

Разработка математической модели экстрагирования из люпина подсырной сывороткой наложением низкочастотных механических колебаний

Юлиан И. Шишацкий¹

Алексей М. Барбашин¹

Сергей А. Никель¹

sergei.nickel@yandex.ru

¹ Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия

Аннотация. В работе отмечено, что модель построена с целью создания в экстракторе возможно большего изменения давления в подсырной сыворотке, поскольку скорость переноса целевых компонентов пропорциональна разности давлений на концах капилляров. Подробно дано математическое описание пропитки как основной или важной вспомогательной операции. Приведены уравнения для пропитанной части капилляра, отношение скоростей пропитки в разные моменты времени. Из приведенных зависимостей выведено уравнение Вошберна относительно времени пропитки. Записаны формулы для расчета объемов экстрагента, прошедшего через капилляр, сыворотки и вытесненного из капилляра воздуха с учетом вязкого сопротивления последнего. После интегрирования уравнения скорости капиллярной пропитки получено выражение, позволяющее оценить конечное значение пропитки в начальной стадии. Для различных случаев капиллярной пропитки записаны выражения при атмосферном давлении, вакуумировании и при избыточном давлении. Введение безразмерных величин позволило упростить решение и получить выражение для расчета времени пропитки поры. Сделан анализ уравнения безразмерного времени пропитки с учетом наложения низкочастотных механических колебаний. Отмечено, что процессы пропитки и экстрагирования протекают одновременно, поэтому временем пропитки зачастую пренебрегают, что обедняет понимание физики процесса, снижает точность расчета. С учетом диффузионной нестационарности процесса переноса вещества, вследствие гидродинамической нестационарности, записано уравнение, содержащее эффективный коэффициент диффузии. Уравнение нестационарной диффузии для сферической частицы люпина в экстракторе периодического действия дополнено начальными и граничными условиями. С учетом балансного уравнения получено уравнение кинетики процесса. Изучено распределение пор в частице люпина по радиусам и площадям, рассчитано значение пористости частицы. Методом графического решения выписанных балансового уравнения, уравнения кинетики и параметров, входящих в эти уравнения, определены значения D_e и B_i . Сделаны выводы по работе.

Ключевые слова: математическая модель, экстрагирование, люпин, подсырная сыворотка, механические колебания

Development of mathematical model of extraction from lupine with cheese serum by applying low-frequency mechanical vibrations

Julian I. Shishatsky¹

Alexey M. Barbashin¹

Sergei A. Nickel¹

sergei.nickel@yandex.ru

¹ Voronezh state university of engineering technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia

Abstract. It is noted that the model is designed to create the largest possible pressure change in the cheese whey in the extractor, since the rate of transfer of the target components is proportional to the pressure difference at the ends of the capillaries. The mathematical description of impregnation as the main or important auxiliary operation is given in detail. The equations for the impregnated part of the capillary, the ratio of impregnation rates at different times are given. From the above dependencies, the equation Washburne regarding the time of impregnation. The formulas for calculating the volume of extractant passed through the capillary, serum and forced out of the capillary air taking into account the viscous resistance of the latter. After integration of the equation of the speed of capillary impregnation of the obtained expression allows to estimate the final value of the impregnation in the initial stage. For different cases of capillary impregnation expressions are written at atmospheric pressure, vacuuming and overpressure. The introduction of dimensionless values allowed to simplify the solution and to obtain an expression for calculating the time of pore impregnation. The analysis of the equation of dimensionless impregnation time taking into account the application of low-frequency mechanical vibrations is made. It is noted that the processes of impregnation and extraction occur simultaneously, so the impregnation time is often neglected, which impoverishes the understanding of the physics of the process, reduces the accuracy of the calculation. Taking into account the diffusion unsteadiness of the process of substance transfer due to hydrodynamic unsteadiness, the equation containing the effective diffusion coefficient is written. The equation of unsteady diffusion for a spherical lupine particle in a batch extractor is supplemented with initial and boundary conditions. Taking into account the balance equation, the kinetic equation of the process is obtained. We studied the distribution of pores in the particle lupine along the radii and squares, the calculated value of the porosity of the particle. The values of D_e and B_i are determined by the method of graphical solution of the balance equation, the equation of kinetics and the parameters included in these equations. Conclusions on the work.

