

УДК 664.15:66.061

ИССЛЕДОВАНИЕ МАССООБМЕННЫХ И МАССОПРОВОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЦЕССА ЭКСТРАКЦИИ ХВОИ ПИХТЫ НАСЫЩЕННЫМ ВОДЯНЫМ ПАРОМ

© *А.В. Сафина*

*Казанский национальный исследовательский технологический
университет, ул. К. Маркса, 68, Казань, 420015, Россия, alb_saf@mail.ru*

В статье представлены результаты исследования массообменных и массопроводных характеристик процесса экстракции эфирного масла из хвои пихты насыщенным водяным паром. Отсутствие численных значений коэффициентов массоотдачи, отражающих интенсивность процесса во внешней фазе, и коэффициентов стесненной диффузии, учитывающих эффективность внутреннего переноса эфирного масла в матрице хвои, определили цель настоящего исследования. Проведены экспериментальные исследования кинетики выхода эфирного масла при различных температурах обработки. Установлено, что при температуре насыщенного пара 110–120 °С достигается наибольший выход эфирного масла, а при более высоких температурах ведение процесса нецелесообразно вследствие разложения структуры масла и изменения химического состава экстракта. Определены физические характеристики хвои пихты как объекта экстракции, имеющие значение для оценки массообменных процессов. Представлено математическое описание процесса на основе закона Фика при соответствующих краевых условиях, произведен расчет коэффициентов массоотдачи и стесненной диффузии и получены корреляционные зависимости указанных коэффициентов от температуры насыщенного пара. Посредством сравнения данных математического моделирования и результатов экспериментов установлена адекватность определения массообменных и массопроводных характеристик в диапазоне от 100 до 120 °С. Погрешность вычислений не превышает 10.7%. Результаты исследований являются основой для последующего математического моделирования и оптимизации режимных параметров процесса экстрагирования древесной зелени насыщенным водяным паром.

Ключевые слова: экстракция, хвоя пихты, насыщенный водяной пар, массоотдача, коэффициент стесненной диффузии.

Для цитирования: Сафина А.В. Исследование массообменных и массопроводных характеристик процесса экстракции хвои пихты насыщенным водяным паром // Химия растительного сырья. 2026. №1. Online First. <https://doi.org/10.14258/jcprm.20260117182>.

Введение

Комплексное использование лесных ресурсов, эффективная переработка отходов лесозаготовки и деревопереработки с получением новых продуктов с высокой добавленной стоимостью и поддержание экологического равновесия природных систем – это требования, которым должны удовлетворять современные производства лесного комплекса в условиях циркулярной экономики.

По данным Росстата, в России наблюдается рост объемов обработки древесины и производства изделий из дерева, что влечет за собой и рост объемов образующихся отходов [1]. При этом объектами промышленной переработки является лишь 65% деловой древесины, в то время как 30–50% древесной биомассы представляют собой отходы, являющиеся потенциальным сырьем для производства дополнительной продукции. Значительную долю биомассы лесосечных отходов на (22–25%) на лесозаготовке составляет древесная зелень, объемы которой ежегодно составляют до 30 млн т, в том числе 25 млн т – это древесная зелень хвойных пород. В еловых и пихтовых насаждениях средней полноты в среднем образуется до 60 кг хвойной лапки с 1 м³ заготовленной древесины, чуть меньше – в сосновых насаждениях.

Древесная зелень хвойных пород древесины обладает уникальным строением и химическим составом [2]. Хвоя имеет значительно меньшую пористость по сравнению с лиственными породами, а толстый восковой слой на поверхности хвои препятствует проникновению экстрагентов. Это ограничивает доступ растворителей к внутренним структурам и увеличивает общую продолжительность экстрагирования. При этом

сформировавшаяся хвоя не меняет свою анатомическую структуру во времени, так, размеры поперечного сечения хвои, ее длина, число смоляных каналов имеют низкий уровень хронологической изменчивости [3]. Таким образом, процессы экстрагирования хвои требуют учета специфических особенностей кинетики извлечения из нее ценных компонентов и знания ее массопроводных и структурных характеристик.

Многочисленные работы в области исследования кинетики экстрагирования хвойной зелени касаются вопросов выбора способа извлечения или вида растворителя, посвящены изучению влияния гидродинамических условий, биоценологических и прочих факторов на выход ценных компонентов [4–9]. Согласно теории диффузионного экстрагирования растительного сырья, перенос экстрактивных веществ осуществляется посредством молекулярной диффузии [10]. Основными подходами математического описания процессов извлечения ценных компонентов из растительного сырья является моделирование массопереноса в соответствии со вторым законом Фика, в котором важную роль как раз и играет коэффициент диффузии. Определение этого параметра обусловлено необходимостью расчета и анализа происходящих при экстракции массообменных процессов [11]. Исследованию и анализу коэффициентов диффузии при экстракции хвойной зелени посвящено немало работ, причем в основном исследования касаются таких пород как сосна, ель, лиственница, можжевельник [12–17].

Хвоя пихты имеет уникальные свойства благодаря содержанию большого количества микроэлементов, биофлавоноидов, поливитаминного комплекса, каротиноидов, фитонцидов, полифенольных соединений, тритерпеновых кислот, что обуславливает их противовоспалительное, антимикробное, гепатозащитное и регенерирующее действие [18]. Эфирное масло хвои пихты используется в качестве компонента в косметике, парфюмерии, придает аромат товарам и вкусоароматическую ценность.

Существующие научные работы по экстракции пихты в основном касаются исследований компонентного состава и качественных характеристик получаемого эфирного масла, направлены на поиск новых методов и способов экстрагирования древесной зелени пихты [19–22], в то время как данные по массообменным и диффузионным параметрам процесса экстракции хвои пихты малочисленны. Так, в работе [23] представлены результаты исследования процессов экстракции древесной зелени и коры хвойных пород Сибири. В частности, даны оценки коэффициентов диффузии летучих компонентов растительного сырья, включая монотерпеновые и сесквитерпеновые углеводороды, кислородсодержащие соединения, при экстракции жидким диоксидом углерода, водой и водно-этанольным раствором при температуре, не превышающей 65 °С.

