

Влияние образования отложений в порах фильтровальной перегородки на процесс фильтрации

Ю.А. Таран[@], А.В. Козлов, **А.Л. Таран**

МИРЭА – Российский технологический университет (Институт тонких химических технологий имени М.В. Ломоносова), Москва 119571, Россия

[@] Автор для переписки, e-mail: capsula2@mail.ru

Целью работы является рассмотрение механизма закупоривания пор фильтрующего блока мелкими частицами из протекающего внутри них потока фильтрата. Теоретические представления о ходе процесса фильтрования с отложением на стенках пор частиц мелких фракций из фильтрата и отнесение его основ к протеканию процессов с перестройкой из исходной структуры в конечную позволяют описать процесс закупорки пор, используя хорошо изученные представления известных процессов с фазовыми превращениями (в частности, кристаллизацию). Опираясь на эту аналогию и подход к описанию процесса превращения «старой» структуры в «новую» во времени, рассчитали скорости зарождения центров отложений (ω_{nuc}), линейную и объемную скорости (u_{lin}) роста отложений в порах фильтровального блока фильтра при различных значениях движущей силы процесса, разности давлений в системе, при разных концентрациях твердых частиц в суспензии. Получили интерполяционные и экстраполяционные зависимости для анализа механизмов образования и роста отложений определения и расчета этих (ω_{nuc} , u_{lin}) скоростей. С использованием представлений неравновесной термодинамики для оценки влияния движущих сил изучено их влияние (изменения концентрации твердых частиц в суспензии фильтрата и перепада давления на фильтрующем слое) на динамику процесса фильтрования. Используя полученные данные, можно найти степень закупоривания сквозных пор, которая определяет условия проведения фильтрации, тип фильтровальной перегородки, габаритные размеры фильтра.

Ключевые слова: фильтрация, закупоривание пор, процессы со структурной перестройкой системы, неравновесная термодинамика.

The Formation of Deposits on the Walls of the Pores in the Filtering Process

Yuliya A. Taran[@], Alexey V. Kozlov, **Alexander L. Taran**

MIREA – Russian Technological University (M.V. Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies), Moscow 119571, Russia

[@] Corresponding author e-mail: capsula2@mail.ru

The aim of the work is to consider the mechanism of clogging the pores of the filter unit by small particles from the flow of filtrate inside them. Theoretical ideas about the process of filtering with the deposition of small particles from the filtrate on the pore walls and attribution of its fundamentals to restructuring from the original structure to the final structure allow to describe the process of clogging the pores using well studied concepts of known processes with phase transformations (in particular, crystallization). Based on this analogy and the approach to the description of the transformation of the "old" structure into a "new" one in time, using experimental data and their processing we calculated the rate of nucleation of the sediment centers (ω_{nuc}), the linear (v_{lin}) and volumetric rates of sediment plaques growth in the pores of the filter unit at different values of the process driving force, at different pressure difference in the system, and at different concentrations of solid particles in the suspension. Interpolation and extrapolation dependences were obtained for analyzing the mechanisms of sediments formation and growth for determining and calculating these (ω_{nuc} , v_{lin}) rates. Using the concepts of nonequilibrium thermodynamics to assess the influence of the driving forces we studied their influence (changes in the concentration of solid particles in the filtrate suspension and pressure drop across the filtering layer) on the dynamics of the filtration process. Using the data obtained it is possible to find the degree of clogging of through pores, which determines the filtration conditions, the filter septum type, and the filter overall dimensions.

Keywords: filtration, pore plugging, processes with the restructuring of the system, nonequilibrium thermodynamics.

Фильтрация – распространенный процесс [1–3], осложненный разной номенклатурой суспензий, различиями в их стабильности, физико-химических свойствах, размерах, формах частиц твердой фазы и др. В зависимости от размера частицы могут не только задерживаться на фильтрующей поверхности, перекрывая вход в поры фильтровальной перегородки или намывного слоя, но и проходить сквозь нее, двигаясь с потоком фильтрата по каналу пор. Проникшие в сквозные поры частицы могут откладываться на их стенках, накапливаясь там, образуя отложения (в случае кровеносных сосудов – это отложения холестерина, в медицине именуемые «бляшками»), которые со временем перекрывают живое сечение каналов. Это приводит к нежелательному увеличению сопротивления фильтровальной перегородки.

