СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А*фанасьев, Ю. О*. Влияние зернистого слоя на пленочную конденсацию / Ю.О. Афанасьев, И.В. Дворовенко, С.И. Лазарев, П.Т. Петрик, Г.С. Сердаков // Теплообмен в парогенераторах: матер. Всесоюзн. конф., июнь 1988 г., Новосибирск. – Новосибирск, ИТ СО АН СССР, 1988. – С. 366-372.

2. *Богомолов, А. Р.* Теплообмен при конденсации на поверхности вертикального цилиндра, погруженного в зернистый слой / А.Р. Богомолов, П.Т. Петрик, О.Н. Цой // Химия и химическая технология: сб. науч. тр. – Кемерово, 1995. – С. 60-66.

3. *Петрик, П. Т.* Теплообмен при конденсации хладона R227 на наклонных трубах, помещенных в зернистый слой / П.Т. Петрик, П.В. Дадонов, И.В. Дворовенко, А.Р. Богомолов // ИФЖ, – 2004. – Т. 77. – № 4. – С.76-78.

4. *Богомолов, А. Р.* Пленочная конденсация водяного пара на вертикальной трубе в пористой среде / А.Р. Богомолов, П.Т. Петрик, И.В. Дворовенко, А.А. Богомолов // Вестник КузГТУ, – 2006. – №6. – С.110-115.

5. *Plumb, O. A.* Film condensation on a vertical flat plate in a packed bed / O.A. Plumb, D.B. Burnett, A. Shekarriz // J. Heat Transfer. – 1991. – V. 112. – P. 235-239.

6. *Белоусов, А. П.* Гидродинамическая структура двухфазного течения в окрестности точек контакта элементов шаровых засыпок / А.П. Белоусов, А.Р. Богомолов, Д.М. Маркович // Теплофизика и аэромеханика. – 2004. – Т. 11, № 3. – С. 429-440.

Авторы статьи:

Азиханов
Сергей Сейфудинович
– ст. препод. каф.,
«Процессы машины
и аппараты химических
производств»
Тел.3842-58-10-36

Богомолов
Александр Романович
– канд. техн. наук, с.н.с.,
Института теплофизики
СО РАН
Тел.3842-58-10-36

Петрик
Павел Трофимович
– докт. техн. наук,
зав. каф. «Процессы машины
и аппараты химических
производств»
e-mail: ppt@kuzstu.ru

УДК 66.067.16

В.А. Плотников

РАЗДЕЛЕНИЕ СУСПЕНЗИЙ В ФИЛЬТРЕ – ОТСТОЙНИКЕ

Примером реализации принципа совмещения процессов в одном аппарате является фильтр-отстойник, где разделение суспензии осуществляется одновременно фильтрованием и отстаиванием. Строго говоря, разделение суспензии в обычном фильтре также всегда осложнено осаждением твердых частиц на горизонтальной фильтрующей перегородке [1]. В большинстве случаев этим обстоятельством пренебрегают, полагая, что оно не оказывает существенного влияния на работу фильтра. Рассмотрим процесс разделения в фильтре-отстойнике и покажем, что при определенных условиях гравитационное осаждение частиц может существенно изменить ход процесса.

На рис. 1 показана схема фильтра–отстойника периодического действия. Цикличность работы аппарата складывается из следующих операций: заполнение аппарата до максимального уровня, выдержка под наливом, прекращение подачи суспензии и опорожнение, разгрузка образовавшегося осадка. Оставив без внимания стадию разгрузки, проанализируем процесс разделения суспензии в период заполнения, выдержки и опорожнения аппарата. Будем полагать, что подача суспензии осуществляется с невысокой скоростью и потому не оказывает заметного влияния на гидродинамическую обстановку внутри фильтра-отстойника.

В то же время в условиях спокойной подачи возможно расслоение суспензии под действием силы тяжести и осаждение частиц на фильтрующей поверхности. Оба явления, в конечном счете, влияют на скорость фильтрования, т.к. изменяют закономерность накопления осадка на фильтре.

