Записки Ленинградского ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции
и ордена Трудового Красного Знамени горного института им. Г.В.Плеханова,
т. XCI, 1982 г.

УДК 556.314 + 551.491.4

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕКОТОРЫХ МЕХАНИЗМОВ САМООЧИЩЕНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД В ЛАБОРАТОРНЫХ УСЛОВИЯХ

Н.С.ПЕТРОВ, В.Г.РУМЫНИН

Под самоочищением подземных вод обычно понимают процессы, способствующие устойчивой консервации загрязняющих компонентов в водоносных горизонтах. К подобным процессам следует отнести прежде всего сорбцию, ионный обмен, осаждение; при фильтрации растворов в гетерогенных комплексах пород (характерными примерами последних служат слоистые песчано-глинистые толщи и трещиновато-пористые коллекторы) дополнительное улучшение качества вод происходит за счет молекулярно-диффузионного оттока загрязняющих веществ в обособленные в фильтрационном отношении зоны (слабопроницаемые глинистые слои, пористые блоки трещиноватых пород), где происходит их накопление.

Имея в виду большую важность экспериментального изучения отмеченных процессов, остановимся на особенностях методики оценки показателей сорбции и молекулярной диффузии в горных породах.

Для малоконцентрированных растворов равновесная сорбция описывается линейной изотермой Генри. При этом показателем интенсивности сорбции служит коэффициент распределения $\beta = C/N$ (здесь N – сорбционная емкость породы; C – концентрация вещества в растворе). Для хорошо сорбирующихся компонентов $\beta \leqslant k \cdot 10^{-1}$, для слабо сорбирующихся $\beta = k \div 10k$.

При фильтрации растворов сорбция уменьшает скорость продвижения фронта загрязняющих веществ и может быть учтена в соответствующих расчетных зависимостях формальным увеличением значения активной пористости n на величину $1/\beta$.

При изучении сорбции применяются в основном две схемы эксперимента: статическая и динамическая [2]. В первой схеме сорбция исследуется при взаимодействии раствора с измельченной навеской породы, при второй процесс изучается при фильтрации раствора через образец породы естественного сложения. Опуская особенности методики и интерпретации результатов по этим схемам, которые подробно изложены в работах [2, 3], проведем сравнитель-

Таблица

Сорбция талловых мыл, фосфатов и фторидов при различных схемах эксперимента

Схема эксперимента	β		
	Талловые мыла	Фосфаты	Фториды
	Лентоные глины		
Статическая	0,014–0,033	0,010–0,015	
Динамическая	0,10–0,45	0,15–0,30	
По принципу молекулярного насыщения	0,14	0,10	
	Озерно-ледниковые суглинки		
Статистическая	0,050–0,070	0,060–0,078	
Динамическая	0,25–0,70	0,12–0,71	
По принципу молекулярного насыщения	0,27	0,52	
	Озерно-ледниковые пески		
Статистическая	0,83–2,2	0,7–3,2	1,1–16,2
Динамическая	0,8–1,4	1,2	2,1–9,5

ный анализ лабораторных опытов по сорбции талловых мыл и фосфатов, т.е. основных загрязняющих компонентов фосфоритового производства; образцы пород, с которыми проводились сорбционные опыты, отобраны вблизи хвостохранилищ вне зоны влияния загрязненного фильтрационного потока.

Как уже отмечалось, опыты в статических условиях проводятся с измельченной навеской породы (с нарушением естественной структуры образца) в результате каждая частица породы свободно омывается раствором и при сорбции реализируется практически вся поверхность частиц. Напротив, при динамической схеме опыта сорбция имеет место только в пределах порового пространства. Поэтому логично предположить, что результаты опытов по двум этим схемам будут неоднозначны, а именно, значения β для опытов в статических условиях будут занижены (табл.I). Анализ экспериментов показал, что независимо от выбранной схемы наблюдается закономерное увеличение сорбции талловых мыл и фосфатов от песчаных к глинистым отложениям; в то же время значения коэффициентов распределения по данным статических опытов занижены по сравнению с динамическими в 5–10 раз. Для несвязных песчаных разностей подобное расхождение выражено не столь рельефно, что можно объяснить идентичностью величин удельных поверхностей песков нарушенной естественной структур.

