

Биотехнология, бионанотехнология и технология сахаристых продуктов

Оригинальная статья/Original article

УДК 66.061

DOI: <http://doi.org/10.20914/2310-1202-2016-4-233-237>

Расчет периода раскочки утфеля раствором сахарозы в вакуум-аппарате

Анатолий А. Славянский	¹	anatoliy4455@yandex.ru
Евгений В. Семенов	¹	sem-post@mail.ru
Наталья Н. Лебедева	¹	mgutu-sahar@mail.ru
Сергей Т. Антипов	²	ast@vsuet.ru

¹ кафедра технологии продуктов из растительного сырья и парфюмерно-косметических изделий, Москов. гос. ун-т технол. и управл. им. К.Г. Разумовского (ПКУ), ул. Земляной вал, 73, г. Москва, 109004, Россия

² кафедра машин и аппаратов пищевых производств, Воронеж. гос. ун-т. инж. техн., пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394066, Россия

Реферат. Важным и ответственным элементом в управлении технологическим потоком производства кристаллического сахара товарных кондиций является период времени обогащения утфеля в виду его обессахаривания в процессе кристаллообразования в вакуум-аппарате. Хотя в настоящее время предложен и внедрен в промышленность, в том числе и в качестве интерфейсного сопровождения процесса, ряд способов, в реальных условиях сахарного производства во многих случаях приходится прибегать к услугам опытного варщика. Очевидно, что в любом случае необходимо располагать зависящими от объемного содержания сахара в растворе данными по времени подачи сахаросодержащего раствора в вакуум-аппарат. Касательно вопроса о периоде протекания процесса обогащения обедненного сахарозой раствора интродуцируемым в эту субстанцию раствором сахарозы следует отметить, что данная проблема теоретически проработана все еще недостаточно. При этом очевидно, что в практических целях желательно иметь простые и удобные для инженерного расчета зависимости времени обработки сахаром заданного объема воды от режимных параметров процесса (требуемой концентрации раствора по сахарозе, температуре раствора, условий перемешивания и др.). Проблема количественного анализа процесса кристаллизации сахарозы в вакуум-аппарате, включая сроки обогащения межкристалльного раствора сиропом, периода времени обработки утфеля в целом в данном аппарате, исследовалась во многих работах. Однако вследствие своей важности для решения задачи получения товарного сахара высоких кондиций эта проблема нуждается в дальнейшем углубленном изучении. В статье с целью обоснования процесса обогащения раствора сахарозой в результате обессахаривания этой жидкостной системы в вакуум-аппарате, с позиций диффузионной теории кристаллообразования в растворе, предлагается более обоснованный, по сравнению с известными до сих пор аналогами, количественный анализ данного процесса, где в качестве коллектива кристаллов сахарозы рассматривают систему шаров, равномерно распределенных в моделирующем вакуум-аппарат объеме. На базе решения поставленной задачи получены расчетные формулы, результаты численного эксперимента отражены графическим путем.

Ключевые слова: вакуум-аппарат, раствор сахарозы, процесс диффузии, период обработки

Calculation of period processing solution syrup in vacuum apparatus

Anatolii A. Slavyanskii	¹	anatoliy4455@yandex.ru
Evgenii V. Semenov	¹	sem-post@mail.ru
Nataliya N. Lebedeva	¹	mgutu-sahar@mail.ru
Sergei T. Antipov	²	ast@vsuet.ru

¹ technologies of products from vegetable raw materials and parfymery-cosmetic products department, K.G. Razumovsky Moscow State University of technologies and management (the First Cossack University), Zemlyanoi val st., 73, Moscow, 109004, Russia

² machinery and equipment for food production department, Voronezh state university of engineering technologies, Revolution Av., 19, Voronezh, 394066, Russia

