Приближенный инженерный расчет кристаллизаторов-охладителей для молочного сахара в изогидрических условиях

Константин К. Полянский¹ tovar201@list.ru
 Геннадий В. Калашников²
 Александр С. Муравьев² huntrun@mail.ru

¹ Воронежский филиал Российского экономического ун-та им. Г. В. Плеханова, ул. Карла Маркса, 67А, г. Воронеж, 394036, Россия

² Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия

Реферат. Ранее была предпринята попытка создания математической модели непрерывной кристаллизации лактозы в водных растворах при различных пересыщениях. Расчетный способ базировался на основе нового критерия метастабильности пересыщенных растворов. Критерий метастабильности раствора в данном случае представляет собой безразмерную величину от 0 до 1 и отражает роль зародышеобразования в любой момент времени. Другими словами, эта безразмерная величина, показывающая соотношение скоростей зародышеобразования и роста кристаллов. Нами эта величина определена путем математического моделирования с использованием модифицированной модели Гюнтера–Маца. Практическая значимость критерия заключается в установлении области кристаллизации (смешанная, нуклеация и роста) с учетом поверхности внесенной кристаллической фазы. Установлено, что при малой поверхности процесс кристаллизации протекает преимущественно в смешанной области, при отсутствии затравки ($F=0$), при превышении границы метастабильности идет в blast нуклеации ($P_g=0,1$), при больших поверхностях кристаллов F процесс протекает в области роста даже при высоких пересыщениях ($P_g=0,9$), т.е. он позволяет быстро определить необходимое количество затравки с целью интенсификации процесса кристаллизации. Он может быть применен для любого кристаллизующего вещества, если имеются кинетические параметры процесса (константы скорости и кинетические порядки зародышеобразования и роста, растворимость и др.). Однако присутствие несахаров и соответствующей приборной базы вызывают большие осложнения по нахождению вышеуказанных параметров процесса рабочих растворов, поэтому остановились на упрощенном инженерном методе расчета.

Ключевые слова: кристаллизатор-охладитель, молочный сахар, материальный и тепловой баланс, коэффициент пересыщения, доброкачественность сиропа

Approximate engineering calculation of chill molds for milk sugar in isohydric conditions

Konstantin K. Polyanskii¹ tovar201@list.ru
 Gennadii V. Kalashnikov²
 Aleksandr S. Muravev² huntrun@mail.ru

¹ Voronezh Branch of the Russian Economic University. GV Plekhanov, Karl Marx str., 67A Voronezh, 394036, Russia

² Voronezh state university of engineering technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia

Summary. Earlier, an attempt was made to create a mathematical model for the continuous crystallization of lactose in aqueous solutions at various supersaturations. The calculation method was based on a new criterion for the metastability of supersaturated solutions. The metastability criterion of the solution in this case is a dimensionless quantity from 0 to 1 and reflects the role of nucleation at any time. In other words, this dimensionless quantity, showing the ratio of the rates of nucleation and growth of crystals. We determined this value by mathematical modeling using the modified Gunther–Mat model. The practical significance of the criterion is the establishment of a crystallization region (mixed, nucleation and growth), taking into account the surface of the introduced crystalline phase. It is established that for a small surface, the crystallization process proceeds predominantly in the mixed region, in the absence of a seed ($F = 0$), when the metastability limit is exceeded, goes into the blast nucleation ($P_g = 0.1$), with large surfaces of the crystals F . The process proceeds in the growth region even at high supersaturations ($P_g = 0.9$), i.e. it allows you to quickly determine the required amount of seed to intensify the crystallization process. It can be used for any crystallizable substance if kinetic parameters of the process are available (rate constants and kinetic orders of nucleation and growth, solubility, etc.). However, the presence of nonsugars and the corresponding instrument base cause great errors in finding the above parameters of the process of working solutions, therefore, we decided on a simplified engineering calculation method.

Keywords: crystallizer-cooler, milk sugar, material and heat balance, supersaturation coefficient, syrup purity

Введение

Известно широкое применение в производстве молочного сахара открытых кристаллизаторов с перемешивающими и охлаждающими устройствами [1, 2, 4–6, 10–13].

