

13. Gorokhovskiy A.G. Sawn Timber Drying Technology Based on Modeling and Optimization of Heat and Mass Transfer Processes in Wood: Dr. Eng. Sci. Diss. Yekaterinburg, 2008. 263 p.
14. Shishkina E.E. Energy-Saving Technology for Convective Drying of Sawn Timber Based on Controlled Moisture Transfer in Wood: Dr. Eng. Sci. Diss. Abs. Arkhangelsk, 2016. 40 p.
15. Bardin I.P., Grum-Grzhimailo V.E. Elementary theory of construction of metallurgical furnaces. M.; L.: AN SSSR, 1949.
16. Abramovich G.N. Theory of turbulent jets. Moscow: Fizmatizdat, 1960.
17. Lykov A.V. Drying Theory. Moscow, Energiya Publ., 1968. 470 p.
18. Azzouz S., Dhib K.B., Bahar R., Ouertani S., Elaieb M.T., Elcafsi A. Mass Diffusivity of Different Species of Wood in Convective Drying. European Journal of Wood and Wood Products, 2018, vol. 76, iss. 2, pp. 573–582. DOI: 10.1007/s00107-017-1212-9.
19. Da Silva W.P., da Silva L.D., e Silva C.M.D.P.S., Nascimento P.L. Optimization and Simulation of Drying Processes Using Diffusion Models: Application to Wood Drying Using Forced Air at Low Temperature. Wood Science and Technology, 2011, vol. 45, iss. 4, pp. 787–800. DOI: 10.1007/s00226-010-0391-x.
20. Device for drying lumber: Pat. 37815 Ros. Federation / Agapov V.P., Gorokhovskiy A.G.; for-yavl. May 10, 2004.
21. Guiding technical materials on the technology of chamber drying of wood. Arkhangelsk: TsNIIMOD, 1985.

©Gorokhovskiy A.G. – Grand PhD in Engineering sciences, Professor, Head of the Department of Management in Technical Systems and Innovative Technologies, Ural State Forestry University (USFU), e-mail: goralegr@yandex.ru; Shishkina E.E. – Grand PhD in Engineering sciences, Professor of the Department of Management in Technical Systems and Innovative Technologies, USFU, e-mail: elenashishkina@yandex.ru; Mialitsin A.V. – PhD in Engineering sciences, Associate Professor of the Department of Management in Technical Systems and Innovative Technologies, Ural State Forestry University, e-mail: mialitsin@gmail.com.

УДК 66.046

ПРОГРАММНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЭКСТРАКЦИИ ЦЕННЫХ КОМПОНЕНТОВ ИЗ РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ

А.В. Сафина, Е.Н. Ахметханова, Р.Р. Сафин, Л.Ю. Исмаилов, Е.И. Байгильдеева

Разработана математическая модель процесса экстракции ценных компонентов из растительного сырья, в частности березового гриба чаги. Описана методика проведения аналитических исследований процесса экстракции. Проанализировано влияние изменения коэффициента массопроводности на продолжительность процесса экстракции. Установлен оптимальный размер частиц чаги, при котором обеспечивается высокая скорость извлечения ценных компонентов при рациональной продолжительности процесса. Были представлены профили изменения концентрации экстрактивных веществ по сечению частицы с течением времени в процессе экстрагирования чаги. Выявлено, что активный процесс экстракции наблюдается в поверхностном слое в начале процесса и характеризуется достаточно быстрым падением концентрации в каждом последующем слое. Изучено влияние размера частиц на продолжительность процесса экстракции. Установлен оптимальный размер частиц чаги, при котором обеспечивается высокая скорость извлечения ценных компонентов при рациональной продолжительности процесса. Результаты математического моделирования получены с использованием программной среды Visual Basic for Applications.

Ключевые слова: экстракция, растительное сырье, математическая модель, моделирование, березовый гриб чага.

Введение

Экстракция лекарственного растительного сырья является неотъемлемым и важным процессом в фитохимическом производстве. Теория и практика процесса экстракции интенсивно развиваются в

последние годы в связи с ростом технической оснащенности фармацевтического производства, а также решением проблем, возникающих при рассмотрении процессов экстракции в системе твердое тело-жидкость [1].

Оптимизация процессов экстракции растительного сырья требует знания соответствующих параметров равновесия и массопереноса, а также оптимальных условий работы экстракционного аппарата [2]. Параметры массопереноса и растворимости могут быть определены количественно путем применения адекватной математической модели, а математическое моделирование позволяет решать многие задачи, связанные с управлением технологическим процессом, прогнозированием оптимальных режимных параметров работы экстракционных установок [3].

