

УДК 66.067.1

ЭКОНОМИЧЕСКИ ОПТИМАЛЬНЫЕ УСЛОВИЯ ФИЛЬТРОВАНИЯ ВЫСОКОВЯЗКИХ СУСПЕНЗИЙ

А. А. ГРИЧЕНКО, А. И. ЕЛЬНИН

Предложен критерий экономической оптимизации фильтрации высоковязких суспензий с использованием разбавителей. Полученные аналитические выражения могут быть использованы при проектировании фильтровального оборудования и оптимизации действующих фильтровальных установок.

На основе общего критерия проведен анализ процесса фильтрации с образованием осадка.

В промышленности часто встречаются процессы фильтрации высоковязких суспензий. Для снижения вязкости суспензий и повышения скорости фильтрации широко используются разбавители. При этом объем разбавителя соизмерим с объемом разбавляемой суспензии, что требует решения задачи оптимизации процесса фильтрации с целью выбора наиболее экономичных условий проведения процесса.

В настоящее время для оптимизации различных процессов используются методы с привлечением экономических оценок [1, 2]. Наиболее обоснованной при управлении действующим производством является оптимизация по минимуму приведенных затрат на единицу продукции. В этом случае длительность цикла, обеспечивающая минимум приведенных затрат, как правило, не совпадает с максимальной производительностью. Снижение вязкости жидкой фазы суспензии за счет разбавления приводит к увеличению скорости фильтрации при возрастающем объеме фильтра. В этом случае для рационального проведения процесса при выборе степени разбавления, отвечающей наибольшей экономичности, необходимо принимать во внимание затраты, связанные с разбавлением, отгонкой и регенерацией разбавителя. Известные способы определения оптимальной степени разбавления относятся к условию максимальной производительности [3—7]. Недостатком этих способов является их частный характер, не позволяющий сопоставить различные типы процессов фильтрации, а также оценить и учесть влияние затрат на разбавление, стоимости и длительности вспомогательных операций и промывки на оптимальную степень разбавления. Следует отметить также, что в работах [3—8] не принимается во внимание изменение при разбавлении отношения объема осадка к объему фильтра.

Воспользуемся при выводе критерия оптимизации принципами [1, 9], применяя в качестве показателя эффективности производства приведенный доход от работы фильтровальной установки [10]:

$$D_{пр} = \Pi V_{нз} - (Z_0 + EK),$$

где $D_{пр}$ — приведенный доход, руб/год; Π — отпускная цена продукта, руб/м³; $V_{нз}$ — годовой объем полученного неразбавленного продукта, м³/год; Z_0 — эксплуатационные затраты, руб/год; E — нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений, 1/год; K — производственные фонды (единовременные затраты), руб.

При постоянных Π и $V_{нз}$ условие $D_{пр} \rightarrow \max$ адекватно условию $Z_{пр}^{пер} = Z_0 + KE \rightarrow \min$. Если считать KE постоянной составляющей приведенных затрат, то

$$Z_{пр}^{пер} = Z_0 = (k_\phi \tau_\phi + k_n \tau_n + k_z \tau_z) n + n V_p k_p,$$

где $Z_{пр}^{пер}$ — переменная составляющая приведенных затрат, руб/год; k_ϕ, k_n, k_z — стоимости единицы времени фильтрования, промывки и вспомогательных операций соответственно, руб/с; $\tau_\phi, \tau_n, \tau_z$ — длительность циклов за год, 1/год; V_p — объем разбавителя, используемого в одном цикле, м³; k_p — затраты на 1 м³ разбавителя, связанные с его использованием, руб/м³.

Если объемная доля разбавителя в смеси g_p , то его количество в объеме смеси V равно $V_p = g_p V$, а неразбавленного продукта $V_n = V(1 - g_p)$. Тогда объем неразбавленного продукта q_n , полученного за цикл с единицы поверхности фильтрования, определится как

$$q_n = V_n / F = V(1 - g_p) / F,$$

где F — поверхность фильтрования, м², а суммарный объем неразбавленного продукта, полученного за год, составит величину $V_{нз} = n q_n F$.

