

УДК 661.521

КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ ХЛОРИСТОГО АММОНИЯ

Никандров М.И., Никандров И.С.

*Дзержинский политехнический институт Нижегородского государственного университета,
Дзержинск, e-mail: mnnd@mail.ru*

Изучена кристаллизация хлористого аммония из растворов, содержащих 38% хлорида аммония, политермическим методом. Определено влияние скорости охлаждения раствора в интервале 0,5–2,1 град./мин на скорость образования центров кристаллизации и скорость роста кристаллов. Показано, что размер кристаллов определяется соотношением скорости образования зародышей и скорости роста кристаллов. Расхождение расчетных и экспериментальных величин средних диаметров кристаллов не превышает 10%. С использованием методики Тодеса О.М. определены значения средних диаметров кристаллов, доля зародышей и доля частиц коагуляции. Определены скорость фильтрации суспензии и производительность фильтра. Установлено время свободного отстаивания суспензии в 26%-м растворе хлористого аммония при температуре 20 °С. Установлено влияние скорости охлаждения раствора на величину пересыщений, достигаемых в нем. Показано влияние отношения фазовых масс жидкой и твердой фаз на время отстаивания суспензии. Определен оптимальный технологический режим процессов кристаллизации и разделения суспензии.

Ключевые слова: хлорид аммония, кристаллизация, раствор, пересыщение, размер кристаллов

CRYSTALLIZATION OF AMMONIUM CHLORIDE

Nikandrov M.I., Nikandrov I.S.

*Dzerzhinsky Polytechnic Institute of Nizhegorodsky Technical University,
Dzerzhinsk, e-mail: mnnd@mail.ru*

Studied crystallization of ammonium chloride of solutions, containing 38% of ammonium chloride, by means of polytermicmethod. To determine the influence of the cooling rate of the solution in the interval 0,5–2,1 deg./min. at the rate of crystallization centers and speed of crystal growth. It is shown that the size of the crystals is determined by the ratio of the velocity of the germ of a crystal and growth rate of crystals. The discrepancy between calculated and experimental values of average diameters of the crystal does not exceed 10%. With the use of methods of Todes O.M. defined values of average diameters of crystals, the share of the embryos and the share of particles coagulation. Defined the speed filtering suspensions and productivity of the filter. Set the time free uphold the suspension in 26% solution of ammonium chloride at the temperature of 20 C.Set the influence of the speed of the cooling of the solution on the value of supersaturation, achieved in it. It is shown the influence of the relationship phase of the masses of liquid and solid phases at the time of assertion of the suspension. Determined the optimal technological mode of processes of crystallization and separation of suspensions.

Keywords: ammonium chloride, crystallization solution, supersaturation, the size of the crystals

В связи с дефицитом хлористого аммония является актуальной организация производства данной соли на базе отходящих газов огневого обезвреживания отходов получения хлоркарбонновых кислот. Предложено хлористый водород из печных газов поглощать циркулирующим в абсорбционной системе маточным раствором хлорида аммония. После нейтрализации солянокислого щелока аммиаком хлористый аммоний выделяют политермической кристаллизацией из раствора, содержащего 38–43% хлорида [3].

Целью данной работы явилось определение оптимальных параметров кристаллизации, обеспечивающих получение хорошо фильтрующихся кристаллов.

Материал и методы исследования

Выполнена расчетная оценка скоростей образования центров кристаллизации и роста кристаллов по методу Тодеса и Себалло [5, 6].

Проведено экспериментальное исследование кристаллизации хлористого аммония из водного раствора, содержащего 38% NH₄Cl. Установка состояла из кристаллизатора с рубашкой охлаждения и мешал-

кой ($n = 24$ об/мин) вместимостью 0,032 м³, напорного бака с подогревателем вместимостью 0,025 м³, приемного бака вместимостью 0,063 м³ и нутч-фильтра с площадью фильтрации 0,07 м²

Раствор из мерника с температурой 80 °С сливали в кристаллизатор, включали мешалку и начинали подачу охлажденного (3–5 °С) рассола, регулируя расходом рассола скорость охлаждения в кристаллизаторе. По охлаждению раствора до 20 °С суспензию сливали в приемник 3 кг суспензии мерной емкостью наливали на фильтр и разделяли. Отношение Ж:Т в суспензии составляло 5,1:1. Высушенные до влажности < 1% кристаллы взвешивали. Результаты опытов представлены в таблице.