Состояние системы в виде суспензии, образованной частицами и сплошной фазой, обладающей известными свойствами, назовем начальным состоянием системы. Состояние системы с уже отложившимися на стенках проточных пор фильтра частицами, обладающую другими свойствами, назовем конечным. Мы имеем два состояния одной системы и рассматриваем превращения в ней (перестройку структур) за счет зарождения и роста центров отложения осадка на стенках пор, проводя формальную аналогию процесса фильтрации с закупориванием пор с процессами со структурной перестройкой системы (кристаллизация, сублимация, растворение и др.) [4–6]. Кинетика образования новой фазы в этих процессах определяется скоростями зарождения ω_{nuc} и линейными скоростями роста v_{lin} центров новой фазы. Под фазами мы понимаем состояния рассматриваемой системы, отличающиеся друг от

друга строением, энергией, физико-механическими свойствами [4–6].

Динамику закупоривания пор, пользуясь представлениями о формальной аналогии процессов со структурной перестройкой системы [4–6], можно выразить как степень превращения η «старой» фазы в «новую», которая будет зависеть от скорости зарождения ω_{nuc} и линейной скорости роста v_{lin} центров превращения (образования «бляшек», закупоривающих поры, из стабильной суспензии [4]. Эти скорости, в свою очередь, зависят от разности давлений ΔP , создаваемой в системе на фильтровальной перегородке, и концентрации твердых частиц в суспензии ΔC . В связи с нелинейностью таких задач их решают численно [5, 6.], а в ограниченном числе случаев – аналитически [7].

Таким образом, на процесс влияют две движущие силы, определяющие его динамику, следовательно, с их помощью можно управлять процессом. Настоящая работа посвящена созданию модельных представлений о фильтрации с закупоркой пор (с нелинейностями 1–3-го рода) методами вычислительного и физического экспериментов и определению параметров, влияющих на динамику процесса.

Экспериментальная часть

Физический эксперимент проводили на промышленных образцах неорганической и органической природы: конверсионном меле, получаемом из отходов производства как побочный продукт при изготовлении удобрений NPK 16:16:16 [8], и молочной сыворотке, получаемой отделением от продукции маслозавода. Эксперимент проводили на барабанном вакуум-филт্রে марки БОН1-1,0-1У (БОУ1-1,0) под вакуумом 730 ± 10 мм рт. ст.

Суспензию непрерывно подавали в ванну фильтра. Вакуум в барабанном фильтре создавали при помощи масляного вакуум-насоса, в том числе обеспечивающего движущую силу процесса фильтрации.

Фиксировали изменение объема фильтрата во времени $V_f(\tau)$ при различных движущих силах: при ряде значений разности давления ΔP , создаваемого в системе при постоянной концентрации твердых частиц в суспензии, и нескольких значениях концентрации твердых частиц в суспензии ΔC при постоянном перепаде давления ΔP .

Обработкой выборки экспериментальных данных из 20 параллельных опытов экспериментальных данных определяли доверительный интервал с вероятностью 90%. Погрешность экспериментальных данных не превышала 10% с вероятностью 90% (отсечки на кривых на рис. 1–3).

Окончание индукционного периода τ_{ind} свидетельствует о возникновении и росте зародышей отложений. Вероятностный характер определения τ_{ind} компенсировался увеличенным массивом экспериментов [4].

Выразим поток фильтрата через массовый поток твердых частиц в единицу времени через единицу поверхности фильтра.

До момента появления зародышей отложений, закупоривающих каналы фильтровальной перегородки, массовый поток равен:

$$q_m = \frac{V\rho C}{S\tau_{ind}} \quad (1)$$

После образования и роста центров отложений поток начнет уменьшаться:

$$q_m(\tau) = \frac{V(\tau)\rho C}{S\tau} \quad (2)$$

Зная, как изменяется поток во времени, выразим через него степень превращения (долю «закупоренности» проточных каналов фильтровальной перегородки отложениями на стенке сквозных пор):

$$\eta(\tau) = 1 - \frac{q_m(\tau)}{q_m} \quad (3)$$

Тогда возможно представить динамику закупоривания фильтра от влияния разности давлений и концентрации для конверсионного мела (рис. 1).

