МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФИЛЬТРОВАНИЯ ПОРИСТОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ СВС-ФИЛЬТРА

В.В. Евстигнеев, Ж.М. Исаева, В.И. Пролубников, Н.П. Тубалов

Моделированию процессов фильтрования посвящен ряд работ [1-3] В данном разделе рассматривается модель гидромеханического процесса фильтрования полидисперсной суспензии с учетом закупорки пор, вызванной прохождением частиц дисперсной фазы через пористую перегородку. В рамках модели будем считать радиусы частиц дисперсной фазы R и радиусы фильтрующей перегородки r случайными непрерывно распределенными величинами. Прохождение частиц дисперсной фазы через фильтрующую перегородку обусловлено рядом случайных факторов, попадание данной частицы на поверхность поры фильтрующей перегородки, соотношение между радиусом данной дисперсной частицы и радиусом поры, на поверхность которой частица попала, и, соответственно, прохождение частицы через пору фильтрующей перегородки в фильтрат или закупорка поры. Поэтому описание процесса носит вероятностный характер.

Обозначим через $P(R,\ t,\ \tau)$ функцию вероятности попадания дисперсной частицы радиусом R к моменту времени t в фильтрат при ее вводе в фильтр в момент времени τ, а через $P_ж(t,\tau)$ – функцию вероятности, имеющую аналогичный смысл для молекул сплошной фазы. Естественно считать, что размер молекул сплошной фазы намного меньше размера пор фильтрующей перегородки, поэтому функция $P_ж(t,\tau)$ обозначает вероятность того, что любая молекула сплошной фазы, введенная в фильтр в момент времени τ, окажется к моменту времени t в фильтрате.

Будем предполагать, что процесс фильтрования является непрерывным. Тогда математическое ожидание массы частиц дисперсной фазы, которая окажется в фильтрате к моменту времени t, можно записать, используя введенную функцию вероятности $P(R,\ t,\ \tau)$:

$$EM(t) = \int_0^t \int_{R_{min}}^{R_{max}} P(R,t,\tau)F(R,\tau)c(\tau)w(\tau)dRd\tau\ ,(1)$$

где R_{max} R_{min} – максимальный и минимальный размер частиц в суспензии, соответственно; $c(\tau)$ – массовая концентрация дисперсной фазы в суспензии; $F(R,\tau)$ – дифференциальная функция распределения твердых частиц по размерам в момент времени τ; $w(\tau)$ – объемная скорость ввода суспензии в фильтр.

Аналогично можно определить математическое ожидание жидкой фазы в фильтрате:

$$EV_ж(t) = \int_0^t P_ж(t,\tau)w(\tau)d\tau\ . \qquad (2)$$

Очевидно, что при большой концентрации дисперсных частиц в суспензии вероятность их попадания в фильтрат велика и, следовательно, масса дисперсной фазы M(t), оказавшейся в фильтрате к моменту времени t, будет мало отличаться от ее математического ожидания. Это обстоятельство позволяет использовать формулу (1) для вычисления M(t).

Для упрощения поставленной задачи ограничимся случаем агрегативно устойчивых дисперсных систем, то есть будем считать, что рассматриваемую дисперсную систему можно считать суспензией на протяжении всего процесса фильтрования. Кроме того, будем считать, что объемная скорость ввода суспензии в аппарат является постоянной: $w(\tau)=w$.

Учитывая сделанное предположение о режиме проведения процесса фильтрования, из формулы (2) легко определить объем жидкой фазы, прошедший в фильтрат к моменту времени t:

$$V_ж(t) = wt. \qquad (3)$$

Очевидно, что, в отличие от вероятности попадания дисперсных частиц в фильтрат $P(R,\ t,\ \tau)$, вероятность попадания молекул жидкой фазы в фильтрат $P_ж(t,\tau)$ тем больше, чем меньше концентрация дисперсных частиц в суспензии. Поэтому соотношение (3) можно считать справедливым для малоконцентрированных суспензий с насжимаемой жидкой фазой.

Обозначим через S площадь сечения фильтрующей перегородки. Тогда линейную скорость поступления суспензии в фильтр можно записать в виде:

$$V = w/S = w/2\pi r_ф l, \qquad (4)$$

где $r_ф$ – средний радиус фильтровальной перегородки; l – высота фильтроэлемента.

Без ограничения общности будем предполагать, что при подходе к фильтрующей перегородке все частицы дисперсной фазы движутся с одинаковой скоростью, равной линейной скорости v, определяемой при помощи соотношения (4).

