

Математическое моделирование процесса центробежного промывания осадка паром (на примере сахарного производства)

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

¹ Московский государственный университет технологий и управления им. К.Г. Разумовского, ул. Талалихина, 31, г. Москва, 109004, Россия² Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия

Аннотация. Известно, что в процессе кристаллообразования в вакуум-аппарате продуктового отделения сахарного завода кристаллический белый сахар покрывается пленкой из таких влияющих на качественные показатели товарного сахара субстанций как несахара и красящие вещества. Поэтому на сахарном заводе одной из важных операций технологического потока получения сахара-песка высоких товарных кондиций является его промывание. При этом, реализуя процесс промывания, используют воду в двух фазовых состояниях – жидкостном или парообразном. Поскольку с экономической точки зрения данная процедура является достаточно затратной, то в производственных условиях с целью снижения трудовых и материальных затрат, прибегают к различным способам удешевляющих технику и технологию проведения процесса промывания сахара-песка. Причем, хотя на производстве чаще используется вода, по мнению специалистов, процесс промывания образующегося в результате центрифугирования утфеля слоя кристаллического белого сахара экономически целесообразно проводить используя не воду, а водяной пар. Так, в частности, при промывании сахара-песка паром, за счет выделяемой при конденсации теплоты примерно половина пленки на кристаллах испытывает скачкообразный нагрев в несколько десятков градусов по Цельсию, что снижает вязкость пленки и облегчает ее отделение в виде оттока. Однако следует отметить и явно недостаточную проработку, с целью прогнозирования протекания процесса промывания паром, как жидкости небольшой плотности, сахара-песка теоретической базы по его расчету. Поэтому в работе, анализируя количественно процесс промывания потоком пара уплотненного слоя пористой среды в виде сахара-песка, используется положение гидродинамики пористой среды, когда течение парообразной жидкости сквозь этот слой имитируется потоком жидкости в изолированной капиллярной трубке. Что позволило при расчете эффективности процесса промывания паром слоя сахара-песка осуществить основанный на математическом аппарате теории конвективной диффузии соответствующий численный эксперимент и предложить его для инженерного расчета данного процесса.

Ключевые слова: сахар-песок, центробежное промывание, пар, фильтрация, диффузия

Mathematical modelling of the process of rinsing centrifugal draught ferry (on the example of sugar production)

Anatolij A. Slavjanskij	¹	anatoliy4455@yandex.ru
Evgeniy V. Semenoc	¹	sem-post@mail.ru
Andrej A. Alekseev	¹	mgutu-sahar@mail.ru
Sergey T. Antipov	²	ast@vsuet.ru

¹ Moscow state University of technology and management. K. G. Razumovsky, st. Talalikhina, 31, Moscow, 109004, Russia² Voronezh state university of engineering technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia

Abstract. It is known that in the process of crystal formation in vacuum apparatus grocery sugar factory Office crystalline white sugar covered by a film of such qualitative indicators affecting commodity sugar substances as liming and coloring substances. So at a sugar factory, one of the important operations process flow for obtaining sugar high product standards is it washing. At the same time, in implementing this process, use water in two phase conditions—a liquid or vapor. Because from an economic point of view, this procedure is quite expensive, in production environments to reduce labor and material costs, are resorting to various ways to less expensive equipment and process technology washing of granulated sugar. Moreover, although it is more often used in the production of water, according to experts, the process of washing by centrifuging massecuite layer of crystalline white sugar economically feasible to conduct, using no water, and water vapor. In particular, if you rinse the sugar vapor due to condensation heat allocated about half of a film on experiencing enormous heating in several tens of degrees Celsius, which reduces the viscosity and facilitate its films Office in the form of liquid. However, it should be noted and clearly insufficient elaboration, with the purpose of forecasting of the washing of the ferry, as low density liquids, sugar-sand theoretical base for its convenience. Therefore, in the work, analyzing process flow a couple of washings quantitatively the compacted layer of porous systems as granulated sugar, use a porous system hydrodynamics position when for a vaporous fluid through a layer of granulated sugar simulate fluid flow in an isolated capillary tube. That allowed when calculating the effectiveness of steam wash a layer of granulated sugar to implement based on the mathematical apparatus of the theory of convection diffusion corresponding numerical experiment and offer it for engineering calculation of the process.

