

References

1. Kuryanova T.A. et al. The state of the issue of production and operation of railway sleepers from various materials / T.K. Kuryanova, A.D. Platonov, M. A. Mikheevskaya, D.A. Parinov, etc. // Forestry Journal. – 2017. -Vol.7.- № 4(28). – Pp. 157-166.
2. Platonov D.A. et al. Obtaining sleepers with specified quality indicators from pressed birch wood / A.D. Platonov, M.A. Mikheevskaya, T. K. Kuryanova, S. N. Snegireva, etc. // Lesotechnicheskiy zhurnal. – 2018. - T.8.-№ 4(32). – Pp. 187-193.
3. Kuryanova T.K. et al. Theoretical foundations of obtaining modified wood [Text] / T.K. Kuryanova, A.D. Platonov, M. A. Mikheevskaya, S.N. Snegireva, etc. // Forestry Journal – 2018. -Vol.8.- № 1(29). – Pp. 146-154. DOI:10.12737/article_5ab0dfc30d6f83.06547595.
4. Fedyukov V.I. et al. Fundamentals of quality assurance of sawn products / V. I. Fedyukov, O. G. Tarasova, M. V. Boyarsky; under the general editorship of V. I. Fedyukov // Volga State Technological University. Yoshkar-Ola, 2012. – 163 p.
5. Shamaev V. A. et al. Wood modification / V. A. Shamaev, N. S. Nikulina, I. N. Medvedev. – M.: FLINT: Nauka, 2013. – 448 p.
6. Nikolic M, Lawther J.M, Sanadi A.R. Use of nanofillers in wood coatings: a scientific review. Journal of Coatings Technology and Research. 2015 May;12(3):445-461. <https://doi.org/10.1007/s11998-015-9659-2>.
7. Platonov A. D., Kuryanova T.K., Mikheevskaya M.A., Snegireva S.N. Increasing the durability of sleepers made from soft leaf-bearing species (2018). IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. № 226 (2019) 012030 IOP Publishing doi:10.1088/1755-1315/226/1/012030
8. Ren Li, Zhiqiang, Gao Shanghuan Feng, Jianmin Chang, Yanmei Wu, Rongfeng Huang (2018). Effects of preheating temperatures on the formation of sandwich compression and density distribution in the compressed wood. // Journal of Wood Science. pp. 1–7.
9. Shamaev V, Parinov D, Medvedev I. Wood modification by pressing-Wood // Science and Engineering studies, Issue 3(2), Vol.10, 2018, p.708-718.
10. Medvedev I.N., Shamayev V.A., Parinov D.A. Resource-saving production sleepers of modified wood / I.N. Medvedev, V.A. Shamayev, D.A. Parinov // Path and track economy. 2018. No. 11. pp. 30 -32.
11. Vinnik N. I., Shamaev V. A. Some physico-mechanical properties of modified wood of various brands / N. I. Vinnik, V. A. Shamaev // Modification, properties of wood. - Riga, "Zinatne", 1983. - pp.74-77.

©**Burmistrova O.N.** – Grand PhD in Engineering Sciences, Professor of the Department of Technology and Transport and Technological Machines, Ukhta State Technical University (USTU), e-mail: oburmistrova@ugtu.net; **Pobedinsky V.V.** – Grand PhD in Engineering Sciences, Professor, Head of the Department of Intelligent Systems, Ural State Forest Engineering University (USFEU), e-mail: pobed@e1.ru; **Kruchinin I.N.** – Grand PhD in Engineering Sciences, Professor of the Department of Transport and Road Construction, USFEU, e-mail: kinaa.k@yandex.ru; **Mikheevskaya M.A.** – PhD in Engineering, Associate Professor of the Department of Technology and Transport and Technological Machines, USTU e-mail: mmiheevskaya@ugtu.net; **Kungurova E. A.** – Master of the Department of Landscape Construction, USFEU, e-mail: kungurovaea@m.usfeu.ru.

УДК 661.123

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССА ВОДНО-ВАКУУМНОЙ ЭКСТРАКЦИИ *INONOTUS OBLIQUUS*

А.В. Сафина, В.В. Губернаторов

*В статье представлена математическая модель водно-вакуумной экстракции *Inonotus obliquus* (березового гриба чага), описывающая взаимосвязанные процессы стадий предварительной дегазации материала и последовательно чередующихся стадий извлечения ценных компонентов при атмосферном давлении и в режиме вакуумирования. При этом происходящие физические явления рассмотрены через решение внешней задачи (теплообмена экстрагента с материалом и паровой фазой) и внутренней задачи - теплопереноса внутри материала. Решение внутренней задачи основано на диффузионном переносе целевого компонента через стенку капилляра в экстрагент и его молярном переносе под действием градиента давления внутри частицы чаги. Проведена проверка*

