

На правах рукописи



Фахрутдинова Лейсан Рамилевна

**ТЕХНОЛОГИЯ И АППАРАТУРНОЕ ОФОРМЛЕНИЕ ПРОЦЕССА
ИЗВЛЕЧЕНИЯ БЕТУЛИНА ИЗ КОРЫ БЕРЁЗЫ**

4.3.4. Технологии, машины и оборудование для лесного хозяйства и
переработки древесины

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Казань – 2025

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

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Сафин Рушан Гареевич

Официальные оппоненты: **Рощин Виктор Иванович**, доктор химических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С. М. Кирова», заведующий кафедрой технологии лесохимических продуктов, химии древесины и биотехнологии;

Кутакова Наталья Алексеевна, кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Северный (Арктический) федеральный университет имени М. В. Ломоносова», доцент кафедры целлюлозно-бумажных и лесохимических производств.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уральский государственный лесотехнический университет», г. Екатеринбург.

Защита диссертации состоится «18» декабря 2025 года в 9 часов 30 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, зал заседаний Ученого совета А-330.

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

В отзыве указывается фамилия, имя, отчество лица, предоставившего отзыв, его почтовый адрес, телефон и адрес электронной почты (при наличии), наименование организации и должность с указанием структурного подразделения (п. 28 Положения о присуждении ученых степеней), специальность по защите диссертации, дата визирования отзыва, печать.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет» и на сайте <https://www.kstu.ru/servlet/contentblob?id=557755>.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2025 года

Ученый секретарь
диссертационного совета



Екатерина Игоревна
Байгильдеева

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В настоящее время на деревообрабатывающих предприятиях Российской Федерации, в частности, на фанерно-мебельных производствах и домостроительных комбинатах ежедневно образуется до 4,3 т невостребованной коры берёзы. При этом в берёзовой коре содержится биологически активное вещество – бетулин. Он синтезируется клетками растения в его внешней оболочке и выполняет функцию защиты от неблагоприятных факторов внешней среды. Бетулин является ценным сырьем для медицинской, фармацевтической, косметической, а также ветеринарной и пищевой промышленности.

Бетулин проявляет антиоксидантное, антисептическое, противовоспалительное, противовирусное, гастропротекторное, онкопротекторное, регенерирующее, иммуномоделирующее и ряд других свойств. В сельском хозяйстве он используется для введения прикорма в рацион животных, заменяя антибиотик. В косметологии бетулин применяют как компонент, оказывающий противовоспалительное, увлажняющее и омолаживающее действие. В пищевой промышленности его используют как замену антиоксидантов и консервантов, при производстве БАДов. В фармацевтике бетулин входит в состав ряда препаратов, применяемых при различных заболеваниях.

Благодаря эффективности бетулина и широкому спектру его свойств в последние 2 – 3 года наблюдается значительный рост спроса на него. Стоимость бетулина на мировом рынке варьируется в пределах 30 – 60 тыс. руб. за кг в зависимости от чистоты продукта. Основная доля поставки бетулина осуществляется из-за рубежа.

На данный момент потребность в бетулине на отечественном рынке составляет примерно 3 тыс. кг в месяц. На территории Российской Федерации производится только 1 тыс. кг, а разница импортируется, в том числе из Китая, США и Канады. При этом практически 80 % мирового парка берёз расположено на территории Российской Федерации.

На основании вышеизложенного становится очевидной необходимостью совершенствования технологии отечественного производства бетулина. Это позволит эффективно использовать ресурсы, образующиеся на деревообрабатывающих предприятиях, и минимизировать зависимость от импорта.

Работа выполнялась в рамках конкурса научно-исследовательских проектов «Техностарт» на тему «Способ получения бетулина из коры берёзы» по договору № 1-25 от 29.01.2025 г. и гранта «Умник» на тему «Разработка процесса высокоэффективной экстракции бетулина из отходов древесины (берёсты берёзы)» по договору 19320ГУ/2024 от 17.05.2024 г.

Степень разработанности темы. В процессе диссертационного исследования проанализированы работы, посвященные вопросу извлечения биологически активных веществ из древесного сырья. Теоретическими основами процесса извлечения ценных компонентов из твердых материалов занимались российские ученые Рощин В. И., Кузнецов А.Н., Кутакова Н.А., Кочетов А.С., Третьяков С.И., Кузнецов Б.Н., Бадогина А.И., Белякова А.Ю., Трошкова И.Ю., Щипко М.Л., Полежаева Н.И., Фалева А.В.

Изучением биологически активных веществ древесины берёзы и методами их извлечения занимались ученые Кислицин А.Н., Юнусов М.С., Хлебникова Т.Б., Стернин Ю.И., Левданский В.А., Коптелова Е.Н., Скворцова Г.П., Веприкова В.А.

Цель работы заключается в разработке технологии и аппаратного оформления процесса извлечения бетиулина из коры берёзы и обосновании целесообразности использования полученных результатов малыми предприятиями.

Для реализации этой цели поставлены следующие **задачи**:

1. Проведение аналитического обзора методов современного извлечения бетиулина из коры берёзы.
2. Исследование физико-химических свойств луба и бересты берёзы, влияющих на их сепарируемость.
3. Выявление рациональных режимов процесса сепарации бересты от луба и экстракции бетиулина из бересты берёзы.
4. Разработка математической модели процесса извлечения бетиулина из бересты берёзы, отражающей зависимость интенсивности извлечения от температуры и концентрации экстрагента.
5. Выявление рациональных режимов экстрагирования путём математического моделирования.
6. Разработка технологического и аппаратного оформления процесса извлечения бетиулина в промышленных масштабах.

