ХРАНЕНИЕ И ПЕРЕРАБОТКА СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ПРОДУКЦИИ / STORAGE AND PROCESSING OF AGRICULTURAL PRODUCTION

https://doi.org/10.30766/2072-9081.2025.26.4.816–826
УДК 664.3.033

Моделирование процесса экстрагирования масла из продуктов переработки облепихи

© 2025. Д. Ф. Зиатдинова, Р. Г. Сафин, Е. Н. Соловьева✉
ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет», г. Казань, Республика Татарстан, Российская Федерация

В работе представлены результаты переработки плодовой части облепихи, на первом этапе которой извлекали водорастворимые компоненты ягоды (сок), на втором – жирорастворимые компоненты (масло). Рассмотрены два последовательных способа извлечения масла из плодовой части облепихи: прессование и экстракция сырья. Прессованием получены маслá холодного отжима из мякоти и семян, отпрессованные пластины жома мякоти и семян. Проведено извлечение остаточного масла из отпрессованных пластин экстрагированием гексаном. В процессе экстрагирования получены кинетические зависимости концентрации облепихового масла в жоме мякоти и семян. По аналогии с методом регулярного режима для исследования тепловых процессов предложен метод определения коэффициента массопроводности, который апробирован математическим и физическим моделированием. Методом темпа регулярного режима массопереноса из кинетических зависимостей концентрации облепихового масла в жоме определены коэффициенты массопроводности: при экстрагировании гексаном отпрессованных пластин жома мякоти –1,09·10^{-8} м^2/с и жома семян – 5,65·10^{-9} м^2/с. Наибольшее значение коэффициента массопроводности получили в жоме мякоти облепихи, характеризующейся высокой пористостью. Результаты математического моделирования получены с использованием языковой среды программирования Python. Определены расчетные значения кинетических кривых концентрации облепихового масла в жоме. Решением дифференциальных уравнений тепломассопереноса при заданных граничных условиях построены динамические кривые. Статистическая обработка результатов моделирования с применением критерия Фишера показала адекватность математической модели процесса экстрагирования облепихового масла из продуктов переработки облепихи. Полученные данные могут быть использованы для последующего математического моделирования и оптимизации режимных параметров процесса экстракции плодовой части облепихи.

Ключевые слова: *коэффициент массопроводности, облепиховое масло, экстракция*

***Благодарность**:* работа выполнена без финансового обеспечения в рамках инициативной тематики. Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Зиатдинова Д. Ф., Сафин Р. Г., Соловьева Е. Н. Моделирование процесса экстрагирования масла из продуктов переработки облепихи. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2025;26(4):816–826.
DOI: https://doi.org/10.30766/2072-9081.2025.26.4.816-826

Поступила: 29.11.2024 Принята к публикации: 31.07.2025 Опубликована онлайн: 29.08.2025

Modeling of oil extraction process from sea buckthorn products

© 2025. Dilyara F. Ziatdinova, Rushan G. Safin, Elena N. Soloveva ✉
Kazan National Research Technological University, Kazan, Russian Federation

The paper presents the results of sea buckthorn fruit processing, at the first stage of which there have been extracted water-soluble components of the berry (juice), at the second stage – fat-soluble components (oil). Two successive methods of oil extraction from the fruit part of sea buckthorn are considered: pressing and extraction of raw materials. Cold-pressed oils from flesh and seeds and pressed plates of flesh and seed pulp were obtained by pressing. Extraction of residual oil from the pressed plates was carried out by extraction with hexane. In the process of extraction kinetic dependences of sea buckthorn oil concentration in flesh and seed pulp were obtained. By analogy with the method of regular mode for the study of thermal processes, a method of determining the mass-conductivity coefficient was proposed, which was tested by mathematical and physical modeling. The mass conductivity coefficients were determined from the kinetic dependences of sea buckthorn oil concentration in pulp by the method of regular mass transfer rate: at extraction of pressed pulp plates with hexane – 1.09·10^{-8} m^2/s and seed pulp – 5.65·10^{-9} m^2/s. The highest value of the mass conductivity coefficient is observed in the flesh pulp of sea

buckthorn, characterized by high porosity. The results of mathematical modeling were obtained using the Python programming language environment. The calculated values of kinetic curves of sea buckthorn oil concentration in the pulp were determined. By solving the differential equations of heat and mass transfer under the given boundary conditions, dynamic curves were constructed. Statistical processing of modelling results using Fisher's criterion testified the adequacy of the mathematical model of the process of sea buckthorn oil extraction from sea buckthorn products. The obtained data can be used for further mathematical modeling and optimization of regime parameters of the extraction process of sea buckthorn fruit part.

Keywords: *mass conductivity coefficient; sea buckthorn oil; extraction*

Acknowledgments: the work was done without financial support in the framework of the initiative topics.
The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

Conflict of interest: *the authors declared no conflict of interest.*

For Citation: Ziatdinova D. F., Safin R. G., Soloveva E. N. Modeling of oil extraction process from sea buckthorn products. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2025;26(4):816–826. (In Russ.).
DOI: https://doi.org/10.30766/2072-9081.2025.26.4.816-826

Received: 29.11.2024 Accepted for publication: 31.07.2025 Published online: 29.08.2025

Облепиха представляет особый интерес для научных исследований благодаря высокому содержанию ценных масел, витаминов и микроэлементов. Это обуславливает её широкое применение в производстве лекарственных средств, функциональных продуктов питания и косметики. В облепиховом масле, которое является наиболее ценным продуктом переработки облепихи, содержится токоферол (витамин Е), триацилглицерины с насыщенными и ненасыщенными жирными кислотами, среди последних преобладают мононенасыщенные (пальмитоолеиновая, олеиновая) кислоты [1, 2].

На первом этапе переработки облепихи проводят извлечение водорастворимых компонентов ягоды (сока), при этом в жоме остаются жирорастворимые компоненты, которые можно извлечь с помощью механического отжима и твердожидкостной экстракцией[1] [1, 2, 3].

Облепиховое масло получают несколькими технологическими способами: прессованием; диффузией; экстракцией. На практике, в основном, используют комбинацию из нескольких методов. В качестве сырья применяют свежие, замороженные, сухие плоды, семена, сухой жом с семенами, сухой жом без семян [4].

Получение облепихового масла прессованием позволяет получить натуральный продукт с физико-химическими и биохимическими характеристиками, свойственными композиции липидов и липидорастворимых веществ, содержащихся в плодовой мякоти и семенах облепихи.