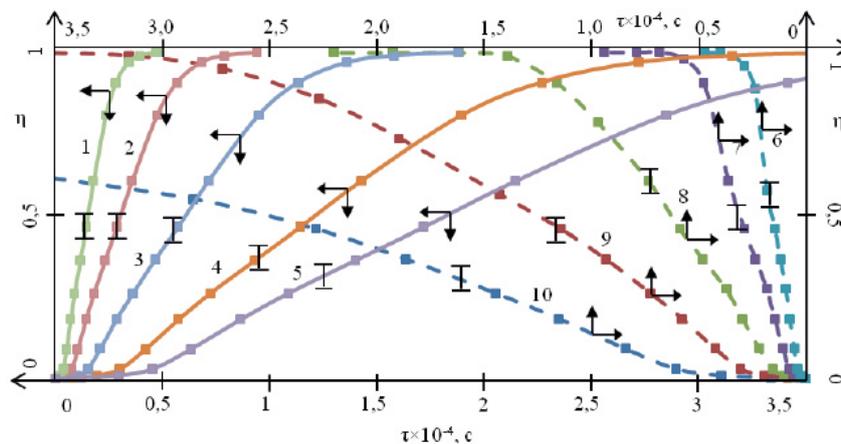


Рис. 1. Зависимость степени превращения (закупоренности) от времени для конверсионного мела – при различных концентрациях твердых частиц в суспензии ($\text{м}^3 \text{тв}/\text{м}^3$) и постоянной разности давлений $\Delta P = 9.8 \pm 0.98$ кПа (сплошная линия): 1 – 0.08; 2 – 0.04; 3 – 0.02; 4 – 0.01, 5 – 0.005; при различных разностях давлений (кПа) в системе и постоянной концентрации твердых частиц $\Delta C = 0.02 \pm 0.002$ $\text{м}^3 \text{тв}/\text{м}^3$ (штриховая линия): 6 – 39.2; 7 – 19.6; 8 – 9.8; 9 – 4.9; 10 – 2.45.

Результаты и их обсуждение

Оценить общность предлагаемого подхода, в частности, диапазон его применения и воспроизводимость полученных результатов можно, проводя подобное исследование на принципиально различных промышленных объектах: молочной сыворотке и конверсионном меле. В ходе фильтрования молочной сыворотки отмечено, что процесс качественно не отличается от фильтрования конверсионного мела.

Из зависимости степени превращения от времени при различных значениях движущих сил следует, что с ростом перепада давления в системе ΔP поры заполняются быстрее, такая же картина наблюдается и с ростом концентрации твердых частиц. Согласно представлениям неравновесной термодинамики, степень превращения $\eta(\tau)$ выражается через сумму удельных потоков, вызванных движущими силами – перепадом давления в системе и концентрацией твердых частиц. Степень превращения описывается

уравнением Колмогорова-Аврами [9], позволяющим установить связь между движущими силами процесса фильтрования и скоростями зарождения ω_{nucl} и роста v_{lin} новых отложений:

$$\eta(\tau) = 1 - \frac{q_m(\tau)}{q_m} = 1 - \frac{A_{m,c}\Delta C + A_{m,p}\Delta P}{q_m} = 1 - \exp\left(-\beta \frac{1}{n+1} \omega_{nucl} v_{lin}^n \tau^{n+1}\right) \quad (4)$$

Коэффициенты переноса $A_{m,c}$ и $A_{m,p}$ вычисляют с помощью минимизации квадратичного отклонения экспериментальных и расчетных значений:

$$\sum_n |q_m^{exp} - q_m^{calc}|^2 \rightarrow \min \quad (5)$$

Чтобы получить зависимость скоростей зарождения и роста от концентрации твердых частиц

в суспензии $\omega_{nucl} = f(\Delta C)$ и $v_{lin} = f(\Delta C)$ (рис. 2), необходимо условно выразить уравнение (4) через одну движущую силу:

$$\eta(\tau) = 1 - \frac{q_m(\tau)}{q_m} = 1 - \frac{\Delta C \left(A_{m,c} + \frac{A_{m,p}\Delta P}{\Delta C} \right)}{q_m} = 1 - \exp\left(-\beta \frac{1}{n+1} \omega_{nucl} v_{lin}^n \tau^{n+1}\right) \quad (6)$$

Зная левую часть уравнения, можно определить значение правой части на любом отрезке времени и выразить отсюда линейную скорость роста новой фазы:

$$\frac{\sum_{(\tau)} |q_m^{exp}(\tau) - q_m^{calc}(\tau)|^2}{\sum_{(\tau)} q_m^{exp}(\tau)} \rightarrow \min \quad (7)$$