Предмет и объект исследования. Предметом исследования является технология извлечения бетиулина из отходов древесины берёзы. Объектами исследования являются кора берёзы и получаемый из нее биологически активный компонент – бетиулин.

Научная новизна:

1. Разработан способ сепарации бересты от луба с параметрами:
 - начальная влажность коры 42 – 52 %;
 - продолжительность измельчения коры в молотковой дробилке 45 – 90 с;
 - выделение фракции измельченной коры размерами 1 – 2 мм;
 - гравитационное осаждение выделенной фракции в воде в течение 3 – 10 мин.
2. Определена температурная зависимость коэффициента массопроводности бересты.
3. Разработана математическая модель процесса извлечения бетиулина из бересты берёзы раствором толуола.
4. Выявлены рациональные режимные параметры процесса извлечения бетиулина из бересты:
 - размеры частиц бересты 1 – 2 мм;
 - продолжительность пропитки и прогрева 10 – 15 мин;
 - температура экстракции 110 °С;
 - модуль экстракции 1:2,5.
5. Разработана технология комплексной переработки коры берёзы. Научная новизна принятых решений подтверждена патентами РФ № 2801732 и № 2829457.

Теоретическая значимость работы заключается в развитии научных основ процесса извлечения бетиулина из растительного сырья органическими растворителями. Проведенные исследования показывают целесообразность извлечения бетиулина из бересты берёзы водонерастворимым органическим растворителем – толуолом.

Разработанная технология, позволяющая извлечь бетулин, характеризуется интенсивностью процесса, высоким выходом конечного продукта и возможностью получения бетулина с высокой степенью чистоты.

Практическая значимость работы заключается в формулировании методических рекомендаций и предложений для организации процесса извлечения бетулина из коры берёзы, включая этапы подбора оптимальных режимных параметров процесса, позволяющих улучшить качество конечного продукта и повысить его конкурентоспособность на российском и зарубежном рынках.

Полученные результаты исследований приняты к внедрению в АО «Ласкрафт» (г. Казань), а также применяются в учебном процессе по дисциплине «Современные технологии химической переработки древесины» в ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет».

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 учёных, занимающихся вопросами извлечения биологически активных веществ из древесного сырья, а также нормативные документы, определяющие качественные характеристики получаемого продукта.

Достоверность результатов исследований обусловлена тем, что:

- в ходе экспериментальных работ результаты были получены с использованием сертифицированного оборудования и проведением калибровки приборов;
- использованы современные методики отбора и подготовки образцов;
- применены адекватные статистические методы для анализа данных, что позволило определить значимость результатов и исключить случайные ошибки;
- научные результаты, полученные автором, согласуются с опубликованными ранее экспериментальными данными других исследователей и не противоречат существующим представлениям.

Личное участие автора заключалось в проведении экспериментов, анализе полученных данных и интерпретации результатов, 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. Основные результаты диссертационной работы соответствуют паспорту специальности 4.3.4. Технологии, машины и оборудование для лесного хозяйства и переработки древесины: п. 2. «Химия, физико-химия и биохимия 12 основных компонентов биомассы дерева и иных одревесневших частей растений, композиты, продукты лесохимической переработки» (пункты 1, 2, 3 научной новизны); п. 4. «Технология и продукция в производствах: лесохозяйственном, лесозаготовительном, деревообрабатывающем, целлюлозно-бумажном, лесопильном, лесохимическом и сопутствующих им производствах» (пункт 4, 5 научной новизны).

Положения, выносимые на защиту:

1. Разработанный способ сепарации бересты от луба.
2. Математическая модель процесса извлечения бетулина из бересты берёзы

раствором толуола.

3. Результаты моделирования процесса извлечения бетулина из коры берёзы.

4. Рекомендации по промышленному внедрению разработанного аппаратного оформления.

Апробация работы. Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на международных конференциях: «Механика и машиностроение» (Санкт-Петербург, 2022 г.), «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 г.), «Биологизация и биоэкономика АПК: вызовы и перспективы» (Москва, 2025 г.); 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 Академии наук Республики Татарстан (2023 г.), грантом фонда содействия инновациям «УМНИК» (2023 г.), дипломом победителя научно-исследовательских проектов аспирантов КНИТУ «ТехноСтарт» (2025 г.), грантом фонда содействия инновациям «Студенческий стартап» (2025 г.).

Публикации. По теме диссертационного исследования автором опубликовано 17 печатных работ, в том числе 5 статей в рецензируемых научных изданиях из Перечня ВАК и 1 статья в издании, входящем в реферативную базу Scopus, 2 патента на изобретение, 9 публикаций – в прочих изданиях.

Объем и структура диссертационной работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений. Диссертационная работа изложена на 131 странице, включает 55 рисунков и 6 таблиц. Список литературы включает 123 наименования цитируемых работ, из них 74 источника российских авторов и 49 наименований работ зарубежных исследователей.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В первой главе диссертации произведен анализ существующих технологий извлечения биологически активных веществ из вторичных ресурсов древесного происхождения. Особое внимание уделено берёзовой коре как перспективному сырью для получения тритерпеновых спиртов. Проведён систематизированный обзор физико-химических характеристик коры берёзы, включая структурно-морфологические особенности бересты и луба, обуславливающие сложность их сепарации и необходимость предварительной подготовки сырья. Обоснована неэффективность ряда традиционных методов экстрагирования бетулина при малотоннажном производстве и показана актуальность создания энерго- и ресурсосберегающей технологии извлечения бетулина с замкнутым циклом использования растворителя.

