

ФИЗИЧЕСКАЯ ХИМИЯ

Д. М. МИНЦ

**КИНЕТИКА ФИЛЬТРАЦИИ МАЛО КОНЦЕНТРИРОВАННЫХ
ВОДНЫХ СУСПЕНЗИЙ НА ВОДООЧИСТНЫХ ФИЛЬТРАХ**

(Представлено академиком П. А. Ребиндером 14 III 1951)

Процесс фильтрации мало концентрированной водной суспензии через слой зернистой загрузки без образования осадка на поверхности фильтрующего материала имеет место на водопроводных фильтрах для очистки воды от взвешенных примесей.

Изучение закономерностей этого процесса необходимо для расчета фильтров, заиления нефтеносных слоев при вторичных методах добычи нефти, заиления тела плотин и т. д.

Исследования с помощью микроскопа показали, что эффект фильтрации можно рассматривать как суммарный результат:

1) изъятия суспендированного вещества из раствора вследствие прилипания частиц к зернам фильтрующего материала и к ранее прилипшим частицам и

2) обратного поступления вещества в раствор вследствие срыва частиц и их агрегатов под влиянием потока, т. е.

$$\Delta M = \Delta M_1 - \Delta M_2, \quad (1)$$

где ΔM — количество вещества, задержанного слоем Δx за время Δt , ΔM_1 — количество вещества, изъятая слоем Δx из раствора за время Δt , ΔM_2 — количество вещества, вынесенного из слоя Δx за время Δt .

Ранее нами было показано (¹, ²), что при изъятии вещества из раствора изменение концентрации суспензии в элементарном слое фильтрующего материала пропорционально ее концентрации

$$\Delta M_1 = bqC\Delta x \Delta t, \quad (2)$$

где b — постоянный параметр, q — расход фильтрационного потока (при фильтрации на водопроводных фильтрах расход q обычно является величиной постоянной); $C = C(x, t)$ — мгновенная концентрация суспензии.

Далее принято, что количество выносимого вещества пропорционально количеству вещества, накопившемуся в слое к данному моменту времени:

$$\Delta M_2 = a\rho \Delta x \Delta t, \quad (3)$$

где a — постоянный параметр, характеризующий интенсивность срыва частиц; $\rho(x, t) = \partial M / \partial x$ — плотность насыщения, т. е. количество задержанного вещества, отнесенного к единице толщины фильтрующего слоя.

Подставляя (2) и (3) в равенство (1) и учитывая, что $C(x, t)$ и $\rho(x, t)$ связаны между собою условием баланса вещества

$$q \frac{\partial C}{\partial x} = - \frac{\partial \rho}{\partial t}, \quad (4)$$

получим

$$-q \frac{\partial C}{\partial x} = bqC - a\rho, \quad (5)$$

откуда следует:

$$\frac{\partial^2 C}{\partial x \partial t} + a \frac{\partial C}{\partial x} + b \frac{\partial C}{\partial t} = 0 \quad (6)$$

(дифференциальное уравнение фильтрации для концентрации суспензии).

Интеграл этого уравнения, удовлетворяющий начальному условию $C = C_0 e^{-bx}$ при $t = 0^*$ и граничному условию $C = C_0$ при $x = 0^{**}$ представляет собою ряд:

$$C = C_0 \sum_{n=1}^{\infty} e^{-bx} \frac{(bx)^{n-1}}{(n-1)!} T_n e^{-at}, \quad (7)$$

где функция T_n , зависящая только от произведения at , определяется выражением:

$$T_n = T_{n-1} - \frac{(at)^{n-2}}{(n-2)!} \quad (8)$$

и

$$T_1 = e^{at}. \quad (9)$$

Для суммарного количества вещества, прошедшего через фильтрующий слой x за время t , получено:

$$M_x = M_0 \sum_{n=1}^{\infty} e^{-bx} \frac{(bx)^{n-1}}{(n-1)!} \frac{P_n}{at}, \quad (10)$$

где $M_0 = qC_0 t$ — суммарное количество вещества, поступившего на фильтр за время t , а P_n определяется выражением

$$P_n = P_{n-1} - T_n e^{-at}, \quad (11)$$

$$P_1 = at. \quad (12)$$

Из уравнений (7) и (10) следует, что кинетика фильтрации определяется значениями безразмерных произведений bx и at .