Для подтверждения вывода о влиянии сохранности структуры образца на достоверность определения сорбционных параметров была проведена серия лабораторных опытов в статических условиях без нарушения естественной структуры породы по принципу молекулярного насыщения породы исследуемым на

Таблица 2

Самоочищение подземных вод горизонта озерно-ледниковых суглинков в районе хвостохранилища

Точки отбора проб	Расстояние от дренажной канавы, м	Содержание, мг/л									pH	Минерализация, г/л
		$Na^+ + K^+$	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Cl^-	SO_4^{2-}	$HCO_3^- + CO_3^{2-}$	F^-	P	$C_{орг}$		
Дренажная канава	0	386	23	16	283	37	1726	3,2	3,4	397	8,0	2,9
Скважины												
2	20	64,2	10,4	54,9	125,7	26,0	578	1,1	0,36	67	7,4	0,9
3	50	3,7	54,3	24,6	33,0	16,0	225	0,8	0,50	21	7,6	0,4
5	80		45,3	20,5	20,9	10,0	146	0,3	0,60	25	6,9	0,2
Р.Луга	160	2,5	51,9	20,7	24,5	15	189	0,3	0,80	25	8,2	0,3
Средний состав грунтовых вод до начала эксплуатации		49,5	44,7	21,5	18,5	9,6	348	0,5	0,30	7,5	7,0	0,5

сорбцию компонентом. Образец породы помещался в специальную камеру из нержавеющей стали, конструкция которой предусматривала возможность использования в опытах глинистых образцов ненарушенного сложения и предохраняла их от набухания. Опыт продолжался до достижения постоянной концентрации компонента в растворе. Согласно данным табл.I, значения β в опытах по молекулярному насыщению образца и в динамических условиях близки между собой.

Полученные результаты хорошо согласуются с данными режимных наблюдений за загрязнением подземных вод на участке хвостохранилища производственного объединения „Фосфорит" (геолого-гидрогеологические условия участка подробно рассмотрены в работе [4]). Так, действительная скорость фильтрации подземных вод (для инертных компонентов) в водоносном горизонте озерно-ледниковых суглинков составляет около $3 \cdot 10^{-2}$ м/сутки, т.е. за 10-летний период эксплуатации хвостохранилища продвижение фронта поршневого вытеснения чистых вод загрязненными должно было бы составить около 110 м и достичь р.Луги. Однако, гидрохимическое опробование наблюдательных скважин и анализ поровых вод показали, что фронт загрязнения в этом водоносном горизонте распространился лишь на расстояние 30–40 м от хвостохранилища (табл.2), что объясняется высокой сорбционной способностью пород горизонта по отношению к основным загрязняющим компонентам. Таким образом, расчетная величина скорости переноса загрязняющих компонентов $8 \cdot 10^{-3}$ м/сутки, а коэффициент распределения $\beta = 0,3$, что характерно для озерно-ледниковых суглинков (см. табл.I, динамическая схема). Близкие значения получены и для нижнего водоносного горизонта ленточных глин.

При лабораторном опробовании слабопроницаемых отложений в динамических условиях или, тем более, в режиме молекулярно-диффузионной пропитки образцов, для компонентов раствора оказываются примерно равнодоступными как активные, так и пассивные (в фильтрационном отношении) зоны порового пространства [6]. Поэтому для подобных грунтов получаемая в опытах сорбционная емкость, на основе которой рассчитывается коэффициент распределения β, близка к максимально возможной для данной породы величине. Однако в опытах с хорошо проницаемыми отложениями проявление микрогетерогенных свойств порового пространства может ощутимо отразиться на конечных результатах. Очевидно, что в этом случае доля застойных зон, участвующих в массообмене и определяющая дополнительную емкость для сорбции, должна меняться в зависимости от принимаемых опытных характеристик в гораздо более широком диапазоне значений. В соответствии с этим должны оказаться неинвариантными по отношению к опытным условиям и расчетные значения коэффициента распределения β.