Keywords: mathematical model, extraction, lupine, cheese whey, mechanical vibrations

Для цитирования

Шишацкий Ю.И., Барбашин А.М., Никель С.А. Разработка математической модели экстрагирования из люпина подсырной сывороткой наложением низкочастотных механических колебаний // Вестник ВГУИТ. 2019. Т. 81. № 1. С. 36–41. doi:10.20914/2310-1202-2019-1-36-41

For citation

Shishatsky Ju.I., Barbashin A.M., Nickel S.A. Development of mathematical model of extraction from lupine with cheese serum by applying low-frequency mechanical vibrations. *Vestnik VGUIT* [Proceedings of VSUET]. 2019. vol. 81. no. 1. pp. 36–41. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2019-1-36-41

Введение

Модель разработана на основе теории турбулентности с целью создания в экстракционном аппарате возможно большего изменения давления в обрабатываемой среде, за счет чего скорость переноса вещества пропорциональна разности давлений на концах капилляров.

Результаты и обсуждение

Течение жидкостей в капиллярах подчиняется закону Пуазейля [8]:

$$v = \frac{dl}{dt} = \frac{r^2}{8\mu l} \Delta p, \quad (1)$$

где l – длина пропитанной части капилляра; t – время; r – радиус капилляра; μ – коэффициент динамической вязкости жидкости; Δp – перепад давлений.

При экстрагировании капиллярная пропитка твердых частиц служит основной или важной вспомогательной операцией [7-12]. Кинетику капиллярной пропитки сквозных капилляров можно описать, представив (1) для пропитанного участка капилляра, следующей зависимостью [1]:

$$\frac{dl}{dt} = \frac{r^2}{8\mu l} (p_k - \rho g l \sin \alpha), \quad (2)$$

где p_k – капиллярное давление; ρ – плотность жидкости; g – ускорение свободного падения; α – угол наклона капилляра по отношению к горизонтальной плоскости.

Тогда отношение скоростей пропитки в разные моменты времени запишется в виде:

$$M = \frac{(l_\infty - l_1)l_2}{(l_\infty - l_2)l_1}, \quad (3)$$

где M – капиллярная масса жидкости; l_∞ – предельное расстояние, на которое мигрирует жидкость.

Из (3) следует:

$$l_\infty = \frac{(M-1)l_1 \cdot l_2}{M \cdot l_1 - l_2}.$$

Уравнение Вошберна [1] получено после интегрирования уравнения (2):

$$t = \frac{8\mu}{r^2 \rho g \sin \alpha} \left(l_\infty \ln \frac{l_\infty}{l_\infty - l} - l \right).$$

Опуская ряд промежуточных преобразований, а также используя термодинамическую теорию капиллярной пропитки Б.В. Дерягина [4], отметим, что полученные соотношения капиллярной пропитки не учитывают сопротивления вытесняемых газов.

Если предположить, что закон Пуазейля выполняется для обеих частей капилляра – заполненных жидкостью и заполненных газом, а газ, вытесняемый из капилляров, оказывает

вязкое сопротивление, для потока жидкости и потока газа запишем соответственно:

$$Q_{\text{ж}} = \frac{\pi \Delta p_1 r^4}{8 \mu_{\text{ж}} L_{\text{ж}}},$$

$$Q_{\text{г}} = \frac{\pi \Delta p_2 r^4}{8 \mu_{\text{г}} (L_0 - L_{\text{ж}})},$$

где $Q_{\text{ж}}$, $Q_{\text{г}}$ – объем прошедшей через капилляр жидкости и объем вытесненного из капилляра газа; $L_{\text{ж}}$, $L_{\text{г}}$ – часть капилляра, заполненная жидкостью и газом соответственно.