Общая схема моделирования любого технологического процесса включает в себя следующие этапы: разработка математической модели и ее анализ, проверка соответствия модели реальному процессу, отработка или корректировка модели, оптимизация режимных параметров процесса на основе разработанной модели и регулирование производственного процесса для получения оптимальных требуемых показателей выхода готовой продукции [4].

Анализ имеющегося информационного материала и литературных данных показывает, что для расчета и оптимизации процесса экстрагирования растительного сырья могут быть использованы три типа математических моделей процессов [5]:

- модели дифференциальных уравнений;
- модели критериальных уравнений;
- модели регрессионных уравнений.

Критериальные уравнения и уравнения регрессии, полученные методом экспериментального проектирования, подходят для описания процессов экстракции. Критериальные уравнения связывают между собой ряд факторов: тонкость сырья, поверхность массообмена, скорость экстрагента, другие гидродинамические условия процесса (пульсации, вибрации), время экстракции, концентрацию веществ в сырье, коэффициенты свободной и внутренней диффузии и другие факторы [6,7].

Также важным направлением в моделировании является проведение экспериментальных исследований в условиях промышленного производства. Большинство критериальных уравнений не учитывают критерии геометрического подобия и не подходят для производственных условий [8].

Суть регрессионного анализа заключается в нахождении наиболее важных факторов, которые влияют на зависимую переменную. При этом важным является установление в исходных эмпирических данных некой закономерности и ее выражение в виде математической функции, которая наилучшим образом аппроксимирует имеющиеся данные [9]. Так, в работе авторов [10] экспериментальные данные водной экстракции фенольных соединений из семян джамун были проанализированы с помощью таких кинетических моделей, как модель первого порядка, модель второго порядка, модель Пелега и модель Минчева и Минкова. Методом нелинейного регрессионного анализа установлено, что, наиболее подходящей для описания кинетики извлечения полифенолов из семян джамуна является модель первого порядка.

Оптимизация процесса водно-этанольной экстракции этаноллигнина из древесины лиственницы сибирской проведена посредством построения двухпараметрической математической модели [11]. В качестве независимых факторов для построения математической модели были выбраны температура экстракции и концентрация водного раствора этанола. Установлено, что основным фактором, влияющим на выход этаноллигнина, является концентрация этанола. Следующим по значимости фактором является температура экстракции.

Как и в случае корреляционного анализа, любая регрессионная модель позволяет обнаружить только количественные зависимости, которые не всегда отражают влияние одного фактора на другой.

Явления, происходящие при экстракции растительного сырья, связаны с динамическими процессами массопереноса, поэтому для математического описания актуальны модели на основе дифференциального интегрирования баланса массы [12]. По сравнению с эмпирическими моделями, модели дифференциальных уравнений требуют определения многочисленных коэффициентов. Однако эти модели описывают непосредственно тенденции и механизмы массопереноса в жидкой и твердой фазах в процессах экстракции.

Целью настоящей работы является разработка математической модели экстракции растительного сырья, проверка ее адекватности реальным физическим процессам и последующее математическое моделирование процесса с целью выбора оптимальных режимных параметров.

Методы и материалы

Математическое описание процесса экстракции растительного сырья предполагает нахождение нестационарного поля концентрации целевого компонента по сечению материала на основе решения дифференциального уравнения:

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} = a_m \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}, \quad (1)$$

где C - концентрация целевого компонента в материале, кг/см³; a_m - коэффициент массопроводности сырьевой матрицы, являющийся коэффициентом внутренней диффузии, м²/с; x - текущая координата частицы, м.

Изменение концентрации на границе тела описывается уравнением:

$$\left. \frac{\partial C}{\partial \tau} \right|_{x=0} = \Delta j \cdot \frac{F_{\text{ч}}}{V_{\text{ч}}}, \quad (2)$$

где $F_{\text{ч}}$ - поверхность частицы, м²; $V_{\text{ч}}$ - объем частицы, м³.

Движущей силой процесса экстракции является разность потоков целевых компонентов:

$$\Delta j = j_1 - j_2, \quad (3)$$

Поток целевых компонентов из центра частицы к ее поверхности описывается уравнением:

$$j_1 = P_0 \cdot \rho_{\text{ист}} \cdot a_m \cdot \frac{f_{\text{пор}}}{V_{\text{пор}}}, \quad (4)$$

где P_0 - коэффициент пористости; $\rho_{\text{ист}}$ - истинная плотность вещества, кг/м³; $f_{\text{пор}}$ - суммарная поверхность пор в частице, м²; $V_{\text{пор}}$ - объем пор, м³.