Известен способ получения облепихового масла прессованием, где сок выделяют под вакуумом при температуре не более 70 °С до полного удаления влаги. Сухой жом подают в пресс, где под давлением 5–10 атм. из него выделяют масло, выход которого составляет 85 %, кислотное число не превышает 5 мг КОН [5].

Известен способ получения натурального масла из семян облепихи, предложенный Ю. М. Нижегородцевым [6]. Данный способ отличается тем, что в результате комплексной переработки облепихи из ее плодов извлекаются семена, которые затем промываются, высушиваются, измельчаются и подвергаются холодному прессованию. Полученное облепиховое масло очищается путем фильтрования и расфасовывается в желатиновые капсулы или флаконы. Выход масла составляет до 12 %.

В работе [7] рассмотрен диффузионный способ получения облепихового масла из сухого жома растительным маслом в диффузионных батареях в режиме противотока. Способ позволяет получать масло с концентрацией 90 %, близкой по своим константам и фармакологическим свойствам к натуральному облепиховому маслу.

В работе [8] предложен способ получения облепихового масла, осуществляемый диффузионным методом с использованием в качестве растворителя растительного масла. Сырье экстрагируют растительным маслом с последующим отделением жидкой фракции прессованием. Выход масла из верхнего слоя мякоти – 90 %.

Экстракционный метод с использованием низкокипящих неполярных растворителей, которые с помощью современной аппаратуры могут быть полностью удалены из продукта – единственный метод, гарантирующий полное извлечение масла из растительного сырья.

[1]Малахова Т. В. Комплексная переработка плодов облепихи. Научное творчество молодежи – лесному комплексу России: мат-лы VIII Всерос. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов и конкурса по программе «Умник». Екатеринбург: УГЛТУ, 2012. Ч. 2. С. 249–251.
URL: https://elar.usfeu.ru/bitstream/123456789/569/2/Malahova.pdf

В литературе [9] есть информация, что наличие в экстрагируемом материале измельченных семян негативно влияет на качественные показатели вырабатываемого масла. Вследствие достаточно активной ферментной системы семян, в частности липазы, увеличивается кислотное число получаемого продукта. Поэтому экстракционное масло рекомендуется получать из плодовой мякоти и семян раздельно.

В работе [10] предложена технология получения облепихового масла, основанная на раздельной экстракции компонентов плодов облепихи – мякоти и семян – экстракционным бензином. Полученные экстракты купажируются в соответствии с содержанием каротиноидов. Выход масла из мякоти – 1,55 %, из семян – 0,36 %.

Известен способ переработки облепихи с получением масла [11], который заключается в экстрагировании облепихового масла из жома малополярным растворителем в присутствии многофункциональных кинетических полимерных катионов в натриевой форме. Выход масла по данному способу – 20 %.

Процессы твердожидкостной экстракции целевых компонентов из растительного сырья играют важную роль в переработке сельскохозяйственных продуктов, пищевой и фармацевтической промышленности и применяются после извлечения масла холодного отжима. Это обуславливает проведение многочисленных научных исследований, посвященных кинетике процесса диффузии, выходу продуктов экстракции, аппаратурному оформлению процесса [12, 13, 14, 15].

Для расчета кинетики массообменных процессов в системах с твердой фазой (экстрагирование, сушка) необходимы данные по коэффициенту массопроводности, который является основным кинетическим параметром экстракции из растительного сырья и количественно представляет все физические и физико-химические процессы в твердой фазе. Его значение зависит от экстрагируемого материала, физических свойств, концентрации и температуры. Для установок по переработке растительного сырья требуются соответствующие конструкции, учитывающие физические характеристики сырья. Коэффициент массопроводности является важной характеристикой для прогнозирования процессов массообмена и необходим при проектировании массообменного оборудования. Изучением этого вопроса занимались С. П. Рудобашта [16], А. А. Атаманов [17], Н. А. Макаревич [18], Т. С. Камалиев [19] и т. д., в ходе их работ были определены коэффициенты массопроводности для разных видов растительного сырья при различных режимах. На данном этапе развития научных исследований не проработан вопрос расчета коэффициента массопроводности применительно к облепихе.

Цель работы – моделирование процесса комплексного извлечения облепихового масла из выжимок облепихи и определение коэффициента массопроводности.

Научная новизна – определение коэффициента массопроводности облепихового сырья при экстрагировании гексаном по аналогии с методом регулярного теплового режима для прогнозирования оптимальных режимных параметров работы экстракционных установок.

Материал и методы. В качестве объекта исследования для эксперимента использовали свежие ягоды облепихи сорта Великан.

Промытые плоды облепихи измельчали с сохранением целостности семян в колбе с лопастной мешалкой. Далее измельченную массу сепарировали на сок и плодовую мякоть путем фильтрации через отверстия диаметром 0,4÷0,6 мм. Отделенную плодовую мякоть промывали дистиллированной водой и отжимали с целью удаления оставшихся сахаров и сока. После процесса отжима плодовую мякоть сушили в конвективной сушилке кипящего слоя при температуре 90 °С в течение 30 минут, затем – при 60 °С до остаточной влажности 4 %. По мере высыхания компоненты плодовой мякоти теряют удельный вес, далее их пневмотранспортируют из конвективной сушилки отработанным теплоносителем в воздушный сепаратор, при этом происходит отделение жома мякоти от семян облепихи [20]. Отделенные семена и жом мякоти подвергали холодному прессованию на гидропрессе при давлении 700 атм. для выделения масла холодного отжима. В результате холодного прессования получают: масло и пластины отпрессованного сырья из семян и жома мякоти.

Остаточное масло из отпрессованных пластин жома мякоти и жома семян извлекали методом твердожидкостной экстракции при 70 °С. В качестве экстрагента использовали гексан.

Математическое описание нестационарного процесса экстракции масла из отпрессованных пластин орошением свежим экстра-

гентом можно записать дифференциальным уравнением Фика для бесконечной пластины[2]:

$$\frac{\partial C_w}{\partial \tau} = a_m \frac{\partial^2 C_w}{\partial x^2} \qquad (1)$$

при краевых условиях:

$$C_w(x, 0) = C_{w\text{н}}, \qquad (2)$$

$$C_w(0, \tau) = 0, \qquad (3)$$

где C_w – концентрация целевого компонента в отпрессованных пластинах, %; a_m – коэффициент массопроводности сырья, являющийся коэффициентом внутренней диффузии, м^2/с; x – текущая координата частицы, м; τ – текущее время, с.

