени, поскольку множителем у показателя экспоненты стоит относительно малая величина $\alpha_K / (n^0 - n)$; это приводит к тому, что выходная кривая обнаруживает устойчивый «хвост». Непосредственно из решения (8) видно, что положение пика максимальной концентрации всецело определяется величиной активной пористости (т.е. в этом варианте $n_p^* = n$). При минимальном влиянии пассивных зон ($\alpha_K = 0$) формула (8) переходит в известное решение уравнения одномерной микродисперсии (1) [2, 7].

В целом анализ свидетельствует о неинвариантности коэффициента пористости, расчетные значения которого во многом предопределены характером режима массопереноса и масштабом его рассмотрения. Этот факт вступает в противоречие с необходимостью независимой (от опытных условий) оценки миграционных параметров. Однако очевидно, что для длительных прогнозных оценок процессов внутрипластовой миграции значимы лишь параметры, отражающие асимптотический режим массопереноса. Это прежде всего коэффициент общей пористости, его надежная оценка при ориентации на стандартную методику возможна лишь в том случае, если удовлетворено условие (7).

С другой стороны, выполнить предварительный расчет оптимального режима миграционного опробования, основываясь на представленном здесь критерии, можно только имея сведения о численных значениях параметров α_K и \bar{n} . В таблице отражены конкретные результаты экспериментальных исследований, выполненных нами и другими авторами [1, 9, 10].

Результаты определения параметров массообмена пористых грунтов

Порода	$d_{\text{э}}, \text{мм}$	$n^{\circ}, \%$	Расчетные значения параметров		Источник
			$\bar{n}, \%$	$\alpha_{\text{ж}}, \text{сут}^{-1}$	
Гравийные отложения	5-7	38,8	15-35	10-150	Лабораторные опыты (наши исследования) ^x
Среднезернистые пески	1,5	36,6	5-7	10-20	То же
	~1-2		18		
Грубозернистый материал	~10-30		10-30	5-10	Лабораторные опыты [9]
Песчаногравийные отложения			40	2-3	Полевые эксперименты [10]

^x Обращает на себя внимание заметное увеличение значений параметров $\alpha_{\text{ж}}$ и уменьшение показателя \bar{n} с ростом скорости фильтрации, на индикаторных графиках (см. рис.2) это проявляется в уменьшении роли „хвостовых“ эффектов; такая же закономерность была отмечена и в работе [9].

Выходные кривые одной из серий экспериментов (длина опытной колонны 1,08 м) с гравийным материалом (рис.2) обрабатывались методом статистических моментов. Связь миграционных параметров с моментами индикаторной кривой для наших условий установлена из анализа решения уравнений (2) и (3) в области изображения по Лапласу, которое для импульсного входного сигнала дается формулой

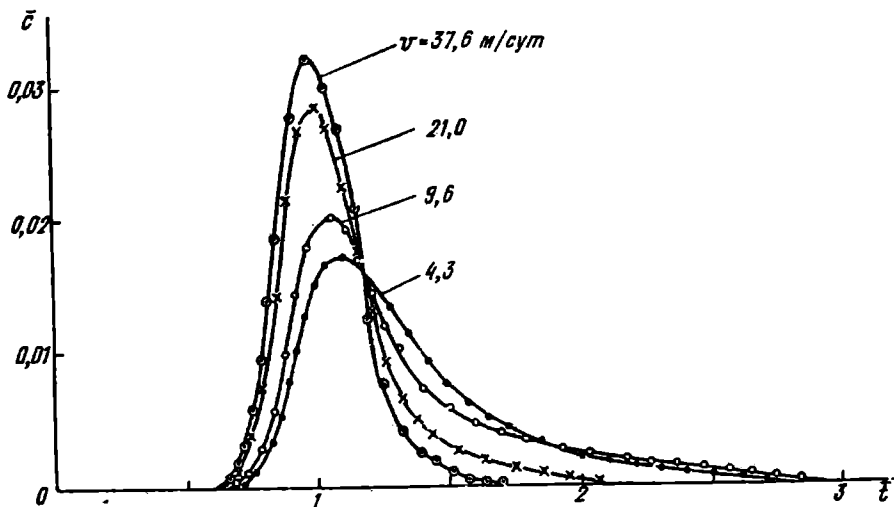


Рис.2. Индикаторные кривые лабораторных миграционных опытов при импульсном входном сигнале

$$\tilde{c} = \frac{2c_m n \exp\left[\left(1 - \sqrt{1 + \frac{4D}{v^2}(np + G_p)}\right) \frac{vL}{2D}\right]}{v\left(1 + \sqrt{1 + \frac{4D}{v^2}(np + G_p)}\right)}, \quad (9)$$

где $\tilde{c} = \int_0^{\infty} c e^{-pt} dt$; $D = D_M + D_D$; p - параметр преобразования;
 $G_p = \alpha_K(n^0 - n)p / [(n^0 - n)p + \alpha_K]$.