Точное описание кинетики расслоения и осаждения полидисперсной суспензии в фильтре представляет сложную задачу, требующую учета гранулометрической характеристики частиц твердой фазы и неравномерности распределения несущего потока в поперечном и продольном направлениях [2]. Допустим, что данный процесс можно характеризовать некоторой скоростью релаксации w_t и балансным уравнением:

$$\frac{\partial(c \cdot dh)}{\partial \tau} = -w_e \cdot \frac{\partial c}{\partial h}, \qquad (1)$$

где $c = C(\tau, h)$ – временная функция распределения твердой фазы по высоте суспензии.

Исходное уравнение (1) записано в предположении, что несущий поток жидкой фазы соответствует потоку вытеснения. Его аналитическое ре-

шение получим, представив искомую функцию произведением двух неизвестных функций: $c = c_1(\tau)\, c_2(h)$. Подобная замена позволяет перейти от уравнения в частных производных (1) к обыкновенному дифференциальному уравнению

$$\frac{d\ln c_1}{d\tau} = -w_e \cdot \frac{d\ln c_2}{dh},$$

частное решение которого имеет вид

$$C(t,z) = c_0 \cdot \exp\{A \cdot (b \cdot t - z)\}, \qquad (2)$$

где $t = \tau/T$, $z = h/H$ - временная и пространственная относительные координаты, $b = w_e\, T/H$ - параметр релаксации, A, c_0 - константы интегрирования.

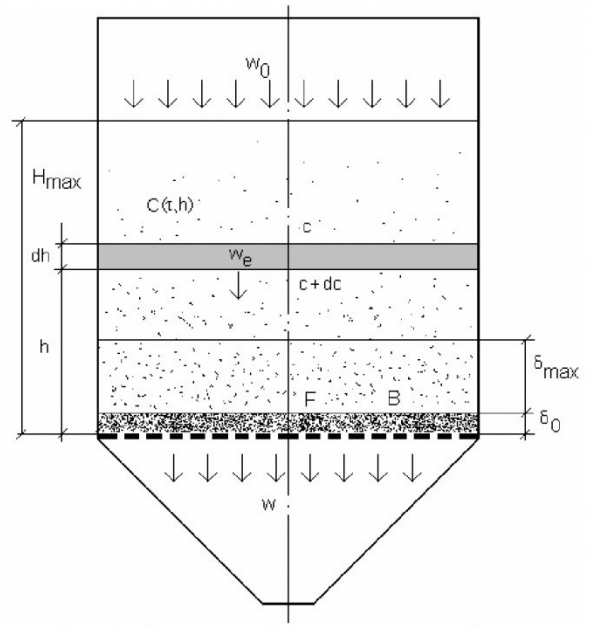

Рис. 1. К расчету фильтра - отстойника

В силу принятых допущений решение (2) приближенно описывает кинетику расслаивания суспензии в фильтре. Его можно улучшить, если ввести временную зависимость для постоянной интегрирования A:

$$C(t,z) = c_0 \cdot \exp\{a \cdot t \cdot (b \cdot t - z)\}. \qquad (3)$$

В таком виде оно отвечает начальному условию: при $t = 0$, $C(0, z) = c_0$, где c_0 – исходное содержание твердой фазы в суспензии. Кроме того, запись решения в форме уравнения (3) позволяет установить связь между постоянными интегрирования a и b. Учитывая постоянство массы твердой фазы в фильтре, в конце процесса должно выполняться условие:

$$\text{при } t = 1 \qquad \int_0^1 \exp\{a \cdot (b - z)\} dz = 1. \qquad (4)$$

Выражение (4) означает, что в конце расслоения твердая фаза остается во взвешенном состоянии.

На рис. 2 показан результат численного интегрирования уравнения (4) в интервале значений $a = 0...10$. Пунктирной линией показана аппроксимирующая зависимость $b(a) = 0.5\, exp(-0.08\, a)$. Таким образом, задача о расслоении суспензии под действием силы тяжести решена с точностью до произвольной постоянной a, определяющей среднюю скорость релаксации. Полученное решение отвечает условию предельного перехода (отсутствие расслоения): при $a = 0$, $C(t,z) = c_0$. Для момента начала образования осадка влажностью B значение параметра a можно найти из граничного условия: при $t = 1$, $C(1, 0) = (1-B)$.