Определим вероятность попадания в фильтрат частицы радиуса R в момент времени t при ее вводе в момент времени τ, то есть P(R, t, τ). С этой целью определим среднюю скорость прохождения пор фильтрующей перегородки молекулами дисперсной среды $v_п(t)$:

$$v_п(t) = \frac{w}{P_н(t)S_п}, \quad (5)$$

где $P_н(t)$ – вероятность того, что пора не будет закупорена к моменту времени t; $S_п$ – суммарная площадь поперечного сечения всех пор.

Предположим, что суспензия имеет постоянный дисперсный состав, концентрация дисперсных частиц также является постоянной:

$$F(R, \tau) = F(R); \; c(R) = c. \quad (6)$$

Тогда время фильтрования будет складываться из времени прохождения частицами дисперсной фазы части аппарата до фильтрующей перегородки H/v и из времени прохождения самой перегородки $h/v_п(t)$. Следовательно, если частица дисперсной фазы была введена в фильтр в момент времени τ, то к моменту времени $t > \tau$ можно предположить, что:

$$P(R, t, \tau) = 0 \text{ при } (t - \tau) < \left(\frac{H}{v} + \frac{h}{V_п(t)}\right). \quad (7)$$

Для определения вероятности попадания частицы дисперсной фазы в фильтрат P(R, t, τ) при условии, обратном условию (7), необходимо найти вероятность закупорки пор к моменту времени t. Пусть при t = 0 суспензия поступает в фильтр. Тогда процесс фильтрования начнется в момент времени t = H/v. Далее будем предполагать, что толщина фильтрующей перегородки много меньше расстояния до фильтрующей перегородки h<<H и в условии (7) можно пренебречь величиной $h/v_п(t)$ по сравнению с величиной H/v. Это допущение ограничивает рассматриваемую задачу случаем тонких фильтрующих пленок.

Примем следующую модель закупорки поры одной частицей [4, 5]. Пусть каждая пора радиусом r расширяется на поверхности до радиуса βr. При попадании твердой сферической частицы радиуса R в такую пору она проходит через нее при условии R<r, а при R>r происходит закупоривание поры. При этом на поверхности фильтрующей перегородки твердые частицы удерживаются силами адгезии. Из сказанного выше следует, что вероятность закупорки поры радиусом r при подходе к фильтрующей перегородке частицы радиусом R>r будет равна отношению площади поперечного сечения данной поры на поверхности фильтрующей перегородки $\pi(\beta r)^2$ к площади сечения перегородки πdl.

Пусть к моменту времени t к фильтрующей перегородке подходит n(r, t) частиц радиусом R>r. тогда вероятность того, что данная пора радиусом r не будет закупорена к моменту времени t, согласно теореме умножения вероятностей, можно определить при помощи следующего предположения:

$$P^*(r, t) = \left(1 - \frac{\beta^2 \pi r^2}{S}\right)^{n(r,t)}. \quad (8)$$

Определим число частиц n(r, t). Очевидно, что при t < H/v ни одна частица не успеет подойти к фильтрующей перегородке:

$$n(r, t) = 0 \text{ при } t < H/v. \quad (9)$$

Для того, чтобы определить число частиц радиусом R > r, которое подходит к фильтрующей перегородке, то есть при $t \geq H/v$, используем введенную ранее функцию распределения дисперсной фазы по размерам F(R). Согласно определению, массовая доля частиц с радиусом, меньшим R, будет равна F(R)dR. С другой стороны, указанную массовую долю можно выразить через долю числа частиц с радиусом, меньшим R, в виде $4/3(\pi R^3 \rho dN)$, где ρ - плотность частиц дисперсной фазы. Следовательно,

$$4/3(\pi R^3 \rho dN) = F(R)dR. \quad (10)$$

Полное число частиц в суспензии можно определить, проинтегрировать равенство (10) в пределах от R_{min} до R_{max}, откуда находим:

$$N = \frac{3}{4\pi\rho} \cdot \int_{R_{min}}^{R_{max}} \frac{F(R)dR}{R^3}. \quad (11)$$

Частичная концентрация суспензии ν и массовая концентрация суспензии с связаны между собой соотношением $\nu = cN$; подставив в это равенство (11), подучим выражение для частичной концентрации:

$$\nu = \frac{3c}{4\pi\rho} \cdot \int_{R_{min}}^{R_{max}} \frac{F(R)dR}{R^3}. \quad (12)$$