Результаты исследования и их обсуждение

Количество кристаллизующейся соли определяется балансом кристаллизации:

$$G_{кр} = G_p(C_o - C_k), \quad (1)$$

где $G_{кр}$ – производительность по кристаллизующему веществу, кг; G_p – производительность по исходному раствору, кг; C_o и C_k – концентрация вещества в исходном растворе и в конечном маточнике к моменту (τ).

Кристаллизация хлористого аммония

Скорость охлаждения, град/мин	Скорость обр. зародышей $U \cdot 10^{-7}$, 1/м ³ с	Средний размер, мкм		Гранулометрический состав, % масс				
		расч.	эксп.	Менее 40 мкм	40-100 мкм	100-200 мкм	200-300 мкм	Более 320 мкм
0,42	0,6	420	407	4	9	31	35	21
0,57	0,92	350	328	6	13	34	31	16
0,72	1,1	280	265	8	16	29	32	15
0,96	1,3	240	220	7	20	26	36	11
1,47	2,1	160	154	12	46	21	21	-

Величина пересыщения в растворе C_n при массовой кристаллизации определяет вероятность возникновения центров кристаллизации U и скорость их роста λ .

Скорость роста кристаллов определяется балансом скоростей создания пересыщения $(dc/dt)_n$ и снятия пересыщения $(dc/dt)_k$:

$$\frac{dC}{d\tau} = \left(\frac{dC}{d\tau}\right)_n + \left(\frac{dC}{d\tau}\right)_k. \quad (2)$$

Скорость образования пересыщения [2]:

$$\left(\frac{dC}{d\tau}\right)_n = \frac{C_0}{\tau_e} \exp\left(-\frac{\tau}{\tau_e}\right), \quad (3)$$

где τ_e – характеристическое время процесса. Скорость кристаллизации (снятие пересыщения) по данным Тодеса О.М. [4-6]:

$$\left(\frac{dC}{d\tau}\right)_k = 3\gamma\lambda \int_0^z (z-z^1)^2 F(c^1) dz^1, \quad (4)$$

где $z = \int_0^{\tau} \lambda(\tau') d\tau'$; $F(c^1) = \frac{U(c^1)}{\lambda(c^1)}$.

Подставив (3) и (4) в (2) и переходя к переменной Z , получили дифферен-

$$x(\xi) = 1 + A_1 \sin y \cdot shy + A_2 \sin ychy + A_3 \cos ychy + A_4 \cos yshy - \frac{x_0}{1+\mu^4} \exp(-\xi/\mu),$$

где

$$A_1 = x_0 \cdot \frac{\mu^2}{1+\mu^4} \exp(-\xi m / \mu); \quad A_2 = \frac{x_0}{\sqrt{2}} \mu \frac{1+\mu^2}{1+\mu^4} \exp(-\xi m / \mu); \quad (9)$$

$$A_3 = \frac{x_0}{1-\mu^4} \exp(-\xi m / \mu); \quad A_4 = \frac{x_0}{\sqrt{2}} \mu \frac{\mu^2-1}{\mu^4+1} \exp(-\xi m / \mu); \quad (10)$$

здесь $\mu = \frac{zl}{z_0}$ – безразмерный параметр отношения времён создания и снятия пересыщения.

$$z_0 = \sqrt[4]{\frac{x_0-1}{6\gamma-F_0}}; \quad (11)$$

$\xi = \frac{z}{z_0}$ – характеристическое время

$$y = \frac{\xi - \xi_m}{\sqrt{2}}. \quad (12)$$

циальное уравнение для определения $X(Z) = C(Z)/C_m$

$$\frac{d^4 x}{dz^4} = -\frac{x_0}{z^4 e} \exp\left(\frac{-z}{ze}\right) - 6 \frac{\gamma\rho}{cm} F(x). \quad (5)$$

С начальными условиями при $Z = 0$

$$x_{(0)} = 0; \quad \frac{dx}{dz} = \frac{x_0}{ze};$$

$$\frac{d^2 x}{dz^2} = -\frac{x_0}{ze^2}; \quad \frac{d^3 x}{dz^3} = \frac{x_0}{ze^3}. \quad (6)$$

Функция:

$$F_x = \begin{cases} 0 & \text{при } x < 1 \\ F_0 \frac{x-1}{x-1} & \text{при } x > 1. \end{cases} \quad (7)$$