Известно, что с ростом температуры интенсифицируются массообменные и диффузионные процессы. Для экстрагирования растительного материала с плотной структурой, а именно хвои, такие параметры как повышенная температура и, соответственно, давление в аппарате являются инструментами интенсификации процесса выхода экстрактивных веществ. Одним из методов извлечения эфирного масла из растительного сырья является экстрагирование с использованием насыщенного пара [24]. Преимущество этого способа обусловлено возможностью дистилляции летучих компонентов при температурах ниже температур кипения их отдельных составляющих, а также легкостью разделения при конденсации [25].

В работе [26] рассмотрен способ переработки древесной зелени пихты водяным паром при избыточном давлении среды, исследовано влияние биоценологических факторов на содержание и состав эфирного масла в хвое пихты, определен рациональный диапазон приведенного расхода пара на проведение процесса и предложено аппаратное оформление метода. Однако в процессах экстракции насыщенным паром эффективность процесса во внешней фазе зависит от ключевого параметра – коэффициента массоотдачи. При этом внутренние процессы миграции веществ из растительного сырья определяются величиной коэффициента диффузии. В работе отсутствуют исследования, связанные с определением численных значений указанных коэффициентов при экстракции эфирного масла из хвои пихты. Знание этих параметров позволило бы провести математическое моделирование динамики процесса извлечения эфирного масла в условиях избыточного давления среды и упростило бы понимание механизмов извлечения компонентов из растительного сырья с плотной структурой.

В связи с этим целью настоящей работы является исследование кинетики экстрагирования хвойной зелени пихты насыщенным водяным паром при избыточном давлении среды и определение численных значений массообменных и массопроводных характеристик процесса извлечения, необходимых для решения математической модели и последующего моделирования.

Экспериментальная часть

В качестве модельного материала использована хвоя пихты, собранная в первой декаде декабря на территории ГБУ «Сабинское лесничество» Республики Татарстан с 20 деревьев, из ветвей с различных ярусов кроны. Время сбора выбрано с учетом максимального содержания эфирного масла в сырье, поскольку в холодное время года в растениях происходит накопление летучих веществ, включая эфирные масла, которые действуют как адаптационный механизм защиты от низкой температуры.

Пробы формировались в навески по 250 г для определения максимального содержания эфирного масла и по 500 г для изучения кинетики его извлечения. Подготовка средних проб осуществлялась методом квартования [27].

Для анализа кинетических параметров процесса экстракции определялись физические характеристики исходного сырья. Длина хвоинок замерялась штангенциркулем, толщина и ширина хвоинки – микрометром гладким с величиной отсчета 0.01 мм, вес измерялся на высокоточных лабораторных весах Госметр ВЛТЭ-1100С с погрешностью измерения ± 0.01 г. В качестве выборки из навески отобрано 30 хвоинок для определения указанных параметров. Оценка вариабельности параметров осуществлялась согласно ГОСТ 8.051-81. Влажность сырья определялась согласно ГОСТ 24027.2-80. Плотность хвои определялась прямым измерением массы навески и объема хвоинок в пробе.

Определение максимального содержания эфирного масла проводилось по методу Гинзберга посредством перегонки хвои пихты с водяным паром в соответствии с нормативными требованиями ГОСТ 24027.2-80. Содержание эфирного масла в хвое определялось посредством вычисления объема полученного образца эфирного масла к массе навески сырья, скорректированной на процент усушки. Для повышения точности измерений проводилось 3-кратное проведение опыта и определялось среднее значение параметра.

Для исследования динамики выхода эфирного масла использована лабораторная установка, принципиальная схема которой представлена на рисунке 1. Установка включает: парогенератор 1 для формирования агента обработки; экстрактор 2; холодильник-конденсатор образующихся паров 3; куб-приемник конденсата 4; флорентины 5 и 6 для разделения смеси.

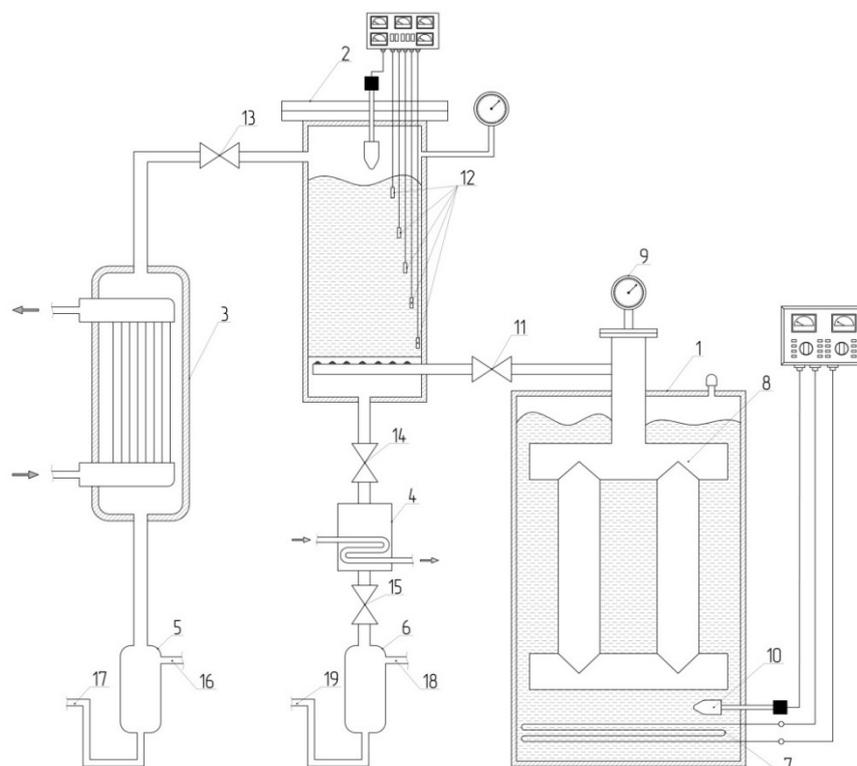


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки экстракции хвои пихты насыщенным водяным паром

В парогенераторе 1 посредством ТЭНа 7 нагревается высококипящая жидкость (этиленгликоль), которая, в свою очередь, нагревает герметичную емкость с водой 8. Давление в герметичной емкости контролируется с помощью манометра 9, а температура – терморпарой 10. Подача образующегося в герметичной емкости насыщенного водяного пара в экстрактор 2 осуществляется открытием игольчатого вентиля 11, в котором находится измельченная хвоя пихты.

