

Совершенствование работы оборудования для противоточной экстракции на основе моделирования процесса

Геннадий В. Алексеев ¹	gva2003@mail.ru	 0000-0002-2867-108X
Вячеслав А. Шанин ²	shanin.vyacheslav@mail.ru	 0000-0002-1257-2319
Артём А. Бирченко ²	topgear67@mail.ru	 0000-0002-0124-8054
Евгения В. Кравцова ²	evkravtcova@itmo.ru	 0000-0003-1393-3347
Максим В. Гончаров ³	goncharovmaxv@ya.ru	 0000-0003-0859-167X

¹ Государственный институт экономики, финансов, права и технологий, Родинская ул., 5, Гатчина, Ленинградская обл., 188300, Россия

² Национальный исследовательский университет ИТМО, Кронверкский пр., 49, Санкт-Петербург, 197101

³ Филиал «Национальный исследовательский университет «МЭИ» в г. Смоленске, Энергетический проезд, 1, г. Смоленск, 214013, Россия

Аннотация. В статье рассматривается возможность и эффективность применения дискретной диффузии при экстрагировании материалов с внутренней анизотропной структурой по сравнению с непрерывным процессом диффузии. С этой целью выполнены теоретические расчеты и проведены экспериментальные исследования противоточной экстракции пектина из топинамбура. Для проведения моделирования были определены уравнение для расчета коэффициента внутренней диффузии и уравнение изотермы адсорбции при противоточной экстракции. Оценка эффективности применения противоточного экстрагирования для получения пектина из топинамбура проводилась рассмотрением влияния эффекта дискретной диффузии на скорость протекания процесса. Полученные уравнения дали возможность провести аналитическую оценку эффективности дискретной диффузии из двухзонных частиц шарообразной формы в сравнении с непрерывной диффузией при многоступенчатом экстрагировании растительного материала. Имея аналитические данные о распределении концентраций экстрагируемого вещества во внутренней и внешней зонах частицы на разных ступенях экстракции, можно высчитать коэффициенты диффузии материалов в различных зонах и теоретически определить степень деструкции клеточных стенок и структуры на разных стадиях экстракции. Разработанная методика, благодаря аналитическому описанию процесса, позволяет подобрать оптимальные условия для экстракции различных материалов из растительного и животного сырья.

Ключевые слова: экстракция, противоточное экстрагирование, коэффициент диффузии, распределение концентрации, анизотропная структура.

Improving the performance of equipment for countercurrent extraction on the basis of process simulation

Gennady V. Alekseev ¹	gva2003@mail.ru	 0000-0002-2867-108X
Vyacheslav A. Shanin ²	shanin.vyacheslav@mail.ru	 0000-0002-1257-2319
Artyom A. Birchenko ²	topgear67@mail.ru	 0000-0002-0124-8054
Evgenia V. Kravtcova ²	evkravtcova@itmo.ru	 0000-0003-1393-3347
Maxim V. Goncharov ³	goncharovmaxv@ya.ru	 0000-0003-0859-167X

¹ State Institute of Economics, Finance, Law and Technology, Roshchinskaya st., 5, Gatchina, Leningrad region, 188300, Russia

² ITMO University, Kronverksky pr., 49, St. Petersburg, 197101, Russia

³ Branch of the National Research University Moscow Power Engineering Institute in Smolensk, Energy proezd, 1, Smolensk, 214013, Russia

Abstract. The article discusses the possibility and efficiency of using discrete diffusion in the extraction of materials with an internal anisotropic structure in comparison with a continuous diffusion process. For this purpose, theoretical calculations were made and experimental studies of countercurrent extraction of pectin from Jerusalem artichoke were carried out. To carry out the simulation, an equation for calculating the coefficient of internal diffusion and an equation for the adsorption isotherm during countercurrent extraction were determined. Evaluation of the efficiency of using countercurrent extraction to obtain pectin from Jerusalem artichoke was carried out by considering the influence of the effect of discrete diffusion on the rate of the process. The resulting equations made it possible to analytically evaluate the efficiency of discrete diffusion from two-zone spherical particles in comparison with continuous diffusion in multistage extraction of plant material. Having analytical data on the distribution of extractable substance concentrations in the inner and outer zones of the particle at different stages of extraction, it is possible to calculate the diffusion coefficients of materials in different zones and theoretically determine the degree of destruction of cell walls and structures at different stages of extraction. The developed technique, thanks to the analytical description of the process, allows you to select the optimal conditions for the extraction of various materials from plant and animal raw materials.

Keywords: extraction, countercurrent extraction, diffusion coefficient, concentration distribution, anisotropic structure.