Действительно, эксперименты с песчаными и гравийными материалами (в качестве сорбируемых компонентов использовались фториды) показали достаточно четкую зависимость величины вовлекаемой в массообмен части пассивного порового пространства $n = n^0 - n_p$ (здесь n^0 и n_p – соответственно общая и расчетная активная пористость) и коэффициента распределения β от опытных скоростей фильтрации (табл.3). Из представленных данных, в частности, следует, что при больших скоростях фильтрации емкостные (по отношению к сорбируемому компоненту) свойства пористой среды не успевают в полной мере проявиться.

Заметим также, что относительно небольшой объем тупиковых пор (до 5–7 %) увеличивает общую сорбционную емкость в несколько раз. Иными словами, сорбция фторидов на поверхности минерального скелета в данном случае сопоставима с их накоплением в пассивных областях порового пространства. Таким образом, анализ результатов миграционных опытов с рыхлосвязанными породами приводит к весьма важному методическому выводу о необходимости внимательного подхода к выбору опытных режимов проведения сорбционных экспериментов.

Несколько слов о постановке и интерпретации опытов. С целью определения расчетного значения активной пористости и доли пассивных зон грунтов в опытную колонку с постоянной скоростью вводился раствор, содержащий инертный индикатор (Cl^-); при определении сорбционных параметров породы с той же скоростью фильтрации производился запуск раствора с сорбирующимся компонентом. Для всех опытов на входном сечении колонны принималось граничное условие первого рода, отвечающее постоянной концентрации индикатора в течение всего опыта. Общая пористость породы определялась на основе балансовых расчетов.

Индикаторные кривые всех опытов с сорбируемым и несорбируемым компонентами представляют собой близкие по форме кривые, сдвинутые одна относительно другой по оси времени (рис.I), что в частности указывает на равновесный характер сорбции. Поэтому коэффициент распределения β для точки $\bar{C} = 0{,}5$ определяется по формуле $\beta = L n_p / v \Delta t$, где L – длина опытной

Таблица 3

Влияние дополнительной емкости застойных зон на сорбционную способность грунтов (динамическая схема эксперимента)

Номер опыта	Скорость фильтрации, м/сутки	n_p	$\bar{n}=(n^0-n_p)/n^0$	Коэффициент β для фторидов
		Среднезернистые пески (n^0 = 0,390; $d_э$ = 1,5 мм)		
1	43,2	0,307	20,0	
2	24,2	0,313	19,7	
3	7,9	0,316	18,9	
4	4,3	0,320	17,8	
5	2,8	0,341	12,5	
6	1,6	0,378	3,5	
		Разнозернистые пески (n_0 = 0,340; $d_э$ = 0,5÷2,5 мм)		
1	17,3	0,283	22,6	5,1
2	9,2	0,278	20,5	3,8
3	6,6	0,290	14,7	3,4
4	4,3	0,292	14,1	3,2
5	3,1	0,295	13,2	2,6
6	1,8	0,302	11,2	2,1
7	0,23	0,330	2,9	2,0
		Гравийные отложения (n_0 = 0,430; $d_э$ = 5÷7 мм)		
1	23,0	0,385	10,5	33,7
2	14,4	0,388	9,9	35,4
3	10,8	0,390	9,5	10,3
4	7,6	0,395	8,6	9,2
5	4,8	0,407	5,6	9,0
6	1,0	0,417	3,2	5,2
7	0,5	0,422	2,1	5,2

Примечание. $d_э$ - эффективный диаметр грунта.

колонны; v - скорость фильтрации; Δt - сдвиг кривых для сорбируемого и несорбируемого компонентов для точки $\bar{c}$ = 0,5.

Для оценки коэффициента молекулярной диффузии $D_м$ растворов веществ в горных породах могут с успехом применяться разнообразные экспериментальные схемы [2, 5, 7]. Здесь остановимся на теоретическом обосновании метода, который, наряду с технической простотой выполнения, обладает двумя немаловажными для подобных экспериментов достоинствами: относительной кратковременностью (опыт проводится в резко нестационарном режиме) и возможностью учета в расчетной схеме процессов сорбции, подчиняющихся нелинейной изотерме.