В экстракторе со встроенными датчиками температуры 12 осуществляется процесс экстракции хвои при заданных параметрах пара. Необходимый расход пара устанавливается вентилем 11, а температура в экстракторе, соответствующая давлению пара, регулируется вентилем 13. В результате обработки насыщенным водяным паром из нагретой хвои извлекаются экстрактивные вещества, причем водорастворимые вещества диффундируют в пар, а эфирные масла уносятся паровым потоком.

В холодильнике-конденсаторе 3 осуществляется конденсация паров и далее образующаяся эмульсия поступает во флорентину 5, где происходит ее разделение на эфирное масло и раствор экстракта пихты. Также во время нагревания хвои в экстракторе 2 часть водяного пара конденсируется на стенках аппарата, поэтому для слива конденсата в куб-приемник 4 используется вентиль 14.

Посредством открытия вентиля 15 образующийся конденсат сливается во флорентину 6 для разделения эмульсии. Поскольку эфирное масло более легкое, оно остается на поверхности смеси и сливается через патрубки 16 и 18, а экстракт хвои сливается через патрубки 17 и 19 во флорентинах 5 и 6 соответственно.

Таким образом, при реализации данного способа происходят следующие процессы: нагревание хвои в среде насыщенного водяного пара; последующая диффузия экстрактивных веществ, в том числе эфирного масла, из внутренних слоев материала к поверхности раздела фаз; унос масла с потоками пара; конденсация паров и выделение масла.

Снятие кинетических параметров процесса экстрагирования осуществлялось при следующих условиях: масса навески хвои пихты – 500 г; вариация температуры – от 100 до 140 °С с шагом в 10 °С, скорость подачи пара – 0.06–0.1 м/с.

Длительность экспериментальных исследований составила 2.5 ч с целью достижения максимального выхода веществ при наиболее низкой температуре процесса.

Определение коэффициентов массоотдачи и диффузии эфирного масла при экстрагировании хвои пихты в среде насыщенного водяного пара основывается на математическом описании кинетики выхода эфирного масла и результатах экспериментальных исследований.

Математическое описание процесса экстракции базируется на основных положениях теории массообмена, гетерогенного равновесия и диффузии. Изменение концентрации извлекаемых веществ в экстрагенте для случая одномерной нестационарной диффузии в соответствии со вторым законом Фика описывается уравнением:

$$\frac{\partial C_n}{\partial \tau} = D_{смеси} \frac{\partial^2 C_n}{\partial x^2} + \frac{\partial j}{\partial x}, \quad (1)$$

и учитывает перенос веществ по системе пор и капилляров посредством стесненной молекулярной диффузии, а также приток экстрактивных веществ через проницаемые стенки клеток (мембраны) и пор при наличии градиента потенциала.

При экстракции насыщенным водяным паром нагретые водорастворимые экстрактивные вещества диффундируют из поверхностных слоев в пар, а нерастворимое эфирное масло испаряется и уносится паровым потоком. Таким образом, при повышенных давлении и температуре среды имеет место два пути уноса: унос растворенных экстрактивных веществ вследствие растворяющей способности пара и капельный унос путем «сдува» нерастворяющегося масла. В условиях повышенного давления увеличивается плотность пара, что способствует повышению эффективности «уноса» выделяемых компонентов. Возникающий градиент концентрации обуславливает массоперенос экстрактивных веществ к поверхности частицы, откуда они уносятся последующими порциями пара.

Поскольку эфирное масло не смешивается с растворителем, то изменением концентрации вследствие миграции через клеточные стенки и поры пренебрегаем. В этом случае дифференциальное уравнение (1) для исследуемого способа экстракции примет вид:

$$\frac{\partial C_{эм}}{\partial \tau} = D_{стесн} \frac{\partial^2 C_{эм}}{\partial x^2}, \quad (2)$$

где $D_{стесн}$ – коэффициент стесненной диффузии, учитывающий трудность миграции веществ по системе пор и капилляров растительной матрицы, м²/с.

Начальные условия процесса определяются исходной концентрацией эфирного масла в сырье:

$$C_{эм}(x; \tau = 0) = C_{эм.нач}. \quad (3)$$

Изменение концентрации на границе материала описывается уравнением:

$$\frac{\partial C_{эм}}{\partial \tau}(x = 0; \tau) = \Delta j \cdot \frac{f'_{хв}}{V_{хв}}, \quad (4)$$

где $f'_{хв}$ – площадь поверхность хвоинки, м²; $V_{хв}$ – объем хвоинки, м³.

Движущей силой процесса экстракции является разность потоков экстрактивных веществ, подводимых изнутри материала и отводимых с поверхности посредством массоотдачи:

$$\Delta j = j_{вн} - j_{внеш}. \quad (5)$$

Поток эфирного масла из центра хвоинки к ее поверхности описывается уравнением:

$$j_{вн} = D_{стесн} \cdot \frac{\partial C}{\partial x}. \quad (6)$$

Поток уносимого насыщенным паром эфирного масла описывается уравнением массоотдачи:

$$j_{внеш} = \beta \cdot (C_{эм.лов} - C_{эм.пар}), \quad (7)$$

где β – коэффициент массоотдачи, м/с; $C_{эм.лов}$ и $C_{эм.пар}$ – концентрация экстрактивных веществ на поверхности частицы и в насыщенном паре соответственно.

Для решения уравнения (2) при краевых условиях (3)–(7) требуется установление значений таких параметров, как коэффициент массоотдачи и коэффициент диффузии эфирного масла, а также изучение кинетики его извлечения из хвои пихты насыщенным водяным паром.