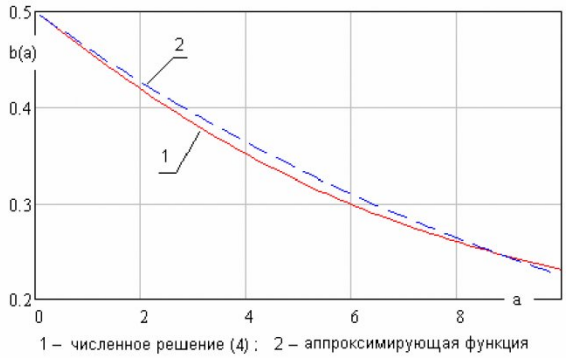

Рис. 2. Зависимость параметра b от a

Рассмотрим процесс фильтрования суспензии в периодическом фильтре в условиях гравитационного расслоения твердой фазы. Исходное уравнение для любой из перечисленных стадий процесса запишем в виде [3]:

$$w = \frac{dV}{F \cdot d\tau} = \frac{\rho \cdot g \cdot h}{\mu \cdot (r_o \cdot \delta + R_F)}, \qquad (5)$$

где w - текущая скорость фильтрования; h - уровень суспензии в аппарате; δ, - текущая толщина осадка; r_0, R_F – удельное сопротивление осадка и сопротивление фильтрующей перегородки; ρ, μ - плотность и вязкость суспензии.

Преобразуем уравнения (5) к безразмерному виду, для чего представим сопротивление перегородки отношением: $k = R_F /(r_0\, \delta_{max})$, где δ_{max} - толщина осадка в конце рассматриваемой стадии. Тогда система уравнений примет вид

$$x = \frac{dU}{dt} = \frac{\lambda \cdot z}{y + k}, \qquad (6)$$

В таком виде уравнения связывают между собой четыре искомые безразмерные функции x, y, z и U, и содержат два обобщенных параметра λ и k. Параметр k определяет относительное сопротивление фильтрующей перегородки и теоретически может принимать значение в интервале $k = 0...\infty$. Нулевое значение равносильно случаю, когда сопротивлением перегородки можно пренебречь. Предельное значение $k \sim \infty$ ассоциируется с непроницаемой перегородкой, что соответствует режиму нулевой скорости фильтрования. Параметр λ рассматривается как показатель интенсив-

ности процесса фильтрования, значение которого заранее не известно и подлежит определению.

Для замыкания системы уравнений (5) требуется два дополнительных уравнения. Первое вытекает из связи между толщиной образующегося осадка и объемом отфильтрованной жидкости

$$\delta = \frac{s \cdot V}{F} + \delta_0 .$$

Здесь s - показатель фильтрации суспензии, зависящий от текущего содержания твердой фазы.

Принимая во внимание процесс расслоения, можно записать

$$y = \frac{C(0,t)}{c_0} U + \Delta \qquad (7)$$

Второе уравнение определяет изменение уровня суспензии в аппарате. В зависимости от стадии процесса его можно представить выражениями:

– стадия заполнения $\frac{dz}{dt} = x_0 - x$;

– стадия выдержки $z = \frac{h}{H_{\max}} = 1$; (8)

– стадия опорожнения $\frac{dz}{dt} = -x$,

где $x_0 = w_0/w_s$, $x = w/w_s$ - относительные скорости заполнения и опорожнение фильтра-отстойника.

Для оценки продолжительности процесса осадительного фильтрования требуется решить систему уравнений (6-8) для каждой стадии. Рассмотрим вначале процесс фильтрования на стадии выдержки. В силу условия (8) исходная система трансформируется к виду

$$\frac{dU}{dt} = \frac{\lambda}{c(t) \cdot U + \Delta + k}, \qquad (9)$$

где $c(t) = exp\{a\ t\ b(a)\ t\}$ - функция расслоения вблизи границы раздела. В предельных случаях уравнение (9) допускает аналитические решения:

– отсутствие расслоения - $c(t)=1$

$$\lambda_0 = \frac{2(k+\Delta)+1}{2};$$

– мгновенное расслоение - $c(t)U=1$

$$\lambda_\infty = k + \Delta + 1.$$

Для промежуточных режимов возможно линейное обобщение:

$$\lambda(p) = p \cdot \lambda_0 + (1-p) \cdot \lambda_\infty . \qquad (10)$$

Произвольный параметр p определяет степень осложнения процесса осадительной фильтрации. Режим $p = 0$ отвечает мгновенному осаждению частиц и образованию осадка максимальной толщины. Режим $p = 1$ соответствует обычной фильтрации, когда частицы движутся вместе с жидкой фазой и постепенно образуют осадок на перегородке. В интервале $[p] = 0...1$ режим фильтрации промежуточный. Описанные представления получили название «промежуточная модель фильтрации».