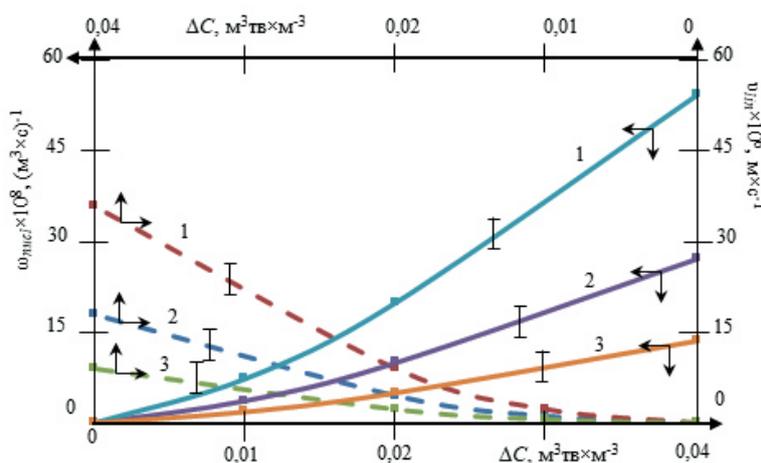


Рис. 2. Зависимость скорости роста центров новой фазы (сплошная линия) и скорости зарождения центров новой фазы (штриховая линия) от разности концентраций в суспензии (конверсионного мела) при постоянной разности давлений ΔP (кПа) в системе: 1 – 4.9, 2 – 9.8, 3 – 19.6.

С позиций формальной аналогии процессов структурной перестройки системы, существование которой подтверждено [4–6] и доказано, в том числе согласованием результатов физического и вычислительного эксперимента, логично в качестве зависимостей v_{lin} и ω_{nucl} воспользоваться апробированными ранее степенными зависимостями. Таким же образом выражаем зависимости $\omega_{nucl} = f(\Delta P)$ и $v_{lin} = f(\Delta P)$ для конверсионного мела (рис. 3).

Экспериментальные данные обработали степенными зависимостями [4], которые обоснованно используются при обработке экспериментальных данных для процессов с фазовыми превращениями, в частности, кристаллизации [10, 11]. Некоторые данные в качестве примера приведены в таблице.

Скорости зарождения и роста можно определять, как:

$$\omega_{nucl} = B_{nucl,P} \Delta P^{n_{nucl,P}} + B_{nucl,C} \Delta C^{n_{nucl,C}} \quad (8)$$

$$v_{lin} = B_{lin,P} \Delta P^{n_{lin,P}} + B_{lin,C} \Delta C^{n_{lin,C}} \quad (9)$$

Расчет коэффициентов переноса массы показал, что их зависимость от движущих сил является нелинейной. Таким образом, мы получаем, что $A_c = f(\Delta C, \Delta P)$ и $A_p = f(\Delta C, \Delta P)$.

Используя формальную аналогию [4], а также хорошо изученный процесс кристаллизации [10, 11], мы исследовали влияние образования отложений в порах фильтровальной перегородки на процесс фильтрации.

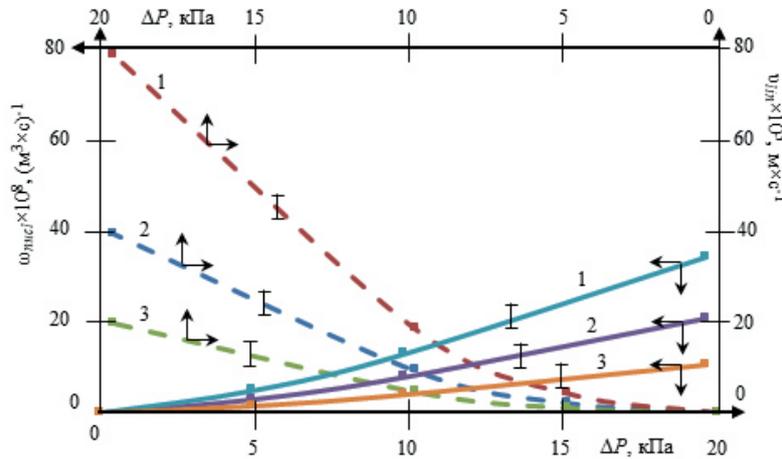


Рис. 3. Зависимость скорости роста центров новой фазы (сплошная линия) и скорости зарождения центров новой фазы (штриховая линия) от разности давлений в системе при постоянных значениях концентраций ΔC ($\text{м}^3 \text{тв}/\text{м}^3$) для конверсионного мела: 1 – 0.04, 2 – 0.02, 3 – 0.01.

