

На правах рукописи



Соловьева Елена Ниязовна

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ КОМПЛЕКСНОЙ ПЕРЕРАБОТКИ
ОБЛЕПИХИ**

4.3.1. Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Казань – 2026

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Казанский национальный исследовательский технологический университет».

Научный руководитель:	доктор технических наук, профессор Зиятдинова Дилляра Фарилловна
Официальные оппоненты:	Рощин Виктор Иванович, доктор химических наук, старший научный сотрудник, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С. М. Кирова», профессор кафедры технологии химической переработки биомассы дерева; Базарнова Наталья Григорьевна, доктор химических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Алтайский государственный университет», профессор кафедры органической химии.
Ведущая организация:	Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова».

Защита диссертации состоится «17» июня 2026 года в 10 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 24.2.312.10, созданного на базе ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет», по адресу: 420015, г. Казань, ул. К. Маркса, д. 68, А-406.

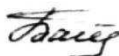
Отзывы на автореферат в двух экземплярах с подписями, заверенными печатью, просим направлять по адресу: 420015, г. Казань, ул. К. Маркса, д. 68, зал заседаний Ученого совета А-330.

В отзыве просим указывать фамилию, имя, отчество, почтовый адрес, телефон и адрес электронной почты (при наличии), наименование организации, структурное подразделение и должность лица, предоставившего отзыв (п. 28 Положения о присуждении ученых степеней), специальность, по которой автор отзыва защищал свою диссертацию, дату визирования отзыва, печать организации.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет» и на сайте <https://www.kstu.ru/servlet/contentblob?id=584598>.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2026 года

Ученый секретарь
диссертационного совета



Екатерина Игоревна
Байгильдиева

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Согласно Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации до 2035 г. приоритетными являются хранение и эффективная переработка сельскохозяйственной продукции, создание безопасных и качественных, в том числе функциональных продуктов питания.

Особой перспективностью в качестве объекта научных исследований отличается лекарственное растительное сырье облепихи, в частности, облепихи крушиновидной (*Hipporhae rhamnoides*), которая относится к семейству Лоховые (*Elaeagnaceae*).

В плодах, коре и листьях облепихи крушиновидной содержатся биологически активные вещества, витамины, ценные масла и микроэлементы, поэтому облепиха является перспективным растительным сырьем и активно культивируется для производства лекарственных препаратов и косметических средств.

Несмотря на наличие отдельных технологий получения продуктов из плодов облепихи (соков, масел, концентратов) и ее неплодовых частей (серотонина, аллантоина, фенольных комплексов), существующие подходы, как правило, ориентированы на извлечение одного целевого компонента. Это приводит к неполному использованию биохимического потенциала сырья, значительным потерям ценных вторичных ресурсов (жома, семян, побегов) и образованию отходов, что противоречит принципам рационального природопользования.

Поэтому исследования, направленные на разработку технологии и аппаратного оформления комплексной переработки облепихи являются актуальными.

Работа выполнялась в рамках конкурса научно-исследовательских проектов «ТехноСтарт» на тему «Разработка технологической линии производства биологически активного комплекса, содержащего серотонин» (договор № 4-24 от 18.01.2024 г.), конкурса «Студенческий стартap» на тему «Разработка способа высокоэффективной экстракции каротина и 5-гидрокситриптамина из облепихи» (договор № 568ГССС15-L/78854 от 12.09.2022 г.).

Степень разработанности темы. Вопросами переработки растительного сырья и извлечения биологически активных веществ занимались: Рошин В.И., Базарнова Н.Г., Кутакова Н.А., Кочетов А.С., Сидорова Ю.С., Бородулин Д.М., Кривченкова М.В., Виницкая Е.А. Значительный вклад в решение задач по извлечению биологически активных веществ из облепихи внесли российские ученые Матафонов И.И., Золотарева А.М., Мустафаса К.К., Малахова Т.В., Атаманов, А.А., Макаревич Н.А., Семин А.Н., Нижегородцев Ю.М., Алексеенко Е.В. Данная тема рассматривалась в трудах таких зарубежных ученых, как Xuetao Zhang, Tom Beveridge, Ivetta Vincze, Mariana Popescu, Florentina-Mihaela Ursache.

Цель и задачи исследования. Целью диссертационной работы является разработка технологии и аппаратного оформления процесса комплексной переработки облепихи.

Для реализации поставленной цели поставлены задачи:

1. Разработать методы определения коэффициента массопроводности для процесса извлечения масла из выжимок облепихи и расчета коэффициента теплопередачи в выпарном аппарате при концентрировании диффузионного сока.
2. Моделирование процесса паровзрывной обработки побегов облепихи для установления рациональных режимов получения биологически активного комплекса, содержащего серотонин.
3. Моделирование процесса концентрирования диффузионного сока в вакуумном выпарном аппарате с целью определения оптимальных параметров (остаточное давление,

температура) для получения концентрата.

4. Моделирование процесса экстракции масла из выжимок облепихи для выявления технологических параметров.

5. Разработка технологии комплексной переработки облепихи.

Научная новизна.

1. Разработаны методы определения коэффициента массопроводности и расчета коэффициента теплопередачи.

2. Моделированием процесса паровзрывной обработки побегов облепихи выявлены рациональные параметры влагонасыщения для получения биологически активного комплекса, содержащего серотонин (пат. № 2792374):

- давление насыщенного пара $P_n = 0,9 - 1,0$ МПа;
- продолжительность процесса $\tau = 4 - 5$ мин.

3. Моделированием процесса концентрирования диффузионного сока в вакуумном выпарном аппарате с циркуляционной трубой выявлены рациональные параметры организации технологического процесса получения концентрата (пат. № 2794158, № 2813352):

- остаточное давление $P_{ост} = 7 - 12$ кПа;
- температура процесса $t = 40 - 50$ °С.

4. Моделированием процесса экстракции масла из выжимок облепихи выявлены технологические параметры для получения масла (пат. № 2838770):

- гидромодуль процесса 8 – 9;
- температура процесса $t = 30 - 35$ °С;
- продолжительность процесса для жома мякоти $\tau = 60 \pm 5$ мин, для жома семян $\tau = 70 \pm 5$ мин.

5. Разработана технология комплексной переработки облепихи (пат. № 2797550).

