

ГИДРАВЛИКА

В. С. САРКИСЯН, А. Ж. ЧИТЧИАН

МЕТОДЫ ПРОГНОЗА ОЧИСТКИ ВОДЫ В НАМЫВНЫХ
ФИЛЬТРАХ (РАДИАЛЬНАЯ ЗАДАЧА)

На многих промышленных и энергетических предприятиях требуется глубокая механическая и сорбционная очистка воды от различных тонкодисперсных и эмульгированных взвесей. Перспективным методом такой очистки является применение намывного фильтра, представляющего собой напорный аппарат с системой цилиндрических фильтрующих элементов, на которых тонким слоем намывается порошкообразный материал, например, шитсмит, перлит, активный уголь и др.

При фильтрации воды, содержащей взвешенные вещества, через намывной слой, в зависимости от размеров частиц и их концентраций, возможны следующие процессы [1]: а) коьматаж (отложение в фильтрующей среде) намывного слоя; б) образование осадка на намывном слое; в) частичный коьматаж намывного слоя с дальнейшим образованием на нем осадка.

Рассмотрим математическую постановку и решение задачи для каждой из этих процессов. Если пренебречь диффузионным переносом веществ по сравнению с конвективным, то дифференциальное уравнение материального баланса при коьматаже намывного слоя в случае квазистационарного режима имеет вид:

$$v \frac{\partial c}{\partial r} - \bar{\epsilon} \frac{\partial b}{\partial t} - n_0 \frac{\partial c}{\partial t} = 0, \quad (1)$$

где $v = \frac{q}{2\pi l r}$ — скорость фильтрации; $q = \text{const}$ — расход воды; l — длина фильтрующего элемента; $\bar{\epsilon}$ — объемный вес отложений; n_0 — начальная пористость намывного слоя; c — концентрация взвешенных веществ в воде; b — удельный объем поровых отложений взвешенных веществ в намывном слое; r — радиальная координата; t — время.

Д. М. Мынц рассматривает процесс коьматажа как суммарный результат отложения частиц на поверхности фильтрующего материала и обратного поступления вещества в протекающую через пористую среду воду. Тогда уравнение кинетики отложения и отрыва взвешенных веществ будет:

$$b \frac{db}{dt} = \gamma (b_0 - b) c - \beta b, \quad (2)$$

а для рассмотренного случая можно считать, что $b_0 \gg b$ и $\beta = 0$, тогда

$$b \frac{db}{dt} = \gamma b_0 c, \quad (3)$$

где γ — коэффициент кольтатации; b_0 — предельное удельное объемное отложение кольтатанта; β — коэффициент, учитывающий отрыв частиц.

Кольтатаж намывного слоя, как показано Н. Н. Веригиным [1], протекает в две стадии. Во время первой стадии продолжительностью t_0 на наружной поверхности намывного слоя еще не достигнута предельная емкость отложения кольтатанта ($b < b_0$), а концентрация взвешенных веществ в исходной воде является постоянной ($c = c_0$). Начальные и граничные условия при этом будут:

$$c_1(r_3, t) = c_0; \quad b_1(r, 0) = 0, \quad (4)$$

где c_0 — концентрация взвешенных веществ в исходной воде; r_3 — наружный радиус намывного слоя, который согласно [1]:

$$r_3 = r_2 \sqrt{1 + 2g/\varphi_0}, \quad (5)$$

где r_2 — наружный радиус фильтрующего элемента; g — удельный расход намываемого материала; φ_0 — объемный вес намывного слоя.

Вторая стадия характеризуется тем, что при $t > t_0$ на наружной поверхности намывного слоя достигнута предельная емкость отложения и образовалась некоторая зона радиусом r_m , в которой $b = b_0$ и $c = c_0$ (рис. 1). Начальные и граничные условия имеют вид:

$$\begin{aligned} c_1(r, t_0) &= c_3(r, t_0); & b_1(t, t_0) &= b_2(r, t_0); \\ c_2(r_0, t) &= c_0; & b_2(r_m, t) &= b_0, \end{aligned} \quad (6)$$

где r_m — переменный радиус фронта предельного насыщения.