адекватности разработанной математической модели водно-вакуумной экстракции чаги путем сопоставления расчетных данных с результатами экспериментальными исследований, расхождение между которыми составило 13 %. Последующее моделирование процесса экстракции позволило определить рациональные временные параметры отдельных стадий. Установлено, что стадию предварительной дегазации измельченного сырья целесообразно проводить в течение 4-5 минут, что способствует удалению воздуха и паров влаги из пор и капилляров растительной матрицы. Эффективная продолжительность стадии настаивания при атмосферном давлении составила 15-20 минут, а последующее вакуумирование системы и выдержку смеси при пониженном давлении целесообразно проводить в течение 10 минут. Общая продолжительность водно-вакуумной экстракции *Inonotus obliquus* составила чуть более 5 ч при проведении 11 циклов чередования стадий и достижения 30 % концентрации экстрактивных веществ в чаге.

Ключевые слова: экстракция, *Inonotus obliquus*, березовый гриб чага, математическое описание, моделирование, адекватность.

Введение

В настоящее время возрос интерес к природным сырьевым материалам, содержащим большое количество биологически активных веществ и имеющих высокую терапевтическую ценность. Широкая доступность и не высокая стоимость сырьевого материала повышает интерес производителей к получению доступных и эффективных препаратов. На фоне данной тенденции повысился интерес к березовому грибу чага *Inonotus obliquus*, который с давних времен славился своими иммуномодулирующими и противовоспалительными свойствами [1, 2].

Обзор современных научных исследований показал, что *Inonotus obliquus* содержит в себе широкий комплекс веществ, способных усиливать терапевтическую активность лекарственных препаратов и затормаживать развитие опухолей, ослабляя при этом симптоматику протекания болезни [3-5]. Благодаря высоким терапевтическим свойствам, экстракты чаги нашли свое применение в различных отраслях промышленности: в виде лекарственных средств в медицине, в виде противоаллергенных компонентов в фармацевтике и косметологии, в пищевой промышленности в виде добавок, повышающих иммунитет организма и улучшающих обмен веществ [6, 7].

Анализ существующих исследований в области извлечения биологически активных веществ из растительных материалов показал, что количественный выход и терапевтическая ценность получаемых экстрактов во многом зависит от применяемых способов экстрагирования [8-11]. В связи с этим, одним из направлений интенсификации процессов извлечения ценных компонентов из растительных материалов является внедрение разреженной среды, как на стадии подготовки сырья, так и при проведении самого процесса экстрагирования. Чередование стадий вакуумирования и создания атмосферного давления в аппарате положительно влияет на выход экстрактивных веществ, и способствует сокращению временных затрат, что подтверждено результатами исследований вакуумно-импульсной экстракции [12, 13].

Однако, сложность аппаратного оформления процесса вакуумно-импульсной экстракции, обусловленная необходимостью использования вакуумного ресивера с большим рабочим объемом, и не высокий перепад давлений на стадиях нагрева и вакуумирования не позволяют достичь необходимой степени разрыхления растительного сырья высокой плотности, соответственно, эффективного выхода целевых компонентов.

Решение указанных проблем возможно посредством экстрагирования в режиме чередования стадий настаивания при атмосферном давлении, последующего постепенного понижения давления и выдержки при постоянном пониженном давлении в циклическом режиме при реализации способа водно-вакуумной экстракции березового гриба чага. При этом внедрение стадии предварительного вакуумирования сырьевой чаги на стадии подготовки способствует облегчению процесса экстракции за счет удаления атмосферной влаги и воздуха из пор материала.

Теоретические и экспериментальные исследования водно-вакуумной экстракции *Inonotus obliquus* (березового гриба чага) подтвердили актуальность данного способа и его высокую эффективность [14, 15], выражающуюся в повышении скорости экстракции и увеличения выхода экстрактивных веществ при сохранении их биологической активности. Целью настоящего исследования является разработка математической модели процесса водно-вакуумной экстракции *Inonotus obliquus* (березового гриба чага), позволяющей оценить влияние режимных параметров процесса на выход биологически активных

веществ и определить оптимальную продолжительность процесса, что может быть использовано при технологических расчетах осуществления предлагаемого способа экстракции на фармацевтических предприятиях.

Материалы и методы

Процесс водно-вакуумной экстракции *Inonotus obliquus* (березового гриба чага) основывается на известных положениях теории тепломассообменных процессов и диффузионных явлений, на законах равновесия между жидкостью и паром, а также существующих исследованиях в области извлечения биологически активных веществ из растительных материалов.