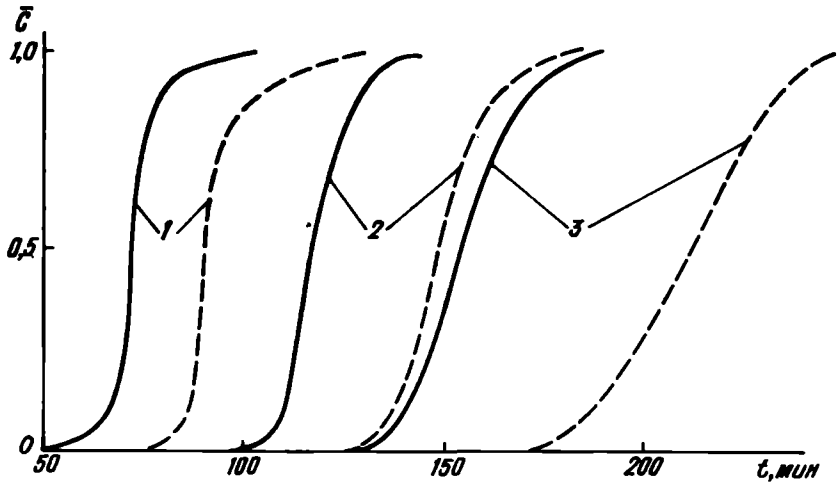


Рис.1. Выходные кривые динамических опытов с несорбируемым (сплошная линия) и сорбируемым (пунктирная линия) компонентами, проводимых с разнозернистыми песками при скорости фильтрации 6,6 м/сутки (1), 4,3 м/сутки (2) и 3,1 м/сутки (3)

Сущность метода заключается в следующем. Образец горной породы погружается в сосуд, заполненный исследуемым раствором (объемом W) с исходной концентрацией C_0. Образцам, представляющим сцементированные разности пород, придается изометрическая форма; они помещаются в сосуд целиком, так что в контакте с породой находится вся боковая поверхность образца. Образцы слабосвязных песчаных и глинистых разностей перед насыщением помещают в специальную цилиндрическую кассету, препятствующую разрушению их структуры, и с раствором контактируют лишь основания цилиндра. Жидкость в сосуде в процессе опыта постоянно перемешивается, и поэтому концентрация вещества в растворе C_P равна концентрации вещества на поверхности образца. Для интерпретации результатов используются данные наблюдений за убылью концентрации вещества в окружающей образец жидкости.

Исходное балансовое уравнение для вещества в растворе имеет вид

$$W\frac{\partial C_P}{\partial t} = -Q_S , \qquad (1)$$

где Q_S - интенсивность молекулярно-диффузионного потока вещества через поверхность образца, вычисляемая по дифференциальному уравнению молекулярно-диффузионного переноса в образце.

Полагая, что за расчетный промежуток времени диффузионным потоком охватывается лишь весьма незначительный объем пористой матрицы, а перенос осуществляется по независимым прямолинейным траекториям (т.е. выполняется предпосылка неограниченной емкости образца), запишем дифференциальное уравнение массопереноса в виде

$$n\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial N}{\partial t} = D_M\frac{\partial^2 C}{\partial s^2} , \qquad (2)$$

где C и N – концентрация вещества в диффундирующем растворе и на минеральном скелете соответственно; S – внутренняя нормаль к поверхности образца.

Рассмотрим наиболее общий случай, когда сорбция носит нелинейный характер, подчиняясь изотерме Ленгмюра:

$$N = \frac{C}{\beta(1+\gamma C)}, \tag{3}$$

где β и γ – постоянные сорбции, определяемые в статических условиях до опыта по методике, аналогичной изложенной выше.

Считая, что сорбционное равновесие устанавливается, как правило, весьма быстро по сравнению со скоростью диффузионного переноса [5], перепишем уравнение (2) в виде

$$\left(n + \frac{\partial N}{\partial C}\right)\frac{\partial C}{\partial t} = D_{\text{м}}\frac{\partial^2 C}{\partial s^2} \tag{4}$$

Определяя производную $\partial N / \partial C$, из уравнения (3) преобразуем уравнение (4). Тогда

$$\left[n + \frac{1}{\beta(1+\gamma C)^2}\right]\frac{\partial C}{\partial t} = D_{\text{м}}\frac{\partial^2 C}{\partial s^2} \tag{5}$$

Решим уравнение (5) методом интегральных соотношений Баренблатта [1], представив искомую концентрационную функцию C в форме многочлена:

$$C = a_0 + a_1 \bar{s} + a_2 \bar{s}^2, \tag{6}$$

где $\bar{s} = s / R_t$; R_t – условный радиус влияния концентрационной функции; a_0, a_1, a_2 – постоянные разложения.

