

Д. М. МИНЦ, В. З. МЕЛЬЦЕР

ГИДРАВЛИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ЗЕРНИСТОЙ ПОРИСТОЙ СРЕДЫ В ПРОЦЕССЕ КОЛЬМАТАЦИИ

(Представлено академиком П. Я. Кочинной 4 VIII 1969)

Вопрос о гидравлическом сопротивлении зернистой пористой среды в процессе кольматации при фильтрации суспензий имеет важное значение в гидротехнике, гидрогеологии, ирригации, водоснабжении, нефтедобыче и других отраслях техники.

Как известно, в области действия линейного закона фильтрации справедливо соотношение:

$$K / K_0 = (m / m_0)^3 (\omega_0 / \omega)^2, \quad (1)$$

где K и K_0 — коэффициенты фильтрации, m и m_0 — значения доли свободного объема (пористости), ω и ω_0 — величины удельной поверхности поровых каналов соответственно при определенной степени кольматации и в начальный момент фильтрации суспензии.

Обычно степень кольматации характеризуют насыщенностью порового пространства осадком

$$\delta = (m_0 - m) / m_0 \quad (2)$$

и выражают отношение коэффициентов фильтрации как функцию насыщенности. Однако предложенные различными авторами (1-4) зависимости дают сильно различающиеся результаты (рис. 1).

Некоторые авторы (1, 2) определяют зависимость теоретически, исходя из а priori принятой модели изменения геометрической структуры пористой среды при ее заилении, другие — эксперимен-

Рис. 1. Результаты расчетов коэффициента фильтрации. 1 — формула Кэмпбелла, 2 — формула Минца, 3 — формула Шехтмана, 4 — формула Мацкрле

тально, вычисляя насыщенность по весовому количеству отложений при приближенной оценке плотности отложений и допущении о несжимаемости осадка в процессе кольматации (3, 4). Прямых измерений насыщенности не проводили из-за трудностей измерений без нарушения структуры осадка. Как отмечалось (5), в этом состоит слабость современной теории фильтрации суспензий через зернистую пористую среду и причина расхождений в результатах расчетов.

Одним из нас была разработана методика экспериментального определения насыщенности путем измерения истинной средней скорости движения раствора индикатора через пористую среду. В основе методики лежит известный способ определения скоростей потоков с помощью индикаторов (6-8), видоизмененный применительно к условиям данной задачи.

В фильтровальную колонку $D = 32,6$ мм между двумя парами серебряных электродов помещали фильтрующий материал: однородный кварцевый песок с диаметром зерен 1,07 и 1,49 мм и толщиной слоя 30 мм. Элек-

троды служили для измерения истинной скорости движения раствора индикатора через фильтрующий слой, определяемой по изменению электропроводности. Третью пару электродов располагали на расстоянии 30 мм над слоем для определения скорости движения индикатора в свободном объеме колонки с целью контроля точности измерений по сопоставлению с объемными определениями расхода раствора индикатора через сечение колонки.

В качестве индикатора использовали 1,25% раствор NaCl. Изменение электропроводности при движении индикатора записывали непрерывно на фотобумаге оптическим самописцем К4-51.

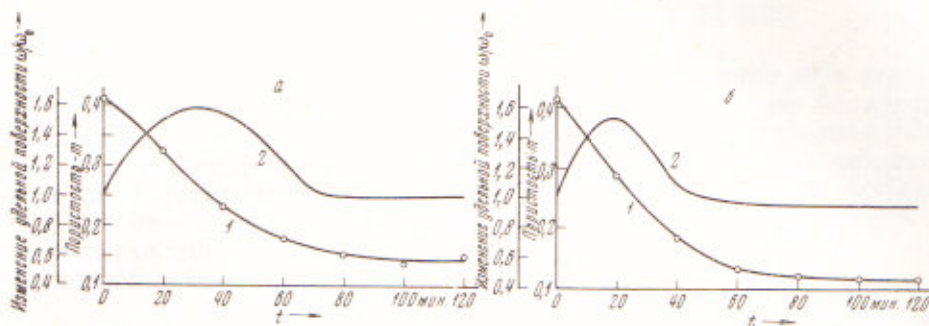


Рис. 2. Характерные кривые изменения пористости (1) и удельной поверхности поровых каналов (2) в процессе фильтрации. а — суспензия торфяной вытяжки с добавлением $Al_2(SO_4)_3$; б — природная вода р. Сходни с добавлением $Al_2(SO_4)_3$.

Описываемая здесь серия опытов была поставлена применительно к условиям работы фильтров для очистки воды.

Через колонку фильтровали различные суспензии, моделирующие природные воды, и воду р. Сходни с добавлением коагулянтов и флокулянтов, применяемых при водоочистке.