Решая (1), (3) при условиях (4), найдем изменения концентрации и удельного объемного отложения вещества для первой стадии:

$$c_1 = c_0 \exp \left[-\frac{\gamma \gamma_0 b_0}{q} (r_3^2 - r^2) \right], \quad r_3 \leq r \leq r_3; \quad (7)$$

$$b_1 = b_0 \frac{t}{t_0} \exp \left[-\frac{\gamma \gamma_0 b_0}{q} (r_1^2 - r^2) \right], \quad t \leq t_0 = \frac{2}{\gamma c_0}, \quad (8)$$

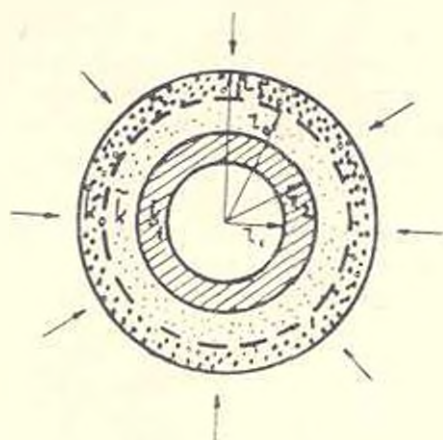


Рис. 1 Кольтатаж намывного слоя

то же при краевых условиях (6) — для второй стадии:

$$c_2 = c_0 \exp \left[-\frac{\pi l \lambda b_0}{q} (r_0^2 - r^2) \right], \quad r_2 \leq r \leq r_0; \quad (9)$$

$$b_2 = b_0 \exp \left[-\frac{\pi l \gamma b_0}{q} (r_0^2 - r^2) \right], \quad (10)$$

$$r_0 = \sqrt{r_2^2 - \frac{q}{\pi l \gamma b_0} \left(\frac{t}{t_0} - 1 \right)}.$$

Во время первой стадии кольтматажа фильтрации через намывной слой ($r_2 \leq r \leq r_3$) протекает с переменным коэффициентом проницаемости $k(r, t)$, а через фильтрующий элемент ($r_1 \leq r \leq r_0$) — с постоянной проницаемостью k_1 . Во время второй стадии фильтрации образуются три гидродинамические области: намывной слой с предельным отложением кольтматанта ($r_2 \leq r \leq r_3$), где $k_0 = \text{const}$ и массообмен завершен; намывной слой с продолжающимся массообменом ($r_2 \leq r \leq r_0$) и переменной $k(r, t)$; фильтрующий элемент. Перепад давления в любой момент времени фильтрации можно определить формулами [1]:

для первой стадии —

$$\Delta p = \frac{\mu q}{2\pi l} \left(\frac{\ln r_3/r_1}{k_1} + \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{kr} \right); \quad (11)$$

для второй стадии —

$$\Delta p = \frac{\mu q}{2\pi l} \left(\frac{\ln r_3/r_1}{k_1} + \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{kr} + \frac{\ln r_2/r_0}{k_0} \right), \quad (12)$$

где μ — динамический коэффициент вязкости воды; r_1 — внутренний радиус фильтрующего элемента.

Следуя [1], изменение проницаемости намывного слоя k и k_0 можно представить:

$$k = k_2 \left(1 - \frac{b}{n_0} \right)^3, \quad k_0 = k_2 \left(1 - \frac{b_0}{n_0} \right)^3, \quad (13)$$

где k_2 — коэффициент проницаемости намывного слоя в начальный момент фильтрации.

Осредним удельное объемное отложение кольтматанта по всему объему намывного слоя для первой стадии и по объему зоны массообмена намывного слоя для второй стадии. Имеем:

$$\bar{b}(r) = \frac{2}{r_3^2 - r_2^2} \int_{r_2}^{r_3} b_1 r dr; \quad \bar{b}_2(r) = \frac{2}{r_2^2 - r_1^2} \int_{r_1}^{r_2} b_2 r dr, \quad (14)$$

Совместно решая (11) — (14), получим:
для первой стадии —

$$\Delta p = \frac{14q}{2\pi l} \left(\frac{\ln r_2/r_1}{k_1} + \frac{\ln r_3/r_2}{\bar{k}} \right), \quad \bar{k} = k_2 \left(1 - \frac{\bar{b}_1}{n_0} \right)^3; \quad (15)$$

для второй стадии —

$$\Delta p = \frac{14q}{2\pi l} \left(\frac{\ln r_2/r_1}{k_1} + \frac{\ln r_0/r_2}{\bar{k}} + \frac{\ln r_3/r_0}{\bar{k}_0} \right), \quad \bar{k} = k_2 \left(1 - \frac{\bar{b}_2}{n_0} \right)^3. \quad (16)$$