Перенос целевых компонентов с поверхности частицы в экстрагент описывается уравнением массоотдачи:

$$j_2 = \beta \cdot (C_{\text{пов}} - C_{\text{экстр}}), \quad (5)$$

где β - коэффициент массоотдачи, м/с; $C_{\text{пов}}$ - концентрация ценного компонента на поверхности частицы; $C_{\text{экстр}}$ - концентрация целевого компонента в экстракте.

Методом конечных разностей с использованием языка визуального и объектно-ориентированного программирования VBA была решена математическая модель.

Задачей моделирующего алгоритма является решение системы уравнений с целью определения режимных параметров технологического процесса извлечения биологически активных веществ из лиственницы.

На рисунке 1 представлена программа расчета процесса экстракции в программной среде Visual Basic for Applications (VBA) [13], позволяющей моделировать процесс целевых компонентов из растительного сырья.

Разработанная математическая модель была апробирована путем сопоставления расчетных данных с экспериментальными данными, полученными при исследовании кинетики водно-вакуумного экстрагирования березового гриба чага [14].

Березовый гриб, относится к виду «трутовик скошенный» и представляет собой плодовое тело многолетнего паразитирующего гриба (чаще всего на березе) в виде наростов неправильной формы, чёрного цвета, с поверхностью, покрытой множеством трещин. По коллоидно-физическим свойствам гриб чага относится к группе капиллярно-пористых коллоидных тел, в которых формы связи влаги с твердым скелетом присущи как капиллярно-пористым, так и коллоидным телам.

В качестве экстрагента использовалась дистиллированная вода, которая обладает хорошей проницаемостью через клеточные стенки, доступна и хорошо растворяет многие лекарственные вещества.

```

Sub 1()
ic = 4:
kc = 15:
dx = 0.001
dt = 7200
P = 0.731
r = 1489
f = 4.233
b = 120 * 10 ^ (-7)
a = 2 * 10 ^ (-11)
V = 0.002
Cn = 26
Cpov = 26
Co = 26
d = 0
While Co > 10
While ic <= 7
Cm = Cells(ic - 1, kc - 1)
Ct = Cells(ic, kc - 1)
Cp = Cells(ic + 1, kc - 1)
Cells(8, kc - 1) = Cells(6, kc - 1)
ci = Ct + (a * ((Cm - 2 * Ct + Cp) / (dx ^ 2))) * dt
If ci < 0 Then ci = 0
Cells(ic, kc) = ci
ic = ic + 1
Co = Cells(7, kc)
Wend
Ctp = Cells(3, kc - 1)
Ct2 = Cells(4, kc)
i1 = P * r * a * f
Cells(11, kc) = i1
i2 = b * Ctp
Cells(12, kc) = i2
di = i1 - i2
Cells(13, kc) = di
dc = di * (f / V) * dt
Cells(14, kc) = dc
Cpov = Ctp + dc
If Cpov < 0 Then Cpov = 0
Cells(3, kc) = Cpov
Cells(2, kc) = d
d = d + 2
ic = 4
kc = kc + 1
Wend
End Sub

```

Рис. 1. Программа расчета процесса экстракции в программной среде Visual Basic for Applications (VBA)

Параметры процесса водно-вакуумной экстракции варьировались в следующих пределах. Периодическое понижение давление в системе осуществлялось до разрежения до 0,1 атм.; температура процесса 60 °С; соотношение чага:экстрагент (гидромодуль процесса) 1:10; размер частиц чаги 1-10мм, форма сфера. Начальная концентрация экстрактивных веществ чаге (в среднем по сечению гриба) – 26 кг/м³; конечная концентрация – 10 кг/м³. В исследованиях учитывались параметры, зависящие от различных зон гриба: внутренней, контактирующей со стволом дерева, основного плодового тела и поверхностной или краевой зоны [15].

Для последующего математического моделирования было исследовано влияние массопроводных характеристик чаги при извлечении из нее экстрактивных веществ относительно различных зон.

Математическое моделирование сводилось к определению продолжительности экстракции ценных компонентов из растительного сырья при вариации следующих параметров:

- радиуса частиц и, соответственно, различного диаметра (от 1 до 10 мм);
- в зависимости от изменения коэффициента массопроводности относительно различных зон гриба;
- в зависимости от изменения коэффициента массоотдачи так же относительно различных зон чаги.

