



УДК 628.16

А.Б. Адельшин, Р.И. Ибяттов, С.В. Леонтьева

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ФИЛЬТРОВАНИЯ В НАМЫВНОМ ФИЛЬТРЕ

Эпидемическая безопасность и высокое качество воды в плавательных бассейнах обеспечиваются тщательным фильтрованием. Для повышения эффективности процесса очистки представляется перспективным фильтрование воды с добавлением тонкодисперсных фильтрующих материалов. Сущность метода заключается в нанесении вспомогательного материала, обладающего высокой пористостью, на фильтрующую поверхность. Процесс реализуется на намывных фильтрах.

Намывные фильтры отличаются своими малыми размерами, большой пропускной способностью, эффектом очистки воды, в том числе и от бактериальных загрязнений, а также незначительным расходом промывной воды, не более 1% пропускной способности фильтра. При этом себестоимость обработки воды снижается в среднем в 2 раза.

Предложенная нами [1] система предназначена для очистки циркулирующей воды плавательного бассейна. В состав системы входят плавательный бассейн, ёмкость разрыва струи с сетчатым префильтром, намывной фильтр, устройства для приготовления и дозирования фильтровального вещества, промывки фильтра, установка обеззараживания воды, компрессор, водонагреватель, насосы, трубопроводы, запорно-регулирующая арматура и КИП. Для подготовки суспензии фильтровального вспомогательного вещества используется вода и порошкообразный активированный уголь. Промывка намывного фильтра осуществляется водой и сжатым воздухом. Загрязненная вода из бассейна самотеком поступает в ёмкость разрыва струи, откуда насосами подается на очистку. Очищенная вода под остаточным давлением подается в бассейн [1].

Рассмотрим работу намывного фильтра, который состоит из вертикального цилиндрического корпуса, внутри которого размещены фильтрующие элементы патронного типа. Патроны представляют собой металлические перфорированные трубы с надетой на них фильтровальной тканью. В начале рабочего цикла, путем предварительной подачи суспензии, на поверхности патрона создается первичный намывной слой, толщиной  $\delta$ , именуемый в дальнейшем осадком. При работе аппарата вода бассейна фильтруется через указанный осадок, образуя второй верхний слой, толщиной  $h$ , переменной толщины (рис).

Производительность аппарата лимитируется скоростью фильтрации воды через двухслойный осадок. Гидродинамическая обстановка в аппарате принята квазистационарной. Поэтому работу рассматриваемого фильтра можно моделировать с помощью стационарных

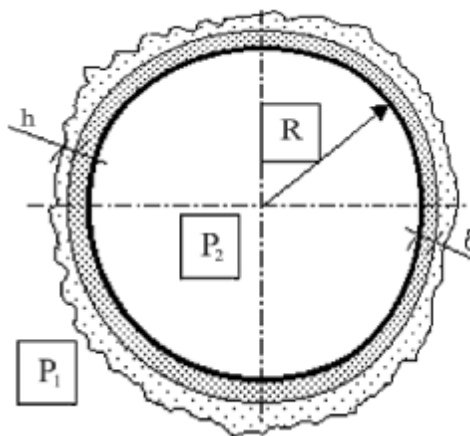


Рис.

уравнений фильтрации [2,3]:

$$\frac{\partial(rV_r)}{\partial r} = 0, \quad (1)$$

$$V_r = -\frac{k}{m} \frac{\partial P}{\partial r}. \quad (2)$$

Граничные условия следующие:

$$\text{при } r = R; P = P_2; \quad (3)$$

$$\text{при } r = R_1 + h; P = P_1, a_1 V_{r1} = e_1 V_r, \quad (4)$$

$$\text{при } t=0; h=0, \quad (5)$$

где:  $r$  - текущий радиус,  $P$  - давление в порах осадка,  $P_1, P_2$  - давления в камере исходной воды и патроне,  $\delta, h(t)$  - толщины нижнего и верхнего намывных слоев к моменту времени  $t$ ,  $R$  - радиус патрона,  $\mu$  - вязкость жидкости.

$R_1 = R + \delta = \text{const}$ ,  $V_{r1}$  - скорость фильтрации  $i$ -ой фазы,  $\alpha_1$  - концентрация исходной жидкости  $i$ -ой фазы;  $e_1$  - пористость верхнего слоя осадка.

Проницаемость комбинированного слоя определяется формулой [2]:

$$\kappa = \frac{1}{(b_0 + b_1 d + b_2 h)},$$

где:  $\beta_0$  - сопротивление патрона,  $\beta_1, \beta_2$  - удельное сопротивление нижнего и верхнего слоев осадка, соответственно.