до достижения метастабильной области ($x < 1$) $F(x) = 0$ решение уравнения (6) имеет вид:

$$X(z) = x_0 [1 - \exp(-z/ze)]. \quad (8)$$

При $x > 1$ уравнение (6), как дано Тодесом О.М. и Себалоо В.А., складывается из общего интеграла однородного уравнения, и оно имеет вид:

Значение, при котором достигается граница метастабильной области ξ_m , определяется выражением:

$$\xi_m = -\mu \ln\left(1 - \frac{1}{x_0}\right). \quad (13)$$

Подстановкой (13) в (12) получено [6]:

$$y = \frac{\xi + \mu \ln\left(1 - \frac{1}{x_0}\right)}{\sqrt{2}}. \quad (14)$$

После достижения критического значения пересыщения, в системе начинает идти интенсивная кристаллизация со снятием пересыщения в растворе. После этого скорость

роста кристаллов падает. При повторном достижении границы метастабильной области при $\xi = \xi_m$ (2), определяемом из уравнения $x(\xi) = 1$, уравнение (9) примет вид:

$$x(\xi) = 1 + x_0 \left[1 - \exp\left(-\frac{\xi - \xi_{m(2)}}{\mu}\right) \right] + a_1 (\xi - \xi_{m(2)})^3 + a_2 (\xi - \xi_{m(2)})^2 + a_3 (\xi - \xi_{m(2)}), \quad (15)$$

где

$$a_1 = \frac{1}{6} \left[\frac{d^3 x}{d\xi^3} \Big|_{\xi \equiv \xi_{m(2)}} - \frac{x_0}{\mu^3} \right];$$

$$a_2 = \frac{1}{2} \left[\frac{d^2 x}{d\xi^2} \Big|_{\xi \equiv \xi_{m(2)}} + \frac{x_0}{\mu^2} \right];$$

$$a_3 = \left[\frac{dx}{d\xi} \Big|_{\xi \equiv \xi_{m(2)}} - \frac{x_0}{\mu} \right].$$

Анализ зависимостей для пересыщения в растворе от времени $x(\xi)$ показывает, что величина времени $x(\xi)$ зависит от параметра μ , определяемого отношением времени образования и снятия пересыщения (z_0) и отношения ($x_0 = c_0/c_m$) исходного пересыщения c_0 к концентрации границы метастабильной области c_m .

С увеличением параметра μ возрастает время создания максимального пересыщения, а его модуль (величина) уменьшается.

Например, при $\mu = 1$ максимальное значение $x = 1,0451$ достигается за время $\xi = 3,4$.

А при $\mu = 2$ максимальное значение $x = 1,01$ достигается уже за время $\xi = 7$. При времени $\xi^{\max} = \xi_{m(2)}$ величина пересыщения становится равной $x \mp x_{\max} = 1$, что соответствует достижению метастабильной области. С этого времени образование новых

зародышей прекращается, а идет рост ранее сформировавшихся частиц. Полностью пересыщение в растворе будет снято в момент $x(\xi_0) = 0$.

Максимальный размер (L_{\max}) выросших кристаллов к этому времени будет равен:

$$L_{\max} = \xi_0 z_0 - z_{m(1)} = \left[\xi_0 - \mu \ln\left(1 - \frac{1}{x_0}\right) \right] z_0. \quad (16)$$

Минимальный размер (L_{\min}) к окончанию кристаллизации будут иметь кристаллы, возникшие к моменту достижения метастабильной зоны, т.е. при времени $\xi = \xi_{m(2)}$

$$L_{\min} = (\xi_0 - \xi_{m(2)}) z_0. \quad (17)$$

Величину начального пересыщения C_0 можно представить в виде [76]:

$$C_0 = C \left[1 - \exp(-\tau / \tau_e) \right]. \quad (18)$$

Производительность по кристаллизующему веществу $\sigma_{\text{кр}}$ равна:

$$\sigma_{\text{кр}} = 3\gamma\lambda \int_0^z F(c') \cdot (z - z')^2 \exp\left(-\frac{z - z'}{d_{\text{cp}}}\right) dz', \quad (19)$$

где γ – фактор размера (габитуса) кристаллов; d_{cp} – величина, характеризующая средний размер кристаллов.