Summary. Important and crucial element in the management of the technological flow of production of sugar product standards is the period of time the enrichment of massecuite, since its neutralization in the process of crystal formation in vacuum apparatus, excess sugar solution. Although currently proposed and implemented in the industry, including as a front-end accompany the process, a number of ways in the real world sugar production in many cases have to resort to the services of an experienced operator. It is obvious that in any case it is necessary to have a surround-dependent glucose solution data on time for the excess sugar solution into the vacuum apparatus. With regard to the period of the enrichment of depleted sucrose solution are entered into this substance excess sucrose solution, it should be noted that this problem is theoretically still insufficiently developed. It is obvious that for practical purposes it is desirable to have a simple and convenient for engineering calculation of sugar processing time dependencies of the specified volume of water from the operating parameters of the process (the required concentration of sucrose, temperature of the solution stirring). The problem is the quantitative analysis of sucrose crystallization in vacuum apparatus, including the timing of enrichment solution to the excess syrup, period of time processing massecuite total this apparatus has been investigated in many works. However, due to its importance to the task of obtaining commercial sugar high standards this issue required further in-depth examination. In the article to support the enrichment process solution sucrose due to neutralize this solvent system in vacuum apparatus, from the standpoint of diffusion theory provides a more reasonable compared to known so far, quantitative analysis of this process. Where as sucrose crystals team are considering a system of balls, uniformly distributed in vacuum apparatus. On the basis of the solution obtained by calculation formulas, results of numerical experiment reflects the graphic way.

Keywords: vacuum apparatus, solution of sucrose, diffusion process, processing period

Для цитирования

Славянский А.А., Семенов Е.В., Лебедева Н.Н., Антипов С.Т. Расчет периода раскочки утфеля раствором сахарозы в вакуум-аппарате // Вестник ВГУИТ. 2016. № 4. С. 233–237. doi:10.20914/2310-1202-2016-4-233-237

For citation

Slavyanskii A.A., Semenov E.V., Lebedeva N.N., Antipov S.T. Calculation of period processing solution syrup in vacuum apparatus. *Vestnik VSUET* [Proceedings of VSUET]. 2016. no. 4. pp. 233–237. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2016-4-233-237

Введение

Одним из важных и ответственных элементов в управлении технологическим потоком производства кристаллического сахара товарных кондиций является период времени обогащения утфеля, в виду его обессахаривания в процессе кристаллообразования в вакуум-аппарате. Несмотря на то, что в настоящее время предложен и внедрен в промышленность в том числе, и в качестве интерфейсного сопровождения процесса, ряд способов, в реальных условиях сахарного производства во многих случаях приходится прибегать к услугам опытного варщика. Очевидно, что в любом случае необходимо располагать зависящими от объемного содержания сахара в растворе данными по времени подачи сахаросодержащего раствора в вакуум-аппарат.

Касательно вопроса о периоде протекания процесса обогащения обедненного сахарозой раствора интродуцируемым в эту субстанцию раствором сахарозы следует отметить, что данная проблема теоретически проработана все еще недостаточно. При этом очевидно, что в практических целях желательно иметь простые и удобные для инженерного расчета зависимости времени обработки сахаром заданного объема воды от режимных параметров процесса (требуемой концентрации раствора по сахарозе, температуре раствора, условий перемешивания и др.).

Проблема количественного анализа процесса кристаллизации сахарозы в вакуум-аппарате, включая сроки обогащения межкристального раствора сиропом, периода времени обработки утфеля в целом в данном аппарате, исследовалась в работах [1–6]. Однако вследствие своей важности для решения задачи получения товарного сахара высоких кондиций эта проблема, по нашему мнению, нуждается в дальнейшем углубленном изучении.

Ниже, с целью обоснования процесса обогащения раствора сахарозой в результате обессахаривания этой жидкостной системы в вакуум-аппарате, с позиций диффузионной теории кристаллообразования в растворе, предлагается более обоснованный, по сравнению с известными до сих пор аналогами, количественный анализ данного процесса.