Исходные данные и кинетические характеристики для математического моделирования процесса экстракции березового гриба чага представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Исходные данные для моделирования

№ слоя	Истинная плотность, кг/м ³ <i>P_{ист}</i>	Коэффициент пористости <i>Π_о</i>	Суммарная поверхность пор, м ² /кг <i>f/m</i>	Коэффициент массопроводности, м ² /с <i>a_m·10⁻¹¹</i>	Коэффициент массоотдачи, м/с <i>β</i>
Внутренний слой, (у дерева)	1489	0,731	4,233	2,81	40·10 ⁻⁷
Плодовое тело (сердцевина)		0,754	4,825	3,47	80·10 ⁻⁷
Наружный слой (край)		0,599	3,742	4,79	120·10 ⁻⁷

Удельная поверхность пор в зависимости от слоевого состава образцов чаги определялась методом адсорбционной пирометрии. Исследование проведено с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Наноматериалы и нанотехнологии» Казанского национального

исследовательского технологического университета при финансовой поддержке проекта Минобрнауки России в рамках гранта № 075-15-2021-699.

Результаты

На рисунке 2 представлены профили изменения концентрации экстрактивных веществ по сечению частицы с течением времени в процессе экстрагирования чаги, полученные моделированием представленных математических описаний. Результаты расчетов по изменению локального содержания целевых компонентов по слоям (с шагом 1 мм) представлены для частицы диаметром 10 мм. Первый слой представляет собой поверхность частицы. Слой с максимальным номером является центральным, поскольку рассматривается симметричная частица.

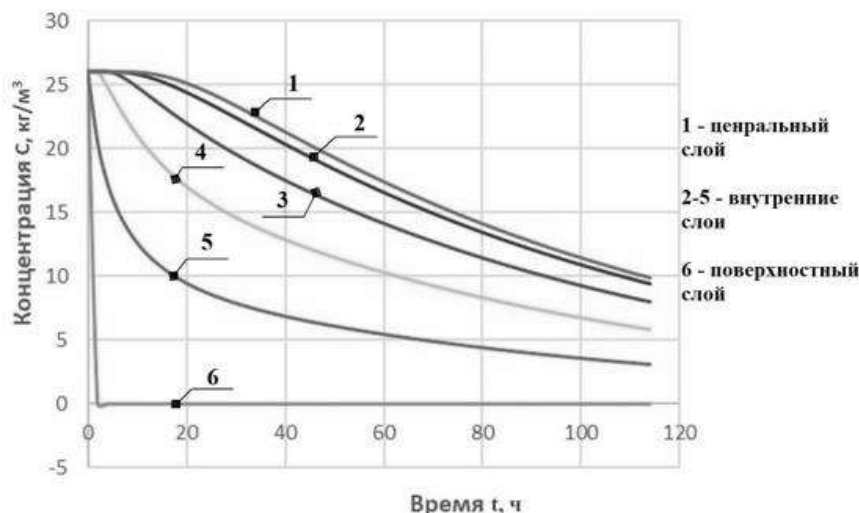


Рис. 2. Изменение локального содержания целевых компонентов по слоям (с шагом 1 мм) для частицы диаметром 10 мм

Как видно из графика, в поверхностном слое наблюдается активный процесс экстракции с максимально быстрым падением концентрации. Каждый последующий слой характеризуется достаточно интенсивным понижением концентрации в начале процесса, которое с течением времени замедляется.

Размеры сырьевой чаги в значительной степени влияют на процесс извлечения экстрактивных веществ из сырьевого материала. Последующие расчеты для частиц различных размеров позволили построить график зависимости продолжительности процесса экстрагирования от радиуса частиц (рис.3), определяемого количеством слоев. Результаты опытов и математического моделирования представлены в виде графических зависимостей. На графиках сплошными линиями изображены данные, полученные расчетным путем, точками – результаты экспериментов. Расчетные значения получены моделированием системы уравнений (1) – (5).

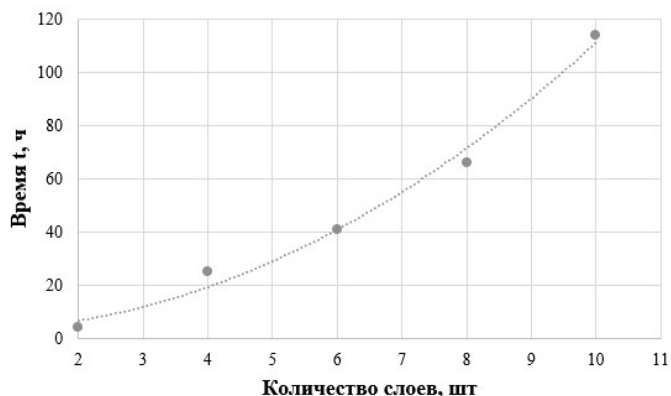


Рис. 3. Зависимость продолжительности процесса экстрагирования от количества слоев частицы

Как видно из графика, время экстракции увеличивается экспоненциально с увеличением размера экстрагируемых частиц. Причем оптимальными для экстрагирования являются частицы с количеством слоев 2, что соответствует диаметру частицы 4 мм, поскольку рассматривается симметричная частица.