Теоретическая значимость работы заключается в развитии научных основ процесса комплексной переработки облепихи и в определении массопроводных свойств ее компонентов.

Практическая значимость работы заключается в формулировании методических рекомендаций и предложений для организации комплексной переработки облепихи, включая этапы подбора оптимальных режимных параметров процесса, позволяющих улучшить качество конечных продуктов и повысить конкурентоспособность на российском и зарубежном рынках.

Разработанные математические модели, инженерные методики расчета оборудования могут быть использованы при технологических расчетах процесса переработки растительного сырья и конструкторских расчетах аппаратурного оформления процесса. Новые данные и аналитические решения, полученные в результате научных исследований, позволят оптимизировать режимные технологические параметры производственного процесса получения биологически активных веществ (БАВ).

Полученные результаты исследований приняты к внедрению в АО «Ласкрафт» (г.Казань).

Методология и методы исследования. Методологической основой исследования послужили сведения о свойствах сырья, модуле процесса экстракции, виде экстрагента, которые выступают в качестве основных факторов, влияющих на режимные параметры исследуемой технологии. Теоретическую базу исследований составили труды ученых, занимающихся вопросами переработки растительного сырья и извлечением из него

биологически активных веществ, а также нормативные документы, определяющие качественные характеристики получаемых продуктов.

Достоверность результатов исследований обеспечивается использованием сертифицированного оборудования и проведением калибровки приборов в ходе экспериментальных работ; использованием современных методов отбора и подготовки образцов; применением адекватных статистических методов для анализа данных, позволяющих определить значимость результатов и исключить случайные ошибки; согласованностью с опубликованными ранее экспериментальными данными других исследователей.

Личное участие автора заключается в проведении экспериментов, анализе полученных данных и интерпретации результатов исследований, разработке экспериментальных стендов и установок для проведения необходимых испытаний и измерений, в подготовке основных публикаций по выполненной работе, включая статьи, доклады и презентации на конференциях и семинарах. Автору принадлежат основные идеи работ, опубликованных в соавторстве.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Результаты диссертации соответствуют паспорту специальности 4.3.1. Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса по п. 2. «Теория и методы технологического воздействия на объекты сельскохозяйственного производства (почву, растения, животных, зерно, молоко и др.)».

Положения, выносимые на защиту:

1. Методы определения коэффициентов массопроводности сырья облепихи (для жома мякоти и семян) и расчета коэффициента теплопередачи в выпарном аппарате с циркуляционной трубой, учитывающих влияние режимных и конструктивных параметров.
2. Рациональные параметры паровзрывной обработки побегов облепихи для получения биологически активного комплекса, содержащего серотонин.
3. Рациональные параметры концентрирования диффузионного сока в выпарном аппарате с циркуляционной трубой для получения концентрата.
4. Технологические параметры процесса экстракции масла из выжимок облепихи.
5. Технология комплексной переработки облепихи и аппаратное оформление процесса, обеспечивающие безотходное производство широкого спектра целевых продуктов.

Апробация работы. Основные положения диссертации докладывались и обсуждались: на международных конференциях «Перспективы развития лесного комплекса» (Брянск, 2023 г.), «Наука и технологии в лесопромышленном комплексе» (Брянск, 2023 г.), «Интенсификация тепломассообменных процессов, промышленная безопасность и экология» (Казань, 2024); на всероссийских конференциях «Вакуумная техника и технология» (Казань, 2023 г.), «Актуальные проблемы лесного хозяйства и деревопереработки» (Казань, 2023 г.).

Результаты исследований отмечены дипломом победителя конкурса стипендий Мэра г. Казани (2024 г.), дипломом победителя научно - исследовательских проектов аспирантов ФГБОУ ВО «КНИТУ» «ТехноСтарт» (2025 г.), дипломом победителя конкурса «Лучший молодой ученый Республики Татарстан» (2024 г.), грантом фонда содействия инновациям «Студенческий стартап» (2025 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 19 печатных работ, в том числе 7 статей в рецензируемых научных изданиях, входящих в Перечень ВАК, из них по специальности – 2 статьи, 5 патентов, 7 трудов в прочих изданиях.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех

глав, заключения, списка литературы и приложений. Диссертационная работа изложена на 136 страницах, включает 36 рисунков и 11 таблиц. Список литературы включает 131 наименование цитируемых работ, в том числе 29 наименований на иностранных языках.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, представлены научная новизна и практическая значимость, дана общая характеристика работы.

Во первой главе представлен аналитический обзор, характеризующий облепиху как уникальное полифункциональное сырье. Рассмотрен биохимический состав плодов, семян, листьев и побегов, включающий витамины, каротиноиды, жирные кислоты, серотонин и другие биологически активные вещества, а также области их применения в пищевой, фармацевтической, косметической промышленности и сельском хозяйстве. Проведен анализ существующих технологий и оборудования для переработки облепихи: производства различных видов сока (прямого отжима, диффузионного, концентрированного), получения облепихового масла (прессовым и экстракционным методами), а также извлечения ценных компонентов из неплодовой части (серотонина, аллантаина). На основе обзора сделан вывод о целесообразности и актуальности разработки комплексной безотходной технологии переработки всех частей облепихи.

Во второй главе рассмотрена физическая картина процесса комплексной переработки облепихи (см.рис.1).

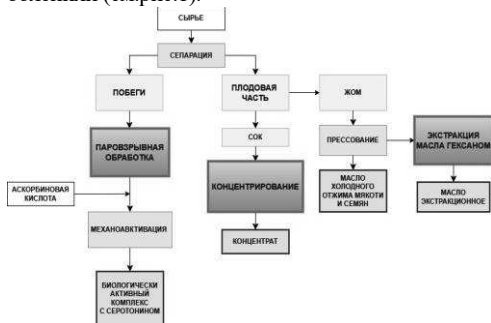


Рисунок 1 – Схема комплексной переработки облепихи

можно описать системой дифференциальных уравнений А.В. Лыкова:

$$\frac{\partial U}{\partial \tau} = a_m \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + a_T \delta \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}; \quad (1)$$

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a_T \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad (2)$$

с краевыми условиями:

$$U(x, 0) = U_H; \quad T(x, 0) = T_H; \quad (3)$$

$$U(0, \tau) = U_{гипр}; \quad T(0, \tau) = \frac{B}{A - \ln P_{max}} - C. \quad (4)$$

При переходе частиц из автоклава в выдувной резервуар происходит сброс давления. При этом поглощенная влага перемещается за счет градиента давления к

Комплексная переработка облепихи включает три ключевых тепло-массообменных процесса: паровзрывную обработку побегов, концентрирование сока и экстрагирование масла из жома (мякоти и семян).