Чтобы найти коэффициенты ряда (6), воспользуемся условием на поверхности образца (при $s = 0$) и особыми условиями в точках $s = R_t$:

$$C\Big|_{s=0} = C_{\text{P}}, \quad C\Big|_{s=R_t} = \frac{\partial C}{\partial s}\Big|_{s=R_t} = 0. \tag{7}$$

Отсюда $a_0 = C_{\text{P}}$, $a_1 = -2C_{\text{P}}$, $a_2 = C_{\text{P}}$. При этом уравнение (6) принимает вид

$$\bar{C} = C / C_{\text{P}} = (1 - \bar{s})^2. \tag{8}$$

Преобразуем уравнение (5):

$$\frac{\partial}{\partial t}\left[\left(n + \frac{1}{\beta}\right) + n\bar{\gamma}\bar{C}^2 + \frac{n\bar{\gamma}^2}{3}\bar{C}^3\right] = \frac{D_{\text{м}}}{R_t^2}\left(1 + \bar{\gamma}C\right)\frac{\partial^2 \bar{C}}{\partial \bar{s}^2},$$

где $\bar{\gamma} = \gamma C_{\text{P}}$, $\bar{C} = C / C_{\text{P}}$.

Подстановка в последнее уравнение значения функции $\bar{C}$ из выражения (8) дает

$$\frac{d}{dt}\left[\left(n + \frac{1}{\beta}\right)(\bar{s}-1)^2 + n\bar{\gamma}(\bar{s}-1)^4 + \frac{n\bar{\gamma}^2}{3}(\bar{s}-1)^6\right] = 2\frac{D_{\text{м}}}{R_t^2}\left[1 + \bar{\gamma}(\bar{s}-1)^2\right]^2. \tag{9}$$

Величину R_t найдем, домножив обе части уравнения (9) на $R_t^2\,\bar{s}\,d\bar{s}$ и проинтегрировав получившееся тождество в пределах от 0 до I; в результате получим обыкновенное дифференциальное уравнение

$$\frac{d}{dt}\left\{R_t^2\left[\frac{1}{12}\left(n+\frac{1}{\beta}\right)+\frac{n\bar{\gamma}}{30}+\frac{n\bar{\gamma}^2}{168}\right]\right\}=D_M\left(1+\frac{\bar{\gamma}}{3}+\frac{\bar{\gamma}^2}{15}\right). \qquad (10)$$

Для решения уравнения (I0) осредним величину $\bar{\gamma}=\gamma C_P$, считая $\bar{\gamma}\approx\gamma C_{CP}=$ $=const$, где C_{CP} - средняя концентрация раствора. Кроме того заметим, что

$$\frac{12\bar{\gamma}}{30}+\frac{12\bar{\gamma}^2}{168}\approx\frac{\bar{\gamma}}{3}+\frac{\bar{\gamma}^2}{15}=P(\gamma,C_{CP}). \qquad (11)$$

Тогда уравнение (I0) имеет решение[x] $R_t=\sqrt{12D_M t}/n_э$ где $n_э$ - эффективная пористость

$$n_э=n+1/\beta\left[1+P(\gamma,C_{CP})\right]. \qquad (12)$$

При $\bar{\gamma}\ll$ I, что отвечает линейной изотерме Генри, и $P(\gamma,C_{CP})\to 0$ получим хорошо известное в теории миграции [7] соотношение $n_э=n+1/\beta$.

Таким образом, здесь мы попутно пришли к одному интересному и полезному результату: в расчетных зависимостях для диффузионного массопереноса, осложненного равновесной нелинейной сорбцией, последняя может быть учтена формальной заменой величины пористости n на ее эффективное значение $n_э$ согласно равенству (I2). Обратим внимание, что в этом варианте активная пористость зависит, помимо численных значений констант нелинейной сорбции β и γ, также от исходной (граничной) концентрации диффундирующего вещества в растворе.