Подставляя (18) и (19) в уравнение (1) и перейдя к переменной величине, получим:

$$\frac{d^3 c}{dz^3} + \frac{3}{d_{\text{cp}}} \frac{d^2 c}{dz^2} + \frac{3}{d_{\text{cp}}^2} \frac{dc}{dz} + \frac{c}{d_{\text{cp}}^3} = -\frac{6\gamma\lambda \cdot F(c)}{\sigma_p} + \frac{c_0}{d_{\text{cp}}^3} + c_0 \left(\frac{1}{ze} - \frac{1}{d_{\text{cp}}} \right) \exp(-z/z_e), \quad (20)$$

со следующими начальными условиями для $z = 0$

$$C_0 = 0; \quad \left. \frac{dc}{dz} \right|_{z=0} = \frac{C_0}{z_e}; \quad \left. \frac{d^2 c}{dz^2} \right|_{z=0} = \frac{C_0}{z_e^2}. \quad (21)$$

До момента достижения метастабильной области ($c < c_m$) $F(c) = 0$ и при начальных условиях (21) уравнение (15) имеет вид:

$$x(\xi) = A_1 \exp\left(-\left(1 + \frac{1}{e}\right)(\xi - \xi_m)\right) + \left[A_2 \cos \frac{\sqrt{3}}{2} (\xi - \xi_m) + A_3 \sin \frac{\sqrt{3}}{2} (\xi - \xi_m) \right] \times \exp\left[\left(\frac{11}{2} - \frac{1}{e}\right) (\xi - \xi_m)\right] + a \exp(-\xi/\mu) + b, \quad (22)$$

$$x(\xi) = x_0 \left[1 - \exp(-\xi/\mu) \right],$$

где $\xi = z/z_0$, а $z_0 = \sqrt[3]{\frac{\sigma_p (c_0 - c_m)}{6\gamma\lambda \cdot F}}$.

С началом образования зародышей (снятие пересыщения) $x > 1$ уравнение (15) приобретает вид:

где $e = d_{\text{cp}} / z_0$ – величина отношения среднего размера кристаллов к z_0 .

$$a = x_0 \frac{\left(\frac{1}{\mu} - \frac{1}{e}\right)^3}{1 - \left(\frac{1}{\mu} - \frac{1}{e}\right)^3}; \quad b = \frac{1 + \frac{x_0}{e^3}}{1 + \frac{1}{e^3}};$$

$$A_1 = c_1 - A_2; \quad A_2 = 2/3(c_2 + B_1 C_1) - \frac{A_3}{\sqrt{3}};$$

$$A_3 = \frac{C_3 - B_1^2 C_1 - 2/3(C_2 + B_1 C_1)(B_2^2 - B_1^2 - 3/4)}{\sqrt{3} \cdot B_2 - (B_2^2 - B_1^2 - 0,75) / \sqrt{3}};$$

$$B_1 = 1 + \frac{1}{e}; \quad B_2 = \frac{1}{2} - \frac{1}{e};$$

$$x(\xi) = \left[D_1 + D_2 (\xi - \xi_m^*) + D_3 (\xi - \xi_m^*)^2 \right] \exp(-\xi/e) + x_0 [1 - \exp(-\xi/\mu)], \quad (25)$$

где

$$D_1 = \left[1 - x_0 (1 - \exp(-\xi_m^*/\mu)) \right] \exp(\xi_m^*/e).$$

$$D_2 = \left[\frac{dx}{d\xi} \Big|_{\xi=\xi_m^*} + \frac{D_1}{e} \exp\left(\frac{-\xi_m^*}{e}\right) - \frac{x_0}{\mu} \exp(-\xi_m^*/\mu) \right] \cdot \exp\left(\frac{\xi_m^*}{e}\right);$$

$$D_3 = \left[\frac{1}{2} \frac{d^2x}{d\xi^2} \Big|_{\xi=\xi_m^*} + 2 \frac{D_2}{e} \exp\left(\frac{-\xi_m^*}{e}\right) - \frac{D_1}{e^2} \exp\left(\frac{-\xi_m^*}{e}\right) + \frac{x_0}{\mu^2} \exp\left(\frac{-\xi_m^*}{\mu}\right) \right] \cdot \exp\left(\frac{\xi_m^*}{e}\right).$$

Величина $x(\xi)$ зависит от трех безразмерных параметров: μ – определяемого отношением времени образования и снятия пересыщения; x_0 – характеризуемого отношением величины исходного пересыщения вещества C_0 к пересыщению в момент попадания в метастабильную область и e – характеризуемого отношением среднего размера кристаллов (d_{cp}) к характерному времени снятия пересыщения z_0 .