Анализ физической картины формализации происходящих процессов и явлений позволил разработать математическую модель водно-вакуумной экстракции чаги, которая представлена в виде взаимосвязанных математических описаний стадий предварительной дегазации материала и последовательно чередующихся стадий извлечения ценных компонентов в режимах «атмосферного давления и «вакуумирования».

Пористое (несквозное) строение чаги обуславливает содержание в них воздуха и накопленной атмосферной влаги, которые затрудняют массообменные процессы экстракции. С целью интенсификации процесса извлечения ценных компонентов на первом этапе измельченную сырьевую чагу предварительно вакуумируют, т.е. осуществляется предварительная стадия – дегазация (рис. 1).

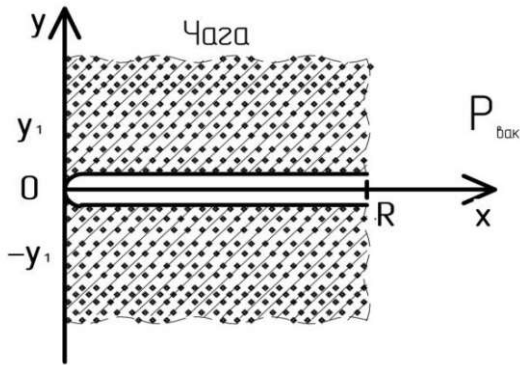


Рис. 1. Стадия предварительного вакуумирования сухого сырья

Данная стадия осуществляется однократно, а ее продолжительность определяется производительностью вакуумного насоса и предполагает удаление инертного газа из рабочей полости аппарата и понижение давления с барометрического до рабочего остаточного значения:

$$\tau_0 = \frac{V_{св}}{П_{вн}} \cdot \ln \frac{P_{атм}}{P_{ост}}, \quad (1)$$

где $V_{св}$ – свободный объем, $м^3$; $П_{вн}$ – объемная производительность вакуумного насоса, $м^3/с$; $P_{атм}$ – атмосферное давление, Па; $P_{ост}$ – остаточное давление, Па.

Далее путем открытия вентиля под действием атмосферного давления в экстрактор подается предварительно нагретый до заданной температуры экстрагент – дистиллированная вода. Осуществляется процесс пропитки до достижения материалом максимально возможного насыщения экстрагентом. За счет градиента концентраций происходит процесс миграции целевых компонентов через пористые клеточные стенки в экстрагент, находящийся в капиллярах чаги. Таким образом, в режиме «атмосферного давления» происходит пропитка матрицы (рисунк 2, а) – макроуровень и молекулярная диффузия целевых компонентов через стенки пор в экстрагент, находящийся в капилляре (рисунк 2, б) – микроуровень.

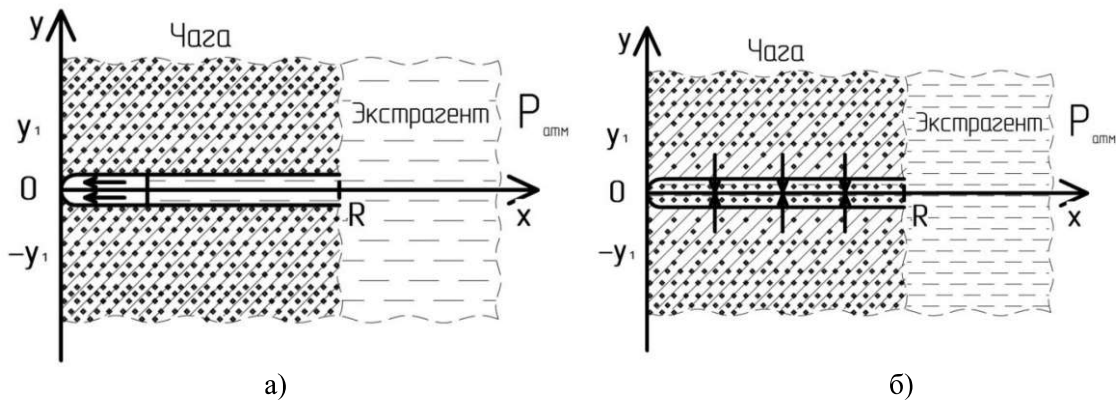


Рис. 2. Режим «атмосферного давления»: а) пропитка экстрагентом под действием атмосферного давления; б) молекулярная диффузия целевых компонентов через стенки пор в экстрагент

Математическое описание процесса экстрагирования в «режиме атмосферного давления» сводится к решению внутренней задачи как на макроуровне (стадия пропитки), так и на микроуровне (молекулярная диффузия целевых компонентов через стенки капилляров в экстрагент).