Начальную концентрацию $C_{w\text{н}}$ определяли в результате исчерпывающей экстракции с помощью аппарата Сокслета.

Кинетические зависимости средней концентрации облепихового масла в экстрагируемом сырье находят косвенным путем – определением масла, переходящего из растительного сырья в экстракт. Поэтому вначале строится кинетическая зависимость концентрации масла в экстракте путем периодического отбора проб и удаления из этих проб экстрагента выпариванием и сушкой.

Из кинетической зависимости средней концентрации масла в растительном сырье методом регулярного режима [16, 22, 23, 24], по аналогии с методом регулярного теплового режима, можно рассчитать коэффициент массопроводности по выражению:

$$a_m = Km. \qquad (4)$$

Коэффициент формы тела K для одномерной частицы пластины определяли по соотношению:

$$K = \frac{a^2}{\pi^2}, \quad \text{где } a \text{ – размер частицы, м.}$$

Для расчета темпа регулярного режима массопереноса m пластины сырья погружали в растворитель, воздействуя на них заданной температурой, и определяли изменение с течением времени массы растворителя. По результатам эксперимента строили зависимость натурального логарифма относительной избыточной массы (разности максимальной массы растворителя после процесса экстракции и массы в текущий момент времени, отчитываемой от начала погружения сырья в экстрагент) от времени. На полученной зависимости выделяли стадию регулярного режима массопереноса, характеризуемую тем, что опытные точки на графике группируются около прямой линии. Тангенс угла наклона этой прямой к оси абсцисс на графике численно равен значению темпа регулярного режима массопереноса. Далее по формуле (4) рассчитывали коэффициент массопроводности.

Решением дифференциального уравнения (1) совместно с краевыми условиями (2) и (3) в языковой среде программирования Python определяли динамические кривые локальной концентрации масла по сечению частицы растительного сырья:

$$C_w = f(x\tau). \qquad (6)$$

Интегрированием зависимостей локальных концентраций масла по сечению в разные моменты времени по соотношению (7) можно получить расчетную кинетическую зависимость средней концентрации облепихового масла в растительном сырье:

$$\overline{C}_w(\tau) = \frac{1}{a}\int_0^a C_w(\tau)dx, \qquad (7)$$

$$\overline{C}_w = f(\tau). \qquad (8)$$

Для исследования процесса экстракции и проверки адекватности математической модели была разработана экспериментальная установка, работающая в вакуумно-импульсивном режиме, схема и внешний вид которой представлены на рисунке 1.

Для извлечения остаточного масла из сырья отпрессованные пластины жома мякоти и жома семян облепихи толщиной 1 мм загружают в камеру 1, экстрагент заливают в колбу 2 и буферную емкость – гидрозатвор 3. Температуру экстрагента поддерживают регулятором расхода хладагента 4, получающего информацию от датчика температуры 5. Перед проведением эксперимента из установки с помощью вакуумного насоса 6 удаляют воздух и закрывают клапан 7, давление в системе измеряют вакуумметром 8. Экстракцию ведут 40–80 минут при открытом вентиле 9 и закрытом вентиле 10. В процессе экстракции по мере заполнения буферной емкости 3 открывают вентиль 11 и экстракт частично переливают в колбу 2.

[2]Ак-сельруд Г. А., Лысянский В. М. Экстрагирование: Система твердое тело – жидкость. Л.: Химия: Ленинградское отд-ние, 1974. 19 с. URL: https://fileskachat.com/view/101323_74e370797a3c3e4f26f47383f2e1ec01.html

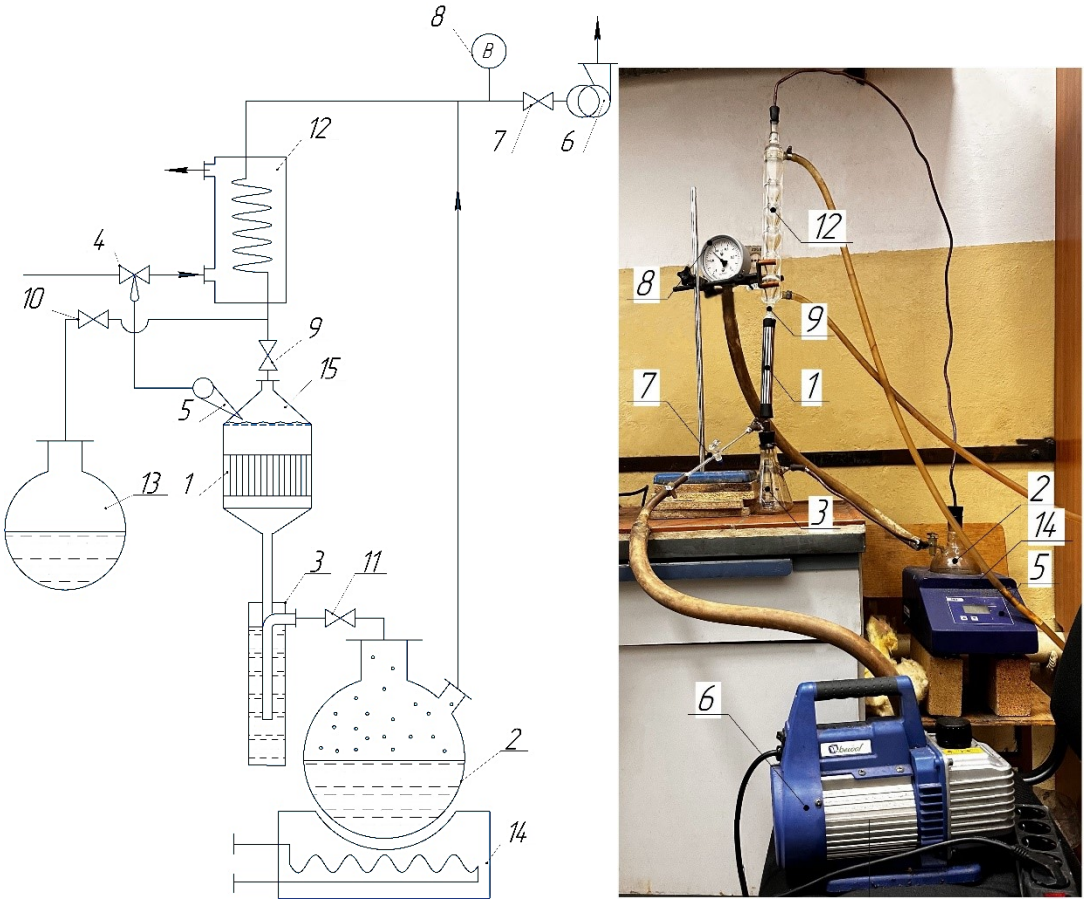


Рис. 1. **Схема экспериментальной установки: 1 – камера с растительным сырьем; 2 – колба с экстрактом; 3 – гидрозатвор; 4 – регулятор расхода хладагента; 5 – датчик температуры; 6 – вакуумный насос; 7 – клапан; 8 – вакуумметр; 9–11 – вентили; 12 – конденсатор; 13 – сборник экстрагента; 14 – колбонагреватель; 15 – распределитель экстрагента по сечению /**