Keywords: sugar, centrifugal washing, steam, filtration, diffusion

Для цитирования

Славянский А.А., Семенов Е.В., Алексеев А.А., Антипов С.Т. Математическое моделирование процесса центробежного промывания осадка паром (на примере сахарного производства) // Вестник ВГУИТ. 2019. Т. 81. № 1. С. 82–87. doi:10.20914/2310-1202-2019-1-82-87

For citation

Slavyanskij A.A., Semenov E.V., Alekseev A.A., Antipov S.T. Mathematical modelling of the process of rinsing centrifugal draught ferry (on the example of sugar production). *Vestnik VGUIT* [Proceedings of VSUET]. 2019. vol. 81. no. 1. pp. 82–87. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2019-1-82-87

Введение

В настоящее время, как и в прошлом, производственники и ученые проявляют интерес к процессу промывания белого сахара паром. Что обусловлено преимуществом данного способа обработки перед способом промывания слоя кристаллов белого сахара водой, в частности, в отношении расхода воды, потерь от растворения сахара в воде и др. [1].

Хотя вопрос о промывании сахара паром поднимался в технической литературе, особенности механизма данного явления изучены еще недостаточно [2]. В то же время процесс промывания сахара-песка паром, подаваемым в рабочий объем ротора центрифуги под избыточным давлением, представляет собой известный практический и теоретический интерес. Поэтому провели исследование влияния данного кинетического фактора на эффективность промывания водяным паром кристаллов сахара. Причем, анализируя данное явление, приняли во внимание, что с позиций положений гидродинамики, водяной пар относят к жидкостным средам, и поэтому кинетика процесса промывания паром может быть исследована в рамках положений этой физической теории.

Постановка задачи

Имея в виду, что в химической технологии процесс промывания кристаллов сахарозы рассматривается как процесс, обратный кристаллизации, кинетику растворения исследовали аналогично анализу кинетики их роста. При этом в основу анализа положим ряд допущений, несильно искажающих протекание реального физического явления. Так, предположим, что процесс промывания сахара-песка является стационарным и изотермическим, паровой агент представляет собой вязкую несжимаемую жидкость невысокой плотности, кинетика растворения кристаллов сахарозы в данном агенте обуславливается диффузионным отводом растворенного вещества от поверхности кристалла в паровой поток. В свою очередь, учитывая, что слой из осевших в результате центрифугирования на стенке ротора кристаллов сахара упакован достаточно плотно, характер течения жидкости в поровом пространстве между кристаллами принимаем капиллярным и одномерным [3].

При этом, как часто поступают при количественном анализе аналогичных диффузионных задач, исследование явления парового промывания сахара как процесса конвективного переноса целевой субстанции (молекул сахарозы) от кристалла сахарозы в паровой поток будем проводить

по двум этапам. Сначала исследуем кинетику парового потока, а затем – диффузионный перенос целевой субстанции в данный поток.

Решение задачи

Анализ кинетика парового потока.

Предварительно, аналогично тому, как поступают в некоторых исследованиях [3], для того чтобы упростить количественный анализ процесса молекулярного переноса сахарозы от кристалла к жидкости, поровый объем (просветность) слоя сахара-песка заменяем, с сохранением значения порозности, совокупностью цилиндрических трубок (условно, капилляров) длиной h и приведенным радиусом r_0 .

Для выбранной таким образом геометрической модели пористого пространства введем обозначения: d – диаметр частицы сахарозы, B – поверхностная порозность среды ($B < 1$), численно равная отношению объема заполняемых жидкостью пор к объему среды [4].

Поскольку объемная и поверхностная порозности рабочего объема количественно совпадают [4], то исходя из определения пористости, приближенно, может быть записано соотношение

$$\pi r_0^2 / B = \pi d^2 / [4 (1 - B)], \quad (1)$$

откуда вытекает зависимость

$$r_0 = 0,5 d [B / (1 - B)]^{1/2}, \quad (2)$$

где, по умолчанию, $r_0 = r_0(d, B)$.