Запишем: $Q_{\text{ж}} = Q_{\text{г}}$ – условие неразрывности потока; $p_k = \Delta p_1 + \Delta p_2$ – сумма потерь давления равна скачку капиллярного давления.

Тогда расход жидкости и равный ему расход газа [1]:

$$Q = \frac{\pi p_k r^4}{8 [\mu_{\text{ж}} L_{\text{ж}} + \mu_{\text{г}} (L_0 - L_{\text{ж}})]}.$$

Уравнение скорости капиллярной пропитки имеет вид:

$$\frac{dL_{\text{ж}}}{dt} = \frac{p_k r^2}{8 [L_{\text{ж}} (\mu_{\text{ж}} - \mu_{\text{г}}) + \mu_{\text{г}} L_0]}. \quad (4)$$

После интегрирования (4) получим:

$$\frac{(\mu_{\text{ж}} - \mu_{\text{г}})}{2} L_{\text{ж}}^2 + \mu_{\text{г}} L_{\text{ж}} L_0 = \frac{r^2 p_k}{8} t.$$

При $L_{\text{ж}} \rightarrow 0$ из (4) находим:

$$\left. \frac{dL_{\text{ж}}}{dt} \right|_{L_{\text{ж}} \rightarrow 0} = \frac{r^2 p_k}{8 \mu_{\text{г}} L_0}. \quad (5)$$

Уравнение (5) позволяет оценить конечное значение пропитки в начальной стадии. Эта скорость постоянна и не зависит от глубины пропитки [1].

Для твердых тел растительного происхождения, например, люпина, характерно, кроме сквозных пор, наличие тупиковых и квазитупиковых пор, то есть сквозных пор, ведущих себя при пропитке как тупиковые.

Для различных случаев капиллярной пропитки: при атмосферном давлении, при низком давлении (вакуумировании), а также под избыточным давлением получается соответственно [1]:

$$\frac{dl}{dt} = \frac{r^2}{8\mu l} \left(p_k + p_o - p_o \frac{l_o}{l_o - l} \right), \quad (6)$$

$$\frac{dl}{dt} = \frac{r^2}{8\mu l} \left(p_k + p_n - p_n \frac{l_o}{l_o - l} \right), \quad (7)$$

$$\frac{dl}{dt} = \frac{r^2}{8\mu l} \left(p_k + p_n - p_o \frac{l_o}{l_o - l} \right). \quad (8)$$

Здесь p_o – атмосферное давление.

Уравнения (6)–(8) получены с учетом значений перепада давлений Δp для перечисленных вариантов, а также пренебрежимо малого значения гидростатического давления $\rho g l$.

С учетом уравнения (6) время пропитки составит:

$$t = \frac{8\mu}{r^2} \int_0^l \frac{(l_o - l) dl}{p_k l_o - (p_k + p_o) l}. \quad (9)$$

Упростить уравнение (9) можно введением безразмерных величин

$$\alpha = p_k / (p_k + p_o) \text{ и } \varphi = l / l_o [1]:$$

$$\frac{d\varphi}{dt} = \frac{r^2 p_k (\alpha - \varphi)}{8\mu \alpha l_o^2 \varphi (1 - \varphi)}.$$

С учетом постоянной интегрирования уравнение (9) примет вид:

$$t = \frac{8\mu \alpha l_o^2}{r^2 p_k} \left\{ 0,5\varphi^2 + (1 - \alpha) \left[\alpha \ln \frac{\alpha}{\alpha - \varphi} - \varphi \right] \right\}.$$

Вводя безразмерное время $\tau = r^2 p_k t / 8\mu \alpha l_o^2$, получили уравнение для расчета времени пропитки поры:

$$\tau = 0,5\varphi^2 + (1 - \alpha) \left(\alpha \ln \frac{\alpha}{\alpha - \varphi} - \varphi \right). \quad (4)$$

Как видно, предельная степень пропитки при атмосферном давлении равна α . В такой ситуации заземлённый газ находится под давлением, равным $p_k + p_o$, а $\Delta p = 0$.