Для цитирования

Алексеев Г.В., Шанин В.А., Бирченко А.А., Кравцова Е.В., Гончаров М.В. Совершенствование работы оборудования для противоточной экстракции на основе моделирования процесса // Вестник ВГУИТ. 2022. Т. 84. № 2. С. 27–33. doi:10.20914/2310-1202-2022-2-27-33

For citation

Alekseev G.V., Shanin V.A., Birchenko A.A., Kravtcova E.V., Goncharov M.V. Improving the performance of equipment for countercurrent extraction on the basis of process simulation. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2022. vol. 84. no. 2. pp. 27–33. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2022-2-27-33

Введение

Современные тенденции рационального природопользования предполагают все более широкое применение технологий глубокой переработки пищевого сырья. Одним из направлений реализации таких тенденций является переработка вторичных пищевых ресурсов как дополнительного источника ценных пищевых веществ [1–3]. Непременным этапом такой переработки является экстракция предварительно измельченных и гидратированных вторичных пищевых ресурсов [4,5]. Экстракционный способ извлечения полезных ингредиентов из вторичного сырья широко распространен во многих сферах пищевой промышленности и его совершенствование определяет эффективность работы отрасли [6–8].

Как правило, цель экстракции – извлечение ценных пищевых компонентов из растительного или животного сырья. Так, например, благодаря процессу экстракции, из топинамбура извлекается пектин – вещество, имеющее высокую пищевую ценность. Поскольку, в основе процесса экстракции лежат явления тепло- и массообмена, для прогнозирования результатов работы технологического оборудования необходимо знать влияние различных параметров системы (температура, давление, гидромодуль, степень измельчения сырья) на протекание этих процессов [9, 10–20].

Цель работы состоит в оптимизации процесса экстракции ценных пищевых веществ из растительного сырья путем разработки математической модели процесса экстрагирования на примере извлечения пектина или инулина из такого растительного сырья как, топинамбур, при многоступенчатом противоточном циклическом процессе экстракции. Для этого необходимо учесть эффект обратного перемешивания растворителя, время стока растворителя из твердой фазы в зоне отсутствия орошения, влияние времени выдержки материала на эффективность последующей ступени орошения, и усовершенствовать действующие экстракторы, предназначенных для этих целей.

Материалы и методы

Концентрация наружного раствора от времени в промышленных аппаратах экстракторов типа ДС 70 и НД 1250 напрямую зависит от математической задачи, а так же ее модели дискретной диффузии. Нужно отметить, что решения задач экстрагирования выполнены при допущении, что внутренняя структура частиц изотропна, но это условие не является постоянным. Было замечено, что маслячность различных слоев материала в ходе его прессования различна. Одной из причин этого является определенная ориентация и более плотная упаковка

белковых молекул в слоях, примыкающих к валу шнекового пресса, что, естественно, свидетельствует и о различиях во внутренней структуре различных слоев. При ступенчатом сбросе давления при экстрагировании сжиженными газами происходит разрушение клеточной структуры наружных слоев частиц, так что внутренняя их структура заведомо анизотропна.

Для получения математической модели дискретной диффузии при многоступенчатом экстрагировании растительного материала с различной степенью вскрытия клеточной структуры из частиц шарообразной формы (соответствует подготовке материала к экстрагированию в виде крупки), состоящей из двух зон с различными коэффициентами диффузии D_1 и поверхностного слоя, состоящего из разрушенных клеток с соответственно большим коэффициентом диффузии D_2 . Из этой двухзонной частицы вещество отводится многократно (многоступенчатое экстрагирование).

Математически задача формулируется следующим образом: требуется решить уравнение нестационарной диффузии

$$\frac{\partial C_{ij}^{(k)}}{\partial \tau} = D_k \left(\frac{\partial^2 C_{ij}^{(k)}}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial C_{ij}^{(k)}}{\partial r} \right) \quad (1)$$

$$(\tau > 0, R_{k-1} < r, R_0 = 0)$$

При следующих краевых условиях:

$$C_{ij}^{(k)}(r, \tau_0) = f(r); \quad (2)$$

$$\text{при } \tau = 0 \quad f(r) = C_0 = \text{const}$$

$$C_{ij}^{(1)}(R_1, \tau) = C_{ij}^{(2)}(R_1, \tau) \quad (3)$$

$$-D_1 \frac{C_{ij}^{(1)}(R_1, \tau)}{\partial r} = -D_2 \frac{C_{ij}^{(2)}(R_1, \tau)}{\partial r} \quad (4)$$

$$\frac{\partial C_{ij}^{(1)}(0, \tau)}{\partial r} = 0; C_{ij}^{(1)}(0, \tau) < \infty \quad (5)$$

$$C_{ij}^{(2)}(R_2, \tau) = C_n = \text{const} \quad (6)$$

$$\frac{C_{ij}^{(2)}(R_2, \tau)}{\partial r} = 0; C_0 > C_n \quad (7)$$

Условие (2) – начальное, определяющее распределение концентрации извлекаемого вещества в начальный момент соответствующего периода.