Таким образом проблема расчета поля концентрации сахарозы в жидкостном потоке сводится к количественному анализу объекта исследования – концентрации продукта – внутри изолированного капилляра. В рамках поставленной задачи предполагаем, что отношение толщины слоя кристаллов сахарозы ($R - R_c$), где R_c , R – радиус поверхности осадка и ротора центрифуги к радиусу ротора центрифуги является небольшой величиной, т. е. $(R - R_c)/R$ – невелико, и поэтому условие $d \ll h$ выполняется, $h = R - R_c$.

При расчете скорости фильтрации v жидкости (агента, парообразной среды), в пренебрежении проницаемости фильтрующей основы, пользуемся приближенной формулой [4–5]

$$v = \kappa \Delta P / (\mu R),$$

где

$$\kappa = B^3 d^2 / [36(1 - B)^2 k], \quad (3)$$

где κ – постоянная Дарси; B – пористость слоя сахара; d – условный диаметр кристалла сахарозы, выбираемого в виде частицы сферической формы; ΔP – перепад давления; μ – коэффициент динамической вязкости пара; параметр $k \approx 5$ [5].

Применительно к рассматриваемому типу капиллярного течения в условиях центробежной обработки продукта под избыточным давлением вследствие (2) скорость фильтрации v находим по зависимости

$$v = \kappa \left[\frac{0,5 \rho \omega^2 (R^2 - R_c^2)}{\ln(R/R_c) + \Delta P_1} \right] / (\mu R), \quad (4)$$

где κ вычисляют по (3); ρ – плотность водяного пара; ω – угловая скорость ротора центрифуги; ΔP_1 – давление пара [1, 6].

Расчет процесса молекулярного переноса сахарозы в паровой поток. Если полагать, что кинетика процесса растворения сахарозы в паровом потоке обусловлена диффузионным осесимметричным массопереносом данного продукта, то в качестве основного дифференциального уравнения, описывающего это явление, выбираем уравнение стационарной конвективной диффузии в связанной с капилляром цилиндрической системе координат [7]:

$$\frac{\partial(cu)}{\partial z} = D \left(\frac{\partial^2 c}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial c}{\partial r} \right), \quad (5)$$

где r, z – соответственно, радиальная и осевая координата ($R_c \leq z < R$); c – объемная концентрация сахарозы в паровом потоке; $u = v/B$ – осевая скорость движения жидкости в капилляре; v – скорость фильтрации (расходная скорость); B – порозность слоя сахара-песка.

Если с небольшой погрешностью скорость u жидкости полагать постоянной по величине, то тогда уравнение (5) в упрощенном виде принимает форму

$$\frac{\partial c}{\partial z} = \alpha \left(\frac{\partial^2 c}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial c}{\partial r} \right), \quad (6)$$

где

$$\alpha = D/u, \quad (7)$$

где α – удельное значение коэффициента диффузии в долях, вычисляемой в соответствии с (4) осевой скорости u жидкости.

Граничное условие на входе в канал (капилляр) по значению концентрации сахарозы в паровом потоке

$$c(r, z) = c_0 \text{ при } 0 \leq r \leq r_0, z = R_c, \quad (8)$$

где полагаем $c_0 = 0$.

Условие симметричности распределения концентрации по радиусу канала

$$\partial c / \partial r = 0 \text{ при } r = 0, R_c < z \leq R. \quad (9)$$

Граничное условие по значению концентрации сахарозы в паровом агенте на стенке капилляра

$$c(r, z) = c_n \text{ при } r = r_0, \xi_0 < z \leq R, \quad (10)$$

где c_n – объемная концентрация насыщенного раствора (СВ).

Согласно (6)–(10) в рамках принятой в теории теплопередачи терминологии [8] имеем задачу с граничными условиями первого рода для дифференциального уравнения (3).

С точки зрения количественного анализа теплового режима в стационарном потоке жидкости внутри капилляра рассматриваемая задача формально эквивалентна (при условии, что диаметр d_k капилляра много меньше толщины h слоя сахара-песка) задаче о зависимости температуры от времени при неустановившемся режиме в неограниченном цилиндре. При этом в (6)–(10) роль времени протекания процесса теплопередачи играет осевая координата z .