Обобщая (15) и (16), изменение перепада давления в процессе кольматации можно представить формулой

$$\Delta p = \frac{14q}{4\pi l k_2} \zeta. \quad (17)$$

Здесь ζ — коэффициент сопротивления, равный

$$\zeta = \zeta_1 + \zeta_0 + \zeta_2, \quad i = 1, 2, \quad (18)$$

где

$$\zeta_1 = 2 \frac{k_1}{k_2} \ln \frac{r_2}{r_1}; \quad (19)$$

$$\zeta_0 = \ln(1 + \bar{g});$$

$$\zeta_2 = \left(\left\{ 1 - \frac{\bar{t}}{n_0 \bar{g}} [1 - \exp(-\bar{\gamma} \bar{g})] \right\}^{-3} - 1 \right) \ln(1 + \bar{g}); \quad (20)$$

$$\begin{aligned} \zeta_2 = & \left[\left(1 - \frac{b_0}{n_0} \right)^{-3} - 1 \right] \ln(1 + \bar{g}) - \left[\left(1 - \frac{b_0}{n_0} \right)^{-3} - \right. \\ & \left. - \left(1 - \frac{b_0}{n_0 \bar{\gamma}} \left(\bar{g} + \frac{1}{\bar{\gamma}} - \frac{\bar{t}}{b_0} \right)^{-1} \left\{ 1 - \exp \left[-\bar{\gamma} \left(\bar{g} + \frac{1}{\bar{\gamma}} - \frac{\bar{t}}{b_0} \right) \right] \right\} \right)^{-3} \right] \times \\ & \times \ln \left(1 + \bar{g} + \frac{1}{\bar{\gamma}} - \frac{\bar{t}}{b_0} \right); \end{aligned} \quad (21)$$

$$\bar{g} = \frac{2g}{b_0 r_2}; \quad \bar{\gamma} = \frac{\pi l r_2 b_0}{q}; \quad \bar{t} = \frac{q c_0 l}{\pi l r_2^2 \bar{\omega}}. \quad (22)$$

ζ_1 , ζ_0 и ζ_2 — коэффициенты сопротивления фильтрующего элемента, намывного слоя и вследствие кольматации в первой и второй стадиях.

Образование осадка взвешенных веществ на намывном слое рассмотрен в [1, 2]. В этом случае изменение перепада давления при постоянном расходе (рис. 2) равно

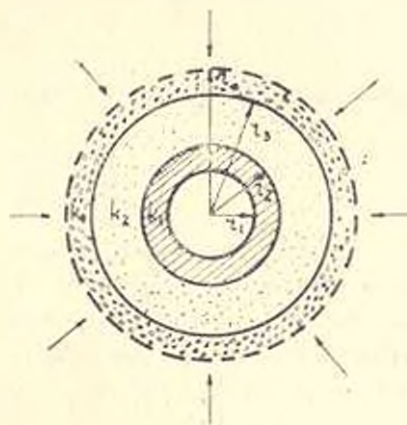


Рис. 2 Образование осадка на намывном слое

$$\Delta p = \frac{\nu q}{2\pi l} \left(\frac{\ln r_3/r_1}{k_1} + \frac{\ln r_3/r_2}{k_2} + \frac{\ln r_3/r_2}{k_3} \right), \quad (23)$$

где k_1 — коэффициент проницаемости осадка; r_1 — координата движущейся внешней границы слоя осадка:

$$r_1 = \sqrt{r_3^2 + \frac{qc_0 t}{\pi l \delta}}. \quad (24)$$

С учетом (23) и (24) изменение перепада давления можно представить формулой (17), в которой коэффициент сопротивления будет выражаться так:

$$\zeta = \zeta_1 + \zeta_2 + \zeta_3, \quad (25)$$

здесь ζ_3 — коэффициент сопротивления слоя осадка, равный

$$\zeta_3 = \frac{k_2}{k_1} \ln \frac{1 + g + \sqrt{1 + g^2}}{1 + g}, \quad (26)$$

Физико-химический процесс частичного кольматации намываемого слоя описывается (7) и (8). Этот процесс продолжается до тех пор, пока значение удельного объемного отложения на внешней поверхности намываемого слоя не достигнет критического значения b_* . Продолжительность этого процесса t_* определяется из (8) при условии $r = r_2$, $b = b_*$. Имеем:

$$t_* = \frac{b_*^2}{\gamma b_0 c_0}. \quad (27)$$

Изменение перепада давления во время частичного кольматации и образования осадка определяется выражениями (17) — (20) и (25) — (26).