Поскольку нас интересуют только частицы радиусом R > r, то частичная концентрация таких частиц ν_r будет отличаться от (12) заменой нижнего предела интегрирования:

$$\nu_r = \frac{3c}{4\pi\rho}\cdot\int_r^{R_{max}} \frac{F(R)dR}{R^3}\ . \qquad (13)$$

Используя функцию ν_r, число частиц n(r, t) радиусом R>r, подходящих к моменту времени $t \geq H/v$ к фильтрующей перегородке, можно записать в виде:

$$n(r,\ t) = \omega\cdot\left(t-\frac{H}{v}\right)\nu_r\ . \qquad (14)$$

Подставив в (14) выражение для ν_r (13), получим:

$$n(r,\ t) = \frac{3c\omega}{4\pi\rho}\cdot\left(t-\frac{H}{v}\right)\int_r^{R_{max}} R^{-3}F(R)dR\ . \qquad (15)$$

Введем обозначение:

$$\varphi(r) = \frac{3c\omega}{4\pi\rho}\cdot\int_r^{R_{max}} R^{-3}F(R)dR\ , \qquad (16)$$

которое в дальнейшем будем использовать для сокращения описания.

Таким образом, функция n(r, t) имеет следующий вид:

$$n(r,\ t) = \begin{cases} 0 \quad \text{при} \quad t\angle H/v: \\ \varphi(r)\left(t-\frac{H}{v}\right) \quad \text{при} \quad t \geq H/v, \end{cases}. \qquad (17)$$

Используя соотношение (8), можно определить значение разности давлений, необходимое для осуществления процесса фильтрования полидисперсной суспензии в рассматриваемом режиме. С этой целью будем считать, что скорость фильтрования в момент времени t остается равной скорости фильтрования в начальный момент времени, осадок на поверхности не образуется, жидкость является ньютоновской и при закупорке поры жидкая фаза полностью перестает через нее проходить.

Введем дифференциальную функцию распределения пор фильтрующей перегородки по размерам $F_п(r)$ (считаем, что структура фильтрующей перегородки остается неизменной со временем).

Определим скорость фильтрования как объемный поток фильтрата q (то есть объем жидкой фазы, прошедший через фильтрующую перегородку в единицу времени). Будем предполагать, что движения жидкости в порах фильтрующей перегородки подчиняется закону Гагена – Пуазейля для движения в прямолинейных каналах:

$$\frac{\Delta p}{h} = \frac{8\mu q}{\pi r^4}\ , \qquad (18)$$

где Δp – перепад давления на концах капилляра; h – длина капилляра; μ - вязкость жидкости; r – радиус капилляра.

Тогда скорость фильтрования в рассматриваемом случае будет определяться равенством:

$$q = \frac{\pi r^4 \Delta p}{8\mu h}, \qquad (19)$$

где Δp – перепад давления по обе стороны фильтрующей перегородки; h – толщина фильтрующей перегородки, совпадающая с длиной поры; r – радиус поры.

Усредняя выражения (19) по всем порам с функцией распределения $F_п(r)$, находим скорость фильтрования в начальный момент времени:

$$q(0) = \frac{\pi\Delta p(0)}{8\mu h}\cdot\int_{r_{min}}^{r_{max}} r^4 F_п(r)dr\ . \qquad (20)$$

Для того, чтобы определить скорость фильтрования в момент времени t, необходимо усреднить выражение (19) по всем порам, которые к моменту времени t не будут закупорены. При этом используем выражение (8) для соответствующей вероятности $P^*(r,\ t)$:

$$q(0) = \frac{\pi\Delta p(t)}{8\mu h}\cdot\int_{r_{min}}^{r_{max}} r^4 F_п(r)\left(1-\frac{\beta^2\pi r^2}{S}\right)^{\varphi(r)\left(t-\frac{H}{v}\right)} dr \qquad (21)$$

Приравнивая выражения (20) и (21), находим значение разности давлений, необходимой для осуществления процесса фильтрования в заданном режиме:

Δp(t) = Δp(0)

$$\Delta p(t) = \Delta p(0)\int_{r_{min}}^{r_{max}} r^4 F_п(r)dr\left\{\int_{r_{min}}^{r_{max}} r^4 F_п(r)\left(1-\frac{\beta^2\pi r^2}{S}\right)^{\varphi(r)\left(t-\frac{H}{v}\right)} dr\right\}^{-1}$$

(22)

Соотношения (22) для расчета Δp(t) справедливо, в соответствии с принятыми при его выводе допущениями, только для ньютоновских жидкостей. Все формулы до (17) включительно применимы также для неньютоновских жидкостей, поскольку при их выводе были использованы вероятностные методы.