Уравнения (3)–(4) являются математическим выражением граничного условия четвертого рода, определяющего равенства концентраций и потоков массы вещества при хорошем массообменном контакте между ядром и поверхностным слоем.

Выражения (5) – условия симметрии и физической ограниченности распределения извлекаемого вещества.

Условия (6) и (7) являются математическим выражением взаимодействия частиц (семени) с окружающей средой в первом и втором периодах процесса. Не уменьшает общности постановки задачи взятое $C_{ii} = 0$. Таким образом, приведенная формулировка данной комплексной задачи содержит ряд отдельных задач, решения которых порознь известны. В данном случае задача существенно сложнее: рассматривается диффузия вещества в двухслойной частице с попеременным непрерывным и дискретным отводом вещества.

В результате применения методов математической физики получено решение краевой задачи (1)–(7), которое для регулярной стадии процесса и для усредненных значений концентрации можно записать в следующем виде:

$$C_0 - \bar{C}_{ij}^{(k)} = 1 + (-1)^j M_{ij}^{(k)}, \quad (8)$$

где

$$M_{ij}^1 = 3k_D^m k_R^n \gamma_{11}^s \gamma' (\sin \rho_{11})^{2-j} \times$$

$$\times (\sin \gamma_{1j} - \gamma_{1j} \cos \gamma_{1j}) \frac{1 - \gamma^2}{\psi_2(k_R)} \times$$

$$\times \left[\frac{2\psi_2(k_R) \sin \gamma_{11}}{(1 - \gamma^2) \varphi_{11}} \right]^i \times \left[\frac{2\sin \gamma_{11} \sin \gamma_{12}}{(1 - \gamma^2) \varphi_{11}} \right]^n \times$$

$$\times \exp \left[- \left(\gamma_{1j}^2 F_0 + \sum_{i=1}^j \sum_{j=1}^2 \gamma_{1j}^2 F_{0ij} - \gamma_{1j}^2 F_{0ij} \right) \right]$$

$$M_{ij}^2 = \begin{cases} \frac{\sin \gamma_{11} (\sin \rho_{11} + \sqrt{k_D} \gamma_{11} \cos \rho_{11} - \sqrt{k_D} \gamma_{11} k_R)}{\sqrt{k_D} (1 - k_R^3) \gamma_{11} \sin \rho_{11} (\sin \gamma_{11} - \gamma_{11} \cos \gamma_{11})} \cdot \\ \frac{\sqrt{k_D}}{1 - k_R^3} M_{ij}^{(1)} \text{ для остальных } i, u, j \\ M_{11}^{(1)} \text{ при } i = j = 1 \\ s = j - 3 + (k - 1)(2 - j); \\ m = \frac{1}{2} [i + (-1)^j - (k - 1)]; \\ i = \begin{cases} i + (-1)^j \text{ при } i = 1; n = i + j - 2; \\ i + (-1)^j + 2 \text{ при } i > 1; \gamma = \frac{\gamma_{11}}{\gamma_{12}} \end{cases} \end{cases}$$

Здесь γ_{11} – первый положительный корень характеристического уравнения

$$\sqrt{k_D} \gamma \text{ctg} \rho + 1 + k_D (\gamma \text{ctg} \gamma - 1) = 0 \quad (9)$$

γ_{12} – положительный корень характеристического уравнения

$$k_D (\gamma \text{ctg} \rho - 1) (\sqrt{k_D} k_R \text{ctg} \rho - 1) + \rho \text{ctg} \rho - (k_D k_R \gamma^2 + 1) = 0 \quad (10)$$

$$\varphi_{11} = \sqrt{k_D} \gamma_{11} \sin^2 \rho_{11} + \rho_{11} \sin^2 \gamma_{11} + \frac{1 - k_D}{\sqrt{k_D} \gamma_{11}} - \sin^2 \gamma_{11} \sin^2 \rho_{11};$$

$$\varphi_{12} = k_D \{ (\sin \rho_{12} + \sqrt{k_D} k_D \gamma_{12} \cos \rho_{12}) \times (\gamma_{12} - \sin \gamma_{12} \cos \gamma_{12}) + k_D \sin \gamma_{12} (\gamma_{12} \cos \gamma_{12} - \sin \gamma_{12}) \times (\cos \rho_{12} - \rho_{12} k_R \sin \rho_{12}) - \gamma_{12} \sin^2 \gamma_{12} [k_R \rho_{12} \cos \rho_{12} + (k_R^2 + 1) \sin \rho_{12}] \}$$

$$\psi_2(k_R) = \sqrt{k_D} \gamma_{12} \sin \gamma_{12} \cos(\sqrt{k_D} \gamma_{12} (k_R - 1)) + [(1 - k_D) \sin \gamma_{12} + k_D \gamma_{12} \cos \gamma_{12}] \times \sin(\sqrt{k_D} \gamma_{12} (k_R - 1));$$