При расчетах таких кристаллизаторов используют: уравнение материального баланса; уравнение теплового баланса процесса кристаллизации молочного сахара [3].

Указанные расчеты необходимы для определения таких показателей, как доброкачественность сиропа сыворотки, коэффициент пересыщения, количество кристаллов молочного сахара (в массовом выражении), количество охлаждающей воды.

В реальных условиях, как правило, известны температура кристаллизующего сиропа, его количество, процентное содержание молочного сахара и сухих веществ в нем, Конечная температура и содержание молочного сахара в конечном растворе задаются [4–7].

Для цитирования

Полянский К.К., Калашников Г.В., Муравьев А.С. Приближенный инженерный расчет кристаллизаторов-охладителей для молочного сахара в изогидрических условиях // Вестник ВГУИТ. 2018. Т. 80. № 1. С. 37–42. doi:10.20914/2310-1202-2018-1-37-42

For citation

Polyansky K.K., Kalashnikov G.V., Korotaeva A.A., Muravev A.S. Approximate engineering calculation of chill molds for milk sugar in isohydric conditions. *Vestnik VGUIT* [Proceedings of VSUET]. 2018. vol. 80. no. 1. pp. 37–42. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2018-1-37-42

Материальный и тепловой баланс, определение расхода воды на кристаллизатор-охладитель

В кристаллизаторе периодического действия с водяной рубашкой и вибрационными дисками охлаждается $V=2 \text{ м}^3$ насыщенного раствора лактозы $\text{C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11}$ от температуры $t_{1н} = 75^\circ\text{C}$ до температуры $t_{1к} = 20^\circ\text{C}$. Начальная температура охлаждающей воды $t_{2н} = 5^\circ\text{C}$. Требуется определить расход охлаждающей воды G и время кристаллизации τ , если коэффициент теплопередачи $K = 250 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ }^\circ\text{C})$.

По кривой растворимости лактозы [5] определяем концентрацию насыщенного раствора $\text{C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11}$ (массовая доля) при 75°C , $a_1 = 0,49$ и при 20°C $a_2 = 0,161$. Так как теплоемкость кристаллов $C_{кр} = 1,202 \text{ кДж}/(\text{кг } ^\circ\text{C})$, то по правилу аддитивности определим теплоемкость исходного раствора C_1 :

$$C_1 = a_1 C_{кр} + (1 - a_1) C_в = 0,49 \times 1,202 + (1 - 0,49) \times 4,19 = 2,72 \text{ кДж}/(\text{кг } ^\circ\text{C}) \quad (1)$$

где $C_в$ – теплоемкость воды, $C_в = 4,19 \text{ кДж}/(\text{кг } ^\circ\text{C})$.

Теплота кристаллизации $q = 25,6 \text{ кДж}/\text{кг}$, плотность исходного раствора (наибольшая) $\rho_1 = 1545,3 \text{ кг}/\text{м}^3$.

Из уравнения теплового баланса определяем количество теплоты Q , которое необходимо отводить из раствора при его кристаллизации [8–10]:

$$Q = V \rho_1 c_1 (t_{1н} - t_{1к}) + G_{кр} q, \quad (2)$$

Количество образуемых кристаллов $G_{кр}$, выпадаемых в растворе, можно определить из уравнения материального баланса по сухим веществам:

$$G_{кр} = \frac{a_1 - a_2}{1 - a_2} \cdot V \rho_1 = \frac{0,49 - 0,161}{1 - 0,161} \cdot 2 \cdot 1545,3 = 1211,9 \text{ кг} \quad (3)$$

Следовательно:

$$Q = 2 \times 1545,3 \times 2,72 \times (75 - 20) + 1211,9 \times 25,6 = 493378,3 \text{ кДж}, \quad (4)$$

Определяем поверхность теплопередачи. Так как объем кристаллизующего раствора задан, а тип оборудования известен, что конструктивно, определяем, например, для вертикального оборудования размеры.