Математическое описание процессов паровзрывной обработки побегов облепихи, концентрирования диффузионного сока и экстракции масла представлено системой уравнений тепло- и массопереноса.

Процесс насыщения сырья влагой и теплом для одномерной частицы

поверхности частиц. Этот процесс описывается дифференциальным уравнением:

$$\frac{\partial U}{\partial \tau} = k_p \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} \quad (5)$$

при краевых условиях:

$$P(x, 0) = P_{max}; \quad P(0, \tau) = P_{в.р.}; \quad (6)$$

Для мелкодисперсных частиц величину влагосъема ΔU при сбросе давления до атмосферного можно определить из уравнения:

$$\Delta U = \frac{C_{в} + C_{др} U}{r} (T_{max} - 100^\circ\text{C}). \quad (7)$$

Интенсивность процесса концентрирования сока определяется конструкцией выпарного аппарата (через коэффициент теплопередачи), поверхностью теплопередачи и температурным напором:

$$\frac{dm_{в}}{d\tau} = \frac{kF_{в}\Delta t}{r}. \quad (8)$$

Температурный напор Δt зависит от температуры первичного пара и давления в выпарном аппарате:

$$\Delta t = t_{пп} - \frac{B}{A - \ln P} - C. \quad (9)$$

Для проведения расчета выпарного аппарата необходимо знать значение коэффициент теплопередачи k .

Математическое описание нестационарного процесса экстракции масла из отпрессованных пластин орошением свежим экстрагентом можно записать дифференциальным уравнением Фика для бесконечной пластины:

$$\frac{\partial C_w}{\partial \tau} = a_m \frac{\partial^2 C_w}{\partial x^2}, \quad (10)$$

при краевых условиях:

$$C_w(x, 0) = C_{wн}; \quad (11)$$

$$C_w(0, \tau) = 0. \quad (12)$$

Начальная концентрация $C_{wн}$ определяется в результате исчерпывающей экстракции в аппарате Сокслета.

Для описания процесса экстракции необходимо знать значение коэффициента массопроводности a_m .

Предложенные модели с соответствующими краевыми условиями формируют основу для последующего численного моделирования и оптимизации технологических режимов.

В третьей главе описано экспериментальное оборудование, методики проведения исследований и результаты моделирования. На рисунке 2 приведена схема экспериментального комплекса.

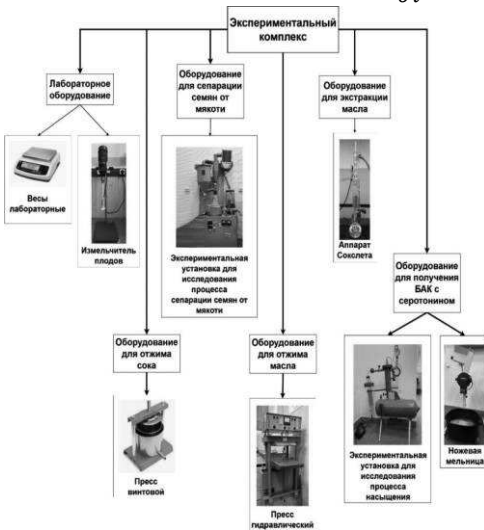


Рисунок 2 – Схема экспериментального комплекса

На рисунке 3 приведены экспериментальные кинетические зависимости влагопоглощения U и температуры T предварительно измельченных частиц побегов облепихи при разных значениях давления в автоклаве P .

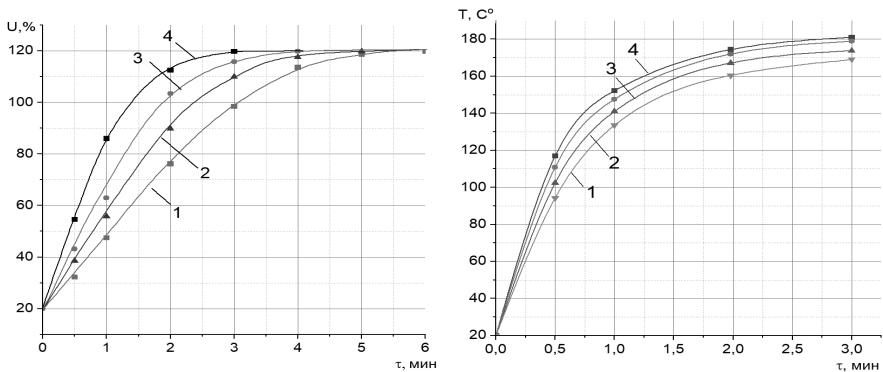


Рисунок 3 – Кинетические кривые влагопоглощения и изменение температуры образца при различных давлениях: 1 – 0,8 МПа; 2 – 0,9 МПа; 3 – 1,0 МПа; 4 – 1,1 МПа

Увеличение давления в установке паровзрывной обработки существенно влияет на продолжительность процесса. Для достижения влажности 120 % при давлении 1,1 МПа необходимо насыщать материал 3 мин, при этом увеличиваются затраты на создание избыточного давления в аппарате. Для достижения необходимой влажности при давлении 0,8 МПа увеличивается продолжительность процесса до 6 мин. Таким образом, интервал обработки при давлении 0,9 – 1,0 МПа в течение 4 – 5 мин является областью оптимальных параметров, сочетающих высокую эффективность влагопереноса с экономической и технологической целесообразностью эксплуатации оборудования.