Fig. 1. **Scheme of the experimental installation: 1 – chamber with raw material; 2 – flask with extract; 3 – hydraulic seal; 4 – refrigerant flow regulator; 5 – temperature sensor; 6 – vacuum pump; 7 – valve; 8 – vacuum gauge; 9-11 – valves; 12 – condenser; 13 – extractant collector; 14 – flask heater; 15 – extractant distributor**

После процесса экстракции для выделения масла из экстракта проводили вакуумное выпаривание гексана и сушку облепихового масла путем открытия вентиля 9 и закрытия вентиля 8. Выпаривание ведут при остаточном давлении 5 кПа в течение 60 минут. Полученное экстракционное масло взвешивают. Все измерения проводили с помощью высокоточных аналитических весов CY-64. Приведенные экспериментальные данные являются результатом обработки трех параллельных опытов.

Сопоставление расчетных в соответствии с выражением (8) и экспериментальных кинетических зависимостей средней концентрации масла в растительном сырье, а также сопоставление расчетного критерия Фишера с табличным значением при доверительной вероятности 95 % позволяет сделать вывод об адекватности математической модели.

Результаты и их обсуждение. В результате сепарации плодов облепихи на компоненты, в соответствии с приведенной методикой, из 1000 г плодов облепихи по результатам трех параллельных опытов получены: сок – 654,90 г; диффузионный сок – 297,03 г; высушенная плодовая мякоть – высушенный жом мякоти –21,44 г; высушенные семена – 26,63 г. Исходное содержание масла в пластинах, определенное в аппарате Сокслета, соответствует 21,74 % – в мякоти, 5,12 % – в жоме семян.

В результате холодного прессования жома мякоти и семян получены масла холодного отжима, средние арифметические значения результатов трех измерений приведены в таблице 1.

Анализ данных таблицы 1 показывает, что выход масла из семян облепихи больше выхода масла из жома мякоти.

Таблица 1 – **Результаты холодного прессования жома мякоти и семян облепихи /**
Table 1 – **Results of cold pressing of flesh and seed pulp**

Переработка растительного сырья / Processing of vegetable raw materials	*Исходная масса, г / Initial weight, g*	*Масса масла холодного отжима, г (%) / Weight of cold pressed oil, g (%)*	*Масса отпрессованных пластин, г / Weight of pressed plates, g*
Жом мякоти / Flesh pulp	21,44	0,62 (2,88 %)	20,82
Семена / Seeds	26,63	2,03 (7,61 %)	24,60

На рисунке 2 приведены кинетические зависимости концентрации (C_D) облепихового масла в гексане при экстрагировании отпрессованных пластин жома мякоти и жома семян при температуре экстрагента, равной 70 °С.

Дисперсионный анализ кривой показывает, что через 50 минут экстрагирования отпрессованных пластин жома мякоти концентрация облепихового масла в экстракте во времени становится незначительной. При экстрагировании отпрессованных пластин жома семян неизменность концентрации облепихового масла в экстракте отмечена через 70 минут.

Результаты исследований по содержанию масла в жоме мякоти и семенах даны в таблице 2. Анализ таблицы 2 показывает относительно небольшой выход масла холодного отжима из жома мякоти 2,88 % по сравнению с выходом масла из семян 7,61 %. Это связано с нахождением масла в жоме мякоти, в основном в межклеточном пространстве, и сложностью его удаления механическим отжимом.

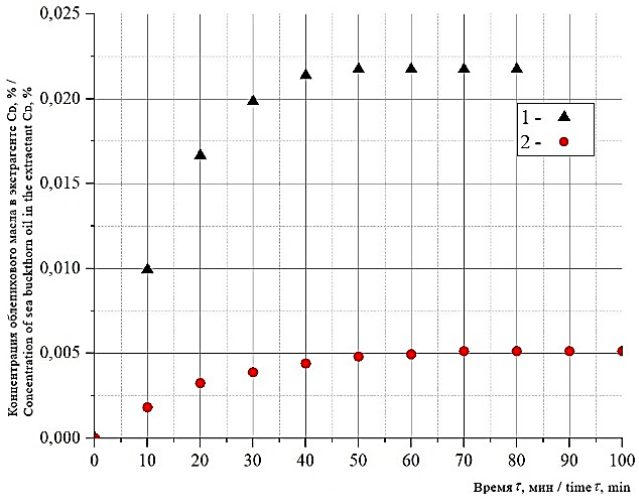
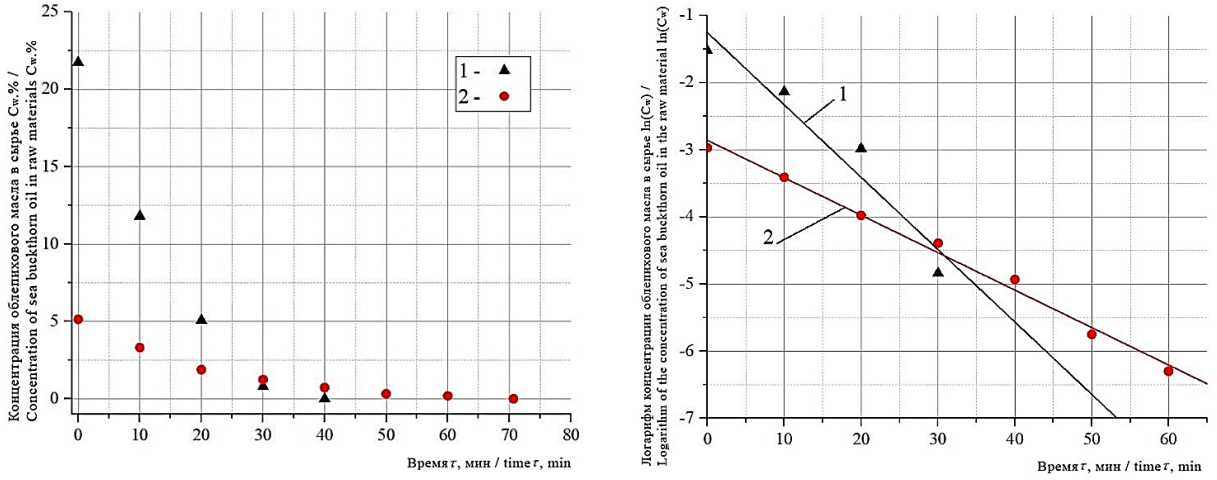