Параметры интерполяционных зависимостей скоростей образования центров новой фазы для молочной сыворотки

$\Delta C,$ $\text{м}^3 \text{тв}/\text{м}^3$	$\Delta P,$ кПа	Молочная сыворотка*			
		$B_{nuc^p} P,$ $(\text{м}^3 \text{с})^{-1}/\text{Па}$	$n_{nuc^p} P$	$B_{nuc^p} C,$ $(\text{м}^3 \text{с})^{-1}/(\text{м}^3 \text{тв}/\text{м}^3)$	$n_{nuc^p} C$
0.01	4.9	1.1×10^{-15}	2.1	0.7×10^{-4}	2.0
0.02	4.9	1.1×10^{-15}	2.1	1.2×10^{-4}	2.1
0.04	4.9	1.1×10^{-15}	2.1	2.7×10^{-4}	2.2
0.01	19.6	4.1×10^{-15}	2.3	0.7×10^{-4}	2.0
0.02	19.6	4.1×10^{-15}	2.3	1.2×10^{-4}	2.1
0.04	19.6	4.1×10^{-15}	2.3	2.7×10^{-4}	2.2

* Все значения имеют доверительный интервал $\pm 10\%$ с вероятностью 90%.

Термодинамические основы процессов получения дисперсий (эмульсий и суспензий), имеющих моно- и полидисперсный состав

Поскольку эмульгирование и суспендирование формально подобны процессам со структурной перестройкой системы (процессам с фазовым переходом [5, 6]), то, используя для данных процессов модель, разработанную для кристаллизации, получим модель образования новой фазы для процессов фильтрации:

$$\Delta G = \Delta G_V + \Delta G_S \tag{10}$$

где ΔG_V – изменение энергии Гиббса при изменении объема фазы;

ΔG_S – изменение энергии Гиббса при образовании поверхности.

Число частиц в суспензии определяли, как:

$$n_{new} = \frac{V_{old}}{V_{new}} = \frac{6V_{disp}(1-\varepsilon)}{\pi d_{new}^3} = \frac{3V_{disp}(1-\varepsilon)}{4\pi r_{new}^3} \tag{11}$$

Аналогично число частиц для «старой» фазы выразим в виде:

$$n_{old} = \frac{V_{old}}{V_{new}} = \frac{6V_{disp}(1-\varepsilon)}{\pi d_{old}^3} = \frac{3V_{disp}(1-\varepsilon)}{4\pi r_{old}^3} \tag{12}$$

Изменение энергии Гиббса при образовании «новой» фазы представим в виде:

$$\Delta G = -\frac{4}{3}\pi r^3 \frac{\rho}{M} (\mu_{new} - \mu_{old}) + 4\pi r^2 \sigma \tag{13}$$

где $\frac{\rho}{M} (\mu_{new} - \mu_{old})$ – энергия Гиббса в единице объема

ма при переходе от «старой» фазы к «новой»;

σ – свободная энергия единицы поверхности.

Изменение свободной энергии всей системы при диспергировании с учетом энтропии смешения будет иметь вид:

$$\Delta F = 4\pi r_{new}^2 \sigma n_{new} - n_{new} \frac{TR}{N} \left[\ln \left(\frac{N}{n_{new}} \right) - \frac{n_{old}}{n_{new}} \ln \left(\frac{N}{n_{new}} \right) \right] \tag{14}$$

Каждая часть уравнения выражает изменение свободной энергии системы: левая – за счет диспергирования, правая – за счет образования дисперсной фазы в сплошной среде.

Свободную энергию системы получают умножением числа частиц на энергию Гиббса:

$$\Delta F = n_{new} \Delta G \quad (15)$$

Приравняв уравнения (15) и (14) и преобразовав их, получим:

$$-\frac{4}{3} \pi r^3 \frac{\rho}{M} (\mu_{new} - \mu_{old}) n_{new} + 4 \pi r^2 \sigma n_{new} = 4 \pi r_{new}^2 \sigma n_{new} - n_{new} \frac{TR}{N} \left[\ln \left(\frac{N}{n_{new}} \right) - \frac{n_{old}}{n_{new}} \ln \left(\frac{N}{n_{old}} \right) \right] \quad (16)$$