Во второй главе рассмотрена физическая картина процесса извлечения бетулина из отходов древесины берёзы (см. рис. 1). На основании формализации

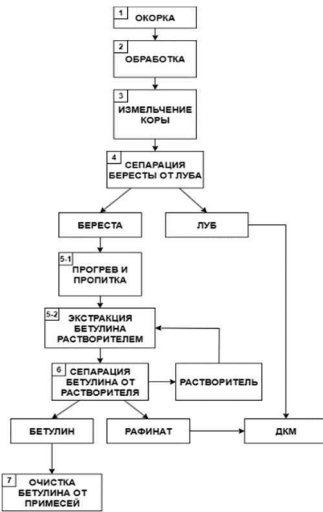


Рисунок 1 – Схема процесса извлечения бетулина из коры березы

процесса была разработана математическая модель извлечения бетулина из березовой бересты, представленная совокупностью математических описаний процесса пропитки и двухстадийного процесса экстракции бетулина из бересты. Математическое описание процессов прогрева и пропитки бересты, представленное системой дифференциальных уравнений тепло- и массопереноса для бесконечной пластины, имеет вид:

$$\frac{\partial C_{DW}}{\partial \tau} = a_m \frac{\partial^2 C_{DW}}{\partial x^2} + \delta a_m \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad (1)$$

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

при краевых условиях I рода:

$$C_{DW}(x0) = 0, C_{DW}(0\tau) = 1, \\ T(x0) = T_n, T(0\tau) = T_D. \quad (3)$$

Первая стадия процесса экстракции протекает в неподвижном слое экстрагента и описывается уравнением массопроводности Фика:

$$\frac{\partial C_W}{\partial \tau} = a_m \cdot \frac{\partial^2 C_W}{\partial x^2}, \quad (4)$$

с начальным условием:

$$C_W(x0) = C_{WN}, \quad (5)$$

и с граничным условием:

$$\frac{\partial C_D}{\partial \tau} = a_m \cdot \frac{f}{C_D + M} \text{grad } C_W \Big|_{x=0}. \quad (6)$$

Коэффициент массопроводности определяется по уравнению:

$$a_m = \frac{\Delta m \cdot B}{F \cdot \Delta C \cdot \Delta \tau}. \quad (7)$$

Вторая стадия процесса экстракции протекает при непрерывной подаче в экстрактор свежего экстрагента со скоростью движения через слой бересты, равной:

$$W = \frac{4 \cdot Q_D}{\varepsilon \cdot \pi \cdot d^2}, \quad (8)$$

и описывается дифференциальным уравнением:

$$\frac{\partial C_W}{\partial h} = \frac{a_m}{W} \cdot \frac{\partial^2 C_W}{\partial x^2}. \quad (9)$$

Начальное условие $C_W(x0)$ определяется конечной концентрацией после I стадии экстракции. Локальное изменение содержания бетулина в экстрагенте на второй стадии протекает по времени и высоте слоя при применении идеальной модели вытеснения, и описывается дифференциальным уравнением:

$$\frac{\partial C_D}{\partial \tau} = W \frac{\partial C_D}{\partial h} + \frac{a_m \cdot f}{C_W + M} \cdot \frac{\partial C_W}{\partial x} \Big|_{x=0}. \quad (10)$$

В третьей главе представлено описание установок, методики извлечения экстракта и результаты моделирования. На рисунке 2 приведен экспериментальный комплекс.

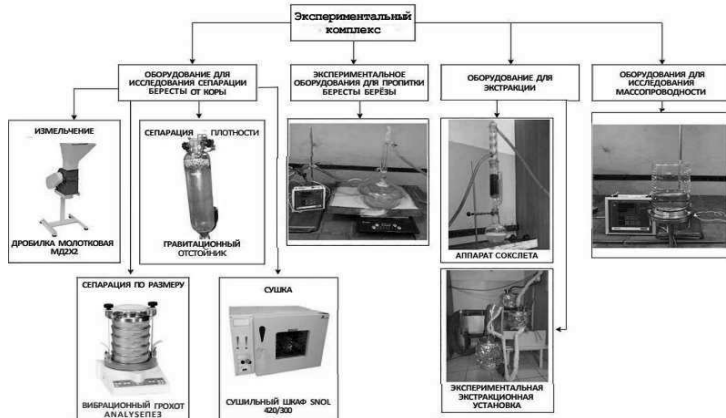


Рисунок 2 – Экспериментальный комплекс

На рисунке 3 представлены гистограммы распределения частиц, измельченных в молотковой дробилке при различной начальной влажности коры.

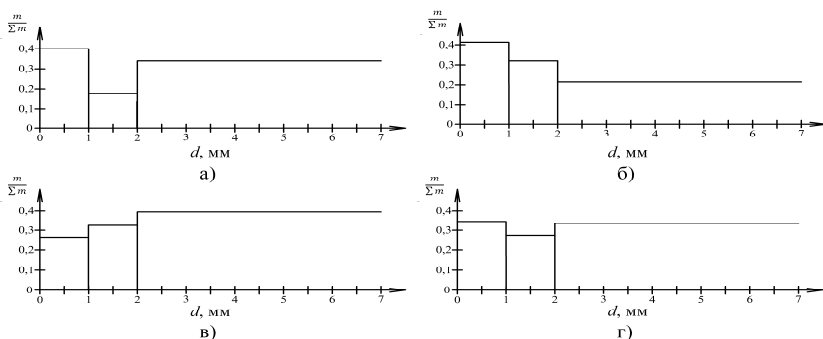


Рисунок 3 – Гистограмма распределения частиц коры, измельченных в молотковой дробилке при различной начальной влажности: а) 25 %; б) 35 %; в) 45 %; г) 55 %

Визуальный анализ частиц на ситах показывает, что частицы размером более 2 мм представляют практически чистую бересту, а частицы менее 1 мм представляют, в основном, луб коры с небольшой примесью бересты. Поэтому сепарируемость измельченных частиц целесообразно исследовать в диапазоне их размеров 1 – 2 мм.