Рисунок 1. Определение размеров кристаллизатора-охладителя

Figure 1. Determination of the sizes of the crystallizer-cooler

При выбранных размерах полезный объем кристаллизатора:

$$V_{кр.} = \frac{\pi D^2}{4} \cdot H + \frac{\pi D^2}{4} \cdot \frac{h}{3} = \frac{3,14 \cdot 1,2^2}{4} \cdot 1,8 + \frac{3,14 \cdot 1,2^2}{4} \cdot \frac{0,385}{3} = 2,1798 \text{ м}^3, \quad (5)$$

при этом теплопередающая поверхность оборудования:

$$F = \pi D H + \frac{\pi D}{2} \cdot \frac{D \sqrt{2}}{2} = 3,14 \cdot 1,2 \cdot 1,8 + 3,14 \cdot \frac{1,2}{2} \cdot \frac{1,2 \cdot \sqrt{2}}{2} = 8,37 \text{ м}^2 \quad (6)$$

Приняв температуру воды, выходящей из рубашки в окончательный момент охлаждения $t_{2к} = 15^\circ\text{C}$, определяем:

$$A = \frac{t - t_{2н}}{t - t_{2к}} = \frac{20 - 5}{20 - 15} = 3 \text{ и } \lg A = 0,4771 \quad (7)$$

Отсюда вычисляем среднюю разность температур:

$$\begin{aligned} \Delta t'_{\text{ср}} &= \frac{t_{1н} - t_{1к}}{2,3 \lg \frac{t_{1н} - t_{2н}}{t_{1к} - t_{2н}}} \cdot \frac{A - 1}{2,34 \lg A} = \\ &= \frac{75 - 20}{2,3 \cdot \lg \frac{75 - 5}{20 - 5}} \cdot \frac{3 - 1}{2,3 \cdot 3 \cdot \lg 3} = 16,7173^\circ\text{C} \end{aligned} \quad (8)$$

По найденным значениям $F, A, \Delta t'$ определим время кристаллизации:

$$\begin{aligned} t &= \frac{Q}{kF\Delta t'} = \frac{493378,3 \cdot 10^3}{250 \cdot 8,37 \cdot 16,7173} = \\ &= 14860,79 \text{ с} \approx 4,12 \text{ ч} \end{aligned} \quad (9)$$

Данное время обусловлено интенсификацией процесса изогидрической кристаллизации кристаллов лактозы при использовании низкочастотных гармонических колебаний [7, 12]

Находим расход воды:

$$\begin{aligned} G &= \frac{kF}{c_2 \cdot \ln A} = \frac{250 \cdot 8,37}{4190 \cdot 2,3 \cdot \lg 3} = \\ &= 0,4551 \text{ кг/с} = 1638,39 \text{ кг/г}, \end{aligned} \quad (10)$$

где теплоемкость воды $c_2 = 4190 \text{ Дж/(кг} \cdot ^\circ\text{C)}$

Общий объем воды за время кристаллизации:

$$\begin{aligned} G_{\text{общ}} &= G \times t = \\ &= 0,4551 \times 14860,79 = 6835,9 \text{ кг} \end{aligned} \quad (11)$$

Справедливость составления материального и теплового баланса и определения расхода охлаждающей воды проверяется следующим расчетом.

На кристаллизацию при температуре 75°C направляется 2600 кг сиропа, содержащего 50% молочного сахара, 64% сухих веществ. В процессе кристаллизации температура сиропа снижается до 20°C . Содержание молочного сахара в конечном растворе 12%. Составим материальный и тепловой баланс кристаллизации, определим коэффициент пересыщения молочного сахара в сиропе. Вычислим доброкачественность сиропа или раствора.

В соответствии с формулой определяем доброкачественность сиропа или раствора:

$$\text{Др} = \frac{K_u}{K_{\text{с.в.}}} \cdot 100, \quad (12)$$

где K_u – концентрация молочного сахара в исходном растворе, %; $K_{\text{с.в.}}$ – общая концентрация сухих веществ в растворе лактозы, %.

Доброкачественность сиропа или раствора:

$$\text{Др} = \frac{50}{64} \cdot 100 = 78,12\% \quad (13)$$

Коэффициент пересыщения раствора вычисляем по формуле:

$$K_i = \frac{K_\phi}{K_n}, \quad (14)$$

где K_ϕ – количество молочного сахара в его растворе при данной температуре, %; K_n – количество молочного сахара в насыщенном растворе, %

Концентрация насыщенного раствора молочного сахара при 20°C составляет 16,1%:

$$K_i = \frac{20}{16,1} = 1,24 \quad (15)$$

Составляем материальный баланс кристаллизации. Для этого используем уравнение кристаллизации:

$$S_u K_u = 100 M_k + S_m K_m \quad (16)$$

При составлении материального баланса принимаем, что в процессе кристаллизации объемное количество сиропа остается постоянным. С учетом содержания несахаров содержание сухих веществ в периоде окончания кристаллизации составит 26%.

