

185
Министерство высшего и среднего специального
образования СССР

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

ХИМИЯ И ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

ОТДЕЛЬНЫЙ ОТТИСК

Том XXIV

Выпуск 6

1981 год

А. А. ГРИЧЕНКО, А. И. ЕЛЬШИН

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ФИЛЬТРОВАНИЯ ВЯЗКИХ СУСПЕНЗИИ

(НОВОПОЛОЦКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ)

При рассмотрении зависимости средней скорости фильтрации от времени для случая фильтрации с постепенным закупориванием пор проведен экономически обоснованный поиск оптимальных условий фильтрации вязких суспензий при использовании разбавителей.

Одним из способов интенсификации процесса очистки высоковязких суспензий фильтрованием является повышение температуры фильтрования. Однако нередко снижение вязкости жидкой фазы суспензии, например присадок к моторным маслам, недопустимо из-за термического разложения продукта, потери ряда свойств и перехода примесей в раствор. В этом случае перед очисткой высоковязких жидкостей фильтрованием целесообразно применять какой-либо разбавитель для снижения вязкости фильтруемой суспензии.

Несмотря на большое внимание, уделяемое вопросам экономичности различных процессов фильтрования, при выборе оптимальных условий фильтрования разбавленных жидкостей не используются экономические оценки затрат, связанных с разбавлением исходного продукта, а также последующей отгонкой и регенерацией разбавителей, хотя такие затраты могут составлять значительную часть всех расходов, связанных с фильтрованием. В этой связи целью настоящей работы является разработка методики определения условий оптимального разбавления вязких суспензий, обеспечивающих экономичность их фильтрования.

При фильтровании суспензий [1], в частности присадок, обработанных разбавителем, может наблюдаться закупорка пор фильтрующей перегородки и образование на ней осадка. Математическое моделирование такого рода процессов фильтрования в настоящее время встречает определенные трудности. Поэтому при разработке методики определения оптимальных разбавлений высоковязких жидкостей был использован известный способ определения функциональной зависимости процесса фильтрования, позволяющий формально представить кинетику фильтрования в виде прямой линии в координатах τ_{ϕ}/q — τ_{ϕ} , где τ_{ϕ} — время фильтрования; q — объем фильтрата, получаемого с 1 м^2 фильтрующей перегородки [1]. Прямолинейная зависимость $\tau_{\phi}/q = f(\tau_{\phi})$ теоретически строго обоснована для случая фильтрования с постепенным закупориванием пор в работе [2] и может быть представлена в виде

$$\frac{k}{2} \tau_{\phi} = \frac{\tau_{\phi}}{q} - \frac{1}{W_{\pi}}, \quad (1)$$

где $k = 2x_0 / (\pi l_{\kappa} N_{\pi} r_{\kappa}^2)$; W_{π} — начальная скорость фильтрования, равная $\pi \Delta p N_{\pi} r_{\kappa}^4 / (8 \mu l_{\kappa})$; x_0 — отношение объема осадка $V_{\text{ос}}$, отложившегося в порах к объему фильтрата V ; l_{κ} — длина капилляров радиусом r_{κ} ; N_{π} — количество капилляров на 1 м^2 фильтрующей перегородки; Δp — перепад давления на фильтре; μ — вязкость фильтруемой жидкости.

Уравнение (1) можно записать в виде

$$W_{\text{ср}} = \frac{q}{\tau_{\phi}} = \frac{2W_{\pi}}{k\tau_{\phi} + 2} \quad (2)$$

или, после соответствующих преобразований,

$$W_{cp} = \frac{2A}{Ak\tau_{\phi} + 2\mu}, \quad (3)$$

где $A = \pi \Delta p N_{\pi} r_{\kappa}^4 / (8l_{\kappa}) = \mu W_{\pi}$. Так как $W_{\pi} = \Delta p / (\mu R_{\phi\pi})$, то $\Delta p / R_{\phi\pi} = \mu W_{\pi}$.