Для этих целей измельченные частицы коры распределены на 3 фракции: крупная фракция – более 2 мм, средняя фракция 1 – 2 мм, мелкая фракция – менее 1 мм.

Обработкой полученных гистограмм построены зависимости выхода удельных фракций от начальной влажности коры (см. рис. 4).

Анализ показывает, что максимальная крупная фракция с бетулином достигается при влажности 42 – 52 %. При влажности ниже 42 % кора становится сухой и хрупкой, увеличивая мелкую фракцию и снижая выход бересты. Влажность выше 52 % делает кору слишком влажной, увеличивая вязкость и затрудняя отделение луба от крупных фракций.

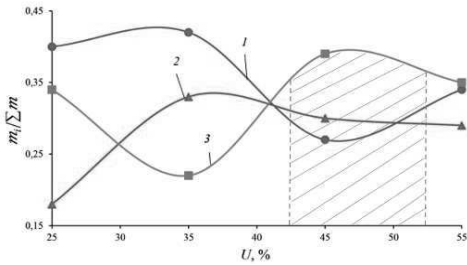


Рисунок 4 – Выход удельных фракций от начальной влажности коры: 1 – мелкая фракция ($d = 0 \div 1$); 2 – средняя фракция ($d = 1 \div 2$); 3 – крупная фракция ($d > 2$ мм)

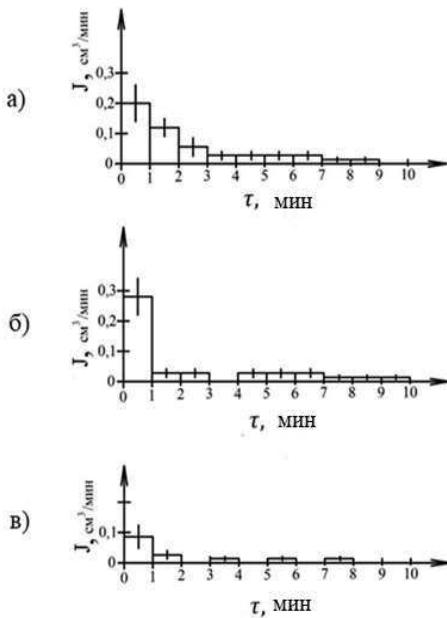


Рисунок 5 – Зависимость выхода удельных масс фракций от продолжительности измельчения в молотковой дробилке: 1 – мелкая фракция (< 1 мм); 2 – средняя; 3 – крупная (> 2 мм)

приводит к естественному перемешиванию. Объем всплывших частиц составляет около 30 %, что способствует эффективному отделению луба и повышает общую эффективность переработки.

При размере частиц более 2 мм (рис. 6, в) осаждение происходит с низкой интенсивностью из-за небольшого содержания луба; объем осажденного луба не превышает 4 %. Бересту из средней фракции следует выделить гравитационным осаждением в воде в течении 3 – 10 мин.

На рисунке 5 представлены кривые средних значений выхода удельных масс фракций коры с влажностью 42 – 55 %, измельченной в молотковой дробилке. Анализ показывает, что при продолжительности измельчения более 90 секунд увеличивается выход мелкой фракции, что приводит к потерям бересты. При измельчении менее 45 секунд в частицах более 5 мм сохраняется луб, что указывает на некачественную сепарацию. Оптимальная продолжительность измельчения при скорости вращения ротора 1500 об/мин составляет 45 – 90 секунд, что обеспечивает максимальный выход средней фракции.

На рисунке 6 приведены кинетические гистограммы интенсивности осаждения измельченной коры при различных размерах частиц. При размере частиц менее 1 мм (рис. 6, а) наблюдается постепенное снижение интенсивности осаждения луба в течение 9 минут из-за плохой впитываемости мелких частиц водой. Мелкие частицы имеют высокую адгезию между собой, что делает слой менее проницаемым.

При размере частиц 1 – 2 мм (рис. 6, б) происходит массовое осаждение луба в первую минуту благодаря быстрой смачиваемости и всплыванию бересты, что

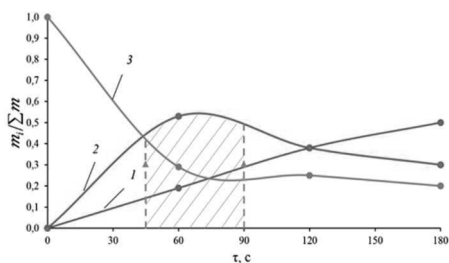


Рисунок 6 – Кинетические гистограммы интенсивности осаждения измельченной коры:

а) менее 1 мм; б) 1 – 2 мм; в) более 2 мм

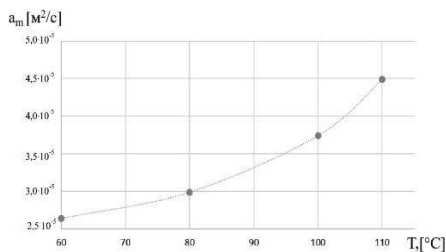


Рисунок 7 – Зависимость коэффициента массопроводности бересты березы от температуры при пропитке толуолом

вязкости растворителя и повышением кинетической энергии молекул, что способствует ускорению диффузии целевого компонента из пор бересты в объём экстрагента.