Отсюда можем заключить, что решение задачи о неустановившемся режиме переноса теплоты в неограниченном цилиндре может быть адаптировано на краевую задачу (6)–(10) о распределении объемной концентрации сахарозы в конвективном потоке жидкости в капилляре и поэтому записано в виде зависимости [8]

$$c(r, z) = \frac{\Delta 2c_1 \sum_{i=1}^n J_0(v_i r / r_0) \exp[-v_i^2 Fo^*(z)]}{v_i J_1(v_i)}, \quad (11)$$

где $J_0(v)$, $J_1(v)$ – соответственно, функция Бесселя первого рода вещественного аргумента нулевого и первого порядка; v_i – положительные корни уравнения $J_0(v) = 0$, $i = 1, 2, \dots, n$;

$$Fo^*(z) = \alpha z / r_0^2 \quad (12)$$

модифицированный критерий Фурье, α определяется по (7), r_0 – по (1).

Ниже обозначим $Fo(z) = Fo^*(z)$.

Имея в виду, что передача сахарозы развивается от стенки капилляра к жидкости, согласно (11) и первому закону Фика поток концентрации q через стенку канала составляет [8]

$$q = D \frac{\partial c}{\partial r_0} = - \frac{2c_1 D}{r_0} \sum_{i=1}^n \exp[-v_i^2 Fo(z)]. \quad (13)$$

В свою очередь, значение данного кинетического фактора через элементарный кольцевой зазор на стенке капилляра определяется как

$$dQ = (2\pi r_0 dz) \cdot q, \quad (14)$$

где q рассчитывается по (13).

Поэтому расход (объем сахарозы, отводимой в единицу времени со стенки капилляра) с учетом (14) составит

$$Q = 2\pi r_0 \int_{R_c}^R q dz = 4\pi c_1 u r_0^2 \times \sum_{i=1}^n \frac{1}{v_i^2} \{ \exp[-v_i^2 Fo(R)] - \exp[-v_i^2 Fo(R_c)] \}. \quad (15)$$

Поскольку процесс промывания развивается в стационарном режиме, то масса Q_1 сахарозы, отводимой из сахара-песка в одном капилляре вместе с паровым агентом за период времени τ вычисляется по зависимости

$$Q_1 = Q \rho_2 \tau, \quad (16)$$

где Q вычисляется согласно (15); ρ_2 – плотность сахарозы.

Количество N моделирующих поровый зазор слоя (просветность в слое сахара-песка), очевидно, составляет

$$N = 4B(R^2 - R_c^2)H/(d^2h), \quad (17)$$

где B – порозность; R и R_c – соответственно, радиус ротора и внутренний радиус осадка; H – высота ротора; d и h – соответственно, диаметр и длина капилляра.

В таком случае масса сахарозы, отводимой из сахара-песка в роторе центрифуги вместе с паровым агентом за период времени τ , вычисляется по формуле

$$M = Q_1 N, \quad (18)$$

где Q_1 определяется по (16); N – по (17).

Численный эксперимент

В качестве значений параметров процесса, характерных для центрифуги типа ФПН-1251 Л, принимали: $\omega = 150$ рад/с; радиус ротора $R = 0,625$ м, высота ротора $H = 1$ м; радиус внутреннего слоя сахара-песка $R_c = 0,525$ м.

Объектом исследования выбирался паровый агент плотностью $\rho_1 = 0,95$ кг/м³ с коэффициентом динамической вязкости $\mu = 12 \cdot 10^{-6}$ м²/с и коэффициентом диффузии для системы «пар-сахар» $D = 15 \cdot 10^{-10}$ м²/с, а также сахарный песок первой кристаллизации плотностью $\rho_2 = 1560$ кг/м³ и размером кристаллов $d = 0,8$ мм.

Избыточное давление парового агента варьировали в области значений $\Delta P_1 \in [2,4 \cdot 10^5 \text{ Па}]$, порозность слоя сахара-песка принимали как $B = 0,35; 0,45$.

В соответствии с параметрами процесса $B = 0,35$ и $z = R = 0,625$ м входящие в выражение числа Фурье коэффициенты приняли значения: $\alpha = 3,4 \cdot 10^{-11}$ м; $r_0 = 2,04 \cdot 10^{-4}$ м и поэтому согласно (12) $Fo = 2,46 \cdot 10^{-4}$.