Если x'_0 — отношение объема осадка к объему фильтрата неразбавленного продукта V_{π} , то для смеси с содержанием объемной доли разбавителя g_p справедливо равенство

$$x'_0 = \frac{V_{oc}}{V_{\pi}} = \frac{V_{oc}}{V(1-g_p)},$$

где V — объем фильтрата смеси при степени разбавления g_p . Следовательно, отношение объема осадка к объему фильтрата смеси при степени разбавления g_p можно записать как

$$x_0 = \frac{V_{oc}}{V} = x'_0 (1-g_p). \quad (4)$$

Принимая во внимание, что вязкость смеси является функцией от g_p , то есть $\mu = \mu(g_p)$, получим уравнение фильтрования для разбавленной суспензии

$$\frac{q}{\tau_{\phi}} = 2A / [Ak_1(1-g_p)\tau_{\phi} + 2\mu(g_p)], \quad (5)$$

где $k_1 = 2x'_0 / (\pi l_{\kappa} N_{\pi} r_{\kappa}^2) = k / (1-g_p)$ — константа фильтрования для неразбавленного продукта.

Введение соотношения $k_1 = k / (1-g_p)$ позволяет учесть изменение постоянных в уравнений фильтрования при изменении g_p . Ранее проведенные исследования показали, что в большинстве случаев предлагаемая запись функции $k_1 = f(g_p)$ соответствует экспериментальным данным и позволяет в явной форме выразить взаимосвязь между переменными. Так как константу k_1 на практике часто определить затруднительно, то она может быть найдена по константам фильтрования, определенным при заданных разбавлениях. Из связи между k и g_p легко получается соотношение для пересчета констант фильтрования от одного разбавления к другому

$$k' / k'' = (1-g_p') / (1-g_p''), \quad (6)$$

где k' и k'' — константы фильтрования, определенные при степени разбавления g_p' и g_p'' .

Определение оптимальных условий фильтрования проводится с использованием критерия оптимизации [3], полученного для фильтрования при использовании разбавителей в работе [4]:

$$C_0 = q(1-g_p) / (\tau_{\phi} + \bar{k}_{\pi}\tau_{\pi} + \bar{k}_{\text{в}}\tau_{\text{в}} + \bar{k}_{\text{р}}g_p q), \quad (7)$$

где $\bar{k}_{\pi} = k_{\pi} / k_{\phi}$, $\bar{k}_{\text{в}} = k_{\text{в}} / k_{\phi}$, $\bar{k}_{\text{р}} = k_{\text{р}} / k_{\phi}$; k_{ϕ} , k_{π} , $k_{\text{в}}$ — затраты в единицу времени фильтрования, промывки и вспомогательных операций соответственно; τ_{ϕ} , τ_{π} , $\tau_{\text{в}}$ — время операций фильтрования, промывки и вспомогательных операций; $k_{\text{р}}$ — затраты на единицу объема разбавителя, связанные с его использованием; C_0 — критерий оптимизации.

Включение операции промывки в критерий экономичности для фильтрования с постепенным закупориванием пор обусловлено тем, что в случае использования намывных слоев и ценности очищаемого продукта на фильтрах предусмотрена промывка во избежание неоп-

равданных потерь продукта, а также с целью облегчения разгрузки фильтра [5, 6].

Принимая, что скорость промывки $W_{\text{пр}}$ пропорциональна скорости фильтрования в конце процесса $W_{\text{к}}$ и ведется под давлением $\Delta\rho_{\text{пр}}$ при вязкости промывной жидкости $\mu_{\text{пр}}$, можно записать

$$W_{\text{пр}} = \frac{W_{\text{к}} \mu(g_{\text{p}}) \Delta\rho_{\text{пр}}}{\mu_{\text{пр}} \Delta\rho} \quad (8)$$

или в общем случае

$$\frac{w_{\text{пр}} q x_0}{\tau_{\text{п}}} = \frac{2A \mu(g_{\text{p}}) \Delta\rho_{\text{пр}}}{[A k_1 (1-g_{\text{p}}) \tau_{\text{ф}} + 2\mu(g_{\text{p}})] \mu_{\text{пр}} \Delta\rho},$$

где $w_{\text{пр}}$ — удельный объем промывной жидкости на 1 м³ влажного осадка.