Обсуждение результатов

В результате проведенных исследований установлены следующие параметры анализируемого сырья:

– максимальное содержание эфирного масла в образцах хвои пихты – 2.78% а.с.с., что согласуется с данными других исследователей [20, 21];

– средние линейные размеры хвоинок пихты: длина – 23.31 мм; ширина – 1.13 мм; толщина – 0.211 мм;

– общая площадь поверхности хвои в навеске $F_{общ} = 10.719$ м²;

– средняя плотность хвои – 703.5 кг/м³;

– влажность исходного сырья составила 103%.

При определении линейных размеров хвои пихты коэффициент вариации (V_o) составил менее 21%, что говорит об однородности полученных данных. При этом коэффициент вариации при измерении толщины хвоинок имеет низкую изменчивость (9.4%), а средняя изменчивость для длины (16.47%) и ширины (20.18%) образцов характерна для природных объектов и связана с различными условиями роста хвоинок.

Посредством отбора проб масла через определенные интервалы времени определена динамика выхода эфирного масла при различных температурах процесса обработки, представленная на рисунке 2. Анализируя характер кинетических кривых выхода масла, установили, что все они имеют вид, близкий к параболическому.

При этом на каждой кинетической кривой можно выделить 2 участка: прямолинейный, соответствующий наибольшей скорости выхода эфирного масла, и параболический с падающей скоростью процесса. Высокая скорость экстракции наблюдается в первые 20 мин экстракции. Далее наблюдается снижение выхода эфирного масла, причем динамика выхода эфирного масла зависит от температуры обработки.

Как показывает анализ, наилучшие результаты выхода масла достигаются при температурах насыщенного пара 110, 120 и 130 °С. Наименьшее количество масла извлекается при 100 и 140 °С. Низкая эффективность экстракции хвойной зелени при 100 °С согласуется с практическими данными по извлечению эфирного масла водяным паром при атмосферном давлении [21, 28]. Снижение выхода эфирного масла при 140 °С объясняется изменением химического состава экстракта и разложением структуры масла, поэтому проведение процесса экстракции хвои нецелесообразно при высоких температурах.

Полученные экспериментальные данные по концентрациям извлеченных веществ в экстракте по уравнению материального баланса пересчитаны в их концентрации в твердой фазе. Изменение средней концентрации эфирного масла в частице с течением времени для различных температурных режимов представлено на рисунке 3.

Как видно из характера кривых, в начальный период времени изменение концентрации эфирного масла в сырье идет с высокой скоростью и можно предположить равенство внутренних и внешних потоков на границе раздела фаз. Поэтому при равенстве потоков уравнения (6) и (7) можно представить в виде:

$$j_{вн} = j_{внеш} = \beta \cdot (C_{эм.пов} - C_{эм.пар}) \quad (8)$$

Поскольку масло не смешивается с паром, то $C_{эм.пар}=0$, тогда из уравнения (8) находим коэффициент массоотдачи:

$$\beta = \frac{j_{вн}}{C_{эм.пов}} \quad (9)$$

Поток извлекаемого компонента представляет собой массу масла, прошедшего через единицу поверхности в единицу времени, и определяется как:

$$j_{вн} = \frac{m_{эм}}{F_{общ} \cdot \tau} \quad (10)$$

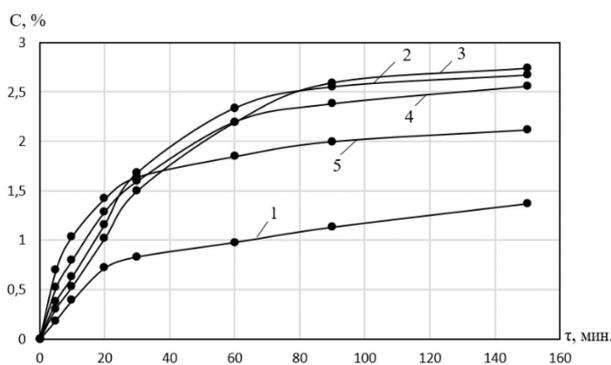


Рис. 2. Кинетика выхода эфирного масла при различных температурах насыщенного водяного пара: 1 – T=100 °С; 2 – T=110 °С; 3 – T=120 °С; 4 – T = 130 °С; 5 –T=140 °С

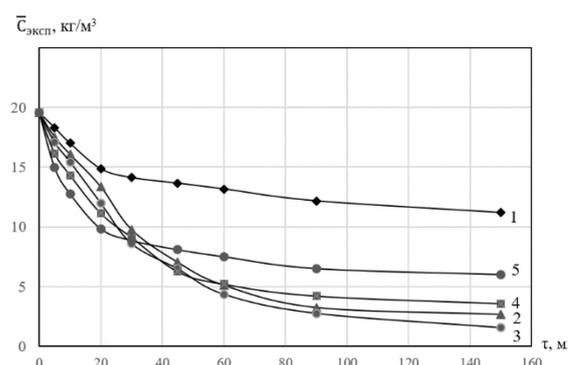


Рис. 3. Динамика изменения средней концентрации эфирного масла в частице с течением времени при различных температурах обработки: 1 – T=100 °С; 2 – T=110 °С; 3 – T=120 °С; 4 – T = 130 °С; 5 – T=140 °С

Масса эфирного масла, извлекаемого в единицу времени, определяется из графика (рис. 3) для соответствующей температуры процесса.

Площадь поверхности всех хвоинок определяется на основе средних линейных размеров одной хвоинки и количества иголок в массе навески (N).

$$F_{\text{общ}} = f'_{\text{хв}} \cdot N \quad (11)$$

В начальный период экстракции концентрацию масла на поверхности частиц считаем равной максимально возможному значению.

На основе полученных экспериментальных данных по уравнению (9) рассчитаны коэффициенты массоотдачи процесса экстрагирования хвои пихты в среде насыщенного водяного пара, значения которых для различных температурных режимов представлены на рисунке 4. На графике точками представлены результаты исследований, а пунктиром – логарифмическая линия тренда, отображающая характер изменения полученных показателей.

