

Инженерный расчет фильтрования суспензии через однородную и двухслойную загрузки

В.Л.Поляков, Институт гидромеханики НАН Украины, г.Киев

Ключевым при формализации разделения суспензии фильтрованием является описание отложения взвешенных частиц в порах загрузки. В теоретических исследованиях фильтрования широко практикуются два подхода к учету этого явления, имеющего сложную физико-химическую природу. Более обоснованным является представление об удалении взвеси как результате процессов прилипания к фильтрующему материалу и отрыва прилипших частиц суспензии. Тогда уравнения линейной кинетики массообмена между твердой и жидкой фазами и массопереноса будут иметь вид

$$\frac{\partial S}{\partial t} = \alpha C - \beta S, \quad V \frac{\partial C}{\partial z} + \frac{\partial S}{\partial t} = 0, \quad (1)$$

где S , C - объемные концентрации осажденных и взвешенных частиц; α , β - коэффициенты скоростей прилипания и отрыва частиц суспензии, V - скорость фильтрования.

Нелинейной кинетике в литературе уделено намного меньше внимания. Система уравнений (1) дополняется условиями

$$z = 0, \quad C = C_0, \quad t = 0, \quad S = 0. \quad (2)$$

Строгое решение задачи (1)-(2) при постоянной скорости V известно давно, но не нашло применения в инженерной практике вследствие его интегральной формы. Построено очень простое приближенное решение, которое, тем не менее, обеспечивает высокую точность расчетов всех характеристик фильтрования. Из него вытекают зависимости для относительных концентраций

$$\bar{C}(\bar{z}, \bar{t}) = \frac{\bar{C}(z, t)}{C_0} = 2e^{-\lambda_1(\bar{t})\bar{z}} - e^{-\bar{\alpha}\bar{z}}, \quad \bar{S}(\bar{z}, \bar{t}) = \frac{S(z, t)}{n_0 C_0} = \lambda_1(\bar{t})\bar{t}e^{-\lambda_1(\bar{t})\bar{z}}, \quad (3)$$

где $\bar{z} = z/L$, $\bar{t} = Vt/(n_0L)$, $\lambda_1 = 2\alpha/(2 + \bar{\beta}\bar{t})$, $\bar{\alpha} = \alpha L/V$, $\bar{\beta} = \beta n_0 L/V$, L - высота загрузки, n_0 - пористость чистой загрузки.

Тогда выходная концентрация взвеси со временем будет расти следующим образом

$$\bar{C}_e(\bar{t}) = \bar{C}(1, \bar{t}) = 2e^{-\lambda_1(\bar{t})} - e^{-\bar{\alpha}}. \quad (4)$$

Используя критерий качества фильтрата ($C_e \leq C_{e*}$), из (4) выводится формула для относительного времени \bar{t}_p защитного действия загрузки

$$\bar{t}_p = \frac{2}{\bar{\beta}} \left[\frac{\bar{\alpha}}{\ln 2 - \ln(\bar{C}_{e*} + e^{-\bar{\alpha}})} - 1 \right]. \quad (5)$$

Если время \bar{t}_p задано, то можно определять соответствующие ему высоту загрузки или скорость фильтрования с помощью уравнения

$$2 \exp \left[-\frac{2L\alpha(V)}{2V + t_p V \beta(V)} \right] - \exp \left[-\frac{L\alpha(V)}{V} \right] = \bar{C}_{e*}. \quad (6)$$

При вычислении V учитывается зависимость коэффициентов α, β от нее. Чрезмерный рост потерь напора в загрузке Δh , который ведет к сниже-

нию производительности фильтра, легко прогнозировать благодаря выводу расчетной формулы на базе выражения для \bar{S} (3), уравнения

$$V = -k(S_d) \frac{\partial h}{\partial z}, \quad (7)$$

эмпирических зависимости для коэффициента фильтрации k и соотношения

$$k = k_0 \left[1 - \left(\frac{S_d}{n_0} \right)^{m_1} \right]^{m_2}, \quad S_d = \gamma S. \quad (8)$$

где $h(z, t)$ – функция напора, S_d – объемная концентрация осадка, k_0 – коэффициент фильтрации чистой загрузки, m_1 , m_2 , γ – эмпирические коэффициенты.