Постановка и решение задачи

Пусть в некотором рабочем объеме имеют гетерогенную жидкостную систему, включающую жидкую среду и коллектив моделируемых как шары радиусом R кристаллов сахарозы. Предполагая, что шары статистически равномерно распределены в жидкости, в качестве модели процесса массопереноса от жидкой

среды к шарам выбирают изолированный шар, к которому из прилегающей к нему области ($R < r < L$) (где r – радиальная координата, $2l$ – среднее расстояние между центрами шаров) подаются молекулы сахарозы (рисунок 1).

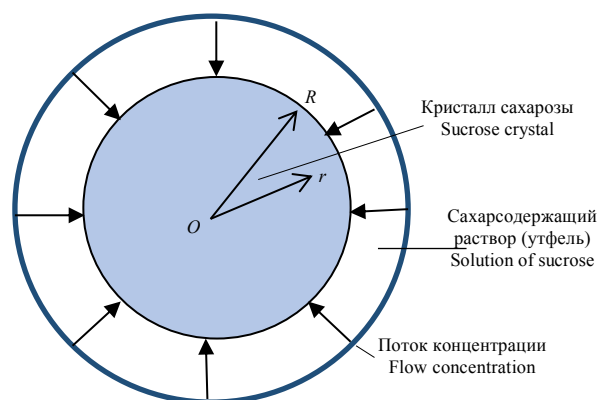


Рисунок 1. Схема к расчету процесса кристаллообразования сахарозы в утфеле

Figure 1. The scheme to calculation of process of grain formation of sucrose in the massecuite

При этом, если $V_{ш}$ и V – соответственно, суммарный объем шаров и жидкости в рабочем объеме и ξ – объемная концентрация шаров в жидкостной системе, то в соответствии с принятой геометрической моделью жидкостной системы “жидкость + система шаров” половина расстояния l между двумя соседними шарами составит (рисунок 2)

$$l = R\xi^{-1/3}, \quad 0 < \xi < 1. \quad (1)$$

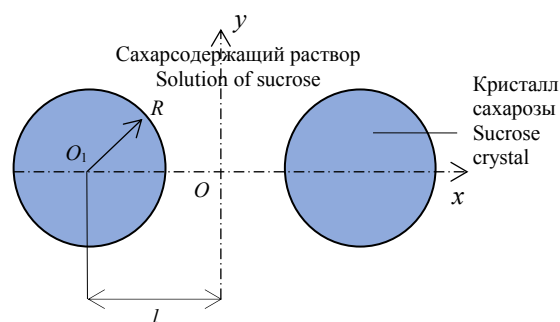


Рисунок 2. Схема к расчету процесса массопереноса сахарозы в жидкостной системе

Figure 2. The scheme to calculation process of a mass transfer of sucrose in liquid system

Полагают, что массоперенос к шарам от жидкой среды реализуется симметричным образом, и, кроме того, для выбранной расчетной модели, с удовлетворительной точностью выполнены все, обычно принимаемые при анализе процесса массопереноса в сплошной среде, допущения по физико-механическим свойствам изучаемого объекта.

Поток концентрации q сахарозы в направлении оси r в принятой одномерной модели массопереноса в сферической системе отсчета рассчитывают по формуле

$$q = -D \frac{\partial c}{\partial r}, \quad (2)$$

где D – коэффициент диффузии, c – объемная концентрация сахарозы, r – радиальная координата.

В качестве исходного соотношения, описывающего кинетику распределения концентрации в растворе, выбирают, как обычно, отнесенное к сферическим координатам, с началом координат в центре O_1 шара, уравнение нестационарной диффузии (второй закон Фика) (рисунок 2).

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 c}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial c}{\partial r} \right) (R < r < L), \quad (3)$$

где t – время.

Начальное условие по исходному распределению концентрации принимают в виде

$$c(r, 0) = c_n (R < r < L), \quad (4)$$

где c_n – концентрация пересыщенного раствора.