Обработкой экспериментальных данных были получены аппроксимирующие зависимости, позволяющие прогнозировать параметры процесса:

$$U = 125,28 - 4,99\tau - 288,88P - 9,76\tau^2 + 184,31P^2 + 59,77\tau P; \quad (13)$$

$$T = 2790,89 + 249,1\tau - 172,9\tau^2 + 61,41\tau^3 - 10,21\tau^4 + 0,56\tau^5 - 14394,57P + 29276,46P^2 - 29388,51P^3 + 14616,27P^4 - 2880,97P^5. \quad (14)$$

На рисунке 4 приведены расчетные кинетические зависимости влагосодержания и

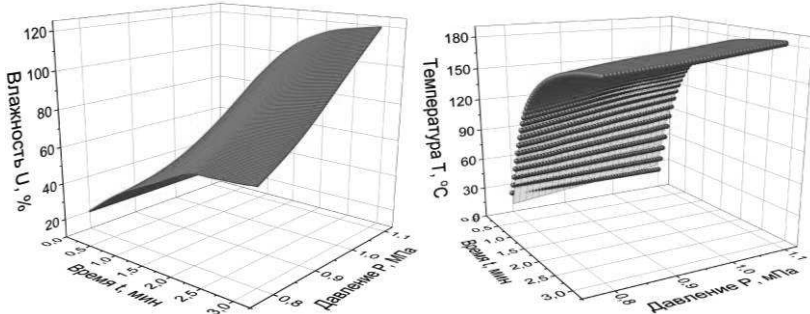


Рисунок 4 – Расчетные кинетические зависимости влагосодержания и температуры материала от давления

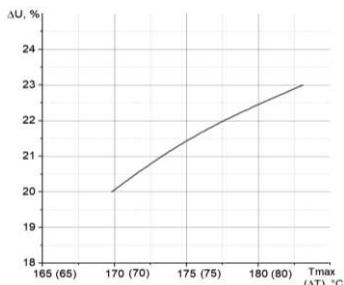


Рисунок 5 – Зависимость величины влагосъема от температуры в автоклаве при сбросе давления

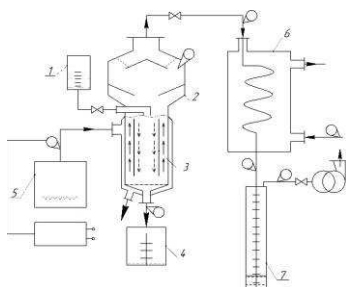


Рисунок 6 – Экспериментальная установка для исследования процесса концентрирования сока: 1 – емкость с соком; 2 – выпарной аппарат; 3 – циркуляционная труба; 4 – емкость с концентратом; 5 – парогенератор; 6 – конденсатор; 7 – мерник конденсата

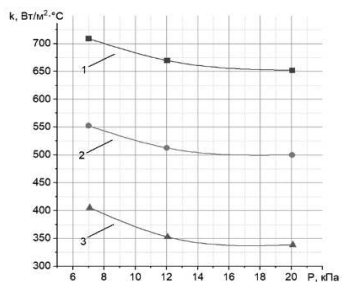


Рисунок 7 – Экспериментальная зависимость коэффициента теплопередачи k от давления P при различных значениях межтрубного пространства: 1 – $\Delta R = 0,02$ м; 2 – $\Delta R = 0,03$ м; 3 – $\Delta R = 0,04$ м

температуры материала от давления, построенные по аппроксимирующим зависимостям (12) и (13).

На рисунке 5 представлена зависимость величины влагосъема ΔU от температуры T в автоклаве.

С повышением температуры в автоклаве от 169 до 183 °C наблюдается рост влагосъема с 20 до 23 %.

Для описания процесса концентрирования сока необходимо знать значение коэффициента теплопередачи k .

Определение коэффициента теплопередачи проводилось на лабораторной установке – вакуумном выпарном аппарате с естественной циркуляцией и центральной циркуляционной трубой. Схема установки представлена на рисунке 6.

По значениям массы отобранного конденсата Δm_k за время Δt при установленном давлении в системе P и межтрубном расстоянии ΔR определяется экспериментальное значение коэффициента теплопередачи k :

$$k = \frac{\Delta m_k r}{F_B \Delta t \Delta t} \quad (15)$$

На рисунке 7 показаны экспериментальные зависимости коэффициента теплопередачи k от давления P при различных значениях межтрубного расстояния ΔR , полученные обработкой экспериментальных данных. Снижение давления в выпарном аппарате до 7 – 12 кПа позволяет проводить процесс в щадящем термическом режиме (40 – 50 °C), предотвращая деструкцию термолабильных биологически активных веществ.

Экспериментально установлено, что коэффициент теплопередачи имеет обратную зависимость от остаточного давления в аппарате и межтрубного расстояния. Увеличение давления снижает температурный напор, а увеличение ΔR уменьшает скорость циркуляционного потока, что приводит к падению коэффициента теплопередачи.

Обработкой экспериментальных данных получена аппроксимирующая зависимость коэффициента теплопередачи от межтрубного расстояния в рабочей зоне выпарного аппарата и давления:

$$k = 1126,44 - 17,707P - 1596,44\Delta R + 0,516P^2 + 138,89\Delta R^2 - 25P\Delta R. \quad (16)$$

На рисунке 8 приведена расчетная зависимость коэффициента теплопередачи k от межтрубного расстояния ΔR в рабочей зоне выпарного аппарата и

давления P , построенная по зависимости (16).

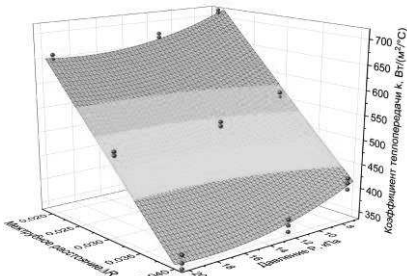


Рисунок 8 – Экспериментальная и расчетная зависимость коэффициента теплопередачи k от межтрубного расстояния ΔR в рабочей зоне выпарного аппарата и давления P

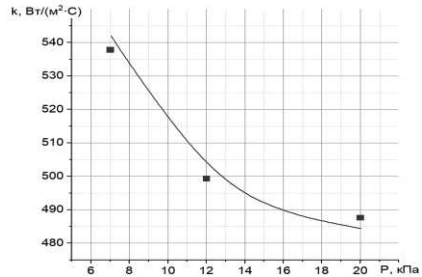


Рисунок 9 – Расчетные и экспериментальные данные по коэффициенту теплопередачи k в зависимости от давления P при межтрубном пространстве $\Delta R = 0,03$ м

Для проверки адекватности полученной математической модели (16) были проведены эксперименты с использованием промежуточных значений давления P ($P = 7$ кПа, $P = 12$ кПа, $P = 20$ кПа) при межтрубном пространстве $\Delta R = 0,03$ м. Результаты интерполяции представлены на рисунке 9. Проверка по критерию Фишера подтвердила ее адекватность.