Откуда изменение химического потенциала системы равно:

$$\mu_{new} - \mu_{old} = \frac{3}{4} \frac{M}{\rho \pi r_{new}^3} \frac{TR}{N} \times \left[\ln \left(\frac{4 \pi r_{new}^3 N}{3 V_{disp} (1 - \varepsilon)} \right) - \left(\frac{r_{new}}{r_{old}} \right)^3 \ln \left(\frac{4 \pi r_{old}^3 N}{3 V_{disp} (1 - \varepsilon)} \right) \right] \quad (17)$$

а изменение энергии Гиббса:

$$\Delta G = -\frac{TR}{N} \left[\ln \left(\frac{4 \pi r_{new}^3 N}{3 V_{disp} (1 - \varepsilon)} \right) - \left(\frac{r_{new}}{r_{old}} \right)^3 \ln \left(\frac{4 \pi r_{old}^3 N}{3 V_{disp} (1 - \varepsilon)} \right) \right] + 4 \pi r^2 \sigma \quad (18)$$

Располагая формулой (18), можно определить (при $\Delta G = 0$) критическое значение межфазного натяжения, при котором система способна к самодиспергированию.

Приравнявая уравнение (18) нулю, выражаем σ_{crit} :

$$\sigma_{crit} = \frac{TR}{4 \pi r_{new}^2 N} \left[\ln \left(\frac{4 \pi r_{new}^3 N}{3 V_{disp} (1 - \varepsilon)} \right) - \left(\frac{r_{new}}{r_{old}} \right)^3 \ln \left(\frac{4 \pi r_{old}^3 N}{3 V_{disp} (1 - \varepsilon)} \right) \right] \quad (19)$$

N – число молекул дисперсной среды, выражаемых как:

$$N = \frac{V_0^{aq} (1 - f) \rho_{aq} N_a}{M_{aq}} \quad (20)$$

где f – доля твердой фазы; V_0^{aq} – объем водной фазы; M_{aq} – молекулярная масса воды.

$$\sigma_{crit} = \frac{T k M_{aq}}{4 \pi r_{new}^2 V_0^{aq} (1 - \phi) \rho_{aq}} \times \left[\ln \left(\frac{4 \pi r_{new}^3 V_0^{aq} (1 - \phi) \rho_{aq} N_a}{3 V_{disp} (1 - \varepsilon) M_{aq}} \right) - \left(\frac{r_{new}}{r_{old}} \right)^3 \ln \left(\frac{4 \pi r_{old}^3 V_0^{aq} (1 - \phi) \rho_{aq} N_a}{3 V_{disp} (1 - \varepsilon) M_{aq}} \right) \right] \quad (21)$$

Сравнивая выражение (21) с уравнением, используемым в коллоидной химии, получаем:

$$\sigma_{crit} = \gamma \frac{T k}{d^2} \quad (22)$$

где γ – коэффициент (определяется эмпирически), пропорциональный $\ln(N/\nu)$.

Вывод уравнения (21) для полидисперсных систем сходен с выводом уравнения для монодисперсных систем.

Значение величины σ_{crit} , вычисленное по уравнению (22), имеет приближенный оценочный характер, который определяет свойство самодиспергирования суспензии для случая полидисперсной системы. Допустим, значение $\sigma_{old-new}$ (поверхностное натяжение между «старой» фазой и «новой») удовлетворяет условию:

$$0 \leq \sigma_{old-new} \leq \sigma_{crit} \quad (23)$$

Отсюда можно сделать вывод, что диспергирование сопровождается уменьшением свободной энергии системы, причем процесс будет происходить самопроизвольно ($\Delta F_{\Sigma} < 0$).

Выводы

1. К процессу фильтрования с закупориванием пор применим механизм кинетики образования новой фазы, разработанный для процессов со структурной перестройкой системы.