Как следует из графика, изменение температуры влияет на коэффициент массоотдачи. С ростом температуры увеличивается летучесть целевых компонентов и снижается вязкость жидкой фазы, что приводит к увеличению рассматриваемого коэффициента.

На основе полученных данных получена эмпирическая формула, позволяющая определять значение коэффициента массоотдачи при различных температурах насыщенного пара в процессе экстракции хвои пихты:

$$\beta = 10^{-7} \ln(T) - 8 \cdot 10^{-7}. \quad (12)$$

Коэффициент детерминации составил $R^2 = 0.9885$, что указывает на высокую степень сходимости математического описания и экспериментальных данных.

Анализируя значения полученных коэффициентов массоотдачи, можно заметить, что в случае экстракции хвои пихты они достаточно малы, что характерно для процессов извлечения из твердых материалов.

При определении β в расчетах исключены результаты исследований при температуре насыщенного пара 140 °С, поскольку, как уже было сказано, при данной температуре падает выход эфирного масла и ведение процесса нецелесообразно.

Далее произведены расчеты коэффициента внутренней (стесненной) диффузии.

Поскольку в начальный период времени наблюдается линейное изменение среднего значения концентрации целевого компонента в частице по времени (рис. 3), то при равномерном начальном распределении целевого вещества в частице можно говорить, что происходит линейное изменение концентрации вещества по конкретному слою. Тогда в первом приближении можно принять, что изменение концентрации в центральных слоях не происходит, а изменение концентрации отдельных слоев частицы прямопропорционально удаленности слоев от центра.

Для симметричной частицы концентрацию на ее поверхности можно представить как:

$$C_{\text{пов}} = 2\bar{C} - C_{\text{эм.центр}}. \quad (13)$$

Тогда уравнение (6) можно представить в виде:

$$j_{\text{вн}} = D_{\text{стесн}} \cdot \frac{\Delta C}{\Delta x} = D_{\text{стесн}} \cdot \frac{(C_{\text{эм.центр}} - C_{\text{эм.пов}})}{\Delta x} = D_{\text{стесн}} \cdot \frac{(C_{\text{эм.центр}} - 2\bar{C} + C_{\text{эм.центр}})}{\Delta x}, \quad (14)$$

где ΔC – движущая сила процесса, определяемая как разность концентраций эфирного масла в центре частицы и на ее поверхности, кг/м³; Δx – половина толщины частицы, м.

Тогда:

$$D_{\text{стесн}} = \frac{j_{\text{вн}} \cdot \Delta x}{2 \cdot (C_{\text{эм.центр}} - \bar{C})}. \quad (15)$$

На основе экспериментальных данных по данному уравнению рассчитаны коэффициенты стесненной диффузии для процесса экстракции при температурах насыщенного пара 100, 110, 120 и 130 °С. График соответствующих зависимостей представлен на рисунке 5, что позволило получить корреляционную зависимость коэффициента стесненной диффузии от температуры насыщенного пара (коэффициент детерминации $R^2 = 0.9877$):

$$D_{стесн} = 5.366 \ln(T) - 30.827. \quad (16)$$

Из анализа динамики изменения величины коэффициента стесненной диффузии следует, что с ростом температуры обработки увеличивается и данный показатель. Хвоя пихты имеет плотную клеточную структуру, поэтому воздействие пара при высоких температурах разрушает клеточные стенки и способствует высвобождению масла.

Полученные данные по коэффициентам массоотдачи в процессе экстрагирования хвои пихты насыщенным водяным паром и коэффициентам стесненной диффузии эфирного масла позволили осуществить моделирование процесса посредством решения системы уравнений (2)–(7) методом конечных разностей с написанием программного кода на языке Python. На рисунке 6 представлены расчетные кривые и экспериментальные данные по изменению концентрации эфирного масла в хвое пихты с течением времени для температуры насыщенного пара 100, 110 и 120 °С.

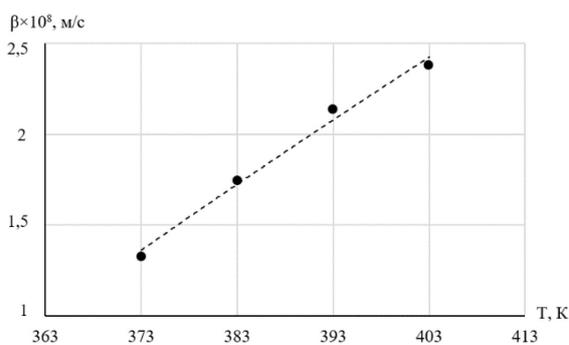


Рис. 4. Зависимость коэффициентов массоотдачи от температуры насыщенного водяного пара при экстрагировании хвои пихты

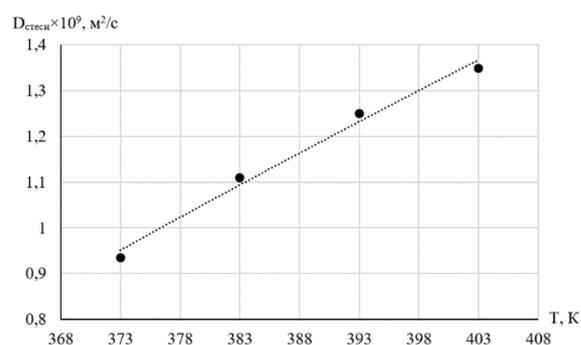
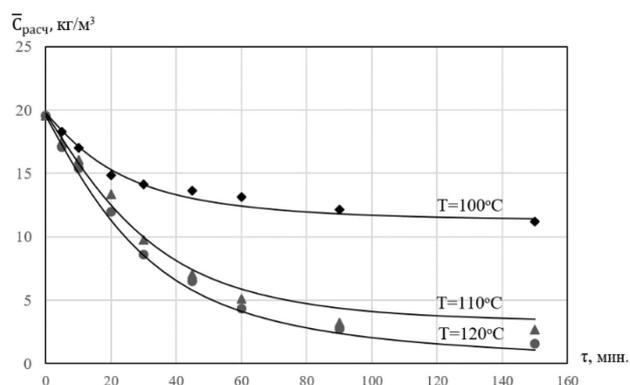


Рис. 5. Зависимость коэффициента стесненной диффузии от температуры при экстракции хвои пихты насыщенным водяным паром

Рис. 6. Сопоставление результатов физического и математического моделирования кинетики процесса экстракции хвои пихты насыщенным водяным паром



Поскольку при температуре выше 120 °С начинается химическое разложение эфирного масла, что снижает его выход (как видно на рисунке 3), данный процесс не учитывается в математической модели физического процесса экстракции. В этой связи полученные массообменные и массопроводные характеристики адекватны в диапазоне от 100 до 120 °С.