Как видно, полученное значение числа Фурье незначительно по величине. Как показано расчетом, это приводит к медленной сходимости рядов (14), (16), что корреспондирует с аналогичной ситуацией и в теории теплопроводности [9–13].

Поэтому приходится пользоваться асимптотическим представлением решения (16), справедливым для малых значений числа Фурье [8].

А именно, будем приближенно полагать

$$c = \sqrt{r_0/r} \cdot \operatorname{erfc}(\xi), \quad (19)$$

где

$$\operatorname{erfc}(\xi) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_{\xi}^{\infty} \exp(-\xi^2) d\xi, \quad (20)$$

$$\xi(r, z) = (1 - r/r_0) / [2Fo(z)^{1/2}]. \quad (21)$$

Причем, в соответствии с (21) $\xi(r_0, z) = 0$, и так как $Fo(z)$ достаточно велико, то $\xi(0, z) = [2Fo(z)^{1/2}]^{-1} \approx \infty$. В результате чего при расчетах пользуемся несобственным интегралом в форме (20).

В свою очередь, согласно (19)–(21)

$$\frac{\partial c}{\partial r} = \sqrt{r_0} \left[-\frac{1}{2} r^{-3/2} \operatorname{erfc}(\xi) + \frac{1}{\sqrt{r}} \frac{\partial [\operatorname{erfc}(\xi)]}{\partial \xi} \frac{\partial \xi}{\partial r} \right], \quad (22)$$

где

$$\begin{aligned} \frac{\partial [\operatorname{erfc}(\xi)]}{\partial \xi} &= \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{\partial}{\partial \xi} \int_{\xi}^{\infty} \exp(-\xi^2) d\xi = \\ &= -\frac{2}{\sqrt{\pi}} \exp(-\xi^2); \\ \frac{\partial \xi}{\partial r} &= -\frac{1}{2r_0 \sqrt{Fo}}, \end{aligned} \quad (23)$$

и поэтому

$$\frac{\partial [\operatorname{erfc}(\xi)]}{\partial \xi} \cdot \frac{\partial \xi}{\partial r} = \frac{\exp(-\xi^2)}{r_0 \sqrt{Fo} \cdot \sqrt{\pi}}.$$

В результате чего на базе (22), (23) получим

$$\frac{\partial c}{\partial r} = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{r_0}{r}} \left[\frac{\exp(-\xi^2)}{r_0 \sqrt{Fo}} - \frac{1}{r} \int_{\xi}^{\infty} \exp(-\xi^2) d\xi \right]. \quad (24)$$

Подставляя в (24) значения $r = r_0$, $\xi = 0$ и учитывая зависимость (12), будем иметь

$$\begin{aligned} \left. \frac{\partial c}{\partial r} \right|_{r=r_0} &= \frac{1}{r_0 \sqrt{\pi}} \left[\frac{1}{\sqrt{Fo}} - \int_0^{\infty} \exp(-\xi^2) d\xi \right] = \\ &= \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot \alpha \cdot z}} - \frac{1}{2r_0}, \end{aligned} \quad (25)$$

так как

$$\int_0^{\infty} \exp(-\xi^2) d\xi = \frac{\sqrt{\pi}}{2}.$$

В таком случае, подставляя (25) в (13), находим

$$q = D \frac{\partial c}{\partial r_0} = D \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{\pi \cdot \alpha \cdot z}} - \frac{1}{2r_0} \right). \quad (26)$$

В результате, исходя из (13), (26) будем иметь

$$Q = 2\pi r_0 \int_{R_c}^R q dz = \pi D \left[\frac{(R - R_c) - 4(\sqrt{R} - \sqrt{R_c})r_0}{\sqrt{\pi \alpha}} \right]. \quad (27)$$

Таким образом, расчетным аппаратом служили зависимости (16)–(18), где в качестве объема Q сахарозы, отводимой в единицу времени со стенки капилляра, использовалась формула (27).

В области варьирования реальных значений параметров процесса центробежной обработки паром слоя сахара-песка на базе зависимостей (16)–(18), (27) был реализован количественный анализ данного процесса.

Выводы

1. Для обоснования структуры пористого слоя, имитирующего промываемой паром слой сахара-песка на стенке ротора фильтрующей

центрифуги, используется модель из системы капиллярных ориентированных по радиусу ротора каналов приведенным радиусом и длиной.