Для этого размера частицы наблюдается высокая скорость извлечения ценных компонентов. Для более крупных частиц увеличивается продолжительность процесса экстракции.

Обработка данных методами математической статистики показала, что среднеквадратичное отклонение экспериментальных данных от расчетных не превышает 12 %. Удовлетворительная сходимость расчетных и экспериментальных данных подтверждает адекватность разработанного математического описания реальному процессу экстракции растительных материалов.

Далее проанализировано влияние изменения коэффициента массопроводности на продолжительность процесса экстракции (рис. 4).

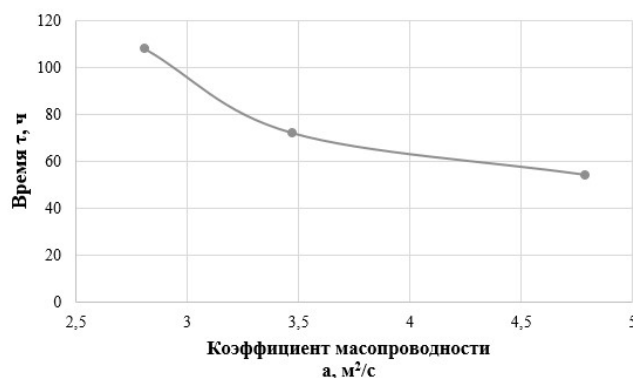


Рис. 4. Зависимость продолжительности экстракции от коэффициента массопроводности

Установлено, что различным зонам чаги, отличающихся максимальным содержанием экстрактивных веществ, соответствуют различные значения коэффициента массопроводности. С увеличением коэффициента a_m повышается эффективность диффузионного процесса и сокращается продолжительность процесса экстракции, что иллюстрируется логарифмической зависимостью и определяет характер кривой, представленной на графике. Исследованиями установлено, что наибольшее количество экстрактивных веществ содержится в краевом слое [16]. Таким образом, с практической точки зрения наибольшее значение для максимального извлечения ценных компонентов имеют наружный слой и плодовое тело чаги.

В результате математического моделирования установлено, что изменение коэффициента массоотдачи не влияет на скорость процесса извлечения целевых компонентов из растительного материала. Продолжительность процесса экстракции, таким образом, не зависит от значения коэффициента массоотдачи и, соответственно, от зон гриба. Это объясняется тем, что отток целевых компонентов с поверхности частицы достаточно велик и процесс массоотдачи значительно превышает массопроводность любой из рассматриваемых зон чаги. Таким образом, процесс экстракции лимитируется процессом массопроводности.

Заключение

Разработана математическая модель экстракции растительного сырья и получены результаты математического моделирования с использованием программной среды Visual Basic for Applications. Адекватность математического описания пробирована на данных экспериментальных исследований березового гриба чага относительно различных его зон (наружной, внутренней и внутренней)

Моделирование изменения концентрации экстрактивных веществ по сечению частицы с течением времени показало, что активный процесс экстракции наблюдается в поверхностном слое в начале процесса и характеризуется достаточно быстрым падением концентрации в каждом последующем слое, интенсивность которого ослабевает с течением времени.

Изучено влияние размера частиц на продолжительность процесса экстракции. Установлено, с увеличением размера экстрагируемых частиц увеличивается и время экстракции. В результате математического моделирования установлен оптимальный размер частиц чаги, при котором обеспечивается высокая скорость извлечения ценных компонентов при рациональной продолжительности процесса.

С целью оптимизации процесса экстракции растительного сырья рассмотрено влияние параметров массопереноса целевых компонентов. Установлено, что с увеличением коэффициента массопроводности,

характерного для наружного слоя и плодового тела чаги, эффективность процесса экстракции существенно возрастает. Анализ влияния коэффициента массоотдачи на продолжительность процесса извлечения ценных компонентов не оказывает влияния на скорость переноса массы, поскольку его значение значительно превышает массопроводность каждой из зон гриба. Проведенное математическое моделирование на примере березового гриба чага позволило исследовать и определить соответствующие параметры массопереноса с целью интенсификации процесса экстракции растительного сырья.