i – номер ступени ($i = 1, 2, 3, \dots, J$); j – номер периода на ступени ($j = 1, 2$); k – номер зоны частицы ($k = 1$ – ядро, $k = 2$ – поверхностный слой); c – концентрация диффундирующих веществ; $k_D = D_1/D_2$; $k_R = R_1/R_2$; $\rho = \sqrt{k_D} (k_R - 1) \gamma$; $\sqrt{k_D} (k_R - 1)$ – иррациональное число; $F_0 = D_1 \tau / R_1^2$; $F_0 = D_1 \tau_{1j} / R_1^2$ – числа Фурье.

Таким образом, определено распределение концентраций в каждой из зон на любой ступени и любом периоде на ступени. Пользуясь полученными результатами, можно оценить коэффициенты диффузии реальных материалов по зонам, и, применяя интервальный метод расчета, оценить степень вскрытия клеточной структуры на каждой ступени. Наличие адекватного аналитического описания ступенчатого процесса экстрагирования позволяет осуществить и оптимизацию процесса.

Полученная модель дала возможность разработать аналитическую оценку эффективности дискретной диффузии из двухзонных частиц шарообразной формы в сравнении с непрерывной диффузией при многоступенчатом экстрагировании растительного материала в виде неравенства:

$$0 < A \leq 1, \quad (11)$$

$$A = -\frac{1}{2} k_D^{\frac{i+1}{2}} \gamma_{11} \gamma^3 \frac{\varphi(1 - \gamma^2) \sin \gamma_{12} - \gamma_{12} \cos \gamma_{12}}{\psi_2(k_R) \sin \gamma_{11} - \gamma_{11} \cos \gamma_{11}} \times$$

$$\times \left(\frac{2 \sin \gamma_{11}}{(1 - \gamma^2)} \right)^2 \left[-\frac{k_R \gamma \psi_2(k_R) \sin \gamma_{12}}{\varphi_{11} \varphi_{12}} \right] \times$$

$$\times \exp \left[-\sum_{i=1}^j \sum_{j=1}^2 \gamma_{1j}^2 F_{0ij} - \gamma_{11}^2 i F_0^* \right]$$

$$F_O^* = \frac{D_1 t}{R_1^2}, \quad t = t_{\text{диф}} = t_{\text{изол}}, \quad t_{\text{диф}} - \text{время соб-}$$

ственно диффузии (отвода вещества) на ступени; $t_{\text{изол}}$ – время отсутствия потока вещества через внешнюю поверхность частицы.

Данный подход может быть использован и при делении частицы на произвольное число зон с различной внутренней структурой.

Экстрагирование и адсорбцию в системе твердое тело-жидкость, широко используемые в пищевой промышленности, можно рассматривать с единой позиции массообмена как процессы с противоположными направлениями потоков массы.

Вещество в твердой фазе, подвергается экстрагированию, в общем случае состоит из двух частей: удерживаемой сорбционными силами и распределенной, обычно равномерно, в поровом пространстве тела. При сорбции в твердой фазе вещество накапливается за счет собственно сорбции и за счет его диффузии в поровом пространстве. Сказанное предопределяет следующую постановку вопроса: необходимо исследовать диффузионно-сорбционную задачу с внутренним источником массы, зависящим от времени и положительным в случаях адсорбции и экстрагирования.

В общем виде поставленная задача для частиц шарообразной формы может быть записана следующим образом:

$$\frac{\partial C_1}{\partial \tau} = D \left(\frac{\partial^2 C_1}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial C_1}{\partial r} \right) + a_0(\tau); \quad (12)$$

$$\tau > 0; 0 < r < R \quad (13)$$

$$C_2(R, \tau) = \Delta(\tau, Y); \quad (14)$$

$$C_1(r, 0) = C_{106} > C_{20} \quad (15)$$

$$C_1(r, 0) = C_{106} < C_{20}; \quad (15)$$

$$C_1(r, 0) = 0; \quad (16)$$

$$C_1(0, \tau) \neq \infty; \quad (17)$$

$$\frac{\partial C_1(0, \tau)}{\partial r} = 0; \quad (18)$$

где C_1 , C_{106} – текущее и начальное значение концентрации раствора внутри частиц; C_2 , C_{20} – текущее и начальное значение концентрации раствора снаружи частиц; τ – время; r – текущее значение радиуса; R – радиус шара; a_c – скорость адсорбции (десорбции); Y – координата, нормальная к поверхности шара.

Формула (14) соответствует экстрагированию, формулы (15) и (16) адсорбции.

Отметим, что в написанную систему изотерма адсорбции не входит, поскольку она характеризует равновесное состояние, т. е. должна быть получена из решения поставленной задачи как предельное состояние системы.