Время промывки $\tau_{\text{п}}$ определится с учетом того, что $x_0 = x_0' (1-g_{\text{p}})$ следующим образом

$$\tau_{\text{п}} = a [A k_1 (1-g_{\text{p}}) \tau_{\text{ф}} + 2\mu(g_{\text{p}})] (1-g_{\text{p}}) \mu(g_{\text{p}})^{-1} q, \quad (9)$$

где

$$a = \frac{w_{\text{пр}} x_0' \Delta\rho \mu_{\text{пр}}}{2 \Delta\rho_{\text{пр}} A}$$

Выразив из уравнения (5) время фильтрования и подставив в уравнение (9), получим

$$\tau_{\text{п}} = 4a \frac{(1-g_{\text{p}}) q}{2 - k_1 q (1-g_{\text{p}})}. \quad (10)$$

Уравнение имеет смысл при $q < 2/k_1 (1-g_{\text{p}})$.

Подставим уравнение промывки (10) и $\tau_{\text{ф}}$ в критерий экономичности (7):

$$C_0 = \varphi(q, g_{\text{p}}) = [q(1-g_{\text{p}})] \left\{ \frac{2\mu(g_{\text{p}}) q}{A [2 - k_1 q (1-g_{\text{p}})]} + 4a k_{\text{п1}} \frac{(1-g_{\text{p}}) q}{2 - k_1 q (1-g_{\text{p}})} + \bar{k}_{\text{в1}} \tau_{\text{в}} + \bar{k}_{\text{р}} g_{\text{р}} q \right\}. \quad (11)$$

Уравнение (11) является критерием оптимизации для процесса фильтрования с постепенным закупориванием пор при постоянном давлении, учитывающим экономические факторы.

Условия экстремума по q , g_{p} , определяемые как $\frac{\partial \varphi(q, g_{\text{p}})}{\partial q} = 0$,

$\frac{\partial \varphi(q, g_{\text{p}})}{\partial g_{\text{p}}} = 0$, дают уравнения

$$\frac{2k_1 \mu(g_{\text{p}}) (1-g_{\text{p}}) q^2}{[2 - k_1 q (1-g_{\text{p}})]^2} \left[\frac{1}{A} + 2a \mu(g_{\text{p}})^{-1} (1-g_{\text{p}}) \bar{k}_{\text{п1}} \right] - \bar{k}_{\text{в1}} \tau_{\text{в}} = 0, \quad (12)$$

$$- \frac{2k_1 (1-g_{\text{p}}) q^2}{[2 - k_1 q (1-g_{\text{p}})]^2} \left[\frac{\mu(g_{\text{p}})}{A} + 2a \bar{k}_{\text{п1}} (1-g_{\text{p}}) \right] +$$

$$+ \frac{2q}{A [2 - k_1 q (1-g_{\text{p}})]} [\mu(g_{\text{p}}) + (1-g_{\text{p}}) \mu'(g_{\text{p}})] + \bar{k}_{\text{р}} q + \bar{k}_{\text{в1}} \tau_{\text{в}} = 0, \quad (13)$$

где $\mu'(g_{\text{p}})$ — производная функции $\mu(g_{\text{p}})$.

Таблица 1

Частные случаи решения системы уравнений (12) и (13)

Условия оптимизации	Критерий экономичности*	Условия оптимума
Наибольшая производительность $\tau_n=0, \tau_b=0, k_p=0$	$C_0 = \frac{q(1-g_p)}{\tau_\phi}$ (14)	$2\mu(g_p) [1 - k_1 q(1 - g_p)] + \mu'(g_p) (1 - g_p) [2 - k_1 q(1 - g_p)] = 0$ (15)
Непрерывный процесс фильтрования с учетом затрат на разбавитель $\tau_n=0, \tau_b=0$	$C_0 = \frac{q(1-g_p)}{\tau_\phi + k_p q g_p}$ (16)	$\frac{4\mu(g_p) [1 - k_1 q(1 - g_p)]}{A [2 - k_1 q(1 - g_p)]^2} + \frac{2\mu'(g_p) (1 - g_p)}{A [2 - k_1 q(1 - g_p)]} + k_p = 0$ (17)
Периодический процесс фильтрования $\tau_n=0, k_p=0$	$C_0 = \frac{q(1-g_p)}{\tau_\phi + k_{в1} \tau_b}$ (18)	$q = \frac{A \bar{k}_{в1} \tau_b k_1 (1 - g_p) - \sqrt{2A \bar{k}_{в1} \tau_b k_1 (1 - g_p) \mu(g_p)}}{0,5 k_1 (1 - g_p) [A k_1 (1 - g_p) \bar{k}_{в1} \tau_b - 2\mu(g_p)]}$ $\frac{4\mu(g_p) q [1 - k_1 q(1 - g_p)]}{A [2 - k_1 q(1 - g_p)]^2} + \frac{2q(1 - g_p) \mu'(g_p)}{A [2 - k_1 q(1 - g_p)]} + \bar{k}_{в1} \tau_b = 0$

* Здесь $\tau_\phi = \frac{2\mu(g_p) q}{A [2 - k_1 q(1 - g_p)]}$

Условия оптимума в общем случае найдутся путем совместного решения уравнений (12) и (13). Некоторые частные случаи решения системы уравнений (12) и (13) приведены в табл. 1.