Полученные данные позволяют выработать технические решения, связанные с управлением технологическим процессом и прогнозировании оптимальных режимных параметров работы экстракционных установок.

Литература

1. Grosso C., J.P. Coelho, F.L.P. Pessoa, J.M.N.A. Fareleira, J.G. Barroso, J.S. Urieta, A.F. Palavra, H. Sovová, Mathematical modeling of supercritical CO₂ extraction of volatile oils from aromatic plants, Chemical Engineering Science, Vol. 65, Issue 11, 2010, P. 3579-3590, ISSN 0009-2509.
2. Amit Rai, Kumargaurao D. Punase, Bikash Mohanty, Ravindra Bhargava, Evaluation of models for supercritical fluid extraction, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 72, 2014, P. 274-287, ISSN 0017-9310.
3. Нагорнов С. А. Математическое моделирование процесса экстракции растительного сырья / С. А. Нагорнов, В. А. Лузгачев, Ю. В. Мещерякова, А. Г. Мещеряков // Наука в центральной России. – 2015. – № 6(18). – С. 40-48.
4. Тарасик, В. П. Математическое моделирование технических систем: учебник / В. П. Тарасик. — Минск: Новое знание, 2013. — 584 с.
5. Ашихмин В.Н. Введение в математическое моделирование / В.Н. Ашихмин, М.Б. Гитман, К.Э. Келлер и др - Москва: Логос, 2004, С. - 440 с
6. Jelena Vlastic, Zoran Zekovic, Stela Jokic, Sandra Svilovic, Strahinja Kovacevic, Senka Vidovic, Winter Chaber: Supercritical Carbon Dioxide Extraction and Mathematical Modeling of Extraction Process, Journal of Supercritical Fluids, Vol. 117, 2016, P. 89-97, ISSN 0896-8446
7. Мухаммадиев Б.Т. Параметрический анализ CO₂ экстракции растительных ингредиентов/ Б.Т. Мухаммадиев., Л.Р. Джураева // Universum: Химия и биология: электрон. научн. журн. 2020. - № 2(68).
8. Özkal S.G. Yener M.E. Bayındır L. Modeling of mass transfer in apricot kernel oil extraction by supercritical carbon dioxide, Journal of Supercritical Fluids, Vol. 35, Issue 2, 2005, P. 119-127, ISSN 0896-8446.
9. Солова Е.Л. Скорость экстракции растительного масла со сверхкритическим CO₂ — I. Моделирование кривых экстракции // Химико-технические науки. – 1994. – № 14 – С.409-414.
10. Милевская В.В. Кинетика извлечения биологически активных веществ из лекарственного сырья разными способами экстракции // Вестник Московского Университета. – 2017. – № 13 – С. 281-289.
11. Матвеев Е. В / Проблемы современной аграрной науки: материалы международной заочной научной конференции // Матвеев Е. В, Величко Н. А. Ушанов С. В. Аешина Е. Н. Красноярск, 2014 года / Ответственные за выпуск: Г.И. Цугленок, Ж.Н. Шмелева. – Красноярск: Красноярский государственный аграрный университет, 10. 2015. – С. 169-174.
12. Букеева А. Б. Обзор современных методов выделения биоактивных веществ из растений / А.Б. Букеева, С.Ж. Кудайбергенова // Вестник ЕНУ им. . – 2012. - № 2. - С. 192-197.
13. Осетрова И.С., Н. А. Осипов Microsoft Visual Basic for Application - СПб: НИУ ИТМО, 2013. – 120 с.
14. Губернаторов В.В. Оптимизация процесса водно-вакуумной экстракции березового гриба чага путем подбора режимных параметров / В.В. Губернаторов, А.В. Сафина, Ш.Р. Мухаметзянов // Актуальные проблемы лесного комплекса. Брянск. – 2021. – № 60. – С. 221-225.
15. Сафина, А.В. Интенсификация процесса водной экстракции чаги путем периодического понижения давления среды / А.В. Сафина, В.В. Губернаторов, В.В. Гараев, Е.Ю. Разумов // Деревообрабатывающая промышленность. – 2017. – № 2. – С. 50-53.
16. Губернаторов В.В. Определение продолжительности отдельных стадий водно-вакуумной экстракции *Inonotus obliquus*/ В.В. Губернаторов, А.В. Сафина, Р.Р. Сафин// Деревообрабатывающая промышленность. – 2021. – № 3. – С. 41-48.