Условия (14) – (16) соответствуют направлениям потоков массы при экстрагировании и адсорбции, (17) и (18) – общеизвестны. Функция $a_c(\tau)$ отражает изменение скорости адсорбции (десорбции) во времени и, естественно, определяется природой адсорбционных сил, величиной удельной поверхности адсорбента, свойствами адсорбируемого вещества, его концентрацией и другими характеристиками сорбционных свойств системы твердое тело-жидкость.

Если для адсорбции газов (паров) собственно сорбция протекает, очень быстро ($10^{-8} - 10^{-9} c$), то адсорбция из растворов длится несколько десятков минут, что по порядку величин равно продолжительности реальных диффузионных процессов. Что касается десорбции при экстрагировании, то при некоторых случаях собственно десорбция протекает длительнее процесса экстрагирования. Таким образом, для системы твердое тело-жидкость $0 \leq a_c(\tau) \leq a_{nc}$, где $0 \leq a_{nc} < \infty$ (a_{nc} – начальная скорость адсорбции), и поэтому необходимо определять вид этой функции. Выбор здесь ограничен: из функций, при использовании которых возможно решение системы (12)–(18), приведенному условию удовлетворяют лишь функция косинуса, экспонента и функция Гаусса; две последние требуют экспериментального определения входящих в них коэффициентов, но по виду графиков мало отличаются от функции косинуса. С учетом сказанного будем иметь:

$$a_c(\tau) = a_{nc} \cos \frac{\pi \tau}{2\tau_{kc}}, \quad (19)$$

где τ_{kc} – конечное время собственно сорбции.

В качестве краевого условия (13) для противотока, что практически наиболее важно, предлагается принять:

$$C_2(R, \tau) = C_{20} + (C_{2k} \cdots C_{20}) \sin \frac{\pi \tau}{2\tau_{kc}} \pm \pm \delta \frac{dC_2(Y, \tau)}{dY} \quad (20)$$

где C_{2k} – конечная концентрация наружного раствора; τ_{kc} – конечное время процесса в целом; δ – толщина пограничного слоя; знак “плюс” относится к экстрагированию, “минус” к адсорбции.

Результаты и обсуждение

Данная функция (20) при $C_{2k} = 0$ и $\delta = 0$ исследована при изучении только одного процесса противоточного экстрагирования, она адекватна изменению концентрации наружного раствора C_2 в зависимости от времени τ в промышленных экстракторах (рисунок 1) и по сравнению с другими функциями обладает тем же преимуществом, что и функция (19).

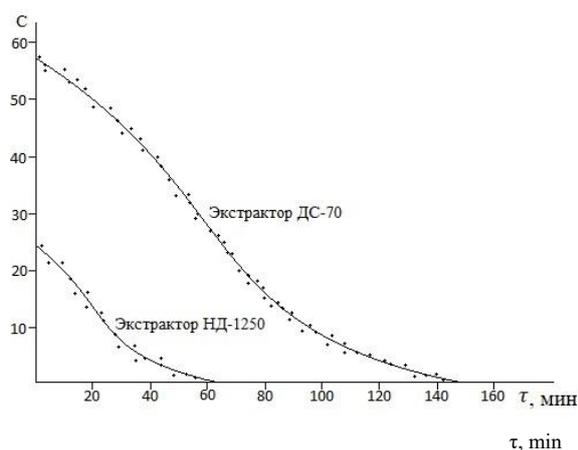


Рисунок 1. Зависимость концентрации наружного раствора (мисцеллы) от времени в промышленных аппаратах

Figure 1. The dependence of the concentration of the external solution (miscella) on time in industrial devices

Третий член функции (20) отражает существование пограничного слоя на поверхности сорбента. Введение третьего члена в условие (20) позволяет обосновать его корректность, например, для адсорбции при $\tau \rightarrow 0$, $C(R, 0) \rightarrow 0$, что соответствует условию (16), в то время как если бы в условии (20) не было третьего члена,

то было бы $C_2(R, 0) \rightarrow C_{20}$. Последнее может быть объяснено, в частности, тем, что при определенных гидродинамических условиях $\delta \rightarrow 0$. Наконец, третий член позволяет привести в соответствие с экспериментом условие (20) путем правильного выбора функции $C_2(Y, \tau) = \Delta(Y)$. При $\tau \rightarrow \infty$ $C_2(R, \infty) \rightarrow C_{2k} \rightarrow C_{20}$, так как в этом случае концентрация по толщине пограничного слоя выравнивается, т. е. $dC_2(Y, \tau)/dY = 0$.

Поскольку задачи можно было бы усложнить путем введения граничных условий третьего рода, но это привело бы к дополнительному учету лишь конвективного массообмена, что общеизвестно и для современных интенсифицированных процессов экстрагирования и адсорбции малозначимо.