С учетом наложения на систему поля низкочастотных механических колебаний имеем в уравнении Пуазейля (1):

$$\Delta p = (p_k + p_m) - \frac{L_o}{L_o - l} p_o.$$

Здесь L_o – длина поры; p_m – максимальное давление на турбулентное перемешивание двухфазной системы в экстракторе.

В уравнении (10) безразмерное время τ , безразмерная степень пропитки φ , а также безразмерная величина α имеют вид:

$$\tau = \left[(p_k + p_m) \frac{\mu^2}{8\mu L_o^2} \right] t; \quad \varphi = \frac{l}{l_o};$$

$$\alpha = \frac{p_m - p_o + p_k}{p_k + p_m}.$$

Анализ уравнения (10) позволяет сделать следующие выводы.

1) При $p_o = p_m$ уравнение (10) совпадает с решением уравнения движения жидкости в тупиковой поре при проведении процесса пропитки без интенсификации экстрагирования.

2) Продолжительность пропитки при наложении поля низкочастотных механических колебаний существенно меньше, чем при традиционном способе (в плотном слое) вследствие вхождения в уравнение (10) члена p_m .

Для радиуса пор, например, $r = 0,3 \cdot 10^{-5}$ м, $\Delta p = 0,1$ МПа и $L_o = 0,35 \cdot 10^{-3}$ м, время пропитки составляет примерно $0,1 \cdot 10^{-4}$ с. При этом $l / L_o \approx 1$, то есть поры практически полностью заполнены подсырной сывороткой, используемой в нашем случае как экстрагент.

Того же порядка данные приведены в [5] при пульсационном экстрагировании из корня женьшеня.

3) Малое время поровой пропитки является эффективным «стартом» в совокупности с последующими стадиями экстрагирования, интенсивно протекающими под воздействием наложения механических колебаний на систему «люпин-подсырная сыворотка».

4) В тупиковых и квазитупиковых капиллярах функцией капиллярного давления служит не высота капиллярного поднятия (как в сквозных капиллярах), а безразмерная величина – степень пропитки капилляров, которая практически не зависит от их длины.

Уместно отметить, что процессы пропитки и экстрагирования протекают одновременно, поэтому временем пропитки зачастую пренебрегают, что обедняет понимание физики процесса, снижает точность расчета [9–12]. В то же время расчет упрощается.

Как отмечается в работе [2] и др., совокупность процессов переноса вещества подчиняется закону Фика: $j = -D \text{grad} C$, где D – коэффициент диффузии.

С учётом диффузионной нестационарности вследствие гидродинамической нестационарности запишем:

$$j = -D_s \text{grad} C,$$

где D_s – эффективный коэффициент диффузии.

Иными словами, при турбулентном режиме перенос происходит как за счёт молекулярного, так и конвективного механизма.

Процессу переноса в порах целевого компонента – белков люпина – оказывает существенное сопротивление находящийся в них воздух, который, однако, может частично (или даже полностью) растворяться в жидкости, а также диффундировать по направлению к выходу из поры [3].

Принимая механизм внутреннего переноса диффузионным, с постоянным коэффициентом диффузии, запишем одномерное дифференциальное уравнение нестационарной диффузии

для сферической частицы люпина в экстракторе периодического действия [6,8]:

$$\frac{dC}{dt} = D_3 \left(\frac{d^2 C}{dx^2} + \frac{2}{x} \frac{dC}{dx} \right),$$

где $0 \leq x \leq R$,

при краевых условиях:

$$\begin{aligned} -D_3 \left(\frac{dC}{dx} \right)_n &= \beta (C_n - C_1) \text{ при } x = R; \\ \left(\frac{dC}{dx} \right)_{x=0} &= 0; \\ t = 0, C_o &= C_n = \text{const}; \\ \beta (C_o - \bar{C}) &= C_1 - C_n. \end{aligned} \quad (11)$$

В балансовом уравнении (22):

$$\beta = \frac{Mm_n}{(pW)} = \frac{Vm_n}{W},$$

где M – масса твердой фазы; m_n – объемная доля пор; β – коэффициент массоотдачи; C_n – начальная концентрация целевых компонентов в экстракторе; $\bar{C}$ – осреднённая концентрация целевых компонентов в порах частиц в каждый момент времени; n – индекс означает поверхность; C_n – концентрация целевых компонентов на поверхности частицы; C_1 – концентрация целевых компонентов в экстракторе; C_o – концентрация целевых компонентов в начальный момент времени в порах частиц; R – радиус частицы люпина; W – объём экстрагента; V – объём твердой фазы.