Принимая в $Z_{пр}^{пер}$ переменной составляющей величину затрат Z_0 , перейдем к отношению суммарного объема фильтрата по неразбавленному продукту к величине Z_0 :

$$C = V_{нз} / Z_0 = q_n / (k_{\phi 1} \tau_\phi + k_{n 1} \tau_n + k_{z 1} \tau_z + q_p k_p), \quad (1)$$

где $k_{\phi 1} = k_\phi / F$, $k_{n 1} = k_n / F$, $k_{z 1} = k_z / F$, $q_p = V_p / F$.

От уравнения (1) легко перейти к критерию оптимизации по объему получаемого фильтрата смеси q :

$$C_0 = C k_{\phi 1} = q(1 - g_p) / (\tau_\phi + \bar{k}_{n 1} \tau_n + \bar{k}_{z 1} \tau_z + \bar{k}_p q g_p), \quad (2)$$

где $\bar{k}_{n 1} = k_{n 1} / k_{\phi 1}$, $\bar{k}_{z 1} = k_{z 1} / k_{\phi 1}$, $\bar{k}_p = k_p / k_{\phi 1}$.

При $\bar{k}_p = 0$ из уравнения (2) получим частный случай критерия, когда не учитываются затраты на разбавитель:

$$C_0 = q(1 - g_p) / (\tau_\phi + \bar{k}_{n 1} \tau_n + \bar{k}_{z 1} \tau_z). \quad (2a)$$

Если отсутствует разбавление ($g_p = 0$), переходим к случаю оптимизации периодических процессов фильтрования с привлечением экономической оценки, рассмотренному в [10].

Приняв $\tau_n = 0$ и $\tau_z = 0$, получим критерий оптимизации для непрерывных процессов фильтрования

$$C_0 = q(1 - g_p) / (\tau_\phi + q g_p \bar{k}_p). \quad (2б)$$

Таким образом, достоинством полученного критерия оптимизации (2) является его универсальность по отношению к процессу фильтрования независимо от способа проведения последнего, что позволяет получить не только условие экономически оптимального режима, но и анализировать влияние различных факторов на ход процесса очистки.

Рассмотрим оптимизацию процессов фильтрования вязких суспензий с образованием осадка на основе полученного критерия с учетом изменения отношения объема осадка к объему фильтрата в процессе разбавления. Запишем отношение объема осадка V_{oc} к объему неразбавленного продукта V_n как $x_0' = V_{oc} / V_n$; $x_0' = \text{const}$ для данной неразбавленной суспензии. Если V — объем смеси при объемной доле разбавителя в последней g_p , то $V_n = V(1 - g_p)$ или

$$x_0' = V_{oc} / V(1 - g_p) = x_0 / (1 - g_p),$$

где x_0 — отношение объема осадка к объему фильтрата при данном разбавлении. Из этого выражения следует

$$x_0 = x_0' (1 - g_p). \quad (3)$$

В общем случае процессы фильтрования и промывки с использованием уравнений работы [11] описываются зависимостями

$$\tau_\phi = \mu(g_p) (a_1' q + b_1' q^2); \quad (4)$$

$$\tau_n = a_2' q + b_2' q^2, \quad (5)$$

где $\mu(g_p)$ — вязкость смеси при данном разбавлении; $a_1 = R_{\phi n} / \Delta p$; $a_2' = (w_{np} x_0 \mu_{np} R_{\phi n}) / \Delta p_{np}$; $b_1' = r_0 x_0 / 2 \Delta p$ при $\Delta p = \text{const}$ и $b_1' = r_0 x_0 / \Delta p$ при $W = \text{const}$; $b_2' = [w_{np} \mu_{np} r_0 (x_0')^2] / \Delta p_{np}$, где Δp — давление фильтрования при $\Delta p = \text{const}$ или максимально допустимое значение перепада давления на фильтре при $W = \text{const}$, $R_{\phi n}$ — сопротивление фильтрующей перегородки; W — скорость фильтрования; w_{np} — удельный объем промывной жидкости на 1 м³ влажного осадка; μ_{np} — вязкость промывной жидкости; Δp_{np} — давление промывки; r_0 — удельное объемное сопротивление осадка.