Функцию вязкости $\mu(g_p)$ удобнее всего выражать как зависимость вязкости смеси от объемных или массовых долей компонентов, так как любой процесс фильтрования рассматривается с точки зрения получения объема фильтрата или массы осадка.

Расчитанные или определенные экспериментально вязкости смесей должны достаточно точно описываться при определении оптимальных условий только в области ожидаемого изменения разбавлений при вариациях параметров процесса фильтрования. В этом случае могут быть использованы сравнительно простые эмпирические зависимости, например такие, как [7]

$$\mu(g_p) = \mu_p g_p^\gamma, \quad (20)$$

где μ_p, γ — эмпирические постоянные.

Воспользуемся уравнением (20) для рассмотрения некоторых частных случаев, приведенных в табл. 1.

Для случая наибольшей производительности ($\tau_{п}=0, \tau_b=0, \bar{k}_p=0$) подстановка $\mu(g_p) = \mu_p g_p^\gamma$ дает следующее решение уравнения (15):

$$g_{p\text{ опт}} = \frac{(1-\gamma)(k_1 q - 1) + \sqrt{(1-\gamma)^2(k_1 q - 1)^2 - \gamma k_1 q(2-\gamma)(2-k_1 q)}}{k_1 q(2-\gamma)}. \quad (21)$$

При $q \rightarrow 0, g_{p\text{ опт}} \rightarrow \gamma/(\gamma-1)$, при $q \rightarrow \infty, g_{p\text{ опт}} \rightarrow 1$.

Анализ уравнения (21) показал, что для объема фильтрата, обеспечивающего $g_{p\text{ опт}}$ во всей области изменений выполняется условие $q < 2/k_1(1-g_{p\text{ опт}}) = q_{пр}$ (рис. 1). Зависимость оптимальной экономичности процесса $C_{o\text{ опт}}$ от объема получаемого фильтрата q и постоянной фильтрования k_1 приведена для условия $A = 10^{-6}$ Па·м; $\gamma = -2,496$; $\mu_p = 1 \cdot 10^{-3}$ Па·с в табл. 2.

Таблица 2
Зависимость критерия $C_{o\text{ опт}}$ от условий фильтрования

$k_1, \text{ м}^{-1}$	1,0		14,0		30,0	
	$g_{p\text{ опт}}$	$C_{o\text{ опт}} \cdot 10^4, \frac{\text{м}}{\text{с}}$	$g_{p\text{ опт}}$	$C_{o\text{ опт}} \cdot 10^4, \frac{\text{м}}{\text{с}}$	$g_{p\text{ опт}}$	$C_{o\text{ опт}} \cdot 10^4, \frac{\text{м}}{\text{с}}$
10^{-3}	0,7140	1,370	0,714	1,368	0,715	1,36
10^{-2}	0,7142	1,368	0,718	1,343	0,723	1,31
10^{-1}	0,7169	1,351	0,758	1,120	0,808	0,89
10^0	0,7451	1,186	0,935	0,330	0,968	0,17
10^1	0,9130	0,435	0,993	0,040	0,997	0,02

Таким образом, $g_{p\text{ опт}}$ определяется свойствами осадка, объемом получаемого фильтрата и не зависит от перепада давления на фильтре.