Рис. 2. **Кинетическая зависимость концентрации (C_D) облепихового масла в экстрагенте при экстрагировании отпрессованных пластин жома: 1 – мякоти; 2 – семян /**
Fig. 2. **Kinetic dependence of sea buckthorn oil concentration (C_D) in the extractant during extraction of pressed plates of pulp: 1 – flesh; 2 – seeds**

Таблица 2 – **Начальная концентрация облепихового масла в сырье, % /**
Table 2 – **Initial concentration of sea buckthorn oil in the raw material, %**

Сырье / Raw materials	*Масло холодного отжима / Cold-pressed oil*	*Масло экстракционное / Extraction oil*	*Исходная концентрация облепихового масла $C_{wн}$ / Initial concentration of sea buckthorn oil*
Мякоть / Flesh	2,88 (0,62 г)	21,74 (4,67 г)	24,62 (5,29 г)
Семена / Seeds	7,61 (2,03 г)	5,12 (1,36 г)	12,73 (3,39 г)
Всего (относительно массы плодов) / Total (relative to fruit weight)	0,265 (2,65 г)	0,603 (6,03 г)	0,868 (8,68 г)

На рисунке 3 представлены кинетические зависимости концентрации облепихового масла в декартовой и логарифмической системах координат в процессе экстракции облепихового масла из отпрессованных пластин жома мякоти и жома семян, полученные обработкой экспериментальных данных трех параллельных измерений.



а / a ***б / b***

Рис. 3. **Кинетические зависимости концентрации облепихового масла: *а* – в декартовой системе координат; *б* – логарифм концентрации; 1 – в жоме мякоти; 2 – в жоме семян /**

Fig. 3. **Kinetic dependences of sea buckthorn oil concentration in Cartesian and logarithmic coordinate systems: *a* – in Cartesian coordinate system; *b* – logarithm of concentration; 1 – in flesh pulp; 2 – in seed pulp**

Коэффициент формы исследуемых частиц, рассчитанный по формуле (5), составил $K = 1 \cdot 10^{-7}$ м^2, темп регулярного режима m определяли как тангенс угла наклона кинетической зависимости натурального логарифма концентрации облепихового масла: для мякоти – 0,10779 $\frac{1}{с}$, для семян – 0,05578 $\frac{1}{с}$.

Коэффициента массопроводности a_m, рассчитанный по формуле (4), составил:

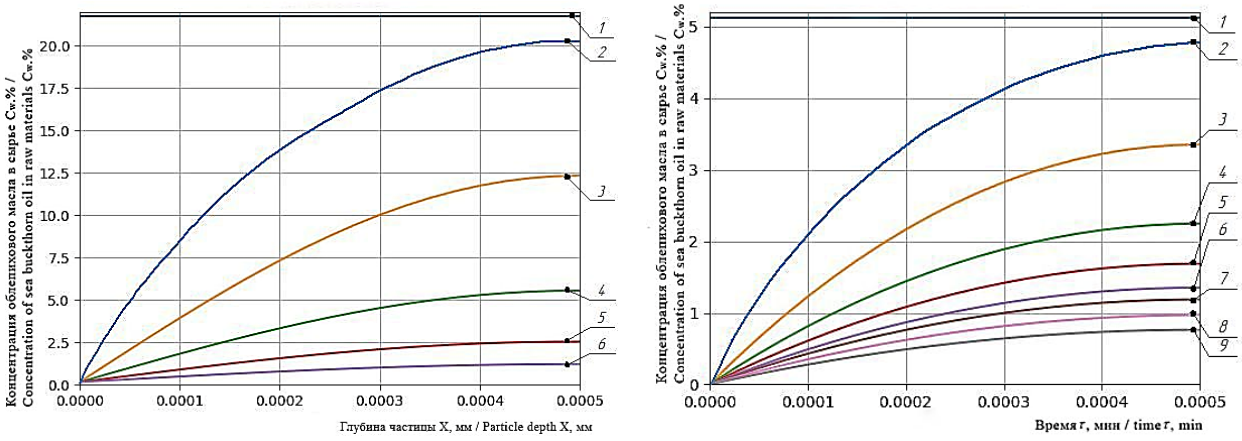
– при экстрагировании отпрессованных пластин жома мякоти:

$$a_m = 1{,}09 \cdot 1^{-8},\ м^2/с; \quad (8)$$

– при экстрагировании отпрессованных пластин жома семян:

$$a_m = 5{,}65 \cdot 10^{-9},\ м^2/с. \quad (9)$$

Решением дифференциального уравнения (1) при граничных условиях (2), (3) и параметрах идентификации (8), (9) построены динамические кривые изменения локальных концентраций экстрактивных веществ по сечению пластины, толщиной 1 мм из жома мякоти и семян (рис. 4).



а / a ***б / b***

Рис. 4. **Расчетные динамические кривые концентрации облепихового масла (C_w) по сечению пластины жома: *а* – мякоти; *б* – семян; 1 – $\tau = 0$ мин; 2 – $\tau = 1$ мин; 3 – $\tau = 10$ мин; 4 – $\tau = 20$ мин; 5 – $\tau = 30$ мин; 6 – $\tau = 40$ мин; 7 – $\tau = 50$ мин; 8 – $\tau = 60$ мин; 9 – $\tau = 70$ мин /**

Fig. 4. **Calculated dynamic curves of sea buckthorn oil concentration (C_w) in the section of the pulp plate: *a* – flesh; *b* – seeds; 1 – $\tau = 0$ min; 2 – $\tau = 1$ min; 3 – $\tau = 10$ min; 4 – $\tau = 20$ min; 5 – $\tau = 30$ min; 6 – $\tau = 40$ min; 7 – $\tau = 50$ min; 8 – $\tau = 60$ min; 9 – $\tau = 70$ min**

Для проверки адекватности математического описания процесса экстракции реальной физической картине интегрированием динамических кривых по соотношению (7) получены расчетные кинетические зависимости средней концентрации. На рисунке 5 сопоставлены результаты экспериментальных данных средней концентрации облепихового масла в мякоти и семенах (рис. 3) с расчетными значениями средней концентрации. Сплошными линиями показаны расчетные данные по соотношению (8), точками – экспериментальные данные.