Заключение

Полученные результаты позволяют с высокой степенью достоверности прогнозировать концентрацию наружного раствора в зависимости от времени процесса экстрагирования. Это подтверждается измерениями концентрации экстрагируемого вещества в течение эксперимента и близостью их значений к расчетным. Таким образом, можно считать, что полученное уравнение (20) позволяет провести анализ влияния степени пропитки мисцеллы, взятой с промежуточной ступени противоточного многоступенчатого экстрактора, на эффективность процесса. Благодаря аналитическим расчетам с использованием полученной математической зависимости можно оптимизировать работу оборудования путем внесения изменений в его конструкцию, обеспечивающих влияние рассчитанных технологических параметров на ход процесса

Литература

- 1 Фабрицкая А.А., Котляревская Н.И., Викторова Е.П. Современные исследования в области интенсификации процесса экстракции биологически активных веществ из растительного сырья с применением ферментов // Новые технологии. 2021. Т. 17. № 2. С. 56–66.
- 2 Алексеев Г.В., Каршева К., Резниченко Р., Шанин В.А. Совершенствование процесса выделения кератина путем гидролиза сырья в ультразвуковом поле // Ползуновский вестник. 2021. № 2. С. 182–187.
- 3 Кустова И.А., Макарова Н.В., Гудкова А.М. Получение экстракта из вторичного виноградного сырья // Химия растительного сырья. 2017. № 3. С. 175–184.
- 4 Dalbhagat S.G., Mishra H.N. Effects of extraction process conditions on system parameters; physicochemical properties and cooking characteristics of extruded fortified rice kernels // Journal of Cereal Science. 2019. V. 89. doi: 10.1016/j.jcs.2019.05.016.
- 5 Александровский С.А. Особенности экспериментальных исследований процесса твердофазной экстракции из растительного сырья // Вестник Казанского технологического университета. 2016. Т. 19. №. 2. С. 134–137.
- 6 Алексеев Г.В., Леу А.Г., Шанин В.А. Возможности прочностных оценок конструктивных элементов ультразвуковых экстракторов // Вестник ВГУТУ 2021. № 3(82). С. 26–33.
- 7 Мартовщук В.И., Лобанов А.А., Мартовщук Е.В. Механохимический метод активации технологического процесса рафинации растительных масел // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. 2020. № 2–3 (374–375). С. 23–26.
- 8 Sabater C., Sabater V., Olano A. et al. Ultrasound-assisted extraction of pectin from artichoke by-products. An artificial neural network approach to pectin characterization // Food Hydrocolloids. 2020. V. 98. P. 105238.

9 Тепляков Ю.А., Рудобашта С.П., Нечаев В.М., Климов А.М. Кинетический расчет процесса экстрагирования для непористых гранулированных материалов // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2009. Т. 15. № 2. С. 330–336.

10 Кузнецова Е.В., Макаров С.Ю. Оптимизация условий экстрагирования растительного сырья в технологии ликероводочных изделий // Евразийский Союз Ученых. 2019. № 3–5 (60). С. 44–48.

11 Sindermann E.C., Holbach A., de Haan A., Kockmann N. Single stage and countercurrent extraction of 5-hydroxymethylfurfural from aqueous phase systems // *Chemical Engineering Journal*. 2016. V. 283. P. 251-259. doi: 10.1016/j.cej.2015.07.029

12 Hewitson P., Sutherland I., Kostanyan A.E., Voshkin A.A. et al. Intermittent counter-current extraction—Equilibrium cell model, scaling and an improved bobbin design // *Journal of Chromatography A*. 2013. V. 1303. P. 18-27. doi: 10.1016/j.chroma.2013.06.023

13 Jaritsch D., Holbach A., Kockmann N. Counter-current extraction in microchannel flow: current status and perspectives // *Journal of Fluids Engineering*. 2014. V. 136. №. 9. doi: 10.1115/1.4026608

14 Zhang Q., Bian Y., Shi Y., Zheng S. et al. An economical and efficient technology for the extraction of resveratrol from peanut (*Arachis hypogaea*) sprouts by multi-stage countercurrent extraction // *Food chemistry*. 2015. V. 179. P. 15-25. doi: 10.1016/j.foodchem.2015.01.113

15 Yang X.F., Ren P., Yang Q., Geng J.S. et al. Strong periodic tendency of trivalent lanthanides coordinated with a phenanthroline-based ligand: cascade countercurrent extraction, spectroscopy, and crystallography // *Inorganic Chemistry*. 2021. V. 60. №. 13. P. 9745-9756. doi: 10.1021/acs.inorgchem.1c01035

16 Haghighi H.K., Moradkhani D., Salarirad M.M. Separation of zinc from manganese, magnesium, calcium and cadmium using batch countercurrent extraction simulation followed by scrubbing and stripping // *Hydrometallurgy*. 2015. V. 154. P. 9-16. doi: 10.1016/j.hydromet.2015.03.007

17 Holtman K.M., Offeman R.D., Franqui-Villanueva D., Bayati A.K. et al. Countercurrent extraction of soluble sugars from almond hulls and assessment of the bioenergy potential // *Journal of agricultural and food chemistry*. 2015. V. 63. №. 9. P. 2490-2498. doi: 10.1021/jf5048332

18 Hartland S. *Counter-current Extraction: An Introduction to the Design and Operation of Counter-current Extractors*. Elsevier, 2017.