На графике сплошными линиями отображены расчетные данные, а точками – результаты экспериментов. Сопоставление данных, расхождение между которыми не превышает 10.7%, свидетельствует об адекватности математического описания процесса экстрагирования древесной зелени насыщенным водяным паром.

Полученные данные являются основой для математического моделирования исследуемой технологии экстрагирования с целью выбора оптимальных режимных параметров и аппаратурного оформления процесса.

Выводы

Массообменные и массопроводные коэффициенты являются ключевыми параметрами, которые позволяют количественно описать, оптимизировать и управлять процессом получения эфирного масла посредством экстракции хвои пихты насыщенным водяным паром. Экспериментальные исследования кинетики выхода эфирного масла при различных температурах обработки с учетом физических параметров хвои (средние линейные размеры, средняя плотность, влажность и площадь поверхности контакта взаимодействующих фаз) позволили определить численные значения массообменных и массопроводных характеристик процесса экстракции древесной зелени пихты в среде насыщенного пара. В результате исследований установлены оптимальные значения температур насыщенного пара (110–120 °С), обеспечивающие максимальный выход эфирного масла, и получены корреляционные зависимости изменения исследуемых коэффициентов от температуры обработки. Полученные результаты являются основой для дальнейших исследований процесса экстракции хвойной зелени насыщенным водяным паром.

Финансирование

Работа выполнена за счет гранта, предоставленного Академией наук Республики Татарстан образовательным организациям высшего образования, научным и иным организациям на поддержку планов развития кадрового потенциала в части стимулирования их научных и научно-педагогических работников к защите докторских диссертаций и выполнению научно-исследовательских работ (Соглашение №10/2025-ПД-КНИТУ от 22.12.2025).

Конфликт интересов

Автор данной работы заявляет, что у нее нет конфликта интересов.

Открытый доступ

Эта статья распространяется на условиях международной лицензии Creative Commons Attribution 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), которая разрешает неограниченное использование, распространение и воспроизведение на любом носителе при условии, что вы дадите соответствующие ссылки на автора(ов) и источник и предоставите ссылку на Лицензию Creative Commons и укажете, были ли внесены изменения.

Список литературы

1. Хаертдинова А.А., Сафина А.В. Корреляционный анализ факторов, определяющих эффективность переработки древесных отходов // Международный научно-исследовательский журнал. 2024. №8 (146). 110. <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.146.53>.
2. Поляков Н.А., Дубинская В.А., Ефремов А.А., Ефремов Е.А. Биологическая активность эфирного масла древесной зелени сосны сибирской (*Pinus sibirica*) и его отдельных фракций с использованием тест-систем in vitro // Вопросы биологической, медицинской и фармацевтической химии. 2013. Т. 11, №12. С. 4–8.
3. Видякин А.И., Лебедев А.Г. Эндогенная и временная изменчивость числа смоляных каналов в хвое деревьев сосны обыкновенной // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2013. Т. 15, №3(1). С. 371–375.
4. Ефремов А.А., Зыкова И.Д. Компонентный состав эфирных масел хвойных растений Сибири: монография. Красноярск, 2013. 130 с.
5. Исмаилов Л.Ю., Сафина А.В. Обзор исследований в области интенсификации процессов экстракции растительного сырья // Деревообрабатывающая промышленность. 2021. №2. С. 85–101.
6. Охрименко О.В., Головлев Д.А., Рыжкова И.П. Исследование процесса экстракции сухих веществ из хвои сосны. Часть 1. Исследование влияния степени измельчения хвои сосны и экспозиции на интенсивность экстракции // Молочнохозяйственный вестник. 2011. №2. С. 47–51.
7. Сафина А.В., Зиятдинова Д.Ф., Сафин Р.Г., Валеев К.В., Арсланова Г.Р. Исследование влияния концентрации водно-этанольного раствора на выход биологически активных веществ из древесины лиственницы // Деревообрабатывающая промышленность. 2020. №4. С. 31–38.
8. Титов Е.В. Влияние местоположения на рост и состояние внутривидовых гибридов кедра сибирского в центральной лесостепи // Хвойные бореальной зоны. 2024. Т. 42, №1. С. 31–35. <https://doi.org/10.53374/1993-0135-2024-1-31-35>.