Определим теперь вероятность P(R, t) того, что дисперсная частица радиусом R, попавшая на поверхность фильтрующей перегородки в момент времени t, пройдет через нее. Поскольку временем прохождения твердой частицы через фильтрующую перегородку можно пренебречь по сравнению со временем прохождения данной частицей части аппарата над фильтрующей перегородкой, будем считать, что если частица попала в момент времени t на поверхность фильтрующей перегородки и прошла ее, то она окажется в фильтрате также в момент времени t. Имеем:

$$P(R,t) = \beta^2 \frac{S_{\text{п}}}{S} \cdot \int_{r_{min}}^{r_{max}} F_{\text{п}}(r) P^*(r,t) dr\,, \qquad (23)$$

где $S_{\text{п}}$ – суммарная площадь поперечного сечения всех пор внутри фильтрующей перегородки; $\beta^2 S_{\text{п}}$ – суммарная площадь поперечного сечения всех пор на поверхности фильтрующей перегородки.

Подставив (8) в (23), получим:

$$P(R,t) = \beta^2 \frac{S_{\text{п}}}{S} \cdot \int_{r_{min}}^{r_{max}} F_{\text{п}}(r) \left(1 - \frac{\beta^2 \pi r^2}{S}\right)^{\varphi(r)\left(t - \frac{H}{v}\right)} dr\,. \qquad (24)$$

В начале данного раздела была введена функция вероятности попадания частицы радиуса R в фильтрат в момент времени t при вводе ее в фильтрат в момент времени τ. Для нахождения этой вероятности необходимо определить вероятность попадания частицы на поверхность фильтрующей перегородки в момент времени t при вводе ее в аппарат в момент времени τ. Очевидно, что эта вероятность, которую обозначим через $P_0(R, t, \tau)$, будет иметь вид:

$$P_0(R,t,\tau) = \begin{cases} 0 & \text{при} \quad t - \tau \angle H/v; \\ 1 & \text{при} \quad t - \tau \ge H/v. \end{cases} \qquad (25)$$

Кроме того, необходимо определить вероятность прохождения частицей фильтрующей перегородки P (R, t). Эта величина определяется соотношением (24).

Поскольку прохождение частицы через фильтрующую перегородку возможно лишь при условии попадания данной частицы на поверхность фильтрующей перегородки, то для определения вероятности $P(R, t, \tau)$ воспользуемся формулой для условной вероятности:

$$P(R, t, \tau) = P(R, \tau + H/v) \cdot P_0(R, t, \tau) \qquad (26)$$

Подставив в (26) выражение для вероятностей (24) и (25), получим:

$$P(R,t,\tau) \begin{cases} 0 & \\ \beta^2 \dfrac{S_{\text{п}}}{S} \cdot \displaystyle\int_{r_{min}}^{r_{max}} F_{\text{п}}(r) \left(1 - \frac{\beta^2 \pi r^2}{S}\right)^{\varphi(r)\tau} & \end{cases} \begin{matrix} \text{при} \quad t - \tau \angle H/v; \\ \text{при} \quad t - \tau \ge H/v. \end{matrix}$$

. (27)

Используя соотношение (27), можно проводить анализ зависимости вероятности попадания частицы дисперсной фазы в фильтрат от времени фильтрования при учете закупорки пор.

Определим массу дисперсной фазы M(t), которая окажется в фильтрате к моменту времени t. При этом будем считать, что математическое ожидание функции M(t) приближенно равно значению этой функции. Тогда для определения M(t) подставим в уравнение (1) выражение для вероятности (27). Кроме того, используем соотношение (6) и условие постоянства объемной скорости ввода суспензии в фильтр. Имеем:

$$M(t) \approx \int_{H/v}^{t} \omega c \cdot \int_{R\,min}^{R_{max}} \beta^2 \frac{S_{\text{п}}}{S} \cdot \int_{r_{min}}^{r_{max}} F_{\text{п}}(r) F(R) \left(1 - \frac{\beta^2 \pi r^2}{S}\right)^{\varphi(r)\tau} dR\,dr\,d\tau$$

(28)