Параметры a и b могут быть найдены экспериментально на модели фильтра. Параметр b определяется путем измерения начальной концентрации суспензий C_0 и концентрации C на выходе из слоя толщиной x в начале процесса из формулы:

$$C = C_0 e^{-bx}. \quad (13)$$

Параметр a определяется путем измерения предельной плотности насыщения ρ_{np} , по достижении которой фильтр перестает задерживать

* Это условие вытекает из того, что в начале фильтрации плотность насыщения невелика и явление срыва частиц не имеет существенного значения.

** Концентрация взвешенных веществ в воде, поступающей на фильтр, остается неизменной в течение всего процесса фильтрации.

взвешенные частицы и концентрация по длине фильтра не изменяется. В этом случае $dC/dx = 0$, а $C = C_0$ и из уравнения (5) получаем:

$$a = \frac{bqC_0}{\rho_{np}} \quad (14)$$

Формула (14) показывает, что с увеличением скорости фильтрационного потока q параметр a , определяющий интенсивность срыва частиц, увеличивается. Это вполне соответствует физической картине явления, так как в этом случае возрастает гидродинамическое воздействие потока на отложения частиц.

По данным опытов Элиассена (3) были найдены значения параметров a и b в обоих описанных им циклах работы опытного фильтра для фильтрующих слоев 0—4,2 см и 0—11,7 см. Значения C/C_0 , вычисленные по формуле (7), и опытные данные сопоставлены на графике (рис. 1), из которого видно, что опытные и вычисленные значения хорошо совпадают.

В опытах, проведенных в лаборатории Академии коммунального хозяйства В. П. Криштулом под руководством автора, была принята методика*, заключающаяся в весовом определении суммарного количества вещества, задержанного фильтрующим слоем. В работу одновременно включалась группа параллельно работавших опытных фильтров (площадь каждого фильтра 5,65 см²), состоящих из отдельных секций с толщиной фильтрующего слоя песка от 2 до 10 см. Вес каждой секции точно определяется до опыта и после выключения фильтров из работы. Таким образом можно было вычислить количество вещества, задержанного каждой секцией, и количество вещества, прошедшего через слой песка в секции.

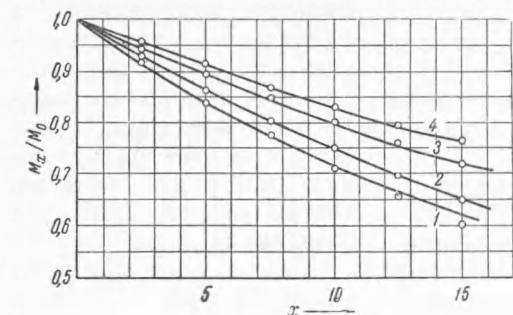


Рис. 2. Опыт № 24. $b = 0,04$, $a = 0,057$. 1— $t = 6$ час. 2— $t = 12$ час., 3— $t = 25$ час., 4— $t = 33$ час. Точки — вычисленные значения

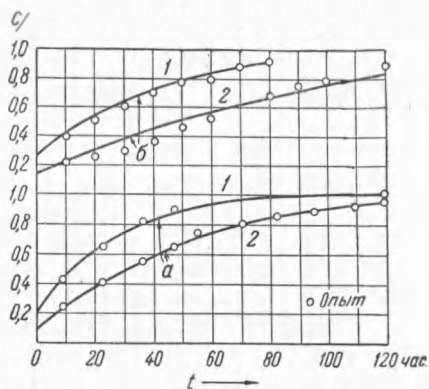


Рис. 1. a — цикл № 1, b — цикл № 2. 1— $x = 4,2$ см, 2— $x = 11,7$ см

определении суммарного количества вещества, задержанного фильтрующим слоем. В работу одновременно включалась группа параллельно работавших опытных фильтров (площадь каждого фильтра 5,65 см²), состоящих из отдельных секций с толщиной фильтрующего слоя песка от 2 до 10 см. Вес каждой секции точно определяется до опыта и после выключения фильтров из работы. Таким образом можно было вычислить количество вещества, задержанного каждой секцией, и количество вещества, прошедшего через слой песка в секции.

Значения M_x/M_0 , полученные в этих опытах, сопоставлены со значениями, вычисленными по формуле (10) на графиках (рис. 2 и 3) и в табл. 1. Для опытов №№ 24 и 25 получено очень хорошее совпадение величин как по длине фильтрующего слоя, так и по времени работы фильтра.