9. Транчук Н.В., Рошин В.И. Групповой состав экстрактов из кроны лиственницы сибирской летнего и осеннего сборов // Химия растительного сырья. 2015. №4. С. 63–70.
10. Рудобашта С.П., Кошелева М.К., Карташов Э.М. Математическое моделирование процесса экстрагирования целевого компонента из тел пластинчатой формы в полунепрерывном процессе // Теоретические основы химической технологии. 2018. Т. 52, №1. С. 53–59. <https://doi.org/10.7868/S0040357118010062>.
11. Safina A.V., Valeev K.V., Safin R.G. Mathematical description of the process of extraction of biologically active substances from larch wood // AIP Conference Proceedings. 2022. Vol. 2767. 020026. <https://doi.org/10.1063/5.0127439>.
12. Малков Ю.А., Остроухова Л.А., Бабкин В.А. Применение метода математического моделирования для разработки технологии извлечения экстрактивных веществ из древесины лиственницы // Химия растительного сырья. 2002. №2. С. 133–138.
13. Матвеев Е.В., Величко Н.А., Ушанов С.В., Аёшина Е.Н. Определение зависимости коэффициента диффузии и выхода экстрактивных веществ при экстракции древесной зелени *Juniperus sibirica* Burgsd этиловым спиртом различной концентрации // Вестник КрасГАУ. 2014. №6. С. 260–263.
14. Невзоров В.Н., Кох Ж.А., Мацкевич И.В., Холопов В.Н. Совершенствование технологии и оборудования производства кедрового масла // Хвойные бореальной зоны. 2022. Т. 40, №5. С. 444–449. <https://doi.org/10.53374/1993-0135-2022-5-444-449>.
15. Шудегова М.Д., Краснова Ю.В., Бутова С.Н. Определение оптимальных параметров экстракции веществ из коры сосны // Universum: технические науки: электронный научный журнал. 2022. №6(99). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/13971>.
16. Safina A.V., Valeev K.V., Ziatdinova D.F. Method for determining the mass conductivity coefficient of wood when extracting biologically active substances from it // J. Phys.: Conf. Ser. 2022. Vol. 2373. 042004. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2373/4/042004>.
17. Дамянов Д.А., Стоянова А.С. Коэффициенты молекулярной диффузии некоторых эфирных масел // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. 2000. №2-3 (255-256). С. 24–25.
18. Степень Р.А., Воронин В.М., Соболева С.В. Биологически активные вещества древесной зелени пихты и область их применения // Хвойные бореальной зоны. 2017. Т. 35, №3–4. С. 120–124.
19. Сотникова Л.В., Созинов С.А., Горюнова П.В., Ходыкина В.В., Иванова Н.В. Методические аспекты хромато-масс-спектрометрического анализа эфирного масла пихты сибирской // Сорбционные и хроматографические процессы. 2017. Т. 17, №6. С. 970–978.
20. Ушанова В.М. Переработка древесной зелени и коры пихты сибирской с получением биологически активных продуктов // Хвойные бореальной зоны. 2013. Т. 31, №1-2. С. 138–142.
21. Панькив О.Г., Демина Л.Н., Паршикова В.Н., Степень Р.А. Эффективность переработки древесной зелени пихты различными методами // Фундаментальные исследования. 2012. №1. С. 168–171.
22. Буркова В.Н., Сергун В.П., Иванов А.А. Химический состав и фармакологическая активность водного экстракта пихты сибирской (*Abies sibirica* L.) // Химия растительного сырья. 2022. №2. С. 19–34. <https://doi.org/10.14258/jcprm.20220210469>.
23. Ушанова В.М. Комплексная переработка древесной зелени и коры пихты сибирской с получением продуктов, обладающих биологической активностью: автореферат дис. ... докт. техн. наук. Красноярск, 2012. 34 с.
24. Yadav A., Chikate S., Vilat R., Suryawanshi Mahesh., Kumbhar G., Student U. Review on steam distillation: a promising technology for extraction of essential oil // Int. J. Adv. Eng. Res. Dev. 2017. Vol. 4(4).
25. Ефремов А.А. Метод исчерпывающей гидропародистилляции при получении эфирных масел дикорастущих растений // Успехи современного естествознания. 2013. №7. С. 88–94.
26. Сафин Р.Р., Воронин А.Е., Назипова Ф.В., Ахунова Л.В. Повышение эффективности экстракции эфирных масел водяным паром // Вестник Технологического университета. 2015. Т. 18, №8. С. 151–154.
27. ОФС.1.1.0005. Отбор проб лекарственного растительного сырья и лекарственных растительных препаратов // Государственная фармакопея Российской Федерации XV изд. М., 2023.
28. Панькив О.Г., Мирошниченко В.В., Паршикова В.Н., Степень Р.А. Выход и состав выделяемого различными способами пихтового масла // Химия растительного сырья. 2009. №3. С. 95–98.

Поступила в редакцию 7 апреля 2025 г.

После переработки 29 апреля 2025 г.

Принята к публикации 10 сентября 2025 г.

Safina A.V. INVESTIGATION OF MASS-EXCHANGE AND MASS-CONDUCTION CHARACTERISTICS OF THE PROCESS OF EXTRACTION OF FIR NEEDLES WITH SATURATED WATER VAPOR

Kazan National Research Technological University, st. K. Marxa, 68, Kazan, 420015, Russia, alb_saf@mail.ru

The article presents the results of the study of mass-transfer and mass-conductivity characteristics of the process of essential oil extraction from fir needles with saturated water vapor. The absence of numerical values of mass-transfer coefficients reflecting the intensity of the process in the external phase and coefficient of constrained diffusion taking into account the efficiency of internal transfer of essential oil in the needle matrix determined the purpose of this study. Experimental studies of the kinetics of the yield of essential oil at different processing temperatures were carried out. It was found that at a saturated steam temperature of 110–120 °C, the highest yield of essential oil is achieved, and at higher temperatures, the process is not advisable due to the decomposition of the oil structure and changes in the chemical composition of the extract. The physical characteristics of fir needles as an object of extraction, which are important for assessing mass-transfer processes, are determined. The mathematical description of the process is presented based on Fick's law under the corresponding boundary conditions, the mass transfer coefficients and constrained diffusion are calculated, and the correlation dependences of the said coefficients on the saturated steam temperature are obtained. By comparing the data of mathematical modeling and the experimental results, the adequacy of determining the mass transfer and mass conductivity characteristics in the range from 100 to 120 °C is established. The calculation error does not exceed 10.7%. The research results are the basis for subsequent mathematical modeling and optimization of the process parameters of wood greenery extraction with saturated water vapor.

Keywords: extraction, fir needles, saturated water vapor, mass transfer, coefficient of constrained diffusion.

For citing: Safina A.V. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya*, 2026, no. 1, Online First. (in Russ.). <https://doi.org/10.14258/jcprm.20260117182>.