С учётом (11) уравнение кинетики можно представить в виде:

$$\frac{C_o - \bar{C}}{C_o - C_n} = \frac{1}{1 + \beta} - \sum_{n=1}^{\infty} A_n e^{-\mu_n^2 F_o}. \quad (12)$$

В уравнении (12) диффузионный критерий Фурье $F_o = D_3 t / R^2$; μ_n – корни характеристического уравнения.

Многочисленные исследования показали, что для области регулярного режима при решении можно ограничиться членами разложения при $n = 1$. В таком случае параметры, входящие в уравнение (12), находятся из уравнений [1, 6]:

$$A_1 = \frac{6}{\left(3\beta - \frac{\mu_1^2}{Bi} \right)^2 + \mu_1^2 \left(1 - \frac{1}{Bi} \right) + 9\beta}; \quad (13)$$

$$\text{tg } \alpha = 0,434 \mu_1^2 \frac{D_3}{R^2} = 0,434 \mu_1^2 \frac{F_o}{\tau},$$

где $Bi = \frac{\beta R}{D_3}$ – диффузионный критерий Био.

$$\text{ctg } \mu_1 = \frac{1}{\mu_1} + \frac{1}{\frac{3\beta}{\mu_1} - \frac{\mu_1}{Bi}}.$$

Пористость частицы люпина m_n находилась экспериментально, как суммарный объём открытых заполненных экстрагентом пор всех размеров в единице объёма тела, $\text{м}^3/\text{м}^3$. Установлено, что $m_n \approx 0,4$. На рисунке 1 представлено распределение пор в частицах люпина по радиусам. Изучено также распределение пор по площадям поверхности.

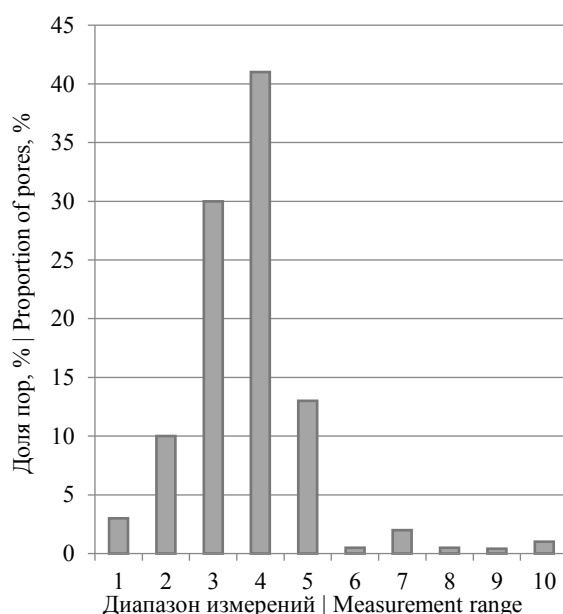


Рисунок 1. Распределение пор в частицах люпина по радиусам, мкм, в диапазонах: 1 – 0,002...0,003; 2 – 0,003...0,004; 3 – 0,004...0,005; 4 – 0,005...0,006; 5 – 0,006...0,008; 6 – 0,008...0,009; 7 – 0,009...0,01; 8 – 0,01...0,011; 9 – 0,011...0,012; 10 – 0,012...0,015

Figure 1. Distribution of pores in the particles of lupine along the radii, microns, in the range of: 1 – 0,002...0,003; 2 – 0,003...0,004; 3 – 0,004...0,005; 4 – 0,005...0,006; 5 – 0,006...0,008; 6 – 0,008...0,009; 7 – 0,009...0,01; 8 – 0,01...0,011; 9 – 0,011...0,012; 10 – 0,012...0,015

Размеры пор определялись с помощью микроскопа «Альтами-Био», программный комплекс обработки изображений Altami Studio 3,5, увеличение 100- и 200-кратное.