С учетом изменения x_0 уравнения (4), (5) примут вид

$$\tau_\phi = \mu(g_p) [a_1 q + b_1 (1 - g_p) q^2]; \quad (6)$$

$$\tau_n = a_2 q (1 - g_p) + b_2 (1 - g_p)^2 q^2, \quad (7)$$

где $a_2 = (w_{np} x_0' \mu_{np} R_{\phi n}) / \Delta p_{np}$; $b_1 = r_0 x_0' / 2 \Delta p$ при $\Delta p = \text{const}$ и $b_1 = r_0 x_0' / \Delta p$ при $W = \text{const}$; $b_2 = [w_{np} \mu_{np} r_0 (x_0')^2] / \Delta p_{np}$.

Подстановка полученных уравнений (6) и (7) в общий критерий оптимизации (2) дает

$$C_0 = \Phi(q, g_p) = \frac{q(1 - g_p)}{\mu(g_p) [a_1 q + b_1 (1 - g_p) q^2] + \bar{k}_{\text{пл}} (1 - g_p) [a_2 q + b_2 (1 - g_p) q^2] + \bar{k}_{\text{в1}} \tau_\phi + \bar{k}_{\text{р}} g_p q}. \quad (8)$$

Условию экстремума для функции двух переменных соответствует система уравнений

$$\partial \Phi(q, g_p) / \partial q = 0;$$

$$\partial \Phi(q, g_p) / \partial g_p = 0.$$

Решение уравнения $\partial \Phi(q, g_p) / \partial q = 0$ дает экономически оптимальный объем фильтрата, полученного с единицы поверхности фильтрования:

$$q_{\text{опт}} = \sqrt{\bar{k}_{\text{в1}} \tau_\phi / [b_1 \mu(g_p) (1 - g_p) + b_2 \bar{k}_{\text{пл}} (1 - g_p)^2]}. \quad (9)$$

Из (9) следует, что при заданной степени разбавления оптимальный объем фильтрата не зависит от сопротивления фильтрующей перегородки и затрат на разбавитель. Этот фактор имеет немаловажное значение в практическом отношении.

Из уравнения $\partial \Phi(q, g_p) / \partial g_p = 0$ имеем

$$a_1 q [\mu(g_p) + \mu'(g_p) (1 - g_p)] + [b_1 \mu'(g_p) - b_2 \bar{k}_{\text{пл}}] q^2 (1 - g_p)^2 + \bar{k}_{\text{в1}} \tau_\phi + \bar{k}_{\text{р}} q = 0, \quad (10)$$

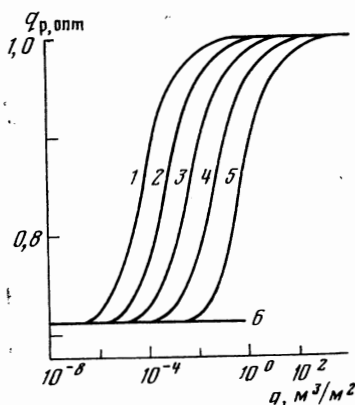
где $\mu'(g_p)$ — производные функции $\mu(g_p)$.

Таким образом, экономически оптимальные условия разбавления для фильтрования с образованием осадка будут определяться совместным решением уравнений (9) и (10). Воспользуемся при решении зависимостью вида $\mu(g_p) = \mu_p g_p^\gamma$ [4] (где μ_p, γ — константы), которой с достаточной точностью можно описать изменение вязкости с разбавлением в области экстремума. После подстановки $\mu(g_p)$ получим ряд частных случаев оптимизации, приведенных в табл. 1.

Проведем сопоставление полученных теоретических результатов с данными эксперимента для условия максимальной экономичности при $\tau_n = 0$, $\bar{k}_{\text{р}} = 0$, $\tau_\phi = 0$. Условие имеет теоретический характер и приводится для

сравнения с данными [4—8], полученными при $x_0 = \text{const}$. Согласно данным [4], оптимальная степень разбавления $g_{p, \text{опт}}$ определяется формулой $g_{p, \text{опт}} = \gamma / (\gamma - 1)$ и не зависит от q и свойств осадка. Как видно из табл. 1, для непрерывного процесса фильтрования при учете изменения x_0 разбавление при $q > 0$ не равно $\gamma / (\gamma - 1)$; равенство имеет место только в гипотетическом случае, когда $q = 0$. Согласно уравнению (14), оптимальная степень разбавления при $x_0 = x_0' (1 - g_p)$ является функцией нескольких пере-