Граничное условие на поверхности шара

$$c(R, t) = c_n (0 < t < \infty), \quad (5)$$

где c_n – концентрация сахарозы на поверхности шара (кристалла сахарозы).

Граничное условие симметричности поля концентрации между соседними шарами

$$\frac{\partial c(l, t)}{\partial r} = 0 \quad (0 < t < \infty), \quad (6)$$

где l связана с R зависимостью (1).

Хотя решение задачи (2)–(6) известно, оно малоприспособлено для практических расчетов, так как имеет вид ряда. Поэтому, как поступают в некоторых случаях, ниже применяют приближенный метод решения данной задачи, аналогичный методу осреднения.

С этой целью, как обычно, предварительно проводят замену переменных

$$c = u + c_n, \quad (7)$$

в результате чего граничные условия (5), (6) становятся однородными по переменной u – приведенной концентрации

$$u(R, t) = 0, \quad (8)$$

$$\frac{\partial u(l, t)}{\partial r} = 0, \quad 0 < t < \infty. \quad (9)$$

Начальное условие вследствие (4) принимает форму

$$u(r, 0) = \Delta c (R < r < L), \quad (10)$$

где $\Delta c = c_n - c_n > 0$ – перепад концентрации в начальный момент времени $t = 0$.

При этом уравнение (3) по переменной u вследствие (7) сохраняет свой вид

$$\frac{\partial u}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial u}{\partial r} \right). \quad (11)$$

В целях упрощения решения задачи начальное условие (10) заменяют его усредненным значением по прилегающей к шару области $r \in (R, l)$

$$\frac{1}{l^3 - R^3} \int_R^l u(r, 0) r^2 dr = \Delta c. \quad (12)$$

В свою очередь, усредняя левую часть уравнения (11) по тому же объему, принимают

$$\frac{1}{l^3 - R^3} \int_R^l \frac{\partial u}{\partial t} r^2 dr = D \phi(t), \quad (13)$$

где $\phi(t)$ – функция, подлежащая определению.

В результате уравнение (11) заменяют приближенным

$$\left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial u}{\partial r} \right) = \phi(t). \quad (14)$$

Так как правая часть уравнения (14) зависит лишь от t , то, интегрируя его дважды по r , находят

$$u(r, t) = D_1 + D_2 / r + r^2 \phi(t) / 6, \quad (15)$$

где D_1, D_2 – произвольные величины, зависящие от t .

Согласно (15) с граничными условиями (8), (9), получают

$$D_1 = -\frac{R^3 + 2l^3}{6R} \phi(t), \quad D_2 = \frac{l^3}{3} \phi(t)$$

и поэтому вместо (15) имеют

$$u(r, t) = \psi(r) \phi(t), \quad (16)$$

где

$$\psi(r) = -\frac{R^3 + 2l^3}{6R} + \frac{l^3}{3r} + \frac{r^2}{6}. \quad (17)$$

Подставляя (16) в (13), приходят к дифференциальному уравнению относительно искомой функции ϕ

$$\frac{1}{l^3 - R^3} \int_R^l \psi(r) \frac{d\phi}{dt} r^2 dr = D \phi(t),$$

или

$$A \frac{d\phi}{dt} = D \phi \quad (18)$$

где

$$A = \frac{1}{l^3 - R^3} \int_R^l \psi(r) r^2 dr, \quad (19)$$

l связано с R и концентрацией c зависимостью (1).

Интегрируя (18), получают

$$\phi(t) = D_3 \exp(Dt / A), \quad (20)$$

где D_3 – произвольная постоянная.

Поэтому, в соответствии с (16), (20) имеют

$$u(r, t) = D_3 \psi(r) \exp\left(\frac{Dt}{A}\right), \quad (21)$$

где $\psi(r)$ задана по (17).

С целью определить D_3 , подставляют (21) в (12)

$$\frac{1}{l^3 - R^3} \int_R^l D_3 \psi(r) r^2 dr = \Delta c,$$

откуда приходят к соотношению

$$D_3 A = \Delta c, \quad (22)$$

где A определяют по (20).