Как показано Тодесом О.М. [5, 6], зависимость пересыщения $x(\xi)$ в кристаллизаторе от времени обычно носит волнообразный характер [6], и это подтверждается на практике. Из-за колебания пересыщений в аппарате происходят колебания скорости возникновения зародышей кристаллов U . Это соответственно приводит к колебанию размеров кристаллов и меняет гранулометрический состав продукта.

Процесс роста кристаллов условно разбивают на 3 стадии:

- рост зародышей до достижения размеров устойчивости (30–50 мкм);
- рост и образование стабильных кристаллов за счет коагуляции зародышей (100–200 мкм);

$$C_1 = 1 - a(1 - 1/x_0) - b;$$

$$C_2 = \frac{x_0 + U}{U} \left(1 - \frac{1}{x_0} \right);$$

$$C_3 = -\frac{x_0 + a}{\mu^2} \left(1 - \frac{1}{x_0} \right). \quad (23)$$

Величина границы метастабильной области ξ_m определяется из условий $x(\xi_m) = 1$. Отсюда время достижения метастабильной зоны равно:

$$\xi_m = -\mu \ln \left(1 - \frac{1}{x_0} \right). \quad (24)$$

После достижения метастабильной области при $\xi = \xi_m^*$ и $x(\xi) = 1$, уравнение (43) при $x < 1$ примет вид:

- рост кристаллов за счет снятия пересыщения с частичным их разрушением и дроблением.

По достижении размера 30–50 мкм зародыши начинают активно коагулировать и через время τ_0 число растущих кристаллов не зависит от числа коагулирующих частиц.

$$\tau_0 \geq \frac{2}{AN}, \quad (26)$$

где A – коэффициент коагуляции, обычно равный $A = 10^{-10} \text{ м}^3/\text{с}$; N – начальное число коагулирующихся частиц, $N \approx 10^9$. Следовательно, τ_0 обычно равно 10–100 с. Среднее время пребывания кристаллов в аппарате составляет 10^3 – 10^4 с.

Поскольку $\tau > \tau_0$, то эффективная скорость образования зародышей новых кристаллов U не зависит от скорости гомогенного зародышеобразования [6]:

$$U = A_{\text{эфф}} \cdot N^2, \quad (27)$$

где $A_{\text{эфф}}$ – постоянная скорость зародышеобразования; N – число частиц крупнее r (≈ 100 мкм), участвующих в росте и разрушении.

Скорость возникновения новых центров кристаллизации (U) равна:

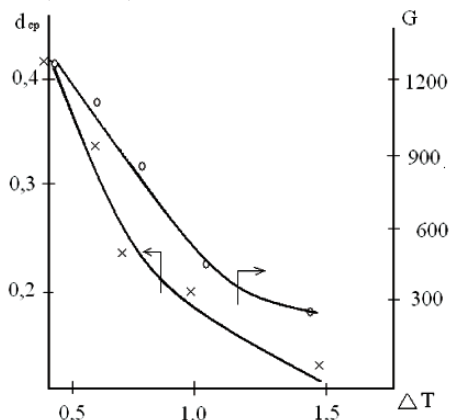
$$U = \frac{k^2}{A_{эфф}} \exp\left(2 \frac{kr}{\lambda}\right),$$

где k – постоянная скорости выгрузки кристаллов; $A_{эфф} = 2,85 \cdot 10^{-13} \text{ м}^3/\text{с}$; r – размер частиц коагуляции, 30–50 мкм[1]; λ – скорость роста кристаллов, $(0,1-0,3) \cdot 10^7 \text{ м/с}$.

Значение U меняется обычно в пределах $(1-30) \cdot 10^7 \text{ м}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$.

Исследование показало, что с увеличением скорости охлаждения раствора с 0,42 до 1,47 град/мин средний размер кристаллов уменьшается с 0,407 до 0,154 мм. Одновременно возрастает доля кристаллов зародышевого размера (в 3 раза) и скорость образования зародышей (в 3,5 раза).

Как видно из рисунка, с увеличением скорости охлаждения с 0,42 до 1 град/мин сьем осадка на фильтре падает с 1200 до 500 кг/(м³·час).



Влияние скорости охлаждения (ΔT , град/мин) на средний размер кристаллов хлорида аммония ($d_{кр}$, мм) и сьем кристаллов на фильтре (G , кг/(м³·ч))

Сьем кристаллов с единицы объема кристаллизатора при скорости охлаждения 0,75–1 град/мин – составляет 30 кг/(м³·час).