В результате моделирования было установлено, что для исследованного оборудования при давлении P в выпарном аппарате $7 - 12$ кПа значение коэффициента теплопередачи k варьируется от 553 до 512 Вт/(м²·°С) в зависимости от давления P и межтрубного расстояния ΔR .

Найденные значения коэффициента теплопередачи используются в инженерной методике расчета, позволяющей определять рациональные параметры (диаметр, высота рабочей зоны и сепарации, поверхность теплопередачи, диаметры патрубков, толщина стенки) вакуум-выпарного аппарата с естественной циркуляцией в зависимости от заданной производительности и режимных параметров.

Методика определения коэффициента массопроводности основана на теории регулярного режима массопереноса. Эксперимент проводился на образцах отпрессованных пластин жома мякоти и семян облепихи толщиной 1 мм.

На рисунках 10 и 11 представлены зависимости концентрации облепихового масла в выжимках мякоти

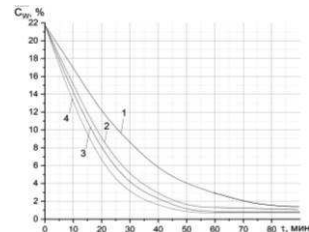


Рисунок 10 – Кинетическая зависимость концентрации облепихового масла в выжимках мякоти при гидромодуле: 1 – $M = 7$; 2 – $M = 8$; 3 – $M = 9$; 4 – $M = 10$

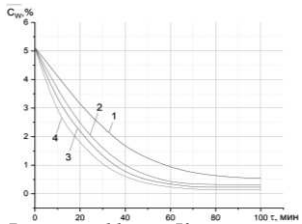


Рисунок 11 – Кинетическая зависимость концентрации облепихового масла в выжимках семян при гидромодуле: 1 – $M = 7$; 2 – $M = 8$; 3 – $M = 9$; 4 – $M = 10$

(рис. 10) и семян (рис. 11) при различных гидромодулях.

Установлено, что при снижении гидромодуля до значений менее 8 наблюдается резкое увеличение продолжительности выхода целевых компонентов, что свидетельствует о лимитировании процесса диффузии в условиях недостатка растворителя. Напротив, при

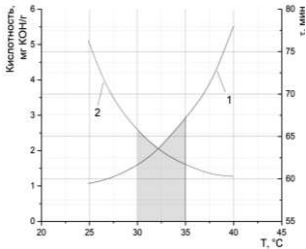


Рисунок 12 – Температурные зависимости кислотности облепихового масла и продолжительности процесса экстракции: 1 – качество облепихового масла, 2 – продолжительность процесса экстракции

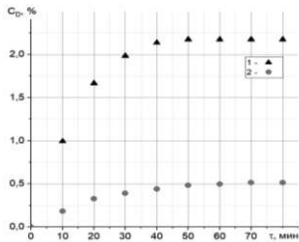


Рисунок 13 – Кинетическая зависимость концентрации облепихового масла в экстрагенте при экстрагировании отпрессованных пластин жома: 1 – мякоти; 2 – семян

гидроMODULE, равном 8 и выше, скорость экстракции выходит на плато: дальнейшее увеличение объема растворителя практически не влияет на время завершения процесса. Таким образом, максимальный выход масла при минимальном расходе экстрагента обеспечивается при гидроMODULE 8 – 9.

На рисунке 12 представлены кинетические зависимости кислотности облепихового масла и температуры процесса экстракции.

С повышением температуры экстракции наблюдается сокращение продолжительности процесса (кривая 2). Однако при этом возрастает кислотность получаемого облепихового масла (кривая 1), что негативно влияет на качество целевого продукта. Оптимальным температурным интервалом, обеспечивающим баланс между технологической эффективностью и сохранением качества масла, является диапазон 30 – 35 °С. Дальнейшее повышение температуры приводит к неоправданному ухудшению качественных показателей масла при незначительном сокращении времени экстракции.

Расчет коэффициента массопроводности производится по формуле:

$$a_m = Km. \quad (17)$$

Коэффициент формы тела „K” для одномерной частицы пластины определяется соотношением:

$$K = \frac{a^2}{\pi^2}. \quad (18)$$

Для определения темпа регулярного режима m вначале строятся кинетические зависимости концентрации облепихового масла в гексане при экстрагировании отпрессованных пластин жома мякоти и жома семян. В качестве растворителя был выбран гексан в связи с высокой экстрактивной способностью по отношению к растительным маслам. Процесс экстракции проводится при температуре 30 – 35 °С, что позволяет сохранить термолабильные БАВ, и гидроMODULE 8 – 9.

При экстрагировании отпрессованных пластин жома мякоти концентрация облепихового масла в экстракте перестает значимо изменяться через 60 мин, для жома семян этот показатель достигается через 70 мин.

На основе полученных экспериментальных данных (рис.13) строятся кинетические зависимости концентрации облепихового масла в сырье в линейных координатах (рис.14а), затем данные зависимости строятся в координатах $t, \ln(C_w)$ (рис.14б). На полученном графике выделяется прямолинейный участок. Темп регулярного режима m численно равен тангенсу угла наклона этого прямолинейного участка к оси абсцисс.

Расчитанные по соотношению (17) значения коэффициентов массопроводности a_m составляют:

- при экстрагировании отпрессованных пластин жома мякоти:

$$a_m = 1,09 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/\text{с}; \quad (19)$$

- при экстрагировании отпрессованных пластин жома семян:

$$\alpha_m = 5,65 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}. \quad (20)$$

Они показывают, что массопроводность жома мякоти примерно в два раза выше, чем у семян, что объясняется различиями в их структуре и локализации масла.