2. На базе концепции молекулярного массопереноса формулируется и количественно анализируется диффузионная краевая задача по кинетике целевого продукта в капиллярном канале.

3. Полученные результаты могут быть использованы при обосновании режимных параметров процесса промывания паром кристаллических осадков на центрифугальном оборудовании в вопросе повышения товарного качества целевого продукта.

ЛИТЕРАТУРА

1 Сапронов А.Р. Технология сахарного производства: изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Пищевая промышленность, 1999. 496 с.

2 Даишев М.И. Пробеливание сахара паром // Сахар. 1993. № 2. С. 14–16.

3 Кот Ю.Д. Математические зависимости процесса центрифугирования утфелей. М.: Пищевая промышленность, 1964. С. 227–237.

4 Полубаринова-Кочина П.Я. Теория движения грунтовых вод. М.: Наука, 1977. 664 с.

5 Хаппель Д., Бреннер Г. Гидродинамика при малых числах Рейнольдса: пер. с англ. М.: Мир, 1976. 630 с.

6 Соколов В.И. Центрифугирование. М.: Химия, 1986. 408 с.

7 Будак Б.М., Самарский А.А., Тихонов А.Н. Сборник задач по математической физике. М.: ГИТТЛ, 1956. 684 с.

8 Лыков А.В. Теория теплопроводности. М.: Высшая школа, 1967. 600 с.

9 Mao Y., Li J., Li S., Chang S. et al. The mass transfer of sugar in sweet sorghum stalks for solid-state fermentation process // Fuel. 2015. № 144. P. 90–95.

10 Zhu Z., Mhemdi H., Zhang W., Ding L. et al. Rotating disk-assisted cross-flow ultrafiltration of sugar beet juice // Food and bioprocess technology. 2016. V. 9. № 3. P. 493–500.

11 Zhou H., Li P., Liu J., Chen Z. et al. Biomimetic polymeric semiconductor based hybrid nanosystems for artificial photosynthesis towards solar fuels generation via CO₂ reduction // Nano Energy. 2016. № 25. P. 128–135.

12 Wang C., Jiang T., Zhao K., Deng A. et al. A novel electrochemiluminescent immunoassay for diclofenac using conductive polymer functionalized graphene oxide as labels and gold nanorods as signal enhancers // Talanta. 2019. № 193. P. 184–191.

13 Knight S., Plant H., McWilliams L., Murray D. et al. Enabling 1536-well high-throughput cell-based screening through the application of novel centrifugal plate washing // SLAS Discovery. 2017. V. 22 (6). P. 732–742. doi: 10.1177/2472555216683650

REFERENCES

1 Saproinov A.R. Tekhnologiya sakharnogo proizvodstva [Technology of sugar production]. Moscow, Pishchevaya promyshlennost', 1999. 496 p. (in Russian).

2 Daishev M.I. Steaming sugar sugar. *Sakhar* [Sugar]. 1993. no. 2. pp. 14–16. (in Russian).

3 Kot Yu.D. Matematicheskiye zavisimosti protsessa tsentrifugirovaniya utfeley [Mathematical dependences of the process of centrifuging of fill fillings]. Moscow, Pishchevaya promyshlennost', 1964. pp. 227–237. (in Russian).

4 Polubarinova-Kochina P.Ya. Teoriya dvizheniya gruntovykh vod [Theory of groundwater movement]. Moscow, Nauka, 1977. 664 p. (in Russian).

5 Happel D., Brenner G. Gidrodinamika pri malykh chislakh Reynol'dsa [Hydrodynamics at low Reynolds numbers]. Moscow, Mir, 1976. 630 p. (in Russian).

6 Sokolov V.I. Tsentrifugirovaniye [Centrifugation]. Moscow, Khimiya, 1986. 408 p. (in Russian).

7 Budak B.M., Samara A.A., Tikhonov A.N. Sbornik zadach po matematicheskoy fizike [Collection of problems in mathematical physics]. Moscow, State publishing house of technical and theoretical literature, 1956. 684 p. (in Russian).