Окончательное решение дифференциального уравнения (9) можно записать в форме

$$C=C_P\left(1-\frac{s}{\sqrt{12D_M t/n_э}}\right)^2 \qquad (13)$$

Тогда общая величина массового потока через поверхность образца

$$Q_S=-FD_M\left.\frac{\partial C}{\partial s}\right|_{s=0}=\frac{C_P\sqrt{D_M n_э}\,F}{\sqrt{3t}},$$

где F - площадь поверхности образца, находящегося в контакте с раствором.

В этом случае балансовое уравнение (I) приобретает вид

$$W\frac{\partial C_P}{dt}=-F\frac{C_P\sqrt{D_M n_э}}{\sqrt{3t}}.$$

Решив его, получим

---

x Если $C_n=C_0=const$, что отвечает наиболее распространенному граничному условию первого рода, характерному для широкого круга задач переноса, то это соотношение является практически строгим.

$$C_P = C_0 \exp\left(-\frac{2F\sqrt{D_M n_э t}}{\sqrt{3}\,W}\right). \qquad (14)$$

При $F\sqrt{D_M n_э t}/W < 0{,}1$ асимптотикой решения (14) является формула

$$C_P \approx C_0\left(1 - \frac{2F\sqrt{D_M n_э t}}{\sqrt{3}\,W}\right), \qquad (15)$$

которая при $n_э = n(\beta \to \infty, \gamma = 0$ т.е. при отсутствии сорбции) практически совпадает с решением, полученным ранее для линейной задачи в работе [5] методом, отличным от выбранного здесь.

Сделанное допущение о неограниченной емкости образца допускает использование полученных здесь решений только при выполнении условия $l > 2\sqrt{D_M t}/n_э$ (здесь l – половина характерной длины образца; t – время опыта), которое дополнительно проверяется после опыта.

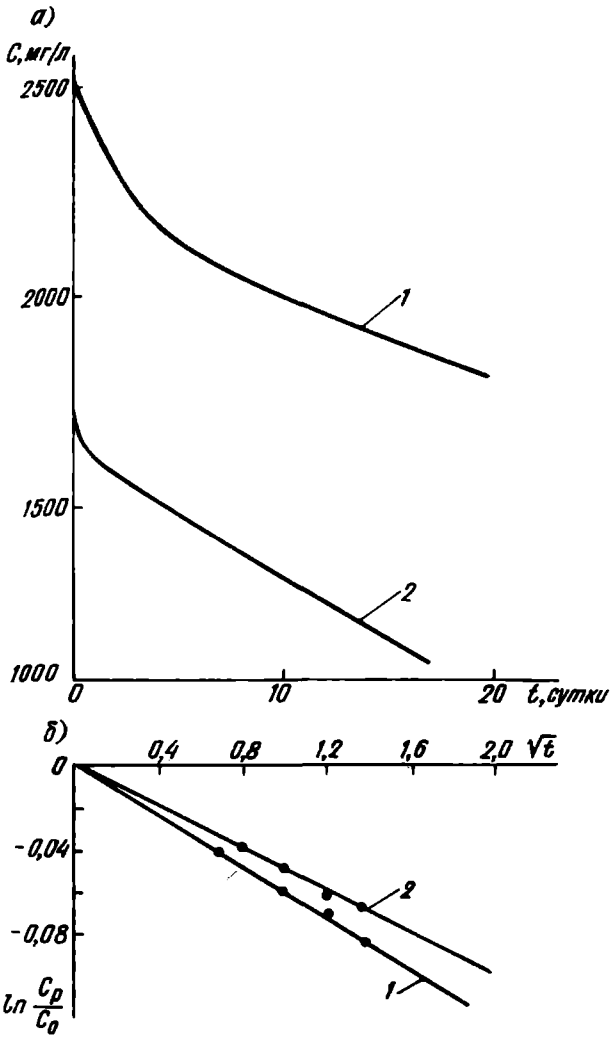


Рис.2. Кривые изменения концентрации Cl^- в камерах (а), представление кривых при графоаналитическом методе их обработки (б)
1 и 2 – соответственно ленточные глины и озерно-ледниковые суглинки