В результате чего, вследствие (21), (22) окончательно имеют

$$u(r, t) = \frac{\Delta c}{A} \psi(r) \exp\left(\frac{Dt}{A}\right). \quad (23)$$

Как видно, что найденное по (23) выражение приведенной концентрации $u(r, t)$ имеет простую и удобную для количественного и качественного анализа мультипликативную форму. А именно, приведенная концентрация пропорциональна перепаду концентрации Δc , и, поскольку, согласно расчету, $A < 0$, $\psi(r) < 0$ при $R < r < l$, в соответствии с (7), (23) концентрация жидкостной среды положительна, убывает по экспоненте с течением времени t и, тем быстрее, чем больше коэффициент диффузии D .

Если входящее в (23) выражение $\psi(r)$ заменить его усредненным значением $\bar{\psi} = A$ согласно (19), то (23) упрощается и принимает вид

$$\bar{u} = \Delta c \exp\left(\frac{Dt}{A}\right), \quad (24)$$

где $\Delta c = c_{\text{п}} - c_{\text{н}}$.

На базе количественного анализа (24) судят о распределении концентрации в обессахариваемом утфеле в заданный период времени.

Поток концентрации сахарозы от жидкостной среды (утфеля) к поверхности шара (кристалла сахара) согласно (2), (23) (с точностью до знака) вычисляют по зависимости (м/с)

$$q(t) = D \frac{\partial u(R, t)}{\partial r} = \frac{D}{3A} \times \frac{R^3 - l^3}{R^2} \cdot \Delta c \cdot \exp\left(\frac{Dt}{A}\right). \quad (25)$$

Полный удельный объем Q сахарозы, подводимый к единице поверхности шара за время T , получают, интегрируя (25) по данному временному интервалу T ($\text{м}^3/\text{м}^2$)

$$Q = \int_0^T q(\tau) d\tau = \frac{(l^3 - R^3) \Delta c}{3R^2} \left[1 - \exp\left(\frac{DT}{A}\right) \right], \quad (26)$$

В соответствии с (26) предельное значение подводимого к единице поверхности шара объема сахарозы составляет

$$Q_{\text{пред}} = \lim_{T \rightarrow \infty} Q = \frac{(l^3 - R^3) \Delta c}{3R^2}. \quad (27)$$

Тогда если значение периода времени t между двумя раскачками утфеля пересыщенным раствором определяют исходя из того, чтобы выраженный в долях $Q_{\text{пред}}$ коэффициент пересыщения κ рассчитывался по отношению

$$Q / Q_{\text{пред}} = \kappa, \quad (28)$$

откуда, исходя из (26)–(28), получают расчетное значение периода (мин) между двумя раскачками утфеля

$$\tau = \frac{A}{60D} \ln(1 - \kappa), \quad (29)$$

где A вычисляют по (19).

Численный эксперимент

Рассматривается пример расчета периода времени между двумя раскачками утфеля сахаросодержащим раствором.

Коэффициент диффузии принимаем $D = 2 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2/\text{с}$, что примерно соответствует значению данного коэффициента при температуре раствора 70°C . Полагали, что кристаллы сахарозы в растворе монодисперсны, диаметр частиц $d = 20 \dots 40 \text{ мкм}$, объемная концентрация частиц $\xi = 40 \dots 50\%$.

По выбранным таким образом исходным параметрам, на базе (29), параметрические по размеру d частиц и их объемной концентрации ξ рассчитаны графические зависимости периода τ между двумя раскачками утфеля от коэффициента пересыщения κ (рисунок 3).