Сравним полученное обобщение (10) с численным решением уравнения (9) в интервале значений параметра релаксации $[a]=0...5$. Результаты расчетов для случая $k+\Delta=1$, представлены на рис. 3. Данные указывают на сопоставимость релаксационной и промежуточной моделей фильтраций и позволяют записать простое соотношение связи между параметрами: $a = 5p$. Таким образом, отпадает необходимость численного решения уравнения (9). Открытым, однако, остается вопрос о выборе численных значений параметров модели. Подобные рекомендации требуют экспериментальных исследований и обобщений.

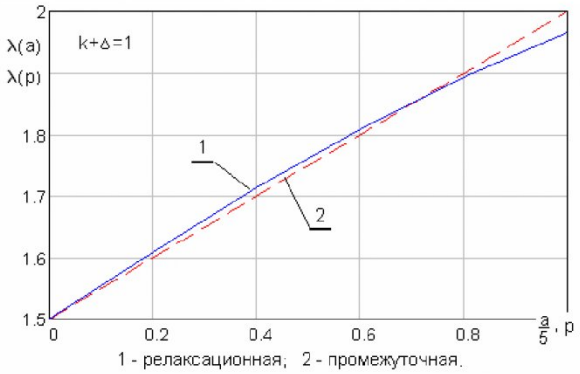

Рис. 3. Сравнение релаксационной и линейной моделей фильтрации

Осаждение твердой фазы приводит к ускорению образования осадка, а значит, сдерживает процесс фильтрования. Максимальную степень торможения можно оценить выражением

$$\eta = \frac{w_\infty}{w_0} = \frac{\lambda_0}{\lambda_\infty} = \frac{2(k+\Delta)+1}{2(k+\Delta+1)},$$

из которого следует, что численное значение зависит от соотношения между сопротивлением перегородки, начальной и конечной толщиной осадка. Максимально возможное торможение $\eta = 0.5$ соответствует случаю $k+\Delta = 0$. Чем выше относительное сопротивление перегородки, тем меньшее влияние оказывает процесс осаждения частиц на скорость фильтрации.

Оценим влияние осаждения твердой фазы на процесс периодического фильтрования в целом. Для первой стадии начальные условия и матрица решения системы уравнений (6-8) выглядят следующим образом:

$$\begin{bmatrix} U_0 \\ z_0 \\ x_0 \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}; \quad \begin{bmatrix} U_{i+1} \\ z_{i+1} \\ x_{i+1} \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} U_i + x_i \cdot \Delta t \\ z_i + (x_0 - x_i) \cdot \Delta t \\ \dfrac{\lambda \cdot z_i}{c(t_i) \cdot U_i + k + \Delta} \end{pmatrix} \qquad (11)$$

где $i = 0...N$, $\Delta t = 1 / N$, $t_i = \Delta t\ i$, $N = 1000$ – параметры численного решения. Поиск искомых функций выполнялся методом прогонки, суть ко-

торого состояла в подборе такого значения параметра λ, которое доставляло переменной U в конце интервала единичное значение, т.е. $U_N = 1$. Аналогично производилось решение уравнений фильтрации для стадии выдержки и опорожнения.