Процедура опытов состояла в чередовании циклов фильтрации суспензии (в направлении сверху вниз) с постоянной скоростью фильтрации в пределах от 4 до 12 м/час и циклов измерения насыщенности с пропуском через заглиненный слой песка индикатора (в направлении снизу вверх) со скоростью фильтрации 0,7 м/час. Насыщенность определяли через каждые 20 мин. после измерения потери напора в слое.

Выбор толщины фильтрующего слоя, крупности зерен, концентрации индикатора, скорости и направления его движения был обусловлен получением приемлемой точности измерений, которая оказалась в пределах $\pm 3\%$.

По результатам измерений истинной скорости движения индикатора $u_{ист}$ и скорости его движения в колонке над слоем песка $u_{ф}$ определяли долю свободного объема пор (динамическую пористость) m на различных стадиях коагуляции слоя по формуле

$$m = u_{ф} / u_{ист}, \quad (3)$$

насыщенность порового пространства осадком по формуле (2), отношение ω / ω_0 из формулы (1).

Исследования показали, что при фильтрации суспензий с постоянной скоростью в условиях, когда над поверхностью фильтрующего слоя осадок не образуется и взвешенные частицы задерживаются в толще слоя (условия, характерные для фильтрации тонкодисперсных малоконцентрированных суспензий на водоочистных фильтрах) полная коагуляция пор никогда не достигается. Во всех опытах пористость снижалась только до определенного предела (рис. 2). Величина предельной пористости была различной в зависимости от рода фильтруемой суспензии, скорости фильтрации, крупности зерен.

Таким образом, получено новое экспериментальное подтверждение фундаментальной гипотезы теории фильтрации малоconцентрированных суспензий о существовании предельной насыщенности $\delta_{пр} < 1$, по достижении которой элементарной фильтрующий слой перестает задерживать частицы суспензии и дальнейшая кольтатация пор прекращается⁽⁹⁾.

Опыты показали также, что в процессе кольтатации происходит изменение удельной поверхности, омываемой потоком, в начале процесса она возрастает, затем уменьшается, и с приближением к предельной дальнейшее изменение удельной поверхности прекращается (рис. 2).

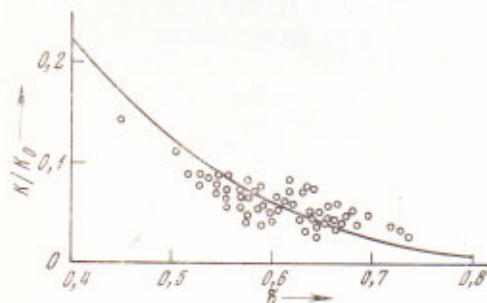


Рис. 3. Точки — опытные данные по изменению коэффициента фильтрации. Кривая $K/K_0 = (1 - \delta)^2$

фильтра при его кольтатации в основном формируется за счет первых по направлению движения слоев, которые при достаточно длительной фильтрации находятся в состоянии предельного насыщения.

Как показали наши опыты (рис. 3), для таких слоев лучшие результаты дает формула

$$K / K_0 = (m / m_0)^2 = (1 - \delta)^2. \quad (4)$$

Однако среднеквадратичные расхождения между опытными и вычисленными значениями довольно велики $\pm 30,2\%$. Основная причина расхождений, по-видимому, состоит в том, что при предельной насыщенности отношение удельных поверхностей может быть несколько больше или меньше 1. Пока не удалось обнаружить какую-нибудь закономерность в формировании поверхности отложений при предельной насыщенности фильтрующего слоя в различных условиях фильтрации суспензий.

Академия коммунального хозяйства
им. К. Д. Памфилова
Москва

Поступило
30 VII 1963

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ T. R. Camp, J. Sanitary Eng. Division, ASCE, 90, № SA4, Part I, August (1964).
² Д. М. Минц, Научн. тр. Акад. коммунальн. хоз., в. II—III, 1951. ³ Ю. М. Шехтман, Фильтрация малоconцентрированных суспензий, 1961. ⁴ V. Mackrle, L'étude de phénomène d'adhérence, Colmatage dans le milieu poreux, Prague, 1961. ⁵ D. M. Mintz, Modern Theory of Filtration, International Water Supply Association, VII Congress, 1, Barcelona, 1966. ⁶ Определение направления и скорости течения подземных вод, Госэнергоиздат, 1949. ⁷ Н. А. Огильви, Д. И. Федорович, Электролитический метод определения скорости фильтрации подземных вод и условия его практической применимости, 1964. ⁸ Б. А. Митин, Сборн. Процессы фильтрования при очистке природных и сточных вод, 1965. ⁹ Д. М. Минц, ДАН, 78, № 2 (1951).