В опытах №№ 26 и 38 параметр b не оставался постоянным по высоте фильтра, но изменение значений M_x/M_0 во времени для каж-

* В обычных условиях работы фильтров при фильтрации естественной или коагулированной сернокислым алюминием водной суспензии, ввиду очень малой концентрации взвешенных веществ, точное определение мгновенных концентраций затруднительно.

Время фильтрации t , час.	Толщина слоя x , см		M_x/M_0		Толщина слоя x , см	M_x/M_0		Толщина слоя x , см	M_x/M_0		Толщина слоя x , см	M_x/M_0	
	опытн.	выч.	опытн.	выч.		опытн.	выч.		опытн.	выч.			
2,0	3,1	0,83	0,83	6,2	0,72	0,75	9,4	0,62	0,64				
4,0	3,2	0,85	0,85	6,5	0,77	0,76	9,7	0,69	0,66				
7,0	3,2	0,89	0,87	6,4	0,79	0,79	9,7	0,71	0,70				
16,0	3,1	0,91	0,91	6,3	0,83	0,84	9,5	0,76	0,77				
26,0	3,3	0,93	0,93	6,4	0,89	0,88	9,7	0,83	0,83				

Опыт № 26

2,0	3,1	0,83	0,83	6,2	0,72	0,75	9,4	0,62	0,64				
4,0	3,2	0,85	0,85	6,5	0,77	0,76	9,7	0,69	0,66				
7,0	3,2	0,89	0,87	6,4	0,79	0,79	9,7	0,71	0,70				
16,0	3,1	0,91	0,91	6,3	0,83	0,84	9,5	0,76	0,77				
26,0	3,3	0,93	0,93	6,4	0,89	0,88	9,7	0,83	0,83				

Опыт № 38

1,5	3,4	0,62	0,65	6,9	0,45	0,45	10,4	0,38	0,41	13,9	0,32	0,34
3,0	3,4	0,68	0,68	6,9	0,51	0,51	10,4	0,44	0,45	14,0	0,38	0,39
5,0	3,4	0,72	0,71	6,7	0,59	0,57	10,2	0,51	0,51	13,7	0,45	0,44
9,5	2,7	0,82	0,81	6,1	0,69	0,67	9,6	0,63	0,60	13,1	0,58	0,55
19,0	3,5	0,83	0,85	6,8	0,73	0,75	10,4	0,68	0,70	14,1	0,64	0,65

дого фильтрующего слоя, вычисленное по формуле (10), хорошо совпадает с наблюдаемым в опытах.

Таким образом, теория кинетики фильтрации мало концентрированных водных суспензий через зернистые фильтры без образования осадка на поверхности фильтра, основанная на физическом представлении о процессе фильтрации как о процессе прилипания взвешенных частиц к зернам фильтрующего материала и отрыва частиц, дает хорошее совпадение с опытом.

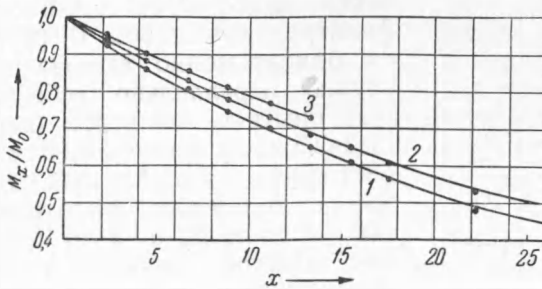


Рис. 3. Опыт № 25. $b = 0,045$, $a = 0,0565$. 1— $t = 13$ час., 2— $t = 19$ час., 3— $t = 27$ час. Точки — вычисленные значения

Теория показывает, что концентрация суспензии в каждом сечении фильтра зависит от безразмерных произведений bx и at .

Тем самым устанавливается принцип моделирования процесса по длине фильтрующего слоя и во времени. Этот результат может быть использован для рационального проектирования водоочистных фильтров путем опытного определения параметров a и b на модели с фильтрующим слоем толщиной всего лишь в несколько сантиметров. Теория дает возможность обоснованно выбрать необходимую толщину фильтрующей загрузки и определить допустимую продолжительность работы фильтра для получения фильтрата надлежащего качества.

Поступило
26 I 1951

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ Д. М. Минц, Сборн. Вопросы коммунального хозяйства, 1949, стр. 33.
² Д. М. Минц, Научн. тр. Акад. коммун. хоз., в. 4—5, 16 (1949). ³ R. Eliassen, Journ. Am. W. W. Ass., 33, No. 5, 926 (1941).