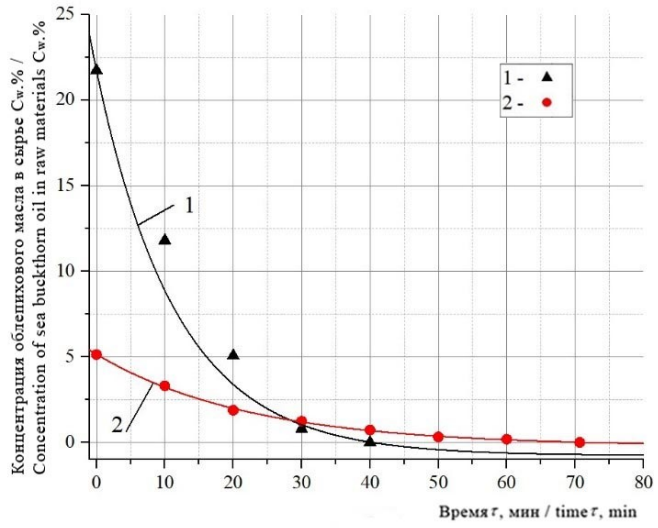


Рис. 5. **Расчетные (сплошные линии) и экспериментальные (точки) кинетические кривые концентрации облепихового масла (C_w) в жоме: 1 – мякоти, 2 – семян /**

Fig. 5. **Calculated (solid lines) and experimental (points) kinetic curves of sea buckthorn oil concentration (C_w) in the pulp: 1 – flesh, 2 – seeds**

Отклонение расчетных данных от экспериментальных не превышает 15 %. Статистическая обработка результатов исследований с применением критерия Фишера показала адекватность математической модели процесса экстрагирования облепихового масла из отпрессованных пластин жома мякоти ($F_{расч}$ = 2,1; $F_{табл}$ = 4,07) и семян ($F_{расч}$ = 2,6; $F_{табл}$ = 4,6) орошением свежим гексаном и возможности ее применения для расчетов перколяционных экстракторов.

Заключение. В результате сепарации плодов облепихи получены: концентрированный сок – 65,49 %; диффузионный сок – 29,70 %; масло холодного отжима – 0,265 %; масло экстракционное – 0,603 %. Выход масла холодного отжима относительно массы жома мякоти и массы семян соответственно 2,88 и 7,61 %. Относительно небольшой выход масла холодного отжима из жома мякоти по сравнению с выходом масла из семян связан с нахождением масла в жоме мякоти, в основном, в межклеточном пространстве и сложностью его удаления механическим отжимом. Определено количество остаточного масла в отпрессованных пластинах относительно массы жома мякоти и массы семян соответственно 21,74 и 5,12 %.

По аналогии с известным методом [16, 21, 22, 23] предложен метод определения коэффициента массопроводности, который апробирован математическим и физическим моделированием.

Методом темпа регулярного режима массопереноса из кинетических зависимостей концентрации облепихового масла в жоме определены коэффициенты массопроводности: при экстрагировании гексаном отпрессованных пластин жома мякоти – $\alpha_m = 1{,}09 \cdot 10^{-8}$ м^2/с и жома семян – $\alpha_m = 5{,}65 \cdot 10^{-9}$ м^2/с.

Математическим моделированием процесса экстракции растительного сырья орошением свежим экстрагентом (гексаном) построены динамические и кинетические кривые удаления облепихового масла из отпрессованных пластин из жома мякоти и семян, полученного после удаления масла холодного отжима.

Результаты исследований позволят выработать технические решения, связанные с управлением технологическим процессом и прогнозированием оптимальных режимных параметров работы экстракционных установок.

Список литературы

1. Касьянов Г. И., Мустафаева К. К., Редько М. Г. Совершенствование технологии комплексной переработки плодов облепихи. Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. 2014;(1):77–79. Режим доступа: https://elibrary.ru/item.asp?id=21303228 EDN: RYEQNF

2. Мезенова О. Я., Мерзель Й. Т., Воронцов С. А., Воронцов П. А. Оценка биопотенциала дикорастущей облепихи и перспектив ее комплексного использования. Вестник Международной академии холода. 2020;(3):44–51. DOI: https://doi.org/10.17586/1606-4313-2020-19-3-44-51 EDN: LGSSZQ

3. Семин А. Н., Евтушенко Н. С., Карпухин М. Ю., Кирсанов Ю. А., Зырянов С. Б. Способ переработки ягод облепихи: пат. № 2262864 Российская Федерация. № 2003114278/13: заявл. 14.05.2003; опубл. 27.10.2005. Бюл. 30. 8 с. Режим доступа: https://www1.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet

4. Vilas-Franquesa A., Juan B., Saldo J. Targeted analysis of sea buckthorn oil extracted by accelerated solvent extraction technique using green and conventional solvents. LWT. 2022;164:113643.
URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0023643822005783

5. Мехтиев Н. Х., Азизов Ф. Ш., Саламов А. А. Способ получения масла и сока из ягод облепихи: авт. св-во №914619 Российская Федерация. №2851193/28-13: заявл. 25.02.1980; опубл. 25.03.1982. Бюл. № 11. Режим доступа: https://www1.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet

6. Нижегородцев Ю. М. Облепиховое масло: пат. № 2093174 Российская Федерация. № 96108335/14: заявл. 07.05.1996: опубл. 20.10.1997. 7 с.
Режим доступа: https://patents.s3.yandex.net/RU2093174C1_19971020.pdf

7. Матафонов И. И. Облепиха: (Влияние на организм животного). Новосибирск: Наука: Сиб. отд-ние, 1983. 165 с. Режим доступа: https://search.rsl.ru/ru/record/01001151566?ysclid=m4l1a5wd1w369977954

8. Терещук Л. В., Павлов С. С. Способ производства облепихового масла: пат. № 2176268 Российская Федерация. № 99109366/13: заявл. 29.04.1999: опубл. 27.11.2001. Бюл. №33. 6 с.
Режим доступа: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_37878937_40037667.pdf

9. Терещук Л. В., Котик О. А., Королькова Н. В., Гладнева А. А. Об изучении жирнокислотного состава облепихи. Вестник РАСХН. 2007;(4):94–95.