В соотношении (28) можно произвести интегрирование по переменной τ, в результате чего получим:

$$M(t) \approx \beta^2 \frac{S_{\text{п}} \omega c}{S} \int_{R\,min}^{R\,max} F(R) \int_{R}^{r_{max}} \frac{F_{\text{п}}(r)}{\varphi(r) \ln\left(1 - \frac{\beta^2 \pi r^2}{S}\right)} \cdot \left[\left(1 - \frac{\beta^2 \pi r^2}{S}\right)^{\varphi(r)\tau} - \left(1\right.\right.$$

(29)

Формулы (28), (29) могут применяться для расчета массы дисперсной фазы, оказавшейся в фильтрате к моменту времени t, также в некоторых случаях фильтрования с образованием осадка, поскольку допущения, принятые при выводе этих соотношений, не исключают такого характера протекания процесса.

Пусть частицы, образовавшие осадок, не перемещаются. При этом происходит частичная закупорка пор. Кроме того, будем считать, что наклонные поры, пронизывающие осадок и фильтрующую перегородку, являются непроходимыми для частиц дисперсной фазы. Это условие связано с предположением о равномерном и прямолинейном движении частиц дисперсной фазы над фильтрующей перегородкой. Тогда можно определить дифференциальную функцию распределения открытых вертикальных пор, пронизывающих фильтрующую перегородку и осадок в момент времени t, в виде отношения:

$$\frac{F_n P^*(r,t)}{\int_{r_{min}}^{r_{max}} F_n P^*(r,t) dr}\,. \qquad (29а)$$

При этом учитываются эффекты, как неравномерный рост осадка на фильтрующей перегородке, постепенная закупорка пор и возможность образования пор в осадке дисперсной фазы. В рассматриваемом случае для вероятности попадания дисперсной частицы радиуса R в момент времени t в фильтрат при вводе ее в фильтр в момент τ можно записать:

$$P(R, t, \tau) = P^1(R, t)\, P^{у}_0(R, t, \tau), \qquad (30)$$

где $P^1(R, t)$ – вероятность попадания частиц дисперсной фазы на площадь, расположенную над незакупоренными порами с радиусом, большим R;

$P^y{}_0(R, t, \tau)$ – условная вероятность попадания частицы в фильтрат при условии ее попадания на площадь, расположенную над незакупоренными порами с r > R.

$$P^1(R, t) = P(R, t);\quad P^y{}_0(R, t, \tau) = P_0(R, t, \tau), \quad (31)$$

и соотношение (30) полностью совпадает с соотношением (26). Следовательно, учитывая предположения, сделанные при выводе равенств (31), можно использовать соотношения (28) и (29) при протекании процесса фильтрования с образованием осадка дисперсной фазы на фильтрующей перегородке.

Рассмотрим процесс фильтрования суспензии, протекающий при постоянной разности давлений ΔP(0). При этом объемная скорость подачи суспензии уже не является постоянной величиной. Учитывая это, для числа частиц n (r, t) с радиусом, большим r, которые подходят к перегородке в момент времени t, вместо (2.17) можно записать:

$$n(r, t) = \int_{H/v}^{t} \frac{3\omega(\tau)c}{4\pi\rho} \int_{r}^{R_{max}} \frac{F(R)dR}{R^3} d\tau . \quad (32)$$

Скорость ввода суспензии в фильтр в момент времени t в случае ньютоновской жидкости определяется выражением, аналогичным (21):

$$\omega(t) = \frac{\pi\Delta p(t)}{8\mu h} N_n \int_{r_{min}}^{r_{max}} r^4 F_п(r) \left(1 - \frac{\beta^2 \pi r^2}{S}\right)^{n(r,t)} dr , \quad (33)$$

где N_n – число пор фильтрующей перегородки.

Выше, при определении разности давлений, необходимой для осуществления процесса фильтрования в рассматриваемом случае, был использован закон Гагена-Паузейля (18), справедливый для ньютоновских жидкостей. С этой целью определим объемную скорость фильтрования q(t) через данную пору радиусом r. Она может быть найдена как среднее по сечению поры значения скорости движения жидкости внутри поры:

$$\frac{1}{\pi r^2} q(t) = \frac{1}{\pi r^2} \int_0^r 2\pi x v_n(x, t) dx \quad (34)$$

Интегрируя это равенство по частям, находим:

$$q(t) = 2\pi r^2 v_п^{ст}(r, t) - \pi \int_0^r x^2 \frac{dv_n}{dx} dx , \quad (35)$$

где $v_п^{ст}(r, t)$ – скорость скольжения частицы на стенке поры.