Более общий случай, когда состав осадка по мере его накопления меняется и, следовательно, γ зависит от S , исследован ранее. В итоге вышеупомянутая формула при $m_2 = 3$ получена в таком виде

$$\Delta \bar{h}(\bar{t}) = \frac{1}{\lambda_1} \left[\frac{2\lambda_2}{1-\lambda_2} \frac{e^{\lambda_1} - 1}{e^{\lambda_1} - \lambda_2} - \frac{\lambda_2^2}{2(e^{\lambda_1} - \lambda_2)^2} + \frac{\lambda_2^2}{2(1-\lambda_2)^2} + \ln \frac{e^{\lambda_1} - \lambda_2}{1-\lambda_2} \right], \quad (9)$$

где $\Delta \bar{h} = \Delta h / (h(0,0) - H_d)$,

H_d – напор на выходе из загрузки.

Время действия фильтра ограничивается вследствие больших затрат механической энергии на фильтрование. Поэтому при установлении длительности фильтроцикла t_f следует наряду с t_p также определять относительное время t_h достижения в загрузке предельно допустимых потерь напора Δh_* , решая подбором уравнение $\Delta \bar{h}_* = \Delta \bar{h}(\bar{t}_h)$.

Существенным недостатком традиционных фильтров с однородной загрузкой является быстрое увеличение потерь Δh из-за сильной неравномерности распределения осадка по высоте и, как следствие, сокращение времени t_h и длительности t_f . Для продления работы фильтров применяют слоистые загрузки, обычно двухслойные.

Расчет фильтрования через двухслойную загрузку предлагается выполнять, опираясь на приведенные выше формулы, причем применительно к верхнему слою их можно использовать непосредственно. При переходе к нижнему слою вид модели сохраняется. Меняются только значения исходных параметров и входная концентрация становится переменной в соответствии с (4). Ход решения задачи для этого слоя усложняется, однако расчетные формулы и уравнения оказались весьма простыми. Основной среди них является формула для выходной концентрации взвеси

$$\bar{C}_{2e}(\bar{t}) = 2F(\bar{t}) e^{\frac{-2\bar{\alpha}_2(1-\bar{L}_1)}{2+\beta_2\bar{t}}} + [\bar{C}_e(\bar{t}) - 2F(\bar{t})] e^{-\bar{\alpha}_2(1-\bar{L}_1)}, \quad (10)$$

где коэффициенты $\bar{\alpha}_i$, β_i относятся к i -му слою ($i = 1, 2$), $\bar{L}_1 = \frac{L_1}{L}$, $L = L_1 + L_2$, L_1 – мощность верхнего (первого) слоя, $\bar{C}_e(\bar{t})$ вычисляется по (4),

$$F(\bar{t}) = \frac{2}{\bar{\beta}_1 \bar{t}} \left\{ (2 + \bar{\beta}_1 \bar{t}) e^{-\frac{2\bar{\alpha}_1 \bar{L}_1}{2 + \bar{\beta}_1 \bar{t}}} - 2e^{-\bar{\alpha}_1 \bar{L}_1} + 2\bar{\alpha}_1 \bar{L}_1 \left[Ei(-\bar{\alpha}_1 \bar{L}_1) - Ei\left(-\frac{2\bar{\alpha}_1 \bar{L}_1}{2 + \bar{\beta}_1 \bar{t}}\right) \right] \right\} e^{-\bar{\alpha}_1 \bar{L}_1},$$

интегральная показательная функция $Ei(-x)$ детально затабулирована, а также вычисляется с любой точностью с помощью стандартных пакетов программ. Потери напора определяются отдельно в верхнем и нижнем слоях по формуле (9), а затем складываются.

Разработанный инженерный метод расчета осветления суспензии фильтрованием эффективен при изучении его закономерностей, обосновании конструктивных и технологических параметров.