©Сафина А.В. – канд. техн. наук, доцент кафедры «Архитектура и дизайн изделий из древесины», ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет» (ФГБОУ ВО «КНИТУ»), e-mail:

alb_saf@mail.ru; **Ахметханова Е.Н.** – магистрант кафедры «Переработки древесных материалов» ФГБОУ ВО «КНИТУ», e-mail: sfornvi@gmail.com; **Сафин Р.Р.** – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Архитектура и дизайн изделий из древесины», ФГБОУ ВО «КНИТУ», e-mail: cfaby@mail.ru; **Исмаилов Л.Ю.** – аспирант кафедры «Архитектуры и дизайна изделий из древесины», ФГБОУ ВО «КНИТУ», e-mail: lenar-2015@mail.ru; **Байгильдеева Е.И.** – канд. техн. наук, доцент кафедры переработки древесных материалов, ФГБОУ ВО «КНИТУ», e-mail: bai48@rambler.ru.

UDC 66.061

SOFTWARE MODELING OF THE PROCESS OF EXTRACTION OF VALUABLE COMPONENTS FROM PLANT RAW MATERIALS

A.V. Safina, E.N. Akhmetkhanova, R.R. Safin, L.Yu Ismailov, E.I. Baigildeeva

A mathematical model of the process of extraction of valuable components from plant raw materials, in particular birch mushroom chaga, has been developed. The method of analytical studies of the extraction process is described. The influence of changes in the mass conductivity coefficient on the duration of the extraction process has been analyzed. The optimum particle size of chaga, which provides a high rate of extraction of valuable components with a rational duration of the process was established. Profiles of changes in the concentration of extractive substances over the cross section of the particle with the passage of time in the process of extraction of chaga have been presented. It was found that the active extraction process is observed in the surface layer at the beginning of the process and is characterized by a fairly rapid drop in concentration in each subsequent layer. The influence of the particle size on the duration of the extraction process was studied. The optimum size of the chaga particles, which provides a high rate of extraction of valuable components at a reasonable duration of the process is established. Results of mathematical modeling were obtained using Visual Basic for Applications.

Keywords: mathematical model, modeling, extraction, plant raw materials, chaga birch mushroom.

References

1. Grosso C., J.P. Coelho, F.L.P. Pessoa, J.M.N.A. Fareleira, J.G. Barroso, J.S. Urieta, A.F. Palavra, H. Sovová, Mathematical modeling of supercritical CO₂ extraction of volatile oils from aromatic plants, Chemical Engineering Science, Vol. 65, Issue 11, 2010, P. 3579-3590, ISSN 0009-2509.
2. Amit Rai, Kumargaurao D. Punase, Bikash Mohanty, Ravindra Bhargava, Evaluation of models for supercritical fluid extraction, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 72, 2014, P. 274-287, ISSN 0017-9310.
3. Nagornov S. A. Mathematical modeling of plant raw material extraction process / S. A. Nagornov, V. A. Luzgachev, V. V. Mescheryakova, A. G. Mescheryakov // Science in Central Russia. - 2015. – Vol. 6 (18). - P. 40-48.
4. Tarasik V. P. Mathematical modeling of technical systems: a textbook / V. P. Tarasik. - Minsk: Novoyeznanie, 2013. - 584 c.
5. Ashhimin, V.N. Introduction to Mathematical Modeling / V.N. Ashhimin, M.B. Gitman, C.E. Keller et al; ed. by V.P. Trusov. - Moscow: Logos, 2004. – P. 440.
6. Jelena Vladoic, Zoran Zekovic, Stela Jokic, Sandra Svilovic, Strahinja Kovacevic, Senka Vidovic, Winter Chaber: Supercritical Carbon Dioxide Extraction and Mathematical Modeling of Extraction Process, Journal of Supercritical Fluids, Vol. 117, 2016, P.89-97, ISSN 0896-8446
7. Mukhammadiev B.T. Parametric analysis of CO₂ extraction of plant ingredients / B.T. Mukhammadiev, L.R. Dzhuraeva // Universum: Chemistry and Biology: electronic scientific journal. - № 2(68).
8. Özkal S.G. M.E. Yener, L. Bayındırlı, Modeling of mass transfer in apricot kernel oil extraction by supercritical carbon dioxide, Journal of Supercritical Fluids, Vol. 35, Issue 2, 2005, P. 119-127, ISSN 0896-8446
9. Sovova, H. "Extraction rate of vegetable oil with supercritical CO₂ - I. Modeling extraction curves." Chemical and Technical Sciences Vol. 49 (1994): P. 409-414.
10. Kinetics of extraction of biologically active substances of medicinal raw materials by different methods of extraction V.V. Milevskaya et al. Bulletin of the Moscow University, 2017. - 281-289.
11. Matveenkov E. V. Problems of modern agrarian science: proceedings of international extramural scientific conference / Matveenkov E. V. N. A. Velichko, S. V. Ushanov, E. N. Aeshina Krasnoyarsk, 2014 // responsible