По сравнению с растворами фосфатов достигаемые в растворе хлорида аммония пересыщения имеют существенно меньшие значения. С увеличением скорости охлаждения раствора с 0,5 до 2,1 град/мин пересыщение в растворе меняется с 0,21 до 0,26%. Меньшие значения достигаемых пересыщений способствуют росту изометричных хорошо фильтрующихся кристаллов хлористого аммония. Скорость отстаивания суспензии кристаллов хлорида аммония в 26% маточном растворе при температуре 20 °С и отношении масс Ж:Т, равной 5,1:1 по времени образования осветленного слоя высотой 100 мм в мерном цилиндре с общей высотой слоя суспензии 200 мм, равна 0,05 мин.

При отношении Ж:Т, равном 3:1, время возрастает до 0,06 мин и при отношении

масс Ж:Т, равном 2:1, время отстаивания составляет 0,08 мин. Следовательно, перед разделением суспензии на фильтре или фильтрующей центрифуге суспензию в кристаллизаторе после выключения мешалки нужно декантировать для уменьшения времени фильтрации суспензии. Суспензия с отношением Ж:Т, равном 2:1, хорошо подвижна и сливается по трубопроводу.

Таким образом, на практике следует рекомендовать поддерживать в кристаллизаторе скорость охлаждения, равную 0,75–1 град/мин, обеспечивающую больший сьем кристаллов с единицы объема кристаллизатора (30 кг/(м³·ч)) и высокую производительность разделения суспензии.

Расхождение расчетных и экспериментальных значений средних диаметров кристаллов не превышает 10%.

Список литературы

1. Бельшев М.А., Баранов Г.П., Постников В.А. Условие получения крупных кристаллов и образование вторичных зародышей при кристаллизации хлористого калия // Химическая промышленность. – 1977. – №6. – С. 455–457.
2. Матусевич Л.Н. Кристаллизация из растворов в химической промышленности. – М.: Химия, 1968. – 324 с.
3. Никандров М.И., Никандров И.С. Исследование очистки печных газов обезвреживания отходов производства хлорорганических веществ промывкой соляной кислотой перед переработкой газов в хлорид аммония // Труды НГТУ. – Н. Новгород, 2011. – №1 (86). – С. 252–257.
4. Тодес О.М. Кинетика процессов кристаллизации // Проблемы кинетики и катализа. – 1949. – Т.18, № 7. – С. 91–93.
5. Тодес О.М., Себалло В.А., Гольчик Е.М. Массовая кристаллизация из растворов. – Л.: Химия, 1984. – 232 с.
6. Тодес О.М., Себалло В.А., Зельманов Г.З. Анализ тепло-массообменных процессов при массовой кристаллизации // Журнал Прикладной химии. – 1985. – Т.58, № 3. – С. 691–694.

References

1. Belyshev M.A., Baranov, G.P., Postnikov V.A. Condition for receiving large crystal-fishing and education secondary of germs in the crystallization of potassium chloride—Chemical industry, 1977, no. 6, pp. 455–457.
2. Matusevich L.N. Crystallization from solutions in the chemical industry. Moscow, Chemistry, 1968. 324 p.
3. Nikandrov M.I., Nikandrov I.S. Study of the purification of the furnace gases waste disposal of production waste organochlorine substances washing hydrochloric acid before processing gases in ammonium chloride— Proceedings of Nizhgorodsky Technical University, Nizhny Novgorod, 2011, no. 1 (86), pp. 252–257.
4. Todes O.M. The kinetics of the processes of crystallization— Problems of kinetics and catalysis, 1949, T.18, no. 7, pp. 91–93.
5. Todes O.M., Seballo V.A., Goltzik E.M. Mass crystallization from solutions. Leningrad, Chemistry, 1984. 232 p.
6. Todes O.M., Seballo V.A., Zelmanov G.Z. The Analysis of heat-mass-exchange processes with mass crystallization— Journal of Applied Chemistry, 1985, T.58, no. 3, pp. 691–694.

Рецензенты:

Луконин В.П., д.т.н., проф., генеральный директор ФГУП «Научно-исследовательский институт химии и технологии полимеров им. В.А. Каргина с опытным заводом» (ФГУП «НИИ Полимеров»), г. Дзержинск;
Ширшин К.В., д.х.н., проф., зам. директора по научной работе ФГУП «Научно-исследовательский институт химии и технологии полимеров им. В.А. Каргина с опытным заводом» (ФГУП «НИИ Полимеров»), г. Дзержинск.

Работа поступила в редакцию 19.03.2012.