10. Михеев С. Г., Михеев А. Г. Способ получения масла и сока из ягод облепихи: пат. № 2144061 Российская Федерация. № 98110045/13: заявл. 27.05.1998; опубл. 10.01.2000. Бюл. №1. 6 с.
Режим доступа: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_37845943_36493203.pdf

11. Светлов А. К., Виноградова Л. А., Сеит-Аблаева С. К, Цехина Н. Н., Орехова С. В., Пирогова Н. А., Хасьянова Н. Г. Способ получения облепихового масла из жома: пат. № 2021996 Российская Федерация. № 4933534/13: заявл. 29.03.1991; опубл. 30.10.1994.
Режим доступа: https://rusneb.ru/catalog/000224_000128_0002021996_19941030_C1_RU/?ysclid=m4l3ey6rmf939468894

12. Сафина А. В., Ахметханова Е. Н., Сафин Р. Р., Исмаилов Л. Ю., Байгильдеева Е. И. Программное моделирование процесса экстракции ценных компонентов из растительного сырья. Деревообрабатывающая промышленность. 2022;(3):42–50.

13. Сафин Р. Г., Ахметханова Е. Н., Арсланова Г. Р., Сафина А. В., Зиатдинова Д. Ф., Валеев К. В. Обзор существующих способов получения ценных компонентов из облепихи крушиновидной и разработка комплексной схемы ее переработки. Деревообрабатывающая промышленность. 2022;(2):70–82.

14. Сафин Р. Г., Ахметханова Е. Н., Сафина А. В., Зиатдинова Д. Ф., Тимербаева А. Р., Валеев К. В. Обзор исследований по производству облепихового сока. Системы. Методы. Технологии. 2022;(3(55)):116–122.
DOI: https://doi.org/10.18324/2077-5415-2022-3-116-122 EDN: JWSVVJ

15. Сафин Р. Г., Соловьева Е. Н. Комплексная переработка облепихи. Казань: ООО «Редакционно-издательский центр «Школа», 2023. 87 с.

16. Тепляков Ю. А., Рудобашта С. П., Нечаев В. М., Климов А. М. Расчет кинетики процессов экстрагирования из твердых материалов с различной структурой. Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2009;15(3):553–560. Режим доступа: http://vestnik.tstu.ru/rus/t_15/pdf/15_3_011.pdf

17. Атаманов А. А., Фролов И. А. Исследование различных вариантов извлечения биологически активных веществ из плодов *Sorbus Aucuparia*. Решетневские чтения: мат-лы XXIV Международ. научн.-практ. конф., посвящ. памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М. Ф. Решетнева: в 2 частях, Красноярск, 10–13 ноября 2020 года. Т. Часть 2. Красноярск: ФГБОУ ВО Сибирский ГУ науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева, 2020. С. 85–86. Режим доступа: https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=rscuch
EDN: RSCUCH

18. Макаревич Н. А., Богданович Н. И., Третьяков С. И., Коптелова Е. Н., Кутакова Н. А. Кинетическая модель извлечения экстрактивных веществ из растительного сырья. Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия химических наук. 2014;(2):98–107.
Режим доступа: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23685799 EDN: TYIFQR

19. Камалиев Т. С., Елизаров Д. В., Елизаров В. В. Кинетика массопереноса в пограничном слое на внутренней поверхности капли в процессе жидкостной экстракции. Вестник Казанского технологического университета. 2013;16(12):182–186. Режим доступа: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=19141310 EDN: QCWPMH

20. Сафин Р. Г., Ахметханова Е. Н., Родионов А. С., Зиатдинова Д. Ф., Сафина А. В., Хайруллин И. Ф. Способ отделения семян ягод от мякоти: пат. № 2797550 Российская Федерация. № 2022112081: заявл. 05.05.2022; опубл. 07.06.2023. Бюл. № 16. 9 с. Режим доступа: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54055375

21. Ковальногов В. Н., Карпухина Т. В., Федоров Р. В., Корнильев М. Г., Золотов А. Н. Способ определения коэффициента диффузии жидкости в капиллярно-пористом теле при воздействии ультразвуком: пат. № 2649082 Российская Федерация. № 2016150288: заявл. 20.12.2016; опубл. 29.03.2018. Бюл. № 10. 5 с. Режим доступа: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_38150526_44002358.PDF

22. 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;15(2):330–336. Режим доступа: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=12228478 EDN: KHPMQT

23. Рудобашта С. П. Массопроводность при сушке строительных материалов. Умные композиты в строительстве. 2021;2(2):16–25. Режим доступа: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46423345 EDN: IJYYPR

Reference

1. Kasyanov G. I., Mustafaeva K. K., Redko M. G. Improvement of complex processing technology of sea-buckthorn fruits. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Pishchevaya tekhnologiya* = Izvestiya vuzov. Food Technology. 2014;(1):77–79. (In Russ.). URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=21303228

2. Mezenova O. Ya., Mörzel Y. T., Vorontsov S. A., Vorontsov P. A. Assessment of the biopotential of wild buckthorn and prospects of its integrated use. *Vestnik Mezhdunarodnoy akademii kholoda* = Journal International Academy of Refrigeration. 2020;(3):44–51. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.17586/1606-4313-2020-19-3-44-51

3. Semin A. N., Evtushenko N. S., Karpukhin M. Yu., Kirsanov Yu. A., Zyryanov S. B. Sea buckthorn berry processing method: Patent RF, no. 2262864 2005. URL: https://www1.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet

4. Vilas-Franquesa A., Juan B., Saldo J. Targeted analysis of sea buckthorn oil extracted by accelerated solvent extraction technique using green and conventional solvents. LWT. 2022;164:113643.
URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0023643822005783

5. Mekhtiev N. Kh., Azizov F. Sh., Salamov A. A. The method of obtaining oil and juice from sea buckthorn berries: Patent RF, no.914619. 1982. URL: https://www1.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet

6. Nizhegorodtsev Yu. M. Sea buckthorn oil: Patent RF, no. 2093174, 1997.
URL: https://patents.s3.yandex.net/RU2093174C1_19971020.pdf

7. Matafonov I. I. Sea buckthorn: (Effect on the animal's body). Novosibirsk: *Nauka: Sib. otd-nie*, 1983. 165 p.
URL: https://search.rsl.ru/ru/record/01001151566?ysclid=m4l1a5wd1w369977954

8. Tereshchuk L. V., Pavlov S. S. Sea buckthorn oil production method: Patent RF, no. 2176268. 2001.
URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_37878937_40037667.pdf

9. Tereshchuk L. V., Kotik O. A., Korol'kova N. V., Gladneva A. A. On the study of fat acid composition in sea buckthorn. *Vestnik RASKhN*. 2007;(4):94–95. (In Russ.).