Полученные результаты, приведенные выше, использованы для решения уравнений математической модели.

Методом графического решения уравнения (12) [8] определялись параметры A_1 и угол α

в координатах $\left[\lg \frac{C_o - \bar{C}}{C_o - C_n} \right] - t$. Имея систему уравнений (13), определяли в области регулярного режима $D_s = 3,2 \cdot 10^{-11} \text{ м}^2/\text{с}$ и $B_i = 21,5$. Эффективный D_s обобщает все формы люпина (крупка, цилиндр, пластина). Результаты верификации модели с экспериментальными данными свидетельствуют о ее адекватности.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Аксельруд Г.А., Альдшулер М.А. Введение в капиллярно-химическую технологию. М.: Химия, 1983. 264 с.
- 2 Аксельруд Г.А., Лысянский В.М. Экстрагирование (Система твердое тепло-жидкость). Л.: Химия, 1974. 256 с.
- 3 Белоглазов И.Н. Твердофазные экстракторы. Л.: Химия, 1985. 240 с.
- 4 Дерягин Б.В., Чураев Н.В., Муллер В.М. Поверхностные системы. М.: Наука, 1985. 385 с.
- 5 Малышев М.Р., Кутенов А.М., Золотников А.Н. и др. Влияние наложения поля низкочастотных колебаний на эффективность экстрагирования и математическая модель процесса // Доклады Академии наук. 2001. Т. 381. № 6. С. 800.
- 6 Романков П.Г., Фролов В.Ф. Массообменные процессы химической технологии. Л.: Химия, 1990. 384 с.
- 7 Шишацкий Ю.И., Лавров С.В., Плюха С.Ю., Голубятников Е.И. Миграция экстрагента в пористую структуру растительной ткани // Хранение и переработка сельхозсырья. 2011. № 5. С. 40–42.
- 8 Шишацкий Ю.И., Плюха С.Ю., Иванов С.С. Определение коэффициентов диффузии экстрактивных веществ в люпине // Вестник ВГУИТ. 2014. № 2. С. 28–32.
- 9 Ashokan S.P. Analytical solution of the nonlinear initial value problem in one-stage thermophilic bioremediation process for the treatment of cheese whey // Asian Journal of Current Engineering and Maths. 2016. P. 44–51.
- 10 Aghili F., Ghoreyshi A.A., Rahimpour A., Rahimnejad M. Dynamic behavior of the adsorption, activated sludge and combined activated sludge-adsorption process for treatment of cheese whey wastewater // Desalination and Water Treatment. 2016. V. 57. № 35. P. 16404–16414.
- 11 Hinkova A., Bubnik Z., Henke S., Pour V. et al. Cheese whey tangential filtration using tubular mineral membranes // Chemical papers. 2016. V. 70. № 3. P. 325–332.
- 12 Trigueros D.E.G., Fiorese M.L., Kroumov A.D., Hinterholz C.L. Medium optimization and kinetics modeling for the fermentation of hydrolyzed cheese whey permeate as a substrate for *Saccharomyces cerevisiae* var. *boulardii* // Biochemical engineering journal. 2016. V. 110. P. 71–83.

REFERENCES

- 1 Aksel'rud G.A., Al'dshuler M.A. Vvedeniye v kapillyarno-khimicheskuyu tekhnologiyu [Introduction to capillary-chemical technology]. Moscow, Khimiya, 1983. 264 p. (in Russian).

Заключение

При наложении на систему «люпин–подсырная сыворотка» низкочастотных механических колебаний одновременно с увеличением коэффициента эффективной диффузии интенсифицируется как внутренний, так и внешний массообмен. Полученные в работе результаты могут быть полезными при расчетах экстракционных процессов и аппаратов, в которых используется активный турбулентный режим.