На рисунках 8 и 9 приведены результаты математического моделирования в виде динамических кривых локальной температуры бересты и локальной концентрации толуола в бересте при пропитке толуолом с температурой 110 °С. Выбор температуры обусловлен температурой кипения толуола, при которой достигается максимальная массопроводность и, соответственно, минимальное время пропитки бересты.

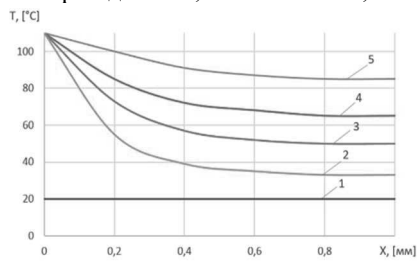


Рисунок 8 – Зависимости локальной температуры бересты березы от времени пропитки толуолом: 1 – $\tau = 0$ мин; 2 – $\tau = 0,5$ мин; 3 – $\tau = 1$ мин; 4 – $\tau = 3$ мин; 5 – $\tau = 10$ мин

В результате проведенных экспериментальных исследований и расчетов получена зависимость коэффициента массопроводности бересты березы от температуры при пропитке толуолом (рис. 7). Анализ кривой показывает, что с повышением температуры коэффициент массопроводности возрастает по параболическому закону. При температуре кипения толуола, равной 110 °С, наблюдается её максимальное значение. Обработкой экспериментальных данных получена расчётная зависимость коэффициента массопроводности от температуры для исследуемого диапазона температур:

$$a_m = 4,71 \cdot 10^{-5} + 6,5 \cdot 10^{-9} \cdot T^2 - 7,35 \cdot 10^{-7} \cdot T \quad (9)$$

Полученная зависимость отражает нелинейный характер изменения диффузионной способности бетулина в толуоле с ростом температуры. Увеличение коэффициента массопроводности обусловлено снижением

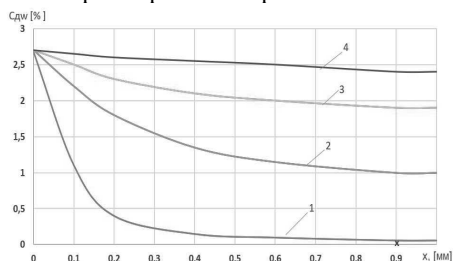


Рисунок 9 – Зависимости локальной концентрации толуола в бересте берёзы от времени пропитки: 1 – $\tau = 1$ мин; 2 – $\tau = 3$ мин; 3 – $\tau = 6$ мин; 4 – $\tau = 10$ мин

Анализ динамических кривых показывает, что через 10 мин температура в

центре бересты превышает $80\text{ }^{\circ}\text{C}$, разница локальных значений концентрации толуола на поверхности и в центре бересты не превышает 12% .

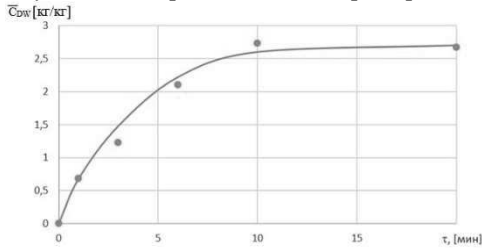


Рисунок 10 – Кинетическая кривая концентрации толуола в бересте при температуре пропитки $110\text{ }^{\circ}\text{C}$

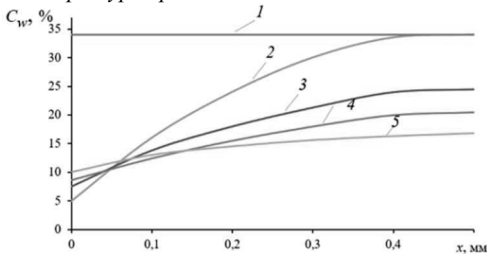


Рисунок 11 – Распределение бетулина в бересте по сечению частицы при продолжительности экстракции, мин: 1–0; 2–5; 3–10; 4–20; 5–90

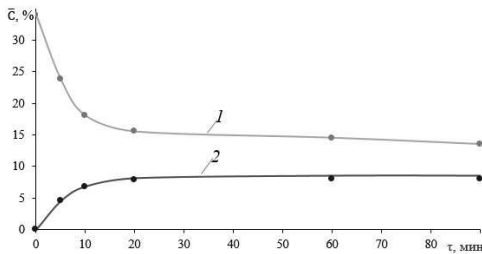


Рисунок 12 – Кинетические кривые средних значений: содержания бетулина в бересте (1) и в толуоле (2)

экстрагента – толуола экстрагируемым компонентом – бетулином.

На рисунке 12 представлены как расчетные, так и экспериментальные данные, касающиеся кинетики выделения бетулина из бересты в толуоле. Из анализа кривых видно, что за первые 20 мин из бересты уходит 23% бетулина, а в течение следующих 70 мин – лишь $2,5\%$, что говорит о резком падении скорости процесса экстракции на этом участке. Данный факт объясняется уменьшением градиента содержания бетулина по сечению бересты вследствие увеличения его концентрации на поверхности при $x = 0$ (см. рис. 11). Поэтому продолжительность 1-й стадии экстракции при гидромодуле $M = 2,5$

Представленные данные позволили получить расчетную кинетическую кривую средней концентрации толуола в бересте в процессе пропитки, представленную на рисунке 10. На рисунке точками показаны экспериментальные данные, линиями – расчетные данные. Расхождение между расчетными и экспериментальными данными не превышает 13% , что говорит об адекватности разработанной модели и подтверждает ее применимость в практических условиях.

Из анализа кривой видно, что интенсивная пропитка бересты ведется в течение 10 мин. Далее скорость пропитки бересты экстрагентом заметно снижается, что может быть связано с уменьшением доступных участков для диффузии экстрагента. Таким образом, процесс пропитки целесообразно ограничить 10-ю минутами, чтобы обеспечить максимальную эффективность.