Рис. 1. Зависимость оптимальной степени разбавления $g_{p, \text{опт}}$ от объема получаемого фильтрата q при $a_1 = 7,934 \cdot 10^4$ м/Н, $\gamma = -2,496$; 1 — $b_1 = 10^{10}$; 2 — 10^9 ; 3 — 10^8 ; 4 — 10^6 ; 5 — 10^5 Н⁻¹; 6 — $g_p = \gamma / (\gamma - 1)$



менных, зависящих от свойств суспензии, фильтрующей перегородки и объема фильтрата. На рис. 1 приведены результаты расчета $g_{p, \text{опт}}$ в зависимости от q , на котором хорошо прослеживается отклонение действительных значений $g_{p, \text{опт}}$ в сторону больших разбавлений с ростом получаемого объема фильтрата, при этом, как следует из (14), $\lim_{q \rightarrow \infty} g_{p, \text{опт}} = 1$ и

$\lim_{q \rightarrow 0} g_{p, \text{опт}} = \gamma / (\gamma - 1)$. Таким образом, степень разбавления тем ближе к величине $\gamma / (\gamma - 1)$, принимаемой за оптимальную в работе [4], чем меньше r_0 или содержание механических примесей в исходной суспензии. Приведенный пример наглядно показывает недостаток определения $g_{p, \text{опт}}$ без учета изменения x_0 в разбавленной суспензии.

Полученные результаты хорошо согласуются с экспериментальными данными, полученными при определении $g_{p, \text{опт}}$, соответствующего максимальной экономичности процесса для суспензии глины в глицерине с использованием в качестве разбавителя воды, при $\tau_n = 0$, $k_p = 0$, $\tau_s = 0$, когда наибольшая экономичность совпадает с наибольшей производительностью фильтра. Условия опыта: $\Delta p = 0,5 \cdot 10^{-5}$ Н/м²; $r_0 = 7,78 \cdot 10^{13}$ м⁻², $R_{\text{фн}} = 3,967 \cdot 10^9$ м⁻¹, $x_0 = 0,01$; $\mu_p = 0,854 \cdot 10^{-3}$ Па·с, $\gamma = -2,496$. В качестве фильтрующей перегородки использовался бельтинг. Поверхность фильтрования $2,83 \cdot 10^{-3}$ м², $q = 7,06 \cdot 10^{-2}$ м³/м². Полученные результаты сравнивали с $g_{p, \text{опт}}$, определенным по уравнениям

$$g_{p, \text{опт}} = \gamma / (\gamma - 1) \quad [4]; \quad (17)$$

$$1 - g_{p, \text{опт}} = \mu (1 - g_p) / \mu' (1 - g_p) \quad [6, 7], \quad (18)$$

где $\mu' (1 - g_p)$ — производная функции $\mu (1 - g_p)$; $1 - g_p = g_n$ — объемная доля исходного продукта в смеси, а также по уравнению (14). Определяли условия наибольшей производительности фильтра по чистым растворам глицерина, фильтруемым через чистую фильтрующую перегородку ($x_0 = 0$), а также $g_{p, \text{опт}}$ при $x_0 = x_0' = \text{const}$ и $x_0 = x_0' (1 - g_p)$ (рис. 2). Полученные результаты приведены ниже:

Уравнение для определения $g_{p, \text{опт}}$	(17)	(18)	(14)	опытное значение
Оптимальная степень разбавления, об. доли	0,714	0,676	0,840	0,850