Обозначения

A – коэффициент переноса, $(\text{кг}\times\text{м}^3)\times(\text{м}^3 \text{тв}\times\text{с})^{-1}$ и $\text{кг}\times(\text{Па}\times\text{с})^{-1}$; B – интерполяционный коэффициент, $\text{м}^3\times(\text{м}^3\times\text{с}\times\text{м}^3 \text{тв})^{-1}$ и $(\text{м}^3\times\text{с}\times\text{Па})^{-1}$; C – концентрация твердых частиц в суспензии, $\text{м}^3 \text{тв}\times\text{м}^{-3}$; d – диаметр частиц, м; G – энергия Гиббса, Дж; k – постоянная Больцмана, $\text{Дж}\times\text{К}^{-1}$; M – молекулярная масса, $\text{кг}\times\text{кмоль}^{-1}$; n – фактор роста, число твердых частиц в суспензии; N – число атомов вещества; N_A – число Авогадро; P – давление, Па; q – массовый поток твердых частиц, $\text{кг}\times(\text{м}^2\times\text{с})^{-1}$; r – радиус частиц, м; R – универсальная газовая постоянная, $\text{Дж}\times(\text{кмоль}\times\text{К})^{-1}$; S – площадь фильтрования, м^2 ; T – температура, К; V – объем; фильтрата, м^3 ; β – фактор формы; γ – коэффициент пропорциональности; ΔF – изменение свободной энергии, Дж; ΔG_{Σ} – изменение энергии Гиббса при образовании поверхности, Дж; ΔG_V – изменение энергии Гиббса при изменении объема фазы, Дж; ε – порозность в суспензии; η – степень превращения; μ – химический потенциал, $\text{Дж}\times\text{кмоль}^{-1}$; ρ – плотность фильтруемой суспензии, $\text{кг}\times\text{м}^{-3}$; σ – поверхностное натяжение, $\text{Дж}\times\text{м}^{-2}$ или $\text{Н}\times\text{м}^{-1}$; τ – время фильтрования, с; v – скорость роста, $\text{м}\times\text{с}^{-1}$; φ – доля твердой фазы; ω – скорость зарождения, $(\text{м}^3\times\text{с})^{-1}$.

Индексы

aq (aqueous) – водный; *calc* (calculated) – расчетный; *crit* (critical) – критический; *disp* (dispersed) – дисперсный; *exp* (experimental) – экспериментальный; *ind* (induction) – индукционный; *lin* (linear) – линейный рост; *lin,C* – линейный рост, зависящий от концентрации; *lin,P* – линейный рост, зависящий от давления; *m* (mass) – массовый; *m,C* – массовый, зависящий от концентрации; *m,P* – массовый, зависящий от давления; *new* – «новая» фаза; *nucl* (nucleation) – зарождение; *nucl,C* – зарождение, зависящее от концентрации; *nucl,P* – зарождение, зависящее от давления; *old* – «старая» фаза, *old-new* – на границе «старой» и «новой» фаз; Σ – суммарный.

Список литературы:

1. Жужиков В.А. Фильтрование. Теория и практика разделения суспензий. М.: Химия, 1971. 440 с.
2. Федосов С.В., Осадчий Ю.П., Маркелов А.В., Теленов А.Т. Исследование механизма закупоривания пор полимерных мембран // Междунар. научно-исслед. журнал. 2015. Вып. № 1–3 (32). С. 18–20.
3. Самохвалов Н.М., Скачков Е.В., Сенотова С.А. Моделирование процесса фильтрования с закупориванием пор // Вестник ИрГТУ. 2009. № 2 (38). С. 181–185.
4. Таран Ю.А., Таран А.В. Теория и практика изучения кинетики фазовых и формально аналогичных им превращений / Под общ. ред. А.Л. Тарана. М.: Московский технологический университет (МИРЭА), 2016. 246 с.
5. Таран Ю.А. Разработка и анализ процессов гранулирования расплавов с использованием экологически безопасных энергосберегающих схем: дис. ... канд. техн. наук. М., 2011. 254 с.
6. Пынкова Т.И. Ресурсосберегающая и экологически безопасная технология процесса капсулирования твердофазных и жидкофазных продуктов: дис. ... канд. техн. наук. М., 2014. 172 с.
7. Алексеев Б.В. Аналитическое решение уравнения Лейбенсона в теории фильтрации // Тонкие химические технологии. 2016. Т. 11. № 1. С. 34–39.
8. Чернышов А.К., Левин Б.В., Тутолуков А.В., Огарков А.А., Ильин В.А. Аммиачная селитра: свойства, производство, применение. М.: Инфохим, 2009. 544 с.