Масса 1 л сиропа, содержащего 26% сухих веществ, равна 1,12 кг, а масса исходного сиропа – 1,3 кг.

Следовательно, объем исходного сиропа составляет $2600/1,3 = 2000$ л. В свою очередь масса мелассы равна $2000 \cdot 1,12 = 2240$ кг. Определим количество кристаллов молочного сахара:

$$M_k = \frac{2600 \cdot 50 - 2240 \cdot 12}{100} = 1031,2 \text{ кг} \quad (17)$$

Тепловой баланс процесса кристаллизации составляем по отдельным его показателям.

Тепловой баланс процесса кристаллизации для молочного сахара можно представить следующим уравнением:

$$S_u c_u t_u + M_k g = S_m c_m t_m + M_c c_c t_c + Q + Q_n, \quad (18)$$

Определим количество теплоты, приходящее с сиропом, по уравнению теплового баланса лактозы:

$$Q_u = 2600 \times 2,72 \times 75 = 530400 \text{ кДж} \quad (19)$$

Количество теплоты, выделяемое за счет теплоты кристаллизации незначительно, поэтому в расчетах его можно не учитывать.

Количество теплоты, отводимое с конечным раствором, Q_m определим по формуле:

$$Q_m = 2240 \times 3,705 \times 20 = 165984 \text{ кДж}, \quad (20)$$

где $c_m = 0,161 \cdot 1,202 + (1 - 0,161) \times 4,19 = 3,705 \text{ кДж/(кг} \cdot ^\circ\text{C)}$.

Количество теплоты, отводимое с кристаллами молочного сахара:

$$Q_k = 1031,2 \times 1,202 \times 20 = 24748,8 \text{ кДж}, \quad (21)$$

где $c_{кр}$ – теплоемкость молочного сахара, $c_{кр} = 1,202 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$.

В расчете принимаем, что потери теплоты в окружающую среду составляют 10% от количества поступающей теплоты:

$$Q_n = 0,1 \times 530400 = 53040 \text{ кДж} \quad (22)$$

Следовательно, количество теплоты, отводимое без учета количества теплоты, направляемого с хладагентом, составляет:

$$165984 + 24748,8 + 53040 = 243772,8 \text{ кДж}. \quad (23)$$

Таким образом, с хладагентом должно отводиться определенное количество теплоты:

$$Q = 530400 - 243772,8 = 286627,2 \text{ кДж}.$$

Количество теплоты Q отводимое хладагентом можно вычислить по формуле:

$$Q = S_x \times (t_k - t_n) \times C_x, \quad (24)$$

где S_k – количество хладагента, кг; t_k, t_n – соответственно, конечная и начальная температура хладагента, $^\circ\text{C}$; C_x – удельная теплоемкость хладагента, $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$.

Определим количество охлаждающей воды, приняв $t_k = 15^\circ\text{C}$, а $t_n = 5^\circ\text{C}$, при этом теплоемкость воды принимаем равной $4,19 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$:

$$S_x = \frac{286627,2}{(15 - 5) \cdot 4,19} = 6840,73 \text{ кг}. \quad (25)$$

1. Доброкачественность сиропа (раствора) D_p , % характеризуется наличием примесей (сухих веществ) в сыровоточном сиропе, которые снижают скорость кристаллизации и затрудняют получение кристаллов однородных по размерам и форме:

$$D_p = \frac{K_n}{K_{с.в.}} \cdot 100, \quad (26)$$

где K_n – количество молочного сахара в насыщенном растворе, %; $K_{с.в.}$ – концентрация сухих веществ в растворе, %.

2. Степень пересыщения лактозы в сиропе K_n (коэффициент пересыщения) определяется следующим образом:

$$K_n = \frac{K_\phi}{K_n}, \quad (27)$$

где K_ϕ – количество молочного сахара в его растворе при данной температуре, %; K_n – количество молочного сахара в насыщенном растворе, %.