10. Mikheev S. G., Mikheev A. G. The method of obtaining oil and juice from sea buckthorn berries: Patent RF, no. 2144061, 2000. URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_37845943_36493203.pdf

11. Svetlov A. K., Vinogradova L. A., Seit-Ablaeva S. K, Tsekhina N. N., Orekhova S. V., Pirogova N. A., Khasyanova N. G. Method for producing sea buckthorn oil from pulp: Patent RF, no. 2021996. 1994.
URL: https://rusneb.ru/catalog/000224_000128_0002021996_19941030_C1_RU/?ysclid=m4l3ey6rmf939468894

12. Safina A. V., Akhmetkhanova E. N., Safin R. R., Ismailov L. Yu., Baygildeeva E. I. Software modeling of the process of extraction of valuable components from plant raw materials. *Derevoobrabatyvayushchaya promyshlennost'* = Woodworking industry. 2022;(3):42–50. (In Russ.).

13. Safin R. G., Akhmetkhanova E. N., Arslanova G. R., Safina A. V., Ziatdinova D. F., Valeev K. V. Review of existing methods for obtaining valuable components from sea buckthorn and the development of a comprehensive scheme for its processing. *Derevoobrabatyvayushchaya promyshlennost'* = Woodworking industry. 2022;(2):70–82. (In Russ.).

14. Safin R. G., Akhmetkhanova E. N., Safina A. V., Ziatdinova D. F., Timerbaeva A. R., Valeev K. V. Overview of research on sea buckthorn juice production. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* = Systems. Methods. Technologies. 2022;(3(55)):116–122. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.18324/2077-5415-2022-3-116-122

15. Safin R. G., Solovyeva E. N. Complex processing of sea buckthorn. Kazan: *OOO «Redaktsionno-izdatel'skiy tsentr «Shkola»*, 2023. 87 p.

16. Teplyakov Yu. A., Rudobashta S. P., Nechaev V. M., Klimov A. M. Calculation of extraction kinetics of solid materials with different structure. *Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Transactions of the TGTU. 2009;15(3):553–560. (In Russ.). URL: http://vestnik.tstu.ru/rus/t_15/pdf/15_3_011.pdf

17. Atamanov A. A., Frolov I. A.Iinvestigation of various options for extracting biologically active substances from *Sorbus Aucuparia* fruits. |Reshetnev Readings: Proceedings of the XXIV International Scientific and Practical Conf., dedicated to the memory of the General Designer of Rocket and Space Systems, Academician M. F. Reshetnev: in 2 parts, Krasnoyarsk, November 10–13, 2020. Vol. Part 2. Krasnoyarsk: *FGBOU VO Sibirskiy GU nauki i tekhnologiy imeni akademika M. F. Reshetneva*, 2020. pp. 85–86. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=rscuch

18. Makarevich N. A., Bogdanovich N. I., Tretiakov S. I., Koptelova E. N., Kutakova N. A. Kinetic model for extraction of extractive substances from vegetable raw materials. *Izvestiya Natsional'noy akademii nauk Belarusi. Seriya khimicheskikh nauk* = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus, Chemical Series. 2014;(2):98–107. (In Belarus). URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23685799

19. Kamaliev T. S., Elizarov D. V., Elizarov V. V. Kinetics of mass transfer in the boundary location on the inner surface of droplets during liquid extraction. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*. 2013;16(12):182–186. (In Russ.). URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=19141310

20. Safin R. G., Akhmetkhanova E. N., Rodionov A. S., Ziatdinova D. F., Safina A. V., Khayrullin I. F. The method of separating berry seeds from the pulp: Patent RF, no. 2797550. 2023. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54055375

21. Kovalnogov V. N., Karpukhina T. V., Fedorov R. V., Kornylev M. G., Zolotov A. N. A method for determining the diffusion coefficient of a liquid in a capillary-porous body when exposed to ultrasound: Patent RF, no. 2649082. 2018. URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_38150526_44002358.PDF

22. Teplyakov Yu. A., Rudobashta S. P., Nechaev V. M., Klimov A. M. Kinetic calculation of extraction process for porosity-free granular materials. *Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Transactions of the TGTU. 2009;15(2):330–336. (In Russ.). URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=12228478

23. Rudobashta S. P. Mass conductivity during drying of building materials. *Umnye kompozity v stroitel'stve* = Smart composite in construction. 2021;2(2):16–25. (In Russ.). URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46423345

Сведения об авторах

Зиатдинова Диляра Фариловна, доктор техн. наук, профессор кафедры «Переработка древесных материалов», ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет», ул. Карла Маркса, д. 68, г. Казань, Республика Татарстан, Российская Федерация, 420015, e-mail: office@kstu.ru,
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2801-4642

Сафин Рушан Гареевич, доктор техн. наук, профессор, зав. кафедрой «Переработка древесных материалов», ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет», ул. Карла Маркса, 68, г. Казань, Республика Татарстан, Российская Федерация, 420015, e-mail: office@kstu.ru,
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5790-4532

✉ **Соловьева Елена Ниязовна**, ассистент кафедры «Переработка древесных материалов», ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет», ул. Карла Маркса, 68, г. Казань, Республика Татарстан, Российская Федерация, 420015, e-mail: office@kstu.ru,
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4794-9796, e-mail: soloveva_elenaa@mail.ru

Information about the authors

Dilyara F. Ziatdinova, PhD in Engineering, professor at the Department of Wood Materials, Kazan National Research Technological University, st. Karl Marx, 68, Kazan, Republic of Tatarstan, Russian Federation, 420015, e-mail: office@kstu.ru, **ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2801-4642**

Rushan G. Safin, PhD in Engineering, professor, Head of the Department of Wood Materials, Kazan National Research Technological University, st. Karl Marx, 68, Kazan, Republic of Tatarstan, Russian Federation, 420015, e-mail: office@kstu.ru, **ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5790-4532**

✉ **Elena N. Soloveva**, teaching assistant, the Department of Wood Materials, Kazan National Research Technological University, st. Karl Marx, 68, Kazan, Republic of Tatarstan, Russian Federation, 420015, e-mail: office@kstu.ru, **ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4794-9796,** e-mail: soloveva_elenaa@mail.ru

✉ – Для контактов / Corresponding author