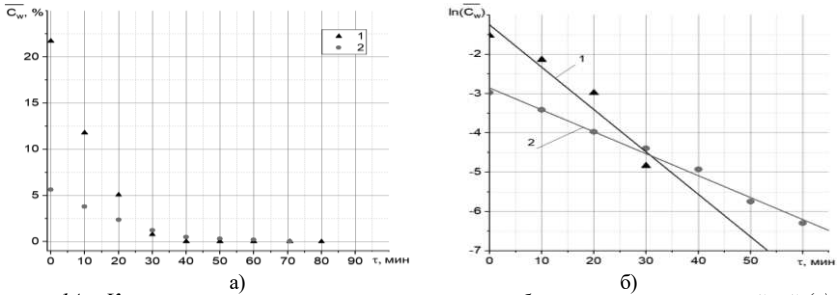


Рисунок 14 – Кинетические зависимости концентрации облепихового масла в линейной (а) и $t, \ln(C_w)$ (б) системах координат: 1 – в жоме мякоти; 2 – в жоме семян

Решением дифференциального уравнения при краевых условиях (11) и (12) и параметрах идентификации (19) и (20) построены динамические кривые изменения локальных концентраций облепихового масла по сечению пластины толщиной 1 мм из жома мякоти и семян (рис.15).

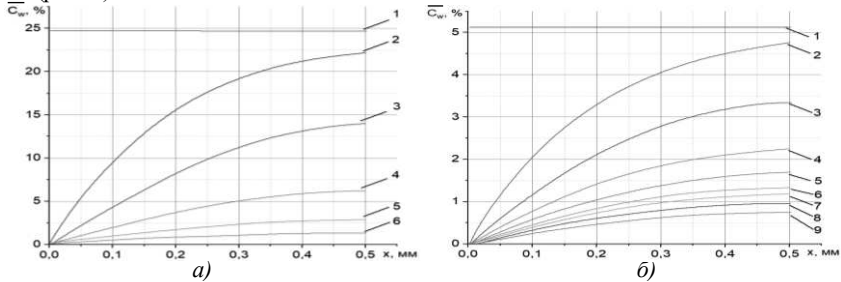


Рисунок 15 – Расчетные динамические кривые концентрации облепихового масла по сечению пластины жома: а – мякоти; б – семян: 1 – $\tau = 0$ мин; 2 – $\tau = 5$ мин; 3 – $\tau = 10$ мин; 4 – $\tau = 20$ мин; 5 – $\tau = 30$ мин; 6 – $\tau = 40$ мин; 7 – $\tau = 50$ мин; 8 – $\tau = 60$ мин; 9 – $\tau = 70$ мин

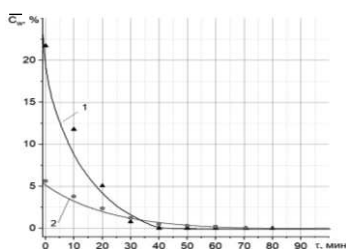


Рисунок 16 – Расчетные и экспериментальные кинетические кривые концентрации облепихового масла в жоме: 1 – мякоти; 2 – семян

Обработкой локальных зависимостей концентрации облепихового масла в сырье построены кинетические кривые средней концентрации (см.рис.16) облепихового масла в жоме мякоти и семян.

Отклонение расчетных данных от экспериментальных не превышает 15 %.

В четвертой главе представлена разработанная технологическая линия комплексной переработки облепихи (рисунок 17), обеспечивающая безотходное производство пяти видов продукции: концентрата сока, масел холодного отжима из мякоти и семян, экстракционного масла и биологически активного комплекса с серотонином.

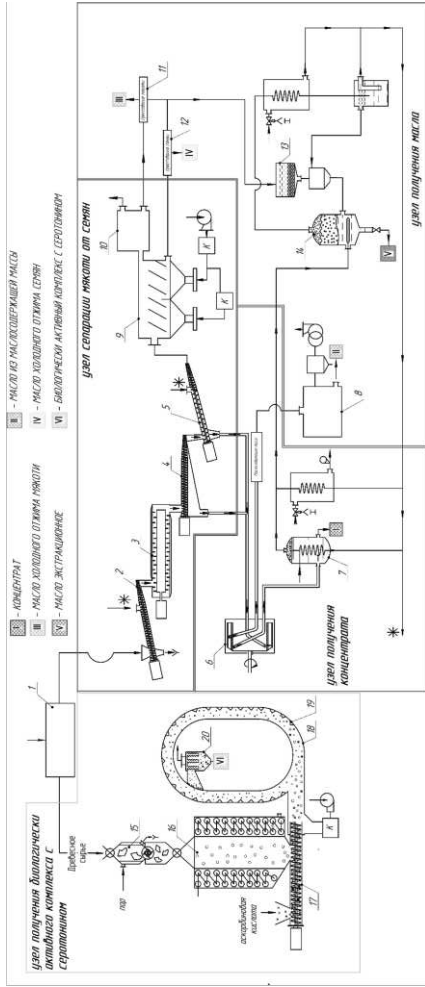


Рисунок 17 – Технологическая линия комплексной переработки облепихи: 1 – стадия сепарации плодов от веток; 2 – промывной аппарат; 3 – горизонтальный дисмембратор; 4 – отжимной шнек-пресс; 5 – промывной аппарат с отжимным узлом; 6 – центробежный сепаратор; 7 – вытарный аппарат; 9 – двухсекционный аппарат; 11, 12 – узлы прессования мякоти и семян; 13 – экстрактор; 14 – испаритель; 15 – автоклав; 16 – выдочный резервуар; 17 – шнековый транспортер; 18 – замкнутый трубопровод; 19 – режущие элементы; 20 – воздушный сепаратор (пухавый фильтр)

Плоды облепихи, закрепленные на побегах, вместе с веточками поступают на сепарацию 1, где происходит их разделение на побеги и плоды.

В узле сепарации мякоти от семян плоды облепихи промывают в промывном аппарате 1 и измельчают в дисмембраторе 3 с сохранением целостности семян. Полученную массу фильтруют в шнековом транспортере 4 (отверстия 1,0–1,1 мм), отделяя облепиховый сок; оставшуюся мякоть промывают теплой водой, отжимают и дополнительно фильтруют в промывном аппарате 5, получая диффузионный сок и жом с семенами. Жом с семенами сушат в двухсекционной сушилке 9 (90–100 °С) до влажности 4–10 %, после чего пневмотранспортом направляют в воздушный сепаратор 10, где разделяют на семена и мякоть.