3. Уравнение материального баланса кристаллизации молочного сахара имеет вид:

$$S_u \times K_u = 100 \times M_k + S_m \times K_m, \quad (28)$$

где S_u – количество исходного раствора, кг; S_m – количество конечного маточного раствора, кг; K_u – концентрация молочного сахара в исходном растворе, %; K_m – концентрация молочного сахара в конечном растворе, %; M_k – количество кристаллов молочного сахара, кг.

Из приведенного уравнения можно определить количество кристаллов молочного сахара M_k , кг:

$$M_k = \frac{S_u \cdot K_u - S_m \cdot K_m}{100}, \quad (29)$$

При этом принимается, что в процессе кристаллизации объемное количество сиропа остается постоянным.

4. Уравнение теплового баланса процесса кристаллизации может быть представлено в виде:

$$S_u \times c_u \times t_u + M_k \times g_k = S_m \times C_m \times t_m + M_c \times c_m \times t_m + M_c \times c_c \times t_c + Q + Q_n, \quad (30)$$

где C_m – удельная теплоемкость удельного раствора, $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$; t_n – температура исходного раствора, $^\circ\text{C}$; g_k – удельная теплота кристалла; C_m – удельная теплота конечного раствора, $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$; t_m – температура конечного раствора, $^\circ\text{C}$; t_c – температура кристаллов молочного сахара, $^\circ\text{C}$; Q – количество теплоты, отводимое хладагентом, Дж ; Q_n – количества тепла, теряемого в среду, Дж .

В практических целях необходимо знать количество хладагента (охлаждающей воды) S_x кг для ведения процесса кристаллизации, величина которой определяется из следующей зависимости:

$$S_x = \frac{Q}{(t_k - t_n) \cdot C_x}, \quad (31)$$

где t_k, t_n – конечная и начальная температура хладагента (воды), $^\circ\text{C}$; C_x – удельная теплоемкость хладагента, $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$; (Для воды $C_x = 4,1864 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$).

Неизвестная величина Q , Дж для указанного выражения определяется в следующей последовательности исходя из уравнения теплового баланса:

а) Количество теплоты, приносимое с сиропом Q_u , кДж :

$$Q_u = S_u \times c_u \times t_u, \quad (32)$$

где c_u – теплоемкость исходного сиропа лактозы, ее принимают равной удельной теплоемкости сахарозы s , которая определяется по формуле:

$$s = 4,2 - 0,0239 \times K_{с.в.}, \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}), \quad (33)$$

$K_{с.в.}$ – концентрация сухих веществ, %.

Исходя из этого:

$$Q_u = S_u \times (4,2 - 0,0239 \times K_{c.в}) \times t_u, \quad (34)$$

б) Количество теплоты, отводимое с конечным раствором Q_m , кДж определяется следующим образом:

$$Q_m = S_m \times c \times t_m = S_m \times (4,2 - 0,0239 \times K_{c.в}) \times t_m, \quad (35)$$

в) Количество теплоты, отводимое с кристаллами молочного сахара:

$$Q_k = M_k \times c_c \times t_c = M_k \times 1,2 t_c, \quad (36)$$

где $c_c = 1,2$ – теплоемкость молочного сахара, кДж/(кг·°C).

г) Потери теплоты в окружающую среду Q_n , кДж принимают равным 10% от Q_n :

$$Q_n = 0,1 S_u \times (4,2 - 0,0239 \times K_{c.в}) \times t_u, \quad (37)$$

д) Количество теплоты, отводимое без учета количества теплоты, уходящего с хладоносителем составит:

$$Q_m + Q_k + Q_n = S_m (4,2 - 0,0239 \times K_{c.в}) \times t_m + M_k \times 1,2 t_c + 0,1 S_u (4,2 - 0,0239 \times K_{c.в}) \times t_u = (4,2 - 0,0239 \times K_{c.в}) (S_m \times t_m + 0,1 \times S_u \times t_u) + M_k \times t_c \times 1,2, \quad \text{кДж} \quad (38)$$

ЛИТЕРАТУРА

1 Полянский К.К. Кристаллизация лактозы. Производство молочного сахара // Переработка молока. 2017. № 6. С. 32–38.