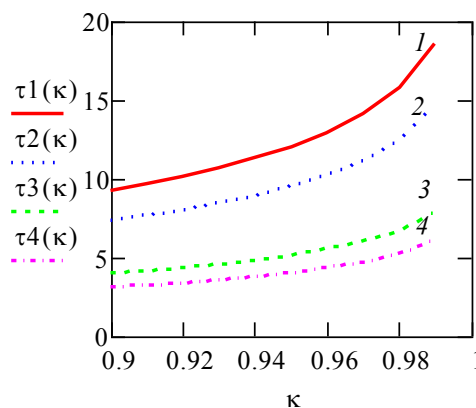


Рисунок 3. Зависимости периода τ (мин) между двумя раскачками утфеля от коэффициента пересыщения κ для различных значений диаметра d (мкм) и объемной концентрации ξ (%) частиц ($d = 20 \text{ мкм}$: 1 – $\xi = 40$, 2 – $\xi = 50\%$; $d = 40 \text{ мкм}$: 3 – $\xi = 40$, 4 – $\xi = 50\%$)

Figure 3. Dependences of the period τ (min.) between two swings massecuite from supersaturation coefficient κ for various values of diameter d (mcm) and volume concentration ξ (%) of particles ($d = 20 \text{ мкм}$: 1 – $\xi = 40$, 2 – $\xi = 50\%$; $d = 40 \text{ мкм}$: 3 – $\xi = 40$, 4 – $\xi = 50\%$)

Из вида графиков рисунка 3 выявляется согласие полученных результатов количественного моделирования рассматриваемого процесса с физическим смыслом исследуемого явления. А именно, естественное увеличение периода τ раскочки в вакуум-аппарате когда возрастает коэффициент пересыщения k (все кривые рисунок 3). Кроме того, отмечается уменьшение периода раскочки для частиц одного размера вместе с ростом их концентрации (кривые 2 и 4 расположены, соответственно, ниже кривых 1 и 3), а также в случае, когда при одинаковой концентрации ξ увеличивается размер частиц.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Saska M. Modelling crystallization and inclusion formation in sucrose crystals // Zuckerindustrie. 2011. V. 113. № 3. P. 224-229.
- 2 Tuzhilkin V., Urazbayeva K., Alibekov R. Semicontinuous sugar crystallization // Jour. of industrial technology and engineering. 2012. № 2 (3). P. 11-18.
- 3 Beckmann W. Crystallization: basic concepts and industrial applications. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co, 2013. 346 p.
- 4 Гнездилова А.И., Червецов В.В. Интенсификация процессов кристаллизации при производстве молочных продуктов. Воронеж: "Издательство Ритм", 2011. 196 с.
- 5 Семенов Е.В., Славянский А.А., Сергеева Е.А., Щитова Т.А. Особенности диффузионного процесса кристаллизации сахарозы // Сахар. 2013. № 3. С. 46-50.
- 6 Тужилкин В.И., Прокофьев Е.Н., Коваленок В.А., Клемешов Д.А. и др. Технология полунепрерывной кристаллизации сахара // Сахар. 2014. № 2. С. 30-33.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Анатолий А. Славянский д. т. н., заведующий кафедрой, кафедра технологии продуктов из растительного сырья и парфюмерно-косметических изделий, Московский государственный университет технологий и управления им. К.Г. Разумовского (ПГУ), ул. Земляной вал, 73, г. Москва, 109004, Россия, anatoliy4455@yandex.ru
Евгений В. Семенов д. т. н., профессор, кафедра технологии продуктов из растительного сырья и парфюмерно-косметических изделий, Московский государственный университет технологий и управления им. К.Г. Разумовского (ПГУ), ул. Земляной вал, 73, г. Москва, 109004, Россия, sem-post@mail.ru
Наталья Н. Лебедева к. т. н., старший преподаватель, кафедра технологии продуктов из растительного сырья и парфюмерно-косметических изделий, Московский государственный университет технологий и управления им. К.Г. Разумовского (ПГУ), ул. Земляной вал, 73, г. Москва, 109004, Россия, mgutu-sahar@mail.ru
Сергей Т. Антипов д. т. н., профессор, проректор по научной и инновационной деятельности, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, ast@vsu.ru