for the issue: G. I. Tsuglenok, Zh. N. Shmeleva. - Krasnoyarsk: Krasnoyarsk State Agrarian University, Vol. 10. 2015. - P. 169-174.

12. Bukeyeva A.B. Review of modern methods of isolation of bioactive substances from plants / A.B. Bukeyeva, S.Zh. Kudaibergenova // Bulletin of ENU. - 2012. - № 2. - С. 192-197..

13. Osetrova I.S., Osipov N.A. Microsoft Visual Basic for Application - SPb: NRU ITMO, 2013. - 120 с.

14. Gubernatorov, V.V. Optimization of the process of water-vacuum extraction of birch chaga mushroom by selecting mode parameters / V.V. Gubernatorov, AV Safina, Sh. R. Mukhametzyanov // Actual problems of forestry complex. Bryansk. - 2021. – Vol. 60. - P. 221-225

15. Safina, A.V. Intensification of the process of water extraction of chaga by periodic lowering of the medium pressure / A.V. Safina, V.V. Gubernatorov, V.V. Garaev, E.Yu. Razumov // Woodworking industry. - 2017. - № 2. - С. 50-53

16. Gubernatorov V.V.. Determination of the duration of the individual stages of water-vacuum extraction *Inonotus obliquus* / V.V. Gubernatorov, AV Safina, R.R. Safin // Woodworking Industry. - 2021. - № 3. - С. 41-48.

©**Safina A.V.** – PhD in Engineering sciences, Associate Professor of the Department of Architecture and Design of Wood Products, Kazan National Research Technological University (KNRTU), e-mail: alb_saf@mail.ru; **Akhmethhanova E.N.** - master's student, educational master, processing of wood materials, KNRTU, e-mail: sfornvi@gmail.com; **Safin R.R.** – Grand PhD in Engineering sciences, Professor, Head of the Department of Architecture and Design of Wood Products, KNRTU, e-mail: cfaby@mail.ru; **Ismailov L.Yu.** – postgraduate student of the Department of Architecture and Design of Wood Products, KNRTU, e-mail: lenar-2015@mail.ru; **Baigildeeva E.I.** - PhD in Engineering sciences, Associate Professor of the Department of Processing of wood materials, KNRTU, e-mail: bai48@rambler.ru.

УДК 674.02

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОЛИМЕРНОГО КОМПОЗИТА, ПОЛУЧЕННОГО ДВУХСТУПЕНЧАТОЙ ОБРАБОТКОЙ ДРЕВЕСНОГО НАПОЛНИТЕЛЯ

К.В. Саерова, Ш.Р. Мухаметзянов, Р.Р. Хасаншин

На сегодняшний день особое внимание уделяется разработке композиционных материалов на основе дешевых отходов растительного и древесного происхождения, а также экологических связующих веществ, так как в связи с ужесточением экологических требований применение древесно-композитных материалов, содержащих в своем составе вредные связующие, ограничено. Эту нишу успешно занимают древесно-полимерные композиты. Однако, долговечность и конструкционные характеристики древесно-полимерного композита зависят от технических свойств связующего и древесного наполнителя, а эксплуатация композитов во влажной среде может приводить к потере прочности и биоповреждениям. В статье исследована технология высокочастотной (ВЧ) плазменной обработки предварительно термомодифицированной древесной муки с последующим изготовлением древесно-полимерного композита повышенной прочности и гигроскопичности. Проведенные ранее исследования по термомодифицированию древесины, позволили получить необходимые свойства материала, а именно снижение гигроскопичности и давления набухания. Второй ступенью исследования было проведение ВЧ-плазменной поверхностной обработки материала, позволившей улучшить механические свойства древесного наполнителя к полимерному связующему в ДПК на 20-23%.

Ключевые слова: древесная мука, полиэтилен, композит, твёрдость, прочность.

Введение

В настоящее время древесина является ценным строительным материалом. Ни одна область строительства не обходится без древесных материалов, при этом, к сожалению, материалы из древесины