Результирующие формулы (14) и (15) позволяют легко интерпретировать результаты лабораторных опытов по молекулярно-диффузионной пропитке образцов. Так, при использовании формулы (14) индикаторный график строится в координатах $\ln C_P/C_0 - \sqrt{t}$, который должен иметь линейный вид; по тангенсу угла наклона φ прямой к оси $\sqrt{t}$ определяют коэффициент $D_M = 3W^2 \operatorname{tg}^2\varphi / 4F^2 n_э$. Значение эффективной пористости рассчитывается по формуле (12) с использованием постоянных изотермы сорбции, найденных известным балансовым методом.

В качестве примера приведем результаты опытов по оценке коэффициентов молекулярной диффузии озерно-ледниково-

вых ленточных глин и суглинков (рис.2). Объем камеры, заполненной индикатором, 420 $см^3$, площадь поперечного сечения образца 95 $см^2$. Значения D_M для ленточных глин и озерно-ледниковых суглинков, рассчитанные согласно изложенной выше методике, составили соответственно $1{,}4 \cdot 10^{-5}$ $м^2$/сутки и $1{,}0 \cdot 10^{-5}$ $м^2$/сутки.

Выводы

1. При изучении параметров сорбции в лабораторных условиях особое внимание должно уделяться выбору экспериментальной схемы и обоснованию для нее оптимального режима. Для глинистых разностей пород важно сохранять естественную структуру образца в процессе опыта. Насыщение образца раствором целесообразно осуществлять в режиме молекулярно-диффузионной пропитки. При опробовании хорошо проницаемых песчаных грунтов необходимо считаться с кинетикой оттока сорбируемого вещества в пассивные (в фильтрационном отношении) зоны порового пространства, на которые нередко падает значительная часть общей сорбционной емкости породы; в этом случае режим опыта должен обеспечивать полное насыщение пассивных зон по мере продвижения фронта раствора по транзитным порам, что достижимо лишь при весьма малых скоростях фильтрации в опытных колоннах повышенной протяженности.

2. Интерпретация опытов по определению коэффициента молекулярной диффузии в горных породах, ориентированная на начальные участки индикаторных кривых, характеризующих резко нестационарный режим насыщения образца, позволяет значительно сократить время опыта (по сравнению с другими известными экспериментальными решениями), причем предлагаемый вариант наиболее удобен и в техническом отношении. Полученное новое решение позволяет учесть в расчетной схеме опыта сорбцию, подчиняющуюся нелинейной изотерме Лэнгмюра.

3. Учет равновесных нелинейных процессов сорбции в решениях диффузионного уравнения возможен путем введения эффективного параметра пористости $n_э$, вычисляемого по формуле (I2).

Соотношения (II) и (I2) могут, по-видимому, использоваться и при анализе процессов конвективно-диффузионного переноса; однако этот аспект требует дальнейшего теоретического исследования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Баренблатт Г.И. О некоторых приближенных методах в теории одномерной неустановившейся фильтрации жидкости при упругом режиме. – Изв. АН СССР, отд. техн. наук, 1954, № 9.

2. Бочевер Ф.М., Орадовская А.Е. Гидрогеологическое обоснование защиты подземных вод и водозаборов от загрязнения. М., Недра, 1972.

3. Мироненко В.А., Румынин В.Г., Учаев В.К. Охрана подземных вод в горнодобывающих районах. Л., Недра, 1980.

4. Коротков А.И., Петров Н.С., Шемякин В.Н. Исследование процессов самоочищения подземных вод на участке шламохранилищ комбината „Фосфорит". Л., Зап. ЛГИ, 1980, т. 80.

5. Рошаль А.А. Методы определения миграционных параметров. М., изд. ВИЭМС, 1980.

6. Румынин В.Г., Ульман В., Петров Н.С. Исследование кинетики процессов массопереноса в квазиоднородных пористых средах. – Зап. ЛГИ, 1980, т. 80.

7. Шестаков В.М. Динамика подземных вод. М., Изд-во МГУ, 1973.