8 Lykov A.V. Teoriya teploprovodnosti [Theory of heat conduction]. Moscow, Vysshaya shkola, 1967. 600 p. (in Russian).

9 Mao Y., Li J., Li S., Chang S. et al. The mass transfer of sugar in sweet sorghum stalks for solid-state fermentation process. *Fuel*. 2015. no. 144. pp. 90–95.

10 Zhu Z., Mhemdi H., Zhang W., Ding L. et al. Rotating disk-assisted cross-flow ultrafiltration of sugar beet juice. *Food and bioprocess technology*. 2016. vol. 9. no. 3. pp. 493–500.

11 Zhou H., Li P., Liu J., Chen Z. et al. Biomimetic polymeric semiconductor based hybrid nanosystems for artificial photosynthesis towards solar fuels generation via CO₂ reduction. *Nano Energy*. 2016. no. 25. pp. 128–135.

12 Wang C., Jiang T., Zhao K., Deng A. et al. A novel electrochemiluminescent immunoassay for diclofenac using conductive polymer functionalized graphene oxide as labels and gold nanorods as signal enhancers. *Talanta*. 2019. no. 193. pp. 184–191.

13 Knight S., Plant H., McWilliams L., Murray D. et al. Enabling 1536-well high-throughput cell-based screening through the application of novel centrifugal plate washing. *SLAS Discovery*. 2017. vol. 22 (6). pp. 732–742. doi: 10.1177/2472555216683650

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Анатолий А. Славянский д.т.н., профессор, кафедра технологии продуктов из растительного сырья и парфюмерно-косметических изделий, Мега-факультет технологии пищевых продуктов и технологического менеджмента (институт), Московский государственный университет технологий и управления им. К.Г. Разумовского, ул. Николоямская 31, каб. 1, 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, ул. Талалихина, 31, г. Москва, 109004, Россия, sem-post@mail.ru

Андрей А. Алексеев к.э.н., инженер, кафедра технологии продуктов из растительного сырья и парфюмерно-косметических изделий, Московский государственный университет технологий и управления им. К.Г. Разумовского, ул. Земляной вал, 73, г. Москва, 109004, Россия, mgutu-sahar@mail.ru

Сергей Т. Антипов д.т.н., профессор, кафедра машин и аппаратов пищевых производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, ast@vsuet.ru

КРИТЕРИЙ АВТОРСТВА

Анатолий А. Славянский предложил научную концепцию работы, корректировал рукопись статьи.

Евгений В. Семенов провел обоснование физико-математической модели процесса, несет ответственность за плагиат.

Андрей А. Алексеев провел числовые расчеты.

Сергей Т. Антипов консультировал проводимые исследования.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ПОСТУПИЛА 10.01.2019

ПРИНЯТА В ПЕЧАТЬ 18.02.2019

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Anatolij A. Slavjanskij Dr. Sci. (Engin.), professor, technology of products from vegetable raw materials and perfumery and cosmetic products department, Mega-Faculty of Food Technology and Technology Management (Institute), Moscow state University of technology and management. K.G. Razumovsky, st. Nikoloyamskaya 31, room. 1, Moscow, 109004, Russia, anatoliy4455@yandex.ru

Evgeniy V. Semenoc Dr. Sci. (Engin.), professor, technology of products from vegetable raw materials and perfumery and cosmetic products department, Moscow state University of technology and management. K.G. Razumovsky, st. Talalikhina, 31, Moscow, 109004, Russia, sem-post@mail.ru

Andrej A. Alekseev Cand. Sci. (Econ.), engineer, technology of products from vegetable raw materials and perfumery and cosmetic products department, Moscow state University of technology and management. K.G. Razumovsky, Zemlyanoy Val str., 73, Moscow, 109004, Russia, mgutu-sahar@mail.ru

Sergey T. Antipov Dr. Sci. (Engin.), professor, machines and apparatus of food production department, Voronezh state university of engineering technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, ast@vsuet.ru

CONTRIBUTION

Anatolij A. Slavjanskij proposed a scientific concept of work, adjusted the manuscript of the article

Evgeniy V. Semenoc held justification for physical and mathematical model of the process responsible for the plagiarism.

Andrej A. Alekseev spent crunching.

Sergey T. Antipov advised studies.

CONFLICT OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

RECEIVED 1.10.2019

ACCEPTED 2.18.2019