Оптимальные условия для различных процессов фильтрования

Условия фильтрования	Критерий оптимизации	Условия оптимума
Непрерывный процесс. Затраты на разбавитель не учитываются, $\tau_B = 0, \tau_{II} = 0, \bar{k}_p = 0$	$C_0 = \frac{1 - g_p}{\mu(g_p)[a_1 + b_1 q(1 - g_p)]} \quad (14)$	<p>При $q > 0$ $g_p, \text{ опт} = \frac{\gamma(r + R) - a_1 + \sqrt{[\gamma(r + R) - a_1]^2 - 4\gamma^2 R r}}{2\gamma}$</p> <p>При $q \rightarrow 0$ $g_p, \text{ опт} \rightarrow \gamma/(\gamma - 1)$ (14)</p>
Непрерывный процесс. Учитываются затраты на разбавитель, $\tau_B = 0, \tau_{II} = 0$	$C_0 = \frac{1 - g_p}{\mu(g_p)[a_1 + b_1 q(1 - g_p)] + \bar{k}_p g_p} \quad (12)$	<p>При $q > 0$ $g_p, \text{ опт}$ определяется из уравнения</p> $\gamma r g_p^{\gamma+1} + (a_1 - \gamma a_1 - 2\gamma r) g_p^\gamma + \gamma R g_p^{\gamma-1} + k = 0 \quad (15)$ <p>При $q \rightarrow 0$ — из уравнения</p> $a_1(1 - \gamma) g_p^\gamma + a_1 \gamma g_p^{\gamma-1} + k = 0$
Периодический процесс. Затраты на разбавитель не учитываются, $\tau_{II} = 0, \bar{k}_p = 0$	$C_0 = \frac{q(1 - g_p)}{\mu(g_p)[a_1 q + b_1(1 - g_p)q^2 + \bar{k}_{B1} \tau_B]} \quad (13)$	$q_{\text{опт}} = \sqrt{\bar{k}_{B1} \tau_B / \mu_p b_1 (1 - g_p) g_p^\gamma} \quad (16)$ $\mu_p [a_1 q [g_p(1 - \gamma) + \gamma] + b_1 \gamma (1 - g_p)^2 q^2] g_p^{\gamma-1} + \bar{k}_{B1} \tau_B = 0$

* $r = b_1 q; R = a_1 + b_1 q; k = \bar{k}_p / \mu_p$.

Таким образом, для условий эксперимента пренебрежение изменением x_0 дает относительное отклонение от действительной величины при расчете по уравнению (17) на 16%, по (18) — на 20,5%, по (14) — на 1,2%.

При моделировании условий $x_0=0$ и $x_0=\text{const}$ найденный опытный оптимум $g_{p, \text{опт}}=0,71$ подтверждает, что уравнения (17) и (18) применимы в частных случаях, ограниченных областью постоянного x_0 .

Учет в непрерывном процессе фильтрования затрат на использование разбавителя приводит к более сложному уравнению (15). Результаты сопоставления экономичности процесса при значениях $g_{p, \text{опт}}$, полученных

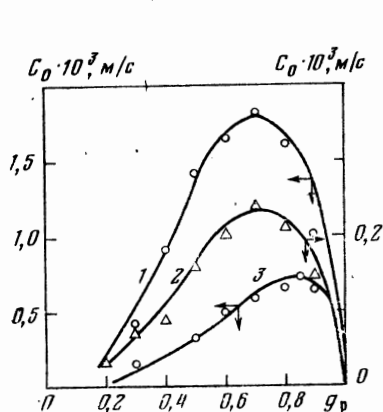


Рис. 2. Зависимость экономичности процесса фильтрования C_0 от степени разбавления g_p при фильтровании суспензии глины в водных растворах глицерина: 1 — $x_0=0$; 2 — $x_0=x_0'=\text{const}$; 3 — $x_0=x_0'/(1-g_p)$

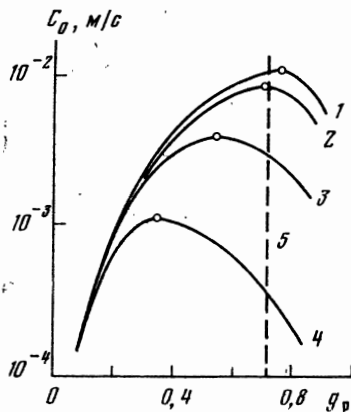


Рис. 3. Экономичность фильтрования при различных затратах на разбавитель при $a_1=10^4 \text{ м/Н}$, $x_0'=0,01$, $b_1=10^6 \text{ Н}^{-1}$, $q=0,01 \text{ м}^3/\text{м}^2$: 1 — $k=10^3$; 2 — 10^4 ; 3 — 10^5 ; 4 — $10^6 \text{ (Па}\cdot\text{м)}^{-1}$; 5 — $g_p=\gamma/(\gamma-1)$

с учетом изменения x_0 при разбавлении с рекомендуемым $g_p=\gamma/(\gamma-1)$, приведены на рис. 3. Можно видеть, что расхождение существенно увеличивается с возрастанием величины $k=k_p/\mu_p$. Снижение экономичности при использовании рекомендации $g_{p, \text{опт}}=\gamma/(\gamma-1)$ приведено ниже:

$k, (\text{Па}\cdot\text{м})^{-1}$	10^4	10^5	10^6
$C_0 \text{ опт}/C_0 _{g_p=\gamma/(\gamma-1)}$	1,30	1,77	3,05

Влияние объема получаемого фильтрата с единицы поверхности q и величины k на экономичность процесса иллюстрируются данными, приведенными в табл. 2.