На рисунке 11 приведены расчетные кривые распределения бетулина в частице бересты в различные моменты времени при экстрагировании без подачи в экстрактор свежего экстрагента. Анализ кривых показывает, что расчетное содержание бетулина по толщине частицы со временем падает, но на ее поверхности ($x = 0$) возрастает. Это объясняется насыщением

целесообразно ограничить 20-ю минутами.

На 2-й стадии экстракцию ведут с подачей свежего экстрагента, поэтому концентрация экстракта, в отличие от 1-й стадии, зависит не только от продолжительности, но и от текущей высоты аппарата, на которой протекает процесс экстрагирования.

На рис. 13 представлены динамические кривые содержания бетулина в бересте, полученные при подаче свежего экстрагента, рассчитанные на текущих высотах: $h_1 = 0$; $h_2 = 1/2H$; $h_3 = H$.

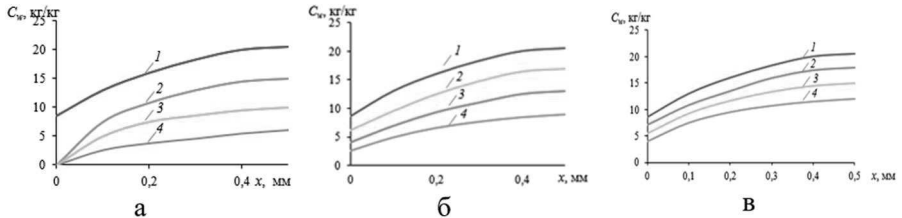


Рисунок 13 – Динамика локальных значений содержаний бетулина в бересте на разных высотах экстрактора, м: а) 0; б) $1/2H$; в) H (обозначения 1–4 соответствуют обозначениям 1–4 на рис. 11)

Анализ показывает, что локальные концентрации бетулина в исходной бересте (после 1-й стадии экстракции) одинаковы по высоте экстрактора. С увеличением текущей высоты экстрактора скорость удаления бетулина замедляется. Это связано с увеличением локальной концентрации бетулина в толуоле по высоте.

На рисунке 14 приведены экспериментальные и расчетные данные по изменению среднего содержания бетулина в бересте на разных высотах экстрактора (рис. 14, а) и по всему аппарату (рис. 14, б) с течением времени. Анализ кривых (рис. 14, а) показывает, что расхождение между расчетными и экспериментальными результатами по высоте аппарата возрастает с 15 до 20 %. Экспериментальные данные говорят о более низком содержании бетулина в бересте с увеличением высоты отбора проб. Это объясняется тем, что начальные условия выбраны без учета продолжительности 1-й стадии процесса экстракции до момента достижения свежим растворителем моделируемой высоты.

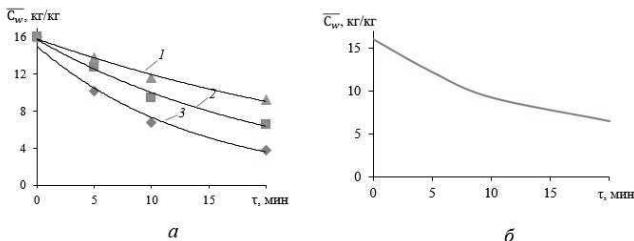


Рисунок 14 – Зависимость среднего содержания бетулина в бересте от продолжительности процесса экстракции: а) на высотах: 1 – 0; 2 – $1/2H$; 3 – H ; б) по всему аппарату

Общий анализ кривых на рисунках 13 и 14 свидетельствует о том, что в конце 2-й стадии экстракции концентрация бетулина в бересте разная по сечению частиц и по высоте экстрактора. Поэтому при организации процесса экстракции следует

предусмотреть 3-ю стадию – стабилизации содержания бетулина по высоте и по сечению частиц.

На рисунке 15 представлена принципиальная схема промышленной установки для извлечения бетулина.

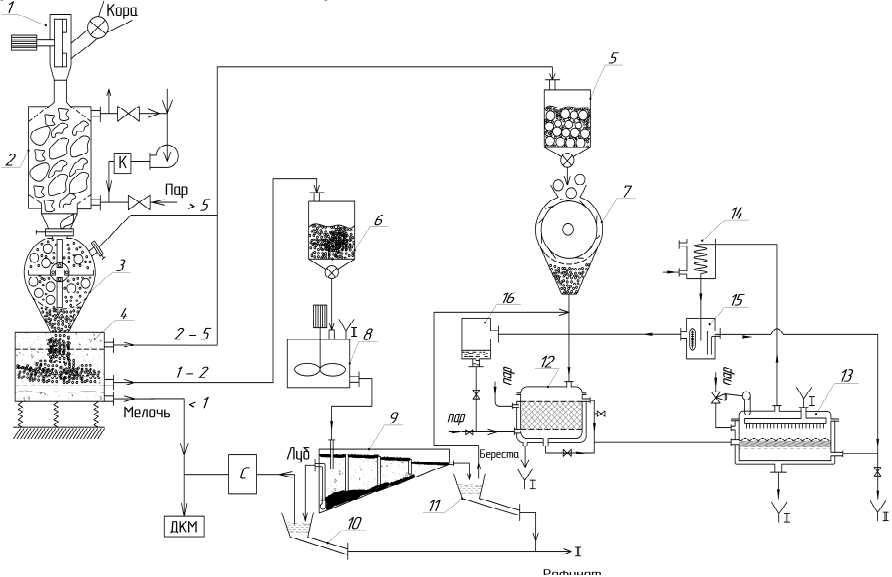


Рисунок 15 – Принципиальная схема получения бетулина из коры берёзы: 1 – рубительная машина; 2 – камера кондиционирования; 3 – молотковая дробилка; 4 – вибрационный сепаратор; 5, 6, 16 – буферные емкости; 7 – роторно-ножевая мельница; 8 – смеситель; 9 – гравитационный осадитель-флорентина; 10, 11 – фильтрующие аппараты; 12 – экстрактор; 13 – куб-испаритель; 14 – конденсатор; 15 – флорентина