19 Xiang W., Liang S., Zhou Z., Qin W. et al. Lithium recovery from salt lake brine by counter-current extraction using tributyl phosphate/FeCl₃ in methyl isobutyl ketone // *Hydrometallurgy*. 2017. V. 171. P. 27-32. doi: 10.1016/j.hydromet.2017.04.007

20 Injarean U., Pichestapong P., Kewsuwan P., Laohaphornchaiphan J. Batch simulation of multistage countercurrent extraction of uranium in yellow cake from monazite processing with 5% TBP/kerosene // *Energy Procedia*. 2014. V. 56. P. 129-134. doi: 10.1016/j.egypro.2014.07.140

References

1 Fabritskaya A.A., Kotlyarevskaya N.I., Viktorova E.P. Modern research in the field of intensification of the processes of extraction of biologically active substances from plant materials using enzymes. *New technologies*. 2021. vol. 17. no. 2. pp. 56–66. (in Russian).

2 Alekseev G.V., Karsheva K., Reznichenko R., Shanin V.A. Development of the process of keratin isolation by hydrolysis of raw materials in an ultrasonic field. *Polzunovskiy Vestnik*. 2021. no. 2. pp. 182–187. (in Russian).

3 Kustova I.A., Makarova N.V., Gudkova A.M. Obtaining an extract from secondary grape raw materials. *Chemistry of plant raw materials*. 2017. no. 3. pp. 175–184. (in Russian).

4 Dalbhat K.G., Mishra H.N. Influence of extraction process conditions on system parameters; physical and chemical properties and culinary characteristics of extruded enriched rice grains. *Journal of Cereal Science*. 2019. no. 89. doi: 10.1016/j.jcs.2019.05.016

5 Aleksandrovsky S.A. Features of experimental studies of the process of solid-phase extraction of vegetable raw materials. *Bulletin of the Kazan Technological University*. 2016. vol. 19. no. 2. pp. 134–137. (in Russian).

6 Alekseev G.V., Leu A.G., Shanin V.A. Possibilities of strength assessments of structural elements of ultrasonic extractors. *ESGUTU* 2021. no. 3(82). pp. 26–33. (in Russian).

7 Martovshchuk V.I., Lobanov A.A., Martovshchuk E.V. Mechanochemical method of activation of the technological process of refining vegetable oils. *Izvestiya of higher educational institutions. Food technology*. 2020. no. 2–3 (374–375). pp. 23–26. (in Russian).

8 Sabater K., Sabater V., Olano A. et al. Extraction of pectin from artichoke by-products using ultrasound. An artificial neural network approach to characterizing pectin. *Food Hydrocolloids*. 2020. vol. 98. pp. 105238.

9 Teplyakov Yu.A., Rudobashta S.P., Nechaev V.M., Klimov A.M. Kinetic calculation of the process of extraction of non-porous granular materials. *Bulletin of the Tambov State Technical University*. 2009. vol. 15. no. 2. pp. 330–336. (in Russian).

10 Kuznetsova E.V., Makarov S.Yu. Optimization of conditions for extracting plant products in the technology of alcoholic beverages. *Eurasian Union of Scientists*. 2019. no. 3–5 (60). pp. 44–48. (in Russian).

11 Sindermann E.C., Holbach A., de Haan A., Kockmann N. Single stage and countercurrent extraction of 5-hydroxymethylfurfural from aqueous phase systems. *Chemical Engineering Journal*. 2016. vol. 283. pp. 251-259. doi: 10.1016/j.cej.2015.07.029

12 Hewitson P., Sutherland I., Kostanyan A.E., Voshkin A.A. et al. Intermittent counter-current extraction—Equilibrium cell model, scaling and an improved bobbin design. *Journal of Chromatography A*. 2013. vol. 1303. pp. 18-27. doi: 10.1016/j.chroma.2013.06.023

13 Jaritsch D., Holbach A., Kockmann N. Counter-current extraction in microchannel flow: current status and perspectives. *Journal of Fluids Engineering*. 2014. vol. 136. no. 9. doi: 10.1115/1.4026608