- 2 Aksel'rud G.A., Lysyanskiy V.M. Ekstragirovaniye (Sistema tverdoe teplo-zhidkost') [Extraction (solid heat-liquid system)]. Leningrad, Khimiya, 1974. 256 p. (in Russian).
- 3 Beloglazov I.N. Tverdogfaznyye ekstraktory [Solid phase extractors]. Leningrad, Khimiya, 1985. 240 p. (in Russian).
- 4 Deryagin B.V., Churayev N.V., Muller V.M. Poverkhnostnyye sistemy [Surface systems]. Moscow, Nauka, 1985. 385 p. (in Russian).
- 5 Malyshev M.R., Kutenov A.M., Zolotnikov A.N. et al. Influence of imposing a field of low-frequency oscillations on the efficiency of extraction and a mathematical model of the process. *Doklady Akademii nauk* [Reports of the Academy of Sciences]. 2001. vol. 381. no. 6. pp. 800. (in Russian).
- 6 Romankov P.G., Frolov V.F. Massoobmennyye protsessy khimicheskoy tekhnologii [Mass circulation processes of chemical technology]. Leningrad, Khimiya, 1990. 384 p. (in Russian).
- 7 Shishatskiy Yu.I., Lavrov S.V., Plyukha S.Yu., Golubyatnikov Ye.I. Extractant migration into the porous structure of plant tissue. *Khraneniye i pererabotka sel'khozsyrya* [Storage and processing of agricultural raw materials]. 2011. no. 5. pp. 40–42. (in Russian).
- 8 Shishatskiy Yu.I., Plyukha S.Yu., Ivanov S.S. Determination of diffusion coefficients of extractive substances in lupine. *Vestnik VGUIT* [Proceedings of VSUET]. 2014. no. 2. pp. 28–32. (in Russian).
- 9 Ashokan S.P. Analytical solution of the nonlinear initial value problem in one-stage thermophilic bioremediation process for the treatment of cheese whey. *Asian Journal of Current Engineering and Maths*. 2016. pp. 44–51.
- 10 Aghili F., Ghoreyshi A.A., Rahimpour A., Rahimnejad M. Dynamic behavior of the adsorption, activated sludge and combined activated sludge-adsorption process for treatment of cheese whey wastewater. *Desalination and Water Treatment*. 2016. vol. 57. no. 35. pp. 16404–16414.
- 11 Hinkova A., Bubnik Z., Henke S., Pour V. et al. Cheese whey tangential filtration using tubular mineral membranes. *Chemical papers*. 2016. vol. 70. no. 3. pp. 325–332.
- 12 Trigueros D.E.G., Fiorese M.L., Kroumov A.D., Hinterholz C.L. Medium optimization and kinetics modeling for the fermentation of hydrolyzed cheese whey permeate as a substrate for *Saccharomyces cerevisiae* var. *boulardii*. *Biochemical engineering journal*. 2016. vol. 110. pp. 71–83.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Юлиан И. Шишацкий д.т.н., профессор, кафедра физики, теплотехники и теплоэнергетики, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, .

Алексей М. Барбашин к.т.н., доцент, кафедра физики, теплотехники и теплоэнергетики, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия,

Сергей А. Никель к.т.н., доцент, кафедра физики, теплотехники и теплоэнергетики, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, sergei.nickel@yandex.ru

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 10.01.2019

ПРИНЯТА В ПЕЧАТЬ 18.02.2019

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Julian I. Shishatsky Dr. Sci. (Engin.), professor, physics, heat engineering and heat power engineering department, Voronezh state university of engineering technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, .

Alexey M. Barbashin Cand. Sci. (Engin.), associate professor, physics, heat engineering and heat power engineering department, Voronezh state university of engineering technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia,

Sergei A. Nickel Cand. Sci. (Engin.), associate professor, physics, heat engineering and heat power engineering department, Voronezh state university of engineering technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, sergei.nickel@yandex.ru

CONTRIBUTION

All authors are equally involved in the writing of the manuscript and are responsible for plagiarism

CONFLICT OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

RECEIVED 1.10.2019

ACCEPTED 2.18.2019