После однократного интегрирования уравнения (1) имеем:

$$V_r = \frac{C_1}{r},$$

Интегрирование уравнения (2) с учетом полученного соотношения дает:



$$C_1 \ln r = -\frac{k}{m} P + C_2,$$

где  $C_1, C_2$  – постоянные интегрирования. Они определяются из граничных условий для давления (3) и (4):

$$C_1 \ln(R) = -\frac{k}{m} P_2 + C_2,$$

$$C_1 \ln(R+h) = -\frac{k}{m} P_1 + C_2.$$

Отсюда находим:

$$C_1 = \frac{k(P_1 - P_2)}{m[\ln R - \ln(R_1 + h)]};$$

$$C_2 = \frac{k}{m} \frac{P_1 \ln(R) - P_2 \ln(R_1 + h)}{\ln(R) - \ln(R_1 + h)}.$$

Тогда для давления в намывном слое и скорости фильтрации получим:

$$P = \frac{P_1 \ln(R) - P_2 \ln(R_1 + h) - (P_1 - P_2) \ln r}{\ln(R) - \ln(R_1 + h)}, \quad (6)$$

$$V_r = \frac{k}{m} \frac{P_1 - P_2}{r[\ln(R) - \ln(R_1 + h)]}. \quad (7)$$

Толщина верхнего слоя является величиной, зависящей от времени. Построим дифференциальное уравнение, описывающее изменение толщины. Количество тонкодисперсной фазы, осаждаемой за время  $t$  на фильтрующий патрон единичной длины, определяется соотношением:

$$q_2(t) = \int_0^t \int_0^{2p} r a_2 V_{2r} dj dt.$$

Отсюда, с учетом граничного условия (4) и считая  $V_{2r} \approx V_{1r}$ , имеем

$$\frac{dq_2}{dt} = 2pre_1 \frac{a_2}{a_1} V_r. \quad (8)$$

С другой стороны, количество осаждаемых частиц за время  $\Delta t$  определяется изменением площади поперечного сечения намывного слоя.

$$\frac{dq_2}{dt} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{e_2 p [(R_1 + \Delta h)^2 - R_1^2]}{\Delta t}.$$

Вычислим предел

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{(R_1 + \Delta h)^2 - R_1^2}{\Delta t} = 2R_1 h',$$

тогда

$$\frac{dq_2}{dt} = 2pR_1 e_2 h'. \quad (9)$$

Сравнивая (8) и (9), получим дифференциальное уравнение для толщины верхнего слоя:

$$\frac{dh}{dt} = \frac{k a_2 e_1}{m a_1 e_2 R_1} \frac{P_1 - P_2}{[\ln R - \ln(R_1 + h)]}. \quad (10)$$

Дифференциальное уравнение (10) решается методом разделения переменных:

$$\int (b_0 + b_1 d + b_2 h) [\ln R - \ln(R_1 + h)] dh = \int A dt.$$

После интегрирования  $C_3$  определяется из начальных условий (5):

$$C_3 = \left[ \frac{b_2 R_1^2 \ln(R_1)}{2} - \frac{3b_2 R_1^2}{4} - (b_0 + b_1 d) R_1 (\ln(R_1) - 1) \right] / A.$$

$$A = \left[ -\frac{a_2 e_1}{a_1 e_2} \frac{P_2 - P_1}{m} \frac{1}{(R_1 + d)} \right].$$

После вычисления интеграла и определения постоянного интегрирования  $C_3$  с помощью граничного условия (5) получим:

$$\begin{aligned} & \frac{b_2 h^2 \ln R}{2} + b h \ln R - \frac{b_2 (R_1 + h)^2}{2} \left[ \ln(R_1 + h) - \frac{1}{2} \right] + \\ & + (b_2 R_1 - b_0 - b_1 d)(R_1 + h) [\ln(R_1 + h) - 1] = \\ & = \frac{b_2 R_1^2}{2} \left( \ln R_1 - \frac{3}{2} \right) - (b_0 + b_1 d) R_1 (\ln R_1 - 1) + \frac{a_2 e_1}{a_1 e_2} \frac{P_1 - P_2}{m R_1} t. \quad (11) \end{aligned}$$

Для расчета толщины первичного слоя в уравнение (11) необходимо положить  $d = 0$ . Тогда  $h$  будет означать толщину первичного слоя.

Нелинейное уравнение (11) решается численно. После нахождения  $h(t)$  определяется скорость фильтрации. Производительность намывного фильтра определяется соотношением

$$Q = 2pre_1 V_r LN, \quad (12)$$

где  $L$  и  $N$  – длина и число патронов.

Полученные зависимости позволяют производить вычислительный эксперимент и определять геометрические размеры фильтра, обеспечивающие заданную производительность.

### Литература

1. Адельшин А.Б., Бусарев А.В., Леонтьева С.В., Селюгина А.С. Проектирование оборотной системы водоснабжения мини-бассейнов // Актуальные проблемы ЖКХ и социальной сферы города. Материалы НПК студентов и аспирантов. Казань 2000. - С. 7
2. Жужиков В.А. Фильтрация. Теория и практика разделения суспензий. - 4-е изд., перераб. и доп. - М.: Химия, 1980. - 400с.
3. Николадзе Г.И., Сомов М.А. Водоснабжение. Учеб. для вузов. - М.: Стройиздат, 1995. - 688с.