14 Zhang Q., Bian Y., Shi Y., Zheng S. et al. An economical and efficient technology for the extraction of resveratrol from peanut (*Arachis hypogaea*) sprouts by multi-stage countercurrent extraction. *Food chemistry*. 2015. vol. 179. pp. 15-25. doi: 10.1016/j.foodchem.2015.01.113

15 Yang X.F., Ren P., Yang Q., Geng J.S. et al. Strong periodic tendency of trivalent lanthanides coordinated with a phenanthroline-based ligand: cascade countercurrent extraction, spectroscopy, and crystallography. *Inorganic Chemistry*. 2021. vol. 60. no. 13. pp. 9745-9756. doi: 10.1021/acs.inorgchem.1c01035

16 Haghighi H.K., Moradkhani D., Salarirad M.M. Separation of zinc from manganese, magnesium, calcium and cadmium using batch countercurrent extraction simulation followed by scrubbing and stripping. *Hydrometallurgy*. 2015. vol. 154. pp. 9-16. doi: 10.1016/j.hydromet.2015.03.007

17 Holtman K.M., Offeman R.D., Franqui-Villanueva D., Bayati A.K. et al. Countercurrent extraction of soluble sugars from almond hulls and assessment of the bioenergy potential. *Journal of agricultural and food chemistry*. 2015. vol. 63. no. 9. pp. 2490-2498. doi: 10.1021/jf5048332

18 Hartland S. *Counter-current Extraction: An Introduction to the Design and Operation of Counter-current Extractors*. Elsevier, 2017.

19 Xiang W., Liang S., Zhou Z., Qin W. et al. Lithium recovery from salt lake brine by counter-current extraction using tributyl phosphate/FeCl₃ in methyl isobutyl ketone. *Hydrometallurgy*. 2017. vol. 171. pp. 27-32. doi: 10.1016/j.hydromet.2017.04.007

20 Injarean U., Pichestapong P., Kewsuwan P., Laohaphornchaiphon J. Batch simulation of multistage countercurrent extraction of uranium in yellow cake from monazite processing with 5% TBP/kerosene. *Energy Procedia*. 2014. vol. 56. pp. 129-134. doi: 10.1016/j.egypro.2014.07.140

Сведения об авторах

Геннадий В. Алексеев д.т.н., профессор, кафедра высшей математики, Государственный институт экономики, финансов, права и технологий, Рошинская ул., 5, Гатчина, Ленинградская обл., 188300, Россия, gva2003@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-2867-108X>

Вячеслав А. Шанин аспирант, факультет биотехнологий, Национальный исследовательский университет ИТМО, Кронверкский пр., 49, Санкт-Петербург, 197101, Россия, shanin.vyacheslav@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-1257-2319>

Артём А. Бирченко аспирант, факультет биотехнологий, Национальный исследовательский университет ИТМО, Кронверкский пр., 49, Санкт-Петербург, 197101, Россия, topgear67@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-0124-8054>

Евгения В. Кравцова к.т.н., факультет биотехнологий, Национальный исследовательский университет ИТМО, Кронверкский пр., 49, Санкт-Петербург, 197101, Россия, evkravtcova@itmo.ru

<https://orcid.org/0000-0003-1393-3347>

Максим В. Гончаров к.т.н., кафедра технологический машин и оборудования, Филиал «Национальный исследовательский университет «МЭИ» в г. Смоленске, Энергетический проезд, дом 1, г. Смоленск, 214013, Россия, goncharovmaxv@ya.ru

<https://orcid.org/0000-0003-0859-167X>

Вклад авторов

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

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about authors

Gennady V. Alekseev Dr. Sci (Engin.), professor, higher mathematics department, State Institute of Economics, Finance, Law and Technology, Roshchinskaya st., 5, Gatchina, Leningrad region, 188300, Russia, gva2003@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-2867-108X>

Vyacheslav A. Shanin graduate student, biotechnology faculty, ITMO University, Kronverksky pr., 49, St. Petersburg, 197101, Russia, shanin.vyacheslav@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-1257-2319>

Artyom A. Birchenko graduate student, biotechnology faculty, ITMO University, Kronverksky pr., 49, St. Petersburg, 197101, Russia, topgear67@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-0124-8054>

Evgenia V. Kravtcova Cand. Sci. (Engin.), biotechnology faculty, ITMO University, Kronverksky pr., 49, St. Petersburg, 197101, Russia, evkravtcova@itmo.ru

<https://orcid.org/0000-0003-1393-3347>

Maxim V. Goncharov Cand. Sci. (Engin.), technological machines and equipment department, Branch of the National Research University MPEI in Smolensk, Energy proezd, house 1, Smolensk, 214013, Russia, goncharovmaxv@ya.ru

<https://orcid.org/0000-0003-0859-167X>

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.

Поступила 04/04/2022	После редакции 28/04/2022	Принята в печать 23/05/2022
Received 04/04/2022	Accepted in revised 28/04/2022	Accepted 23/05/2022