В рассмотренном случае условие экономичности совпадает с условием наибольшей производительности фильтра. Более приемлемой является оптимизация непрерывного процесса фильтрования с учетом экономических затрат на разбавитель, например, при $\tau_{п}=0, \tau_b=0, \bar{k}_p \neq 0$, когда $g_{p\text{ опт}}$ определяется уравнением

$$\frac{2\mu_p g_{p\text{ опт}}}{A[2-k_1 q(1-g_{p\text{ опт}})]} \left\{ \frac{2[1-k_1 q(1-g_{p\text{ опт}})]}{2-k_1 q(1-g_{p\text{ опт}})} + \frac{\gamma(1-g_{p\text{ опт}})}{g_{p\text{ опт}}} \right\} + \bar{k}_p = 0, \quad (22)$$

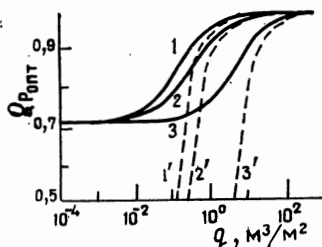


Рис. 1

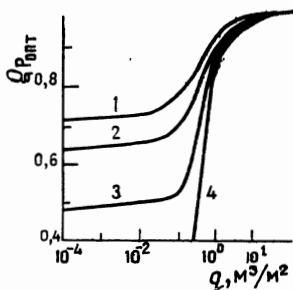


Рис. 2

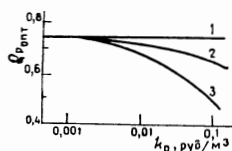


Рис. 3

- Рис. 1. Зависимость оптимального разбавления $g_{p, опт}$ от объема фильтрата q (кр. 1, 2, 3) и $q_{пр}$ (кр. 1', 2', 3') при $\gamma = -2,496$. $k_1, м^{-1}$: 1,1' — 30; 2,2' — 14; 3,3' — 1,0
- Рис. 2. Зависимость $g_{p, опт}$ от q для различных затрат на разбавитель при $k_1 = 14 м^{-1}$, $A = 10^{-6}$ Па·м, $k_p, руб/м^3$: 1 — 0,001; 2 — 0,01; 3 — 0,1; 4 — $q_{пр} = f(g_p)$
- Рис. 3. Влияние константы A на $g_{p, опт}$ при различных затратах на разбавитель k_p для $q = 0,1 м^3/м^2$, $k_1 = 14 м^{-1}$. 1 — $k_p = 0$. $A, Па·м$: 2 — 10^{-7} , 3 — 10^{-6} .

которое в общем случае решается методом последовательного приближения.

Как видно из расчетного примера (рис. 2), возрастание затрат на разбавитель ведет к снижению $g_{p, опт}$, причем, при приближении q к своему предельному значению, $g_{p, опт}$ резко возрастает и стремится к единице. Расчеты сделаны для условий, когда $k_{\phi} = 10^{-5}$ руб/с·м², что приблизительно соответствует часто встречающимся на практике величинам, $k_p = 0,1; 0,01$ и $0,001$ руб/м³, что соответствует величинам $k' = k_p/\mu_p = 10^7, 10^6$ и 10^5 (Па·м)⁻¹ соответственно. Уменьшение $A = \mu W_n$, как и следовало ожидать, требует более высоких степеней разбавления (рис. 3), приближающихся к разбавлениям для предельного случая $k_p = 0$.

Таким образом, проведенные исследования фильтрования с постепенным закупориванием пор при $\Delta p = const$ для непрерывного процесса показали возможность экономической оптимизации процесса фильтрования с использованием разбавителей, что позволяет проводить обоснованный выбор объема фильтрата, снимаемого с единицы поверхности фильтра и степени разбавления при известных затратах на использование разбавителя.

ЛИТЕРАТУРА

1. Концевой А. Л., Жидков Б. А., Точко Н. А. В сб.: Химическая технология. Киев: Наукова думка, 1974, № 5, с. 56.
2. Жужиков В. А. Фильтрование. М.: Химия, 1971, 440 с.
3. Гриченко А. А. Хим. пром. ст. 1975, № 6, с. 449.
4. Гриченко А. А., Ельшин А. И. Исследование и оптимизация процесса фильтрования высоковязких суспензий при использовании разбавителей. Рукопись депонирована в ЦИНТИхимнефтемаш за № 514 от 22.X.79 г.
5. Пустовит В. Е., Гордаш Я. Е. В сб.: Нефтепереработка и нефтехимия. М., 1973, вып. 5, с. 141.
6. Руденко Л. И., Сергеев Г. И. В кн.: Повышение качества смазочных материалов и эффективности их применения. М., 1977, с. 178.
7. Reeves E. J. Industr. and Engng Chem., 1947, vol. 39, N 2, p. 203.