В узле получения концентрата облепиховый сок и диффузионный сок, полученные в шнековом транспортере 4 и промывном аппарате 5, объединяют и центрифугируют в

центрифуге 6 (разделение при 2000–3000 об/мин), отделяя маслосодержащую фракцию; очищенный сок концентрируют в выпарном аппарате 7 при давлении 7–12 кПа и температуре 40–50 °С.

В узле получения масла маслосодержащую фракцию из центрифуги 6 сушат в вакуумной сушилке 8 (5–10 кПа, 60–90 мин). Мякоть и семена, отделенные в узле сепарации мякоти от семян, прессуют на гидравлических прессах 11 и 12, получая масла; отпрессованную мякоть и семена в экстракторе 13 подвергают экстракции гексаном с температурой 30–35 °С при гидромодуле 8–9 в течение 60–70 мин, экстракт очищают выпариванием в испарителе 14,

гексан регенерируют через конденсацию и сепарацию.

В узле получения биологически активного комплекса, содержащего серотонин, побег измельчают до 10 – 20 мм, обрабатывают насыщенным паром в автоклаве 15 (0,9 – 1,0 МПа, 4 – 5 мин), затем измельчают до 1 – 2 мм, активируют в выдувном резервуаре 16 (0,8 – 1,0 кПа), смешивают с аскорбиновой кислотой и подвергают механической активации в замкнутом трубопроводе 18 с режущими элементами 19; образовавшийся порошок сепарируют в рукавном фильтре 20.

Приведено технико-экономическое обоснование, в соответствии с которым годовая прибыль составит 50 млн рублей, срок окупаемости 1,6 года при переработке 48 тонн сырья в год, что подтверждает эффективность и целесообразность промышленного внедрения разработки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработаны методы определения коэффициентов массопроводности для процессов извлечения масла из выжимок облепихи и метод расчета коэффициента теплопередачи в вакуумном выпарном аппарате с циркуляционной трубой при концентрировании диффузионного сока. Экспериментально определены значения коэффициента массопроводности для отпрессованных пластин жома мякоти ($1,09 \cdot 10^{-8}$ м²/с) и семян ($5,65 \cdot 10^{-9}$ м²/с). Получена регрессионная зависимость для расчета коэффициента теплопередачи, учитывающая влияние остаточного давления и межтрубного расстояния в выпарном аппарате.

2. На основе математического моделирования процесса паровзрывной обработки побегов облепихи выявлены рациональные параметры влагонасыщения для получения биологически активного комплекса, содержащего серотонин (пат. № 2792374). Установлено, что оптимальный режим обработки соответствует остаточному давлению 0,9 – 1,0 МПа и продолжительности 4 – 5 мин, что обеспечивает влажосодержание материала до 120%.

3. Моделированием процесса концентрирования диффузионного сока в выпарном аппарате с циркуляционной трубой определены рациональные параметры организации технологического процесса получения концентрата (пат. № 2794158, № 2813352). Установлено, что эффективное концентрирование сока достигается при остаточном давлении 7 – 12 кПа и температуре 40 – 50 °С, что позволяет минимизировать термическую деградацию биологически активных веществ.

4. В результате моделирования процесса экстракции масла из выжимок облепихи выявлены технологические параметры, обеспечивающие максимальный выход целевого продукта (пат. № 2838770). Рациональными режимами являются: гидромодуль 8 – 9; температура 30 – 35 °С; продолжительность процесса для жома мякоти 60 ± 5 мин, для жома семян 70 ± 5 мин.

5. Разработана технология комплексной переработки облепихи (пат. № 2797550) и аппаратное оформление линии, обеспечивающие безотходное производство широкого спектра целевых продуктов: концентрата сока, масел холодного отжима из мякоти и семян, экстракционного масла, а также биологически активного комплекса с серотонином. Предложена инженерная методика расчета узла концентрирования, позволяющая определять рациональные геометрические параметры вакуум-выпарного аппарата. Технико-экономическое обоснование подтверждает эффективность разработки: ожидаемая годовая прибыль составляет 50 млн рублей, срок окупаемости проекта – 1,6 года.

Перспективы дальнейшей разработки темы исследования. Дальнейшее развитие темы направлено на углубление исследований комплексной переработки облепихи, включая извлечение дополнительных ценных компонентов из коры, листьев и древесной зелени для

расширения ассортимента конечных продуктов.

Основные обозначения: U – влагосодержание, %; x – координата локальной точки в сырье, м; a_m, a_T – коэффициенты, соответственно, массопроводности и температуропроводности сырья, м²/с; δ – термоградиентный коэффициент; T – температура образца, °С; A, B, C – константы уравнения Антуана; P_{max} – давление водяных паров в автоклаве, кПа; P – текущее давление, кПа; k_p – коэффициент проницаемости, м²/с·кПа; $P_{в.р.}$ – давление в выдувном резервуаре, кПа; $C_{в.}$, $C_{др}$ – теплоемкость, соответственно, воды и древесины, кДж/кг; r – скрытая теплота парообразования, кДж/кг; F_b – поверхность теплопередачи, Вт/м²·°С; $t_{пп}$ – температура первичного пара, °С; C_w – концентрация облепихового масла в гексана, %.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

Статьи, входящие в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, рекомендованных ВАК Минобрнауки России:

1. Зиятдинова, Д. Ф. Моделирование процесса экстрагирования масла из продуктов переработки облепихи / Д. Ф. Зиятдинова, Р. Г. Сафин, **Е. Н. Соловьева** // *Аграрная наука Евро-Северо-Востока.* – 2025. – Т. 26, № 4. – С. 816-826. – DOI 10.30766/2072-9081.2025.26.4.816-826.

2. Зиятдинова, Д. Ф. Методика расчета выпарного аппарата в установке производства концентрированного облепихового сока / Д. Ф. Зиятдинова, **Е. Н. Соловьева**, Р. Г. Сафин, Б. Г. Зиганшин // *Техника и технологии в животноводстве.* – 2025. – Т. 15, № 4. – С. 72-82. – DOI 10.22314/27132064-2025-15-4-72.