Работа установки осуществляется следующим образом. Сырье измельчается в рубительной машине 1 и обрабатывается до заданной влажности 42 – 52 % в камере кондиционирования 2, далее измельчается в молотковой дробилке 3 для последующего разделения на три фракции в вибрационном сепараторе 4 на мелкую, среднюю и крупную фракции. Крупная фракция, состоящая в основном из бересты, смешивается с неизмельченным остатком из молотковой дробилки и аккумулируется в буферной емкости 5. Средняя фракция смешивается с водой в смесителе 8, сепарируется на бересту и луб гравитационным отстаиванием во флорентине 9 и фильтруется. Береста, аккумулированная в буферной емкости, после предварительного измельчения в роторно-ножевой мельнице до размеров 1 – 2 мм загружается в экстрактор вместе с берестой из фильтрующего аппарата 11. В экстрактор подается 9/10 объема толуола из буферной емкости 16 и начинается стадия пропитки, прогрева и экстракции бересты в течение 20 мин. На второй стадии экстракции сливают остатки 1/10 толуола из буферной емкости 16 и ведут процесс с непрерывной подачей экстрагента в течение 60 – 80 мин, экстракт вытесняется с верхнего патрубка экстрактора в куб-испаритель 13, где происходит непрерывное совместное испарение взаимно нерастворимых толуола и воды. С удалением толуола на поверхности воды аккумулируются кристаллы бетулина. Пары воды и толуола уходят в конденсатор, а затем сепарируются и возвращаются в рецикл из

флорентины 15. На третьей стадии перекрывают вентиль подачи свежего экстрагента и ведут экстракцию в течение 10 – 15 мин. После завершения слива экстракта в экстрактор 12 подается острый пар для извлечения остатков экстракта из рафинированной бересты. Из куба-испарителя 13 сливается вода, бетулин при этом остается на фильтрующей перегородке в мешковине. Бетулин проходит две стадии промывки: сначала кипящей водой в период регенерации растворителя, а затем орошением дистиллированной водой-конденсатом. Луб и рафинат бересты после сушки смешиваются с мелкой фракцией и подаются в экструдер для производства древесных композиционных материалов.

Ожидаемый экономический эффект от внедрения технологии извлечения бетулина составляет 75 млн руб./год.

В приложении представлены статистическая обработка данных, акт о принятии к внедрению, дипломы и сертификаты, патенты.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведен аналитический обзор методов извлечения бетулина из коры берёзы, который охватывает теоретические основы и технологии. В работе проанализированы современные методы экстракции биологически активных веществ из растительного сырья, включая как традиционные, так и инновационные подходы.

2. Исследованы физико-химические свойства луба и бересты берёзы, оказывающие влияние на процессы сепарации, такие как состав и структура материалов, их плотность, влажность, пористость, влагопоглощаемость компонентов и термодинамические параметры.

3. На основе результатов исследований физико-химических свойств луба и бересты и физического моделирования разработан способ сепарации коры берёзы на луб и бересту (патент № 2829457) с параметрами: начальная влажность коры 42 – 52 %; продолжительность измельчения коры в молотковой дробилке 45 – 90 с; выделение фракции измельченный коры размерами 1 – 2 мм; гравитационное осаждение выделенной фракции в воде в течение 3 – 10 мин.

4. Разработана математическая модель процесса пропитки и прогрева бересты берёзы и экстракции бетулина из бересты. Проведено моделирование процессов тепло- и массопереноса и определены ключевые режимные параметры для достижения максимальной эффективности этих процессов.

5. Определены оптимальные параметры процесса экстракции: температура 110 °С, модуль экстракции 1:2,5, размеры частиц бересты 1 – 2 мм, продолжительность первой стадии 20 минут, второй стадии 60 – 80 минут, третьей стадии 15 – 20 минут.

6. Разработана технология комплексной переработки коры берёзы, позволяющая повысить эффективность данного процесса (патент № 2801732), разработана инженерная методика расчета основных узлов промышленной установки для извлечения бетулина из коры берёзы. Основные технико-экономические показатели подтверждают целесообразность внедрения результатов работы для производства бетулина. Результаты исследования приняты к внедрению в производственный процесс на базе АО «Ласкрафт» (г. Казань).

Перспективы дальнейшей разработки темы связаны с применением полученных результатов в исследованиях по выделению различных биологически

активных веществ из отходов предприятий лесопромышленного комплекса.

Основные обозначения: C_{DW} , C_w , C_D – концентрация, соответственно, толуола в бересте, бетулина в бересте, бетулина в толуоле, кг/кг; a_m , a_t – коэффициент, соответственно, массопроводности и температуропроводности бересты, m^2/c ; x – координата локальной точки в частице бересты, м; δ – термоградиентный коэффициент; T – текущая температура толуола, $^{\circ}C$; B – толщина бересты, м; F – площадь поверхности образца бересты, m^2 ; ΔC – разность концентраций толуола на противоположных плоскостях бересты, кг/кг; Δt – период времени исследования, с; f – удельная поверхность, m^2/m^3 ; где Q_D – расход свежего экстрагента, кг/с; ε – порозность слоя; $M = \frac{m_r}{m_0}$ – модуль процесса экстракции.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

Статьи, опубликованные в рецензируемых научных журналах, включенных в Перечень ВАК Минобрнауки России:

1. Губернаторов В. В. Обзор методов извлечения бетулина из коры березы / Фахрутдинова Л. Р., Ахметова Д. А., Попов А. А. // Деревообрабатывающая промышленность. – 2022. – № 4. – С. 88-94.