КРИТЕРИЙ АВТОРСТВА

Анатолий А. Славянский предложил научную концепцию работы, корректировка рукописи статьи
Евгений В. Семенов обоснование физико-математической модели процесса, несет ответственность за плагиат
Наталья Н. Лебедева обзор литературных источников по исследуемой проблеме, выполнила численный эксперимент и его графическую иллюстрацию
Сергей Т. Антипов консультация в ходе исследования

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ПОСТУПИЛА 14.11.2016

ПРИНЯТА В ПЕЧАТЬ 01.12.2016

Заключение

На основе модели молекулярного массопереноса сахарозы от межкристалльного раствора к коллективу шарообразных частиц, имитирующих кристаллы сахара в вакуум-аппарате, предлагается аналитический аппарат по расчету периода времени между раскочками утфеля как функции коэффициента пересыщения и основных физико-механических параметров процесса кристаллизации сахарозы.

REFERENCES

- 1 Saska M. Modelling crystallization and inclusion formation in sucrose crystals. Zuckerindustrie, 2011, vol. 113, no. 3, pp. 224-229.
- 2 Tuzhilkin V., Urazbayeva K., Alibekov R. Semicontinuous sugar crystallization. Jour. of industrial technology and engineering, 2012, no. 2 (3), pp. 11-18.
- 3 Beckmann W. Crystallization: basic concepts and industrial applications. Weinheim, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co, 2013. 346 p.
- 4 Gnezdilova A.I., Chervetsov V.V. Intensifikatsiya processov kristallizatsii pri proizvodstve molochnykh produktov [An intensification of processes of crystallization by production of dairy products]. Voronezh, "Publishing House Rhythm". 2011, 196 p. (in Russian)
- 5 Semenov E.V., Slavyanskii A.A., Sergeeva E.A., Shchitova T.A. Features of the diffusion process of crystallization of the sucrose. *Sakhar* [Sugar] 2013, no. 3, pp. 46-50. (in Russian).
- 6 Tuzhilkin V.I., Prokofev E.N., Kovalenok V.A., Klemeshov D.A. et al. Semi-continuous sugar crystallization technology. *Sakhar* [Sugar] 2014, no. 2, pp. 30-33. (in Russian).

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Anatolii A. Slavyanskii doctor of chemical sciences, head of the department, technologies of products from vegetable raw materials and perfume-cosmetic products department, K.G. Razumovsky Moscow State University of technologies and management (the First Cossack University), Zemlyanoi val str, 73, Moscow, 109004, Russia, anatoliy4455@yandex.ru
Evgenii V. Semenov doctor of chemical sciences, professor, technologies of products from vegetable raw materials and perfume-cosmetic products department, K.G. Razumovsky Moscow State University of technologies and management (the First Cossack University), Zemlyanoi val str, 73, Moscow, 109004, Russia, sem-post@mail.ru
Nataliya N. Lebedeva candidate of technical sciences, chief lecturer, technologies of products from vegetable raw materials and perfume-cosmetic products department, K.G. Razumovsky Moscow State University of technologies and management (the First Cossack University), Zemlyanoi val str, 73, Moscow, 109004, Russia, mgutu-sahar@mail.ru
Sergei T. Antipov doctor of technical sciences, professor, vice-rector for research and innovation, Voronezh state university of engineering technologies, Revolution Av., 19, Voronezh, 394036, Russia, ast@vsu.ru

CONTRIBUTION

Anatolii A. Slavyanskii proposed a scientific concept, correction of the manuscript
Evgenii V. Semenov rationale physic-mathematical model of the process, is responsible for plagiarism
Nataliya N. Lebedeva review of the literature on an investigated problem, performed numerical experiment and graphical illustration
Sergei T. Antipov consultation during the study

CONFLICT OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

RECEIVED 11.14.2016

ACCEPTED 1.12.2016