Будем предполагать, что, как и в случае ньютоновских жидкостей $v_п^{ст}(r, t)$ равно нулю. Введем касательное напряжение внутри поры, которое обозначим через σ. Для неньютоновских жидкостей можно написать соотношение, связывающее касательное напряжение σ и поперечный градиент скорости dv_n/dx, в виде:

$$\frac{dv_n}{dx} = -\varphi(\sigma) . \quad (36)$$

В частном случае ньютоновской жидкости это соотношение переходит в известное линейное соотношение с постоянным коэффициентом вязкости:

$$\frac{dv_n}{dx} = -\frac{1}{\mu}\sigma . \quad (37)$$

Будем предполагать, что распределение касательных напряжений внутри поры линейные [6]:

$$\sigma = \sigma_{ст} \frac{x}{r} , \quad (38)$$

где $\sigma_{ст}$ – касательное напряжение у стенки поры.

Используя (36) и (38) и переходя к интегрированию по σ, преобразуем выражение для скорости фильтрования (35):

$$q(t) = \pi \frac{r^3}{\sigma_{ст}^3} \int_0^{\sigma_{ст}} \sigma^2 \varphi(\sigma) d\sigma . \quad (39)$$

Осредняя полученное соотношение (39) по всем порам, которые к моменту времени t не будут закупорены и умножая его на число пор, находим скорость ввода суспензии в момент времени t для неньютоновской жидкости:

$$\omega(t) = \pi N_n \int_{r_{min}}^{r_{max}} \frac{r^3 F_n(r)}{\sigma_{ст}^3(r)} \left(1 - \frac{\beta^2 \pi r^2}{S}\right)^{n(r,t)} \int_0^{\sigma_{ст}} \sigma^2 \varphi(\sigma) d\sigma . \quad (40)$$

При выводе соотношения (40) было использовано выражение (8) для вероятности P*(r, t) того, что пора радиуса r к моменту времени t не будет закупорена. Касательное напряжение на стенке может быть определено из следующего соотношения:

$$\sigma_{ст} = \frac{1}{2} \Delta p(0) \frac{r}{h} . \quad (41)$$

Уравнения (32), (33) представляют собой замкнутую систему для определения функций n(r, t) и ω(t). В силу того, что при t < H/v n(r, t) = 0 для этих моментов времени легко рассчитать значение скорости ω(t). Задаваясь полученными значениями, определяем значения n(r, t) при t < H/v. Указанная процедура позволяет получить приближенные зависимости n(r, t) и ω(t) путем численного расчета. После такого расчета можно найти массу фильтрата и содержание в нем дисперсной фазы в режиме фильтрования при постоянном давлении с помощью уравнений (1) и (2). В случае, если зависимость скорости ввода суспензии в аппарат ω(t) является известной, определим массу дисперсной фазы, находящейся в фильтрате к моменту времени t:

M(t)≈

$$M(t) \approx \int_{H/v}^{t} \omega(\tau)c(\tau) \int_{R_{мин}}^{R_{макс}} \frac{\beta^2 S_п}{S} \int_{R}^{r_{макс}} F_п(r)F(R)\left(1 - \frac{\beta^2 \pi r^2}{S}\right)^{n(r,\tau)} drdRd\tau \qquad (42)$$

Значение n(r, t) определяется в этом случае по формуле (32) при заданной зависимости ω(t).

Результаты, полученные в данном разделе, могут быть использованы также для расчета количества дисперсной фазы в фильтрате при фильтровании через слои намывных осадков. При этом следует учитывать изменение функции изменения пор по размерам $F_п$(r, t), обусловленное образованием осадков. Изложенная выше статистическая модель отражает общий подход к анализу процессов фильтрования полидисперсных систем с различными свойствами.

Литература

1. Жужиков В.А. Фильтрование. – М.: Химия, 1980. – 400 с.
2. Коваленко В.П., Ильинский А.А. Основы техники очистки жидкостей от механических загрязнений. – М.: Химия, 1982. – 272 с.
3. Дильман В.В. Методы модельных уравнений и аналогий в химической технологии. – М.: Химия, 1988. – 302 с.
4. Джонсон К. Численные методы в химии. – М.: Мир, 1983. – 503 с.
5. Коновалов В.М., Стругацкий В.Я., Рокшевский В.А. Очистка рабочих
6. Капцевич В.М., Сорокина А.Н. Режимы течения газа в пористой бронзе. – Минск: Высш. шк., 1982. – С. 46-49.