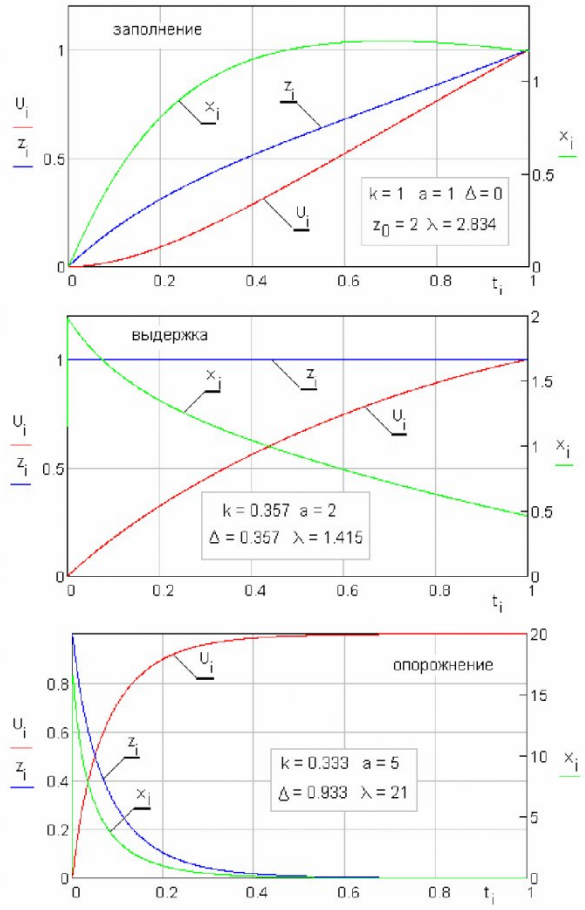

Рис. 4. Кинетика фильтрования в периодическом фильтре-отстойнике

На рис. 4 показана кинетика процесса осадительного фильтрования для случая, когда начальные толщины осадка в каждой стадии составляли $\Delta_1 = 0$, $\Delta_2 = 0.357$, $\Delta_3 = 0.933$, а параметр релаксации $a_1 = 1$, $a_2 = 2$, $a_3 = 5$, соответственно. Относительное сопротивление перегородки на первой стадии принималось равным единице: $k_1 = 1$.

Наиболее интенсивно разделения суспензии происходит на стадии выдержки ($\lambda = 1.415$). Наиболее длительной стадией процесса фильтрования является опорожнение аппарата, несмотря на то, что за это время образуется всего 6.7% от общего объема осадка. Практически к половине периода процесс можно считать полностью завершенным. По сравнению с обычным фильтрованием (без учета осаждения) общая продолжительность цикла увеличилась на ~ 23%.

ОБОЗНАЧЕНИЯ:

$s_0 = \dfrac{\rho_L \cdot c_0}{\rho_o \cdot [1-(B+c_0)]}$ - показатель фильтрации суспензии;

$\rho_o = \dfrac{\rho_L \rho_T}{\rho_L - (\rho_T - \rho_L)B}$ - плотность осадка;

$\rho = \dfrac{\rho_L \rho_T}{\rho_T - (\rho_T - \rho_L)\cdot c_0}$ - плотность суспензии;

$\lambda = \dfrac{\rho \cdot g \cdot H_{\max}}{\mu \cdot r_0 \cdot \delta_{\max} \cdot w_s}$ - параметр интенсивности фильтрования;

$k = \dfrac{R_F}{r_0 \cdot \delta_{\max}}$ - относительное сопротивление фильтрующей перегородки;

$\Delta = \dfrac{\delta_0}{\delta_{\max}}$ - относительная толщина осадка в начальный момент;

$T = \dfrac{\delta_{\max} - \delta_0}{s_0 \cdot w_s}$ - длительность стадии фильтрования;

$V_{\max} = w_s \cdot F \cdot T$ - объем фильтрата, полученного на стадии;

$U = \dfrac{V}{V_{\max}}$ - относительный объем фильтрата.

ρ_L, ρ_T – плотность жидкой и твердой фаз.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Кафаров .В., Глебов М.Б.* Математическое моделирование основных процессов химических производств. – М.: Высшая школа, 1991. – 400 с.
2. *Фортье А.* Механика суспензий. – М.: Мир, 1971. – 264 с.
3. *Романков П.Г., Курочкина М.И.* Гидромеханические процессы химической технологии. – Л.: Химия, 1974. – 288 с.

Автор статьи:
Плотников
Валерий Алексеевич
- канд.техн, наук, доц.каф. «Процессы, машины и аппараты химических производств» КузГТУ
Email p.valera@bk. ru