Отнокая пределы первых трех производных функции \tilde{c} (9) по параметру p (при $p \rightarrow 0$), получим

$$\begin{aligned} \bar{\theta} &= 1 + \frac{1}{Pe}; \\ \bar{\sigma}^2 &= \frac{2}{Pe} + \frac{3}{Pe^2} + \frac{2\bar{n}^2}{\bar{\alpha}_K} \left(1 + \frac{1}{Pe}\right); \\ \bar{\mu}_3 &= \frac{12}{Pe^2} + \frac{20}{Pe^3} + \frac{12\bar{n}^2}{\bar{\alpha}_K Pe} + \frac{18\bar{n}^2}{\bar{\alpha}_K Pe^2} + \frac{6\bar{n}^3}{\bar{\alpha}_K^2} \left(1 + \frac{1}{Pe}\right), \end{aligned} \quad (10)$$

где $\bar{\theta} = \theta/t_0$; $\bar{\sigma}^2 = \sigma^2/t_0^2$; $\bar{\mu}_3 = \mu_3/t_0^3$ - нормированные величины; θ, σ^2, μ_3 - математическое ожидание, дисперсия и третий центральный момент выходной кривой; $t_0 = Ln^0/v$; Pe - критерий Пекле, $Pe = vL/(D_M + D_D)$; $\bar{\alpha}_K = \alpha_K L/v$.

Решение системы уравнений (10) позволяет рассчитать три показателя: коэффициент массообмена α_K , относительное содержание в породе пассивных зон \bar{n} и коэффициент суммарной дисперсии ($D_M + D_D$). При этом вычисление нормированных величин в правой части уравнений системы (10) по выходным данным производится в предположении, что показатель суммарной емкости системы n^0 известен: значение n^0 может быть получено балансовым расчетом по данным предварительного насыщения грунтов.

Выводы

1. Процессы микродисперсии вещества в проточных порах осложняются механизмом массообмена с пассивными областями порового пространства.
2. Пренебрежение кинетикой массообмена между активными и пассивными зонами приводит к неинвариантности значений определяемых миграционных параметров в рамках общепринятой расчетной схемы микродисперсии.
3. В асимптотическом режиме миграции, когда создаются условия для полного насыщения индикатором всех пор, расчетная диффузионная модель приводит к тем же качественным результатам, что и гетерогенная модель с застойными зонами, причем расчетные значения пористости близки к величине общей пористости системы. Учитывая, что последний параметр является наиболее важной характеристикой для длительных прогнозных оценок, асимптотическому режиму в индикаторных опытах должно уделяться особое внимание.
4. Критерий для асимптотического режима может оказаться довольно жестким, так что на оценку суммарной емкости пород - основного миграционного параметра - посредством миграционных опытов будут накладываться значительные погрешности; в то же время коэффициент общей пористости достаточно надежно определяется более простыми балансовыми методами.

5. Проведенный анализ дает полезные параллели и для обоснования дальнейших исследований, связанных с изучением миграции сорбируемых компонентов. Учитывая, что роль кинетического фактора в механизме сорбции резко падает при переходе от масштаба лабораторных экспериментов к пластовым условиям, а малая надежность существующих интерпретационных схем для оптимизации в динамическом режиме не дает большого выигрыша в точности определения сорбционной емкости пород, можно надеяться на достаточную представительность результатов, получаемых в рамках балансовых построений.

ЛИТЕРАТУРА

- Гарибяни А.А., Голубев В.С. Структура фильтрационного потока и динамика растворов в пористых средах. - В кн.: Математическое и физическое моделирование рудообразующих процессов. М., изд. ВИМС, 1978, с. 7-29.
2. Гидродинамические физико-химические свойства горных пород / Н.Н.Веригин, С.В.Васильев, В.С.Саркисян, Б.С.Шершук. М., Недра, 1978. 271 с.
3. Голубев В.С. Гидродинамическая дисперсия и динамика сорбции в пористой среде. - Докл. АН СССР, 1979, т. 243, № 5, с.1161-1164.
4. МакрокINETИКА процессов в пористых средах (топливные элементы) / Ю.А.Чизмаджев, В.С.Маркин, М.Р.Тарасевич, Ю.Г.Чирков. М., Наука, 1981. 369 с.
5. Мироненко В.А., Учалов В.К. Постановка опытно-миграционных работ. - Разведка и охрана недр, 1979, № 11, с.40-47.
6. Шестаков В.М. Динамика подземных вод. М., Изд-во МГУ, 1978. 368 с.
7. K r e f t A., Z u b e r A. - Chem.Eng.Science, 1978, v.33, p.1471-1480.
8. R o s e D.A. - Soil Sci., 1977, v.123, N 5, p.277-283.
9. V a n S w a a i j W.P.M., C h a r p e n t i e r J.C., V i l l e r m a u x J. - Chem.Eng.Science, 1969, v.24, N 7, p.1083-1095.
10. B o o c h s P.W., B a r o v i c G., R o t t U. - Textes des communications présentées au Symposium sur „les effets d'échelle en milieu poreux". Thessaloniki, 1978, p.3.57-3.69.