References

1. Khayertdinova A.A., Safina A.V. *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal*, 2024, no. 8 (146), 110. <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.146.53>. (in Russ.).
2. Polyakov N.A., Dubinskaya V.A., Yefremov A.A., Yefremov Ye.A. *Voprosy biologicheskoy, meditsinskoy i farmatsevticheskoy khimii*, 2013, vol. 11, no. 12, pp. 4–8. (in Russ.).
3. Vidyakin A.I., Lebedev A.G. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk*, 2013, vol. 15, no. 3(1), pp. 371–375. (in Russ.).
4. Efremov A.A., Zykova I.D. *Komponentnyy sostav efirnykh masel khvoynykh rasteniy Sibiri: monografiya*. [Component composition of essential oils of Siberian conifers: monograph]. Krasnoyarsk, 2013, 130 p. (in Russ.).
5. Ismailov L.Yu., Safina A.V. *Derevoobrabatvyayushchaya promyshlennost'*, 2021, no. 2, pp. 85–101. (in Russ.).
6. Okhrimenko O.V., Golovlev D.A., Ryzhkova I.P. *Molochnokhozyaystvennyy vestnik*, 2011, no. 2, pp. 47–51. (in Russ.).
7. Safina A.V., Ziatdinova D.F., Safin R.G., Valeev K.V., Arslanova G.R. *Derevoobrabatvyayushchaya promyshlennost'*, 2020, no. 4, pp. 31–38. (in Russ.).
8. Titov Ye.V. *Khvoynnye boreal'noy zony*, 2024, vol. 42, no. 1, pp. 31–35. <https://doi.org/10.53374/1993-0135-2024-1-31-35>. (in Russ.).
9. Tranchuk N.V., Roshchin V.I. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*, 2015, no. 4, pp. 63–70. (in Russ.).
10. Rudobashta S.P., Kosheleva M.K., Kartashov E.M. *Teoreticheskiye osnovy khimicheskoy tekhnologii*, 2018, vol. 52, no. 1, pp. 53–59. <https://doi.org/10.7868/S0040357118010062>. (in Russ.).
11. Safina A.V., Valeev K.V., Safin R.G. *AIP Conference Proceedings*, 2022, vol. 2767, 020026. <https://doi.org/10.1063/5.0127439>.
12. Malkov Yu.A., Ostroukhova L.A., Babkin V.A. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*, 2002, no. 2, pp. 133–138. (in Russ.).
13. Matveyenko Ye.V., Velichko N.A., Ushanov S.V., Ayoshina Ye.N. *Vestnik KrasGAU*, 2014, no. 6, pp. 260–263. (in Russ.).
14. Nevzorov V.N., Kokh Zh.A., Matskevich I.V., Kholopov V.N. *Khvoynnye boreal'noy zony*, 2022, vol. 40, no. 5, pp. 444–449. <https://doi.org/10.53374/1993-0135-2022-5-444-449>. (in Russ.).
15. Shudegova M.D., Krasnova Yu.V., Butova S.N. *Universum: tekhnicheskkiye nauki: elektronnyy nauchnyy zhurnal*, 2022, no. 6(99). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/13971>. (in Russ.).
16. Safina A.V., Valeev K.V., Ziatdinova D.F. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2022, vol. 2373, 042004. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2373/4/042004>.
17. Damyanov D.A., Stoyanova A.S. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Pishchevaya tekhnologiya*, 2000, no. 2-3 (255-256), pp. 24–25. (in Russ.).
18. Stepen' R.A., Voronin V.M., Soboleva S.V. *Khvoynnye boreal'noy zony*, 2017, vol. 35, no. 3–4, pp. 120–124. (in Russ.).
19. Sotnikova L.V., Sozinov S.A., Goryunova P.V., Khodykina V.V., Ivanova N.V. *Sorbtsionnyye i khromatograficheskiye protsessy*, 2017, vol. 17, no. 6, pp. 970–978. (in Russ.).
20. Ushanova V.M. *Khvoynnye boreal'noy zony*, 2013, vol. 31, no. 1-2, pp. 138–142. (in Russ.).
21. Pan'kiv O.G., Demina L.N., Parshikova V.N., Stepen' R.A. *Fundamental'nyye issledovaniya*, 2012, no. 1, pp. 168–171. (in Russ.).
22. Burkova V.N., Sergun V.P., Ivanov A.A. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*, 2022, no. 2, pp. 19–34. <https://doi.org/10.14258/jcprm.20220210469>. (in Russ.).
23. Ushanova V.M. *Kompleksnaya pererabotka drevesnoy zeleni i kory pikhty sibirskoy s polucheniyem produk-tov, obladayushchikh biologicheskoy aktivnost'yu: avtoreferat dis. ... dokt. tekhn. nauk*. [Complex processing of wood

- greenery and bark of Siberian fir to obtain products with biological activity: abstract of dis. ... Doctor of Technical Sciences]. Krasnoyarsk, 2012, 34 p. (in Russ.).
24. Yadav A., Chikate S., Vilat R., Suryawanshi Mahesh., Kumbhar G., Student U. *Int. J. Adv. Eng. Res. Dev.*, 2017, vol. 4(4).
 25. Efremov A.A. *Uspekhi sovremennogo yestestvoznaniya*, 2013, no. 7, pp. 88–94. (in Russ.).
 26. Safin R.R., Voronin A.Ye., Nazipova F.V., Akhunova L.V. *Vestnik Tekhnologicheskogo universiteta*, 2015, vol. 18, no. 8, pp. 151–154. (in Russ.).
 27. *Gosudarstvennaya farmakopeya Rossiyskoy Federatsii XV izd.* [State Pharmacopoeia of the Russian Federation, 15th ed.]. Moscow, 2023. (in Russ.).
 28. Pan'kiv O.G., Miroshnichenko V.V., Parshikova V.N., Stepen' R.A. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*, 2009, no. 3, pp. 95–98. (in Russ.).

Received April 7, 2025

Revised April 29, 2025

Accepted September 10, 2025

Сведения об авторе

Сафина Альбина Валерьевна – кандидат технических наук, доцент кафедры архитектуры и дизайна изделий из древесины, alb_saf@mail.ru

Information about author

Safina Albina Valerievna – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Architecture and Design of Wood Products, alb_saf@mail.ru