2 Полянский К. К., Калашников Г. В. Тепловой расчет кристаллизатора-охлаждителя для молочного сахара // Деп. ВЦНИИТЭИ мясомолпрома. 1984. № 1. С. 96.

3 Липатов Н.Н. Руководство к лабораторным и практическим занятиям по курсу оборудования предприятий молочной промышленности. М.: Пищевая промышленность, 1978. 287 с.

4 Zhang L. et al. Development of an inverse heat conduction model and its application to determination of heat transfer coefficient during casting solidification // Heat and Mass Transfer. 2014. V. 50. №. 7. P. 945-955.

5 Полянский К.К. Кристаллизация лактозы в производстве молочных продуктов. Воронеж: ВТИ, 1981. 328 с.

6 Гаврилов Г.Б., Кравченко Э.Ф., Куренков А.С. Технологические аспекты кристаллизации лактозы // Молочная промышленность. 2017. № 5. С. 44–45

7 Power G. et al. Design and optimization of a multistage continuous cooling mixed suspension, mixed product removal crystallizer // Chemical Engineering Science. 2015. V. 133. P. 125-139.

8 Бредихин А.С., Червцов В.В. Гидродинамика процесса охлаждения молочной сыворотки при поточной кристаллизации лактозы // Вестник ВГУИТ. 2013. № 3. С. 36-40.

9 Fialkova E.A. et al. Analysis of the cyclic operation effect of the air cooling and heating crystallizer on crystal growth rate // Dairy Farming Journal. 2015.

е) Таким образом, с хладагентом должно быть отведено количество теплоты Q , кДж.

$$Q = Q_u - (Q_m + Q_k + Q_n) = S_u (4,2 - 0,0239 K_{c.в}) t_u - (4,2 - 0,0239 K_{c.в}) \times (S_m t_m + 0,1 S_u t_u) + M_k t_c 1,2 = (4,2 - 0,0239 K_{c.в}) (S_u t_u - S_m t_m - 0,1 S_u t_u) + M_k t_c 1,2 = (4,2 - 0,0239 K_{c.в}) S_u \times t_u (1 - S_m t_m - 0,1) + M_k t_c 1,2 \quad (39)$$

С учетом формул 36, 37, 38, 39 это выражение может быть записано следующим образом:

$$Q = (4,2 - 0,0239 \times K_{c.в}) \times S_u t_u (0,9 - S_m t_m) + M_k t_c \times 1,2 \quad (40)$$

С учетом формулы (32) определяют реальное количество хладагента (охлаждающей воды):

$$S_x = \frac{(4,2 - 0,0239 K_{c.в}) S_u t_u (0,9 - S_m t_m) + M_k t_c 1,2}{(t_k - t_m) : C_v} \quad (41)$$

где C_v – теплоемкость, принимаемая равной 4,1864 кДж/(кг·°C)

10 Slavorosova E.V. et al. Experimental studies of the milk whey nano-filtrate curdling process with the accompanying lactose crystallization // Dairy Farming Journal. 2016.

11 Rjabova A.E., Kirsanov V.V., Strizhko M.N., Bredikhin A.S. et al. Lactose crystallization: current issues and promising Engineering solutions // Foods and Raw materials. 2013. V. 1. №. 1.

12 Храмов А.Г., Нестеренко П.Г., Евдокимов И.А., Рябцева С.А. и др. Альтернативные варианты промышленной переработки молочной сыворотки // Молочная промышленность. 2014. №. 11. С. 44-48.

13 Santos C.A., Quaresma J.M.V., Garcia A. Determination of transient interfacial heat transfer coefficients in chill mold castings // Journal of Alloys and Compounds. 2001. V. 319. №. 1-2. P. 174-186.

REFERENCES

1 Polyanskii K.K. Crystallization of lactose. Manufacture of milk sugar. *Pererabotka moloka* [Processing of milk] 2017. no. 6. pp. 32–38. (in Russian).

2 Polyanskii K.K., Kalashnikov G.V. The thermal design of the crystallizer-cooler for milk sugar. *VTsNIITEI myasomolproma* [Central Research Institute of Information and Technical and Economic Research] 1984. no. 1. pp. 96. (in Russian).