References:

1. Zhuzhikov V.A. Filtration. Theory and practice of separation of suspensions. Moscow: Khimiya Publ., 1971. 440 p. (in Russ.)
2. Fedosov S.V., Osadchy Yu.P., Markelov A.V., Telenov A.T. Investigation of the mechanism of pore blocking of polymeric membranes. *Mezhdunarodnyi nauchno-issledovatel'skii zhurnal* (International Research Journal). 2015; 1-3(32):18-20. (in Russ.)
3. Samokhvalov N.M., Skachkov E.V., Senotova S.A. Modeling of the filtering process with pore blocking. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* (Proceedings of Irkutsk State Technical University). 2009; 2(38):181-185. (in Russ.)
4. Taran Yu.A., Taran A.V. Theory and practice of studying the kinetics of phase and formally similar transformations. Ed. by A.L. Taran M.: Moscow Technological University (MIREA), 2016. 246 p. (in Russ.)
5. Taran Yu.A. Development and analysis of processes of melt granulation processes using environmentally friendly energy-saving schemes: Ph.D. thesis. Moscow, 2011. 254 p. (in Russ.)
6. Pynkova T.I. Resource-saving and environmentally friendly technology of the process of encapsulation of solid-phase and liquid-phase products: Ph.D. thesis. Moscow, 2014. 172 p. (in Russ.)
7. Alekseev B.V. Analytical solution of nonlinear Leybenzon equation in the theory of filtration. *Tonkie khim. tekhnol. = Fine Chemical Technologies*. 2016; 11(1):34-39. (in Russ.)

9. Колмогоров А.Н. К статической теории кристаллизации металлов // Изв. АН СССР. Сер. математическая. 1937. Т. 1. Вып. 3. С. 355–359.

10. Любов Б.Я. Теория кристаллизации в больших объемах. М.: Наука, 1975. 256 с.

11. Зельдович Я.Б. Избранные труды. Химическая физика и гидродинамика. М.: Наука, 1984. 374 с.

8. Chernyshov A.K., Levin B.V., Tutolukov A.V., Ogarkov A.A., Il'in V.A. Ammonium nitrate: properties, production, application. Moscow: Infokhim Publ., 2009. 544 p.

9. Kolmogorov A.N. On the static theory of metal crystallization. *Izvestiya AN SSSR. Ser. Mathem.* 1937; 1(3):355-359. (in Russ.)

10. Lyubov B.Ya. Theory of crystallization in large volumes. Moscow: Nauka Publ., 1975. 256 p. (in Russ.)

11. Zeldovich Ya.B. Selected works. Chemical physics and hydrodynamics. Moscow: Nauka Publ., 1984. 374 p. (in Russ.)

Об авторах:

Таран Юлия Александровна, кандидат технических наук, доцент кафедры процессов и аппаратов химических технологий им. Н.И. Гельперина Института тонких химических технологий им. М.В. Ломоносова ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119571, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 86).

Козлов Алексей Валентинович, аспирант кафедры процессов и аппаратов химических технологий им. Н.И. Гельперина Института тонких химических технологий им. М.В. Ломоносова ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119571, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 86).

Таран Александр Леонидович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой процессов и аппаратов химических технологий им. Н.И. Гельперина Института тонких химических технологий им. М.В. Ломоносова ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119571, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 86).

About the authors:

Yuliya A. Taran, Ph.D. (Engineering), Associate Professor of the N.I. Gelperin Chair of Processes and Apparatus of Chemical Technology, M.V. Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies, MIREA – Russian Technological University (86, Vernadskogo pr., Moscow 119571, Russia).

Alexey V. Kozlov, Postgraduate Student, of the N.I. Gelperin Chair of Processes and Apparatus of Chemical Technology, M.V. Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies, MIREA – Russian Technological University (86, Vernadskogo pr., Moscow 119571, Russia).

Alexander L. Taran, D.Sc. (Engineering), Professor, Head of the N.I. Gelperin Chair of Processes and Apparatus of Chemical Technology, M.V. Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies, MIREA – Russian Technological University (86, Vernadskogo pr., Moscow 119571, Russia).

Для цитирования: Таран Ю.А., Козлов А.В., Таран А.Л. Влияние образования отложений в порах фильтровальной перегородки на процесс фильтрации // Тонкие химические технологии. 2019. Т. 14. № 2. С. 15–22. DOI: 10.32362/2410-6593-2019-14-2-15-22

For citation: Taran Yu.A., Kozlov A.V., Taran A.L. The formation of deposits on the walls of the pores in the filtering process. *Tonkie Khim. Tekhnol. = Fine Chemical Technologies.* 2019; 14(2): 15-22. (in Russ.). DOI: 10.32362/2410-6593-2019-14-2-15-22