2. Сафина А. В. Инженерная методика расчета установки извлечения бетулина из бересты березы /, Зиатдинова Д. Ф., Фахрутдинова Л. Р. [и др.] // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. – 2024. – № 1(397). – С. 195-207.

3. Сафин, Р. Г. Свойства коры березы, влияющие на сепарацию бересты от луба / Сафин Р. Г., Валеев К. В., Фахрутдинова Л. Р. // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. – 2025. – № 1(403). – С. 197-209.

4. Сафин Р. Г., Фахрутдинова Л. Р., Байгильдеева Е. И. Методика расчёта экстрактора в установке извлечения бетулина из бересты берёзы // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Материалы. Конструкции. Технологии. – 2025. – № 2 (34). – С. 47-57.

5. Зиатдинова Д. Ф. Моделирование процессов влагопоглощения древесины при изменении давления среды / Соловьева Е. Н., Фахрутдинова Л. Р. // Вестник технологического университета. – 2024. – Т. 27, № 1. – С. 25-29.

Статья в научном издании, сборнике научных трудов и материалов конференций, индексируемом в базах данных Scopus:

6. Safina A. Mathematical description of birch bark impregnation and heating process of birch bark with toluene / Nazipova L., Safin R. // E3S Web of Conferences: XVI International Scientific and Practical Conference “State and Prospects for the Development of Agribusiness - INTERAGROMASH 2023”, Rostov-on-Don, Russia, 01 – 05 марта 2023 года. Vol. 413. – Rostov-on-Don, Russia: EDP Sciences, 2023. – P. 06007.

Патенты:

7. Пат. 2801732 Рос. Федерация, МПК C07J 53/00, C07J 63/00, B01D 11/04. Способ получения бетулина: № 2023102213: заявл. 01.02.2023 : опубл. 15.08.2023 / Р. Г. Сафин, А. В. Сафина, Л. Р. Фахрутдинова – 9 с.

8. Пат. № 2829457 C1 Российская Федерация, МПК A61K 36/185, B01D 11/02, B27L 11/02. Способ переработки березовой коры : № 2024104843 : заявл. 27.02.2024 : опубл. 30.10.2024 / Сафин Р. Г., Назипова Л. Р., Валеев К. В. – 9 с.

Труды в прочих изданиях:

9. Ахметова Д. А. Распределение бетулина по сечению бересты / Ахметова Д. А., Фахрутдинов Р. Р., Фахрутдинова Л. Р. // Перспективы развития лесного комплекса:

Сборник научных трудов международной научно-практической конференции, Брянск, 18 – 19 декабря 2023 года. – С. 99-100.

10. Ахметова Д. А. Распределение локальной концентрации бетулина в бересте / Ахметова Д. А., Фахрутдинов Р. Р., Фахрутдинова Л. Р. // Перспективы развития лесного комплекса: Сборник научных трудов международной научно-практической конференции, Брянск, 18–19 декабря 2023 года. – С. 98-99.

11. Ахметова Д. А. Извлечение бетулина / Ахметова Д. А., Фахрутдинова Л. Р. // Перспективы развития лесного комплекса: Сборник научных трудов международной научно-практической конференции, Брянск, 18–19 декабря 2023 года. – С. 96-97.

12. Фахрутдинова Л. Р. Извлечение биологически активных веществ из древесины берёзы / Фахрутдинова Л. Р. // Актуальные проблемы лесного хозяйства и деревопереработки: Материалы Всероссийской научно-практической конференции, Казань, 24–28 апреля 2023 года. – С. 57-59.

13. Ахметова Д. А. Установка для определения массопроводности бересты берёзы / Ахметова Д. А., Фахрутдинов Р. Р., Фахрутдинова Л. Р. // Наука и технологии в лесопромышленном комплексе: сборник научных трудов международной научно-практической конференции, Брянск, 20–21 июля 2023 года. – С. 35-37.

14. Сафин Р. Г. Экстрагирование биологически активных веществ из древесного растительного сырья / Валеев К. В., Ахметханова Е. Н., Фахрутдинова Л. Р. // Актуальные проблемы лесного хозяйства и деревопереработки: Материалы Всероссийской научно-практической конференции, Казань, 24–28 апреля 2023 года. – С. 168-172.

15. Фахрутдинова Л. Р. Вакуумные технологии при извлечении бетулина из бересты / Фахрутдинова Л. Р., Сафин Р. Г. // Вакуумная техника и технология: Материалы Одиннадцатой Российской студенческой научно-технической конференции. – Казань, 2023. – С. 126.

16. Фахрутдинова Л. Р. Разработка установки и технологии сепарации бересты от коры берёзы / Фахрутдинова Л. Р., Локотунина М. Ш., Советников А. Н. // Интенсификация тепломассообменных процессов, промышленная безопасность и экология: Материалы VII Всероссийской студенческой научно-практической конференции, Казань, 28–30 мая 2024 года. – С. 112-116.

17. Ахметова Д. А. Березовая кора для экстракции / Д. А. Ахметова, Фахрутдинов Р. Р., Фахрутдинова Л. Р. // Перспективы развития лесного комплекса: Сборник научных трудов международной научно-практической конференции, Брянск, 18–19 декабря 2023 года. – С. 87-88.