3 Lipatov N.N. Rukovodstvo k laboratornym i prakticheskim zanyatiyam po kursu oborudovaniya predpriyatii molochnoi promyshlennosti [Guide to laboratory and practical exercises for the course of equipment of enterprises of dairy industry]. Moscow. *Pishchevaya promyshlennost'*, 1978. 287 p. (in Russian).

4 Zhang L., Reilly C., Li L., Cockcroft S. et al. Development of an inverse heat conduction model and its application to determination of heat transfer coefficient during casting solidification. *Heat and Mass Transfer*. 2014. vol. 50. no. 7. pp. 945-955.

5 Polyanskii K. K. Kristallizatsiya laktozy v proizvodstve molochnykh produktov [Crystallization of lactose in dairy products] Voronezh, 1981. 328 p. (in Russian).

6 Gavrilov G.B., Kravchenko E.F., Kurenkov A.S. Technological aspects of lactose crystallization. *Molochnaya promyshlennost'* [The dairy industry]. 2017. no. 5. pp. 44–45. (in Russian).

7 Power G., Hou, G., Kamaraju V.K., Morris G. et al. Design and optimization of a multistage continuous cooling mixed suspension, mixed product removal crystallizer. *Chemical Engineering Science*. 2015. no. 133. pp. 125–139.

8 Bredihin A.S., Chervetsov V.V. Hydrodynamics of cooling whey at flow lactose crystallization. *Vestnik VGUIT* [Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies]. 2013. no. 3. pp. 36–40. (in Russian)

9 Fialkova E.A., Kulenko V.G., Schevchuk V.B., Slavorosova E.V. Analysis of the cyclic operation effect

of the air cooling and heating crystallizer on crystal growth rate. *Dairy Farming Journal*. 2015.

10 Slavorosova E.V., Kulenko V.G., Shevchuk V.B., Fialkova E.A. Experimental studies of the milk whey nano-filtrate curdling process with the accompanying lactose crystallization. *Dairy Farming Journal*. 2016.

11 Rjabova A.E., Kirsanov V.V., Strizhko M.N., Bredikhin A.S. et al. Lactose crystallization: current issues and promising Engineering solutions. *Foods and Raw materials*. 2013. vol. 1. no. 1.

12 Khrantsov A. G., Nesterenko P. G., Evdokimov I. A., Ryabtseva S. A. et al. Alternative options for the industrial processing of whey. *Molochnaya promyshlennost'* [The dairy industry]. 2014. no. 11. pp. 44–48. (in Russian).

13 Santos C.A., Quaresma J.M.V., Garcia A. Determination of transient interfacial heat transfer coefficients in chill mold castings. *Journal of Alloys and Compounds*. 2011. vol. 319. no. 1–2. pp. 174–186.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Константин К. Полянский д.т.н., профессор, кафедра коммерции и товароведения, Воронежский филиал Российского экономического университета им. Г. В. Плеханова, ул. Карла Маркса, 67А, г. Воронеж, 394036, Россия, tovar201@list.ru

Геннадий В. Калашников д.т.н., профессор, кафедра машин и аппаратов пищевых производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия

Александр С. Муравьев к.т.н., инженер, отдел стандартизации и метрологии, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия

КРИТЕРИЙ АВТОРСТВА

Все авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут ответственность за плагиат

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ПОСТУПИЛА 22.01.2018

ПРИНЯТА В ПЕЧАТЬ 19.02.2018

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Konstantin K. Polyanskii Dr. Sci. (Engin.), Professor, Department of Commerce and Commodity Studies, Voronezh Branch of the Russian Economic University. GV Plekhanov, ul. Karl Marx, 67A Voronezh, 394036, Russia Russiatovar201@list.ru

Gennadii V. Kalashnikov Dr. Sci. (Engin.), Professor, Machines and Apparatuses of Food Production Department, Voronezh state university of engineering technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia

Aleksandr S. Muravev Cand. Sci. (Engin.), engineer, department of standardization and metrology, Voronezh state university of engineering technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia

CONTRIBUTION

All authors equally took part in writing the manuscript and are responsible for plagiarism

CONFLICT OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

RECEIVED 1.22.2018

ACCEPTED 2.19.2018