Полученные расчетные зависимости позволяют определить продолжительность фильтроцикла намываемого фильтра при заданных предельном перепаде давления и допустимой концентрации фильтрата. Величины q , l , r_1 , r_2 , g , δ , δ_0 , μ , c_0 являются заданными (исходными), а параметры k_1 , k_2 , k_3 , μ_0 , γ , b_0 , b_* определяются по данным эксперимента. Методы определения этих параметров изложены в [1, 2].

Для проверки разработанной теории проведены опытно-промышленные испытания намываемого сорбционного фильтра НСФ-400 (с использованием порошкообразного активного угля БАУ или АГЗ) для глубокой очистки воды от растворенных органических соединений и гомодисперсных продуктов коррозии железа [1]. В процессе фильтрации воды через намыванный слой имел место частичный кольматаж намываемого слоя с дальнейшим образованием осадка на нем. Во время стадии частичного кольматации продолжительностью 12 часов наблюдалось незначительное повышение перепада давления в НСФ-400. Продолжительность фильтроцикла НСФ-400 составляла около 4 суток и

лимитировалась предельным перепадом давления 0,2 МПа. На рис. 3 приведен расчетный график зависимости коэффициента сопротивления от безразмерного параметра времени t , а также их опытные значения для двух фильтроциклов. Несмотря на заметное колебание температуры (15—40°С) и концентрации взвешенных веществ в воде (0,2—0,4 мг/л), отклонение расчетных значений перепада давления от опы-

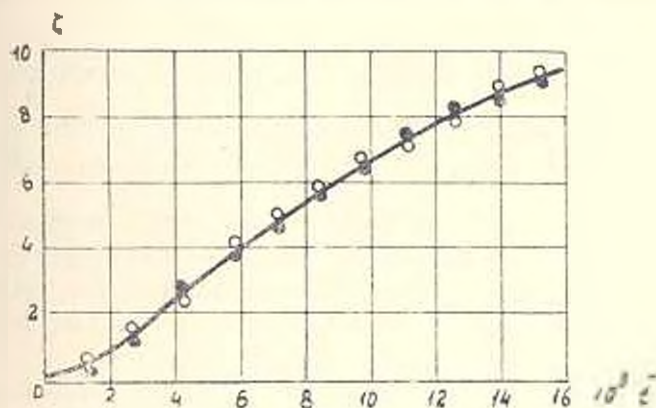


Рис. 3. График зависимости ζ от t .

ных не превышает 10%. Это сравнение показывает, что принятая расчетная модель достаточно хорошо описывает фильтрацию воды, содержащей взвешенные вещества, через намывной слой и полученные зависимости могут применяться при проектировании и эксплуатации намывных фильтров.

АрмНИИВНИИГ

16. II. 1983

Վ. Ս. ՍԱՐԿԻՍՅԱՆ, Ա. Բ. ՉԻՏԻՅԱՆ

ՋՐԻ ՄԱԿՐՈՄԱՆ և ԱՆԱԳՆՈՒՇԱԿԱՆ ՄԵԹՈԴԻԿԵՐԸ ՈՂՈՂԱԿՈՒՑ ՖԻԼՏՐՈՒՄ

Ա. Մ Վ Ր Ո Վ Ր Ո Ւ Մ

Դիտված են գլանային քամիչ էլեմենտներից բաղկացած ողողակուտ ֆիլտրում, փոշևնման շերտի միջով նուրբ տարրալուծված կախույթներ պարունակող ջրի ֆիլտրացիայի ֆիզիկաքիմիական և հիդրոդինամիկական պրոցեսները։ Բերված են հաշվարկային բանաձևեր, որոնք թույլ են տալիս որոշել ֆիլտրի աշխատանքի տևողությունը, երբ տրված են սահմանային ճնշման անկումը և ֆիլտրվող կախույթի թուլլատարելի խտությանը։ Ստացված հաշվային կապերը հնարավորություն են տալիս ողողակուտ շերտում, ժամանակի ցանկացած պահին որոշել կախույթի խտության և ճնշման անկման փոփոխությունները։

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Чичян А. Ж. Гидравлические исследования намывных сорбционных фильтров для глубокой очистки воды. — Дисс. канд. тех. наук. — М.: 1982. — 182 с.
2. Саркисян В. С., Чичян А. Ж. Закономерности фильтрования с образованием осадка на пористом патроне. Химия и технология воды. 1981. т. 3, № 5, с. 435—436.