Патенты:

3. Пат. 2792374 Российская Федерация, МПК А61К 36/72, А61К 31/4045. Способ приготовления биологически активного комплекса, содержащего серотонин / Сафин Р. Г., **Ахметханова Е. Н.**, Зиятдинова Д. Ф. [и др.]; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технологический университет». – № 2023102215: заявл. 01.02.2023; опубл. 21.03.2023.

4. Пат. 2794158 Российская Федерация, МПК А23Н 1/00. Способ получения облепихового сока: № 2022120358: заявл. 26.07.2022; опубл. 12.04.2023 / Р. Г. Сафин, **Е. Н. Ахметханова**, Г. Р. Арсланова [и др.]; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технологический университет».

5. Пат. 2797550 Российская Федерация, МПК А23Н 4/02. Способ отделения семян ягод от мякоти: № 2022112081: заявл. 05.05.2022; опубл. 07.06.2023 / Р. Г. Сафин, **Е. Н. Ахметханова**, А. С. Родионов [и др.]; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технологический университет».

6. Пат. 2813352 Российская Федерация, МПК С11В 1/00. Способ получения масла и сока ягод облепихи / Сафин Р. Г., **Ахметханова Е. Н.**, Ахметханова Е. М. [и др.]; заявитель и патентообладатель ООО «Эколайн». – № 2022126887: заявл. 17.10.2022; опубл. 12.02.2024.

7. Пат. 2838770 Российская Федерация, МПК А61К 36/72, В01Д 11/02, А23Л 2/04. Способ получения масла и сока из ягод облепихи: заявл. 12.07.2024; опубл. 22.04.2025 / Р. Г. Сафин, **Е. Н. Соловьева**, Л. Р. Назипова, Д. Ф. Зиятдинова; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технологический университет».

Труды в прочих изданиях:

8. Сафин, Р. Г. Обзор существующих способов получения ценных компонентов из облепихи крушиновидной и разработка комплексной схемы ее переработки / Р. Г. Сафин, **Е. Н. Ахметханова**, Г. Р. Арсланова [и др.] // *Деревообрабатывающая промышленность.* – 2022. – № 2. – С. 70-82.

9. Сафин, Р. Г. Обзор исследований по производству облепихового сока / Р. Г. Сафин, **Е. Н. Ахметханова**, А. В. Сафина [и др.] // *Системы. Методы. Технологии.* – 2022. – № 3(55). – С. 116-122. – DOI 10.18324/2077-5415-2022-3-116-122.

10. Сафина, А. В. Программное моделирование процесса экстракции ценных

- компонентов из растительного сырья / А. В. Сафина, **Е. Н. Ахметханова**, Р. Р. Сафин [и др.] // *Деревообрабатывающая промышленность*. – 2022. – № 3. – С. 42-50.
11. Зиятдинова, Д. Ф. Моделирование процессов влагопоглощения древесины при изменении давлений среды / Д. Ф. Зиятдинова, **Е. Н. Соловьева**, Л. Р. Назипова [и др.] // *Вестник технологического университета*. – 2024. – Т. 27, № 1. – С. 25-29.
12. Зиятдинова, Д. Ф. Комплексная переработка облепихи / Д. Ф. Зиятдинова, **Е. Н. Соловьева**, Р. Г. Сафин, А. А. Масагутов // *Деревообрабатывающая промышленность*. – 2025. – № 1. – С. 36-44.
13. Соловьева, Е. Н. Способ получения облепихового масла с повышенным содержанием каротиноидов / **Е. Н. Соловьева**, А. М. Юлдашев, Э. Р. Фахуртдинова, Р. Г. Сафин // *Интенсификация тепломассообменных процессов, промышленная безопасность и экология : Материалы VII Всероссийской студенческой научно-практической конференции, Казань, 28-30 мая 2024 года*. – Казань: ООО «Конверс», 2024. – С. 138-140.
14. Соловьева, Е. Н. Разработка экспериментальной установки, работающей при меняющемся давлении паровой среды / **Е. Н. Соловьева**, Г. М. Юлдашева, Э. Р. Фахуртдинова, Р. Г. Сафин // *Интенсификация тепломассообменных процессов, промышленная безопасность и экология : Материалы VII Всероссийской студенческой научно-практической конференции, Казань, 28-30 мая 2024 года*. – Казань: ООО «Конверс», 2024. – С. 482-484.
15. Соловьева, Е. Н. Содержание серотонина в различных частях облепихи / **Е. Н. Соловьева**, Д. А. Феоктистов // *Перспективы развития лесного комплекса: Сборник научных трудов международной научно-практической конференции, Брянск, 18-19 декабря 2023 года*. – Брянск: Брянский государственный инженерно-технологический университет, 2023. – С. 107-109.
16. Соловьева, Е. Н. Экспериментальная установка, работающая при меняющемся давлении среды / **Е. Н. Соловьева**, Д. А. Феоктистов // *Перспективы развития лесного комплекса: Сборник научных трудов международной научно-практической конференции, Брянск, 18-19 декабря 2023 года*. – Брянск: Брянский государственный инженерно-технологический университет, 2023. – С. 112-114.
17. Соловьева, Е. Н. Отделение семян от мякоти в виброкипящем слое / **Е. Н. Соловьева**, Д. А. Феоктистов // *Перспективы развития лесного комплекса: Сборник научных трудов международной научно-практической конференции, Брянск, 18-19 декабря 2023 года*. – Брянск: Брянский государственный инженерно-технологический университет, 2023. – С. 117-118.
18. Ахметханова, Е. Н. Вакуумные технологии при изготовлении порошка, содержащего серотонин / **Е. Н. Ахметханова**, Р. Г. Сафин // *Вакуумная техника и технология: Материалы Одиннадцатой Российской студенческой научно-технической конференции, Казань, 18-20 апреля 2023 года*. – Казань: Казанский национальный исследовательский технологический университет, 2023. – С. 159.
19. Ахметханова, Е. Н. Питательные и биологически активные соединения в сушеном облепиховом жоме / **Е. Н. Ахметханова**, А. С. Родионов // *Новые материалы и перспективные технологии лесопромышленного комплекса: Материалы Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых и студентов, Воронеж, 25 мая 2022 года*. – Воронеж: Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, 2022. – С. 15-19. – DOI 10.581168/NMPTTI2022_15-19.