Таблица 2

Влияние q и k на экономичность процесса
($a_1=10^4 \text{ м/Н}$, $b_1=10^6 \text{ Н}^{-1}$, $\gamma=-2,496$, $\mu_p=0,9\cdot 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}$)

$k, (\text{Па}\cdot\text{м})^{-1}$	10^4				10^6			
	$q, \text{ м}^3/\text{м}^2$	0	0,01	0,10	1,00	0	0,01	0,10
$C_0 \text{ опт}\cdot 10^4$	0,143	0,118	0,07	0,040	0,767	0,568	0,346	0,163
$g_{p, \text{опт}}$	0,05	0,057	0,09	0,163	0,09	0,108	0,167	0,288
$k, (\text{Па}\cdot\text{м})^{-1}$	10^7				10^6			
	$q, \text{ м}^3/\text{м}^2$	0	0,01	0,10	1,00	0	0,01	0,10
$C_0 \text{ опт}\cdot 10^4$	3,93	2,763	1,575	0,675	14,53	11,77	6,28	2,195
$g_{p, \text{опт}}$	0,167	0,197	0,294	0,470	0,300	0,342	0,478	0,679

Для часто встречающейся на практике величины стоимости единицы времени фильтрования $k_{\phi_1} = 10^{-5}$ руб/с·м² следует, что при затратах на разбавитель порядка $k_p = 10$ и 1 руб/м³ ($k = 10^9$ и 10^8 Па·м⁻¹ соответственно) для малых q оптимальная степень разбавления незначительна и возрастает по мере увеличения объема фильтрата. Следовательно, повышение затрат на разбавление вязких суспензий смещает $g_{p, \text{опт}}$ в сторону меньших величин и при выборе g_p и q требует учета ограничений, налагаемых на разбавление фильтруемостью вязкой суспензии при малых разбавлениях.

Проведенные исследования показали, что пренебрежение изменением x_0 в разбавленной суспензии ведет к ошибочному определению параметров процесса фильтрования, таких, как g_p и q . Это подтверждено сравнением полученных расчетных и экспериментальных данных с имеющимися в литературе рекомендациями.

Оптимизация процесса фильтрования высоковязких суспензий с использованием разбавителей должна проводиться с использованием экономических показателей. Неучет этих показателей может привести к ошибкам при определении оптимальных условий проведения процесса ($g_{p, \text{опт}}$, $q_{\text{опт}}$) и значительным потерям в экономичности.

Литература

1. А. П. Бояринов, В. В. Кафаров, Методы оптимизации в химической технологии, М., «Химия», 1975.
2. Интенсификация использования нефтехимических агрегатов, М., «Химия», 1977.
3. W. Kawecki, Inż. Chem., 1, No. 3, 371 (1971).
4. E. J. Reeves, Ind. Engng Chem., 39, No. 2, 203 (1947).
5. A. F. Orliček, A. Schmidt, Chem.-Ing.-Techn., 24, No. 8, 457 (1952).
6. А. С. Сорока и др., Нефтепереработка и нефтехимия, Киев, «Наукова думка», № 5, 70, 1971.
7. А. С. Сорока, Химия и технология топлив и масел, № 10, 27 (1975).
8. G. H. Göttner, Erdöl und Kohle, 7, No. 5, 286 (1954).
9. Г. М. Островский, Ю. М. Волин, Методы оптимизации сложных химико-технологических схем, М., «Химия», 1970.
10. А. А. Гриченко, Деп. ЦИНТИхимнефтемаш, № 274-75, 1975.
11. В. А. Жужиков, Фильтрование, М., «Химия», 1971.

Новополоцкий
политехнический институт

Поступила
12 февраля 1979 г.