При математическом описании стадии пропитки материала экстрагентом (внутренняя задача, макроуровень) для нахождения нестационарных полей концентраций экстрагента в материале решается система дифференциальных уравнений переноса массы и тепла:

$$\frac{\partial C'_{ж}}{\partial \tau} = \frac{1}{x^\Gamma} \cdot \frac{\partial}{\partial x} (x^\Gamma \cdot w \cdot C'_{ж}), \quad (2)$$

$$c_{ч} \cdot \rho_{ч} \cdot \frac{\partial T_{ч}}{\partial \tau} = \frac{1}{x^\Gamma} \cdot \frac{\partial}{\partial x} \left(x^\Gamma \cdot \lambda \cdot \frac{dT_{ч}}{dx} \right) + c_{ж} \cdot \rho_{ж} \cdot T_{ж} \cdot \frac{\partial C'_{ж}}{\partial \tau}, \quad (3)$$

где $C'_{ж}$ – концентрация жидкости в чаге, долей единицы; x – координата, м; Γ – коэффициент формы; w – скорость массопереноса, м/с; $c_{ч}$ – удельная теплоемкость чаги, Дж/(кг·К); $\rho_{ч}$ – плотность чаги, кг/м³; $T_{ч}$ – температура чаги, °С; λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); $c_{ж}$ – удельная теплоемкость жидкости, Дж/(кг·К); $\rho_{ж}$ – плотность жидкости, кг/м³; $T_{ж}$ – температура жидкости, °С.

Движущей силой стадии пропитки экстрагентом является разность давлений в аппарате и внутри капилляра матрицы. Поэтому, согласно закону Пуазейля, скорость массопереноса пропорциональна разности давлений и обратно пропорциональна вязкости жидкости и может быть определена по уравнению:

$$w = -\frac{R_{\text{кап}}^2}{8 \cdot \eta_{ж}} \cdot \frac{dP}{dx}, \quad (4)$$

где $R_{\text{кап}}$ – радиус капилляра, мм; η – коэффициент динамической вязкости жидкости, Па·с.

Граничные условия представлены уравнениями:

$$C'_{ж}|_{x=R} = \frac{(\rho_{\text{ист}} - \rho_{\text{ср}}) \cdot \rho_{ж}}{\rho_{\text{ист}} \cdot \rho_{\text{ср}}}, \quad (5) \quad T_{ч}|_{x=R} = T_{ж}, \quad (6)$$

где $\rho_{\text{ист}}$, $\rho_{\text{ср}}$, $\rho_{ж}$ – плотность истинная, средняя и жидкости, соответственно, кг/м³

Уравнение (5) характеризует условие, когда концентрация целевого компонента на поверхности материала равна максимально возможному значению при полном заполнении капилляра и определяется, соответственно, плотностью древесинного вещества (истинной плотностью) чаги, ее средней плотностью и плотностью жидкости (экстрагента).

Согласно граничному условию (7) для решения уравнения теплопереноса (3) температура на поверхности частицы чаги равна температуре жидкости (экстрагента). Изменение температуры жидкости находится из теплового баланса, где тепловая энергия, подведенная от калорифера, равна изменению внутренней энергии экстрагента в аппарате:

$$\frac{dT_{ж}}{d\tau} = \frac{K \cdot \Delta t \cdot F_{\text{кал}}}{\rho_{ж} \cdot V_{ж} \cdot c_{ж}}, \quad (7)$$

где K – коэффициент теплопередачи, Вт/(м²·К); Δt – средний температурный напор, К; $F_{\text{кал}}$ – площадь калорифера, м²; $V_{ж}$ – объем жидкости, м³.

Для определения перепада давления в уравнении (4) зададим значение давления:

$$\begin{aligned} & \text{- в центре частицы} & & \text{- на поверхности частицы} \\ P|_{x=0} &= P_{\text{ост}}, & (8) & \quad P|_{x=R_{\text{кап}}} = P_{\text{атм}} + P_{\text{ст.ж}}. & (9) \end{aligned}$$

Согласно условиям (8) и (9), давление внутри капилляра равно остаточному давлению после вакуумирования, а давление на поверхности равно сумме атмосферного давления и давления столба жидкости.

Математическое описание массопереноса посредством молекулярной диффузии целевых компонентов через стенки капилляров (внутренней задачи, микроуровень) основано на использовании уравнения Фика:

$$J = -D_{\text{эфф}} \cdot \rho_{\text{ист}} \cdot \frac{dC_{\text{опг}}}{dy}, \quad (10)$$

где J – поток, $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$; $D_{\text{эфф}}$ – эффективный коэффициент диффузии, $\text{м}^2/\text{с}$; $C''_{\text{орг}}$ – концентрация органических веществ в экстрагенте, долей единицы; y – координата, м .

Значение эффективного коэффициента диффузии для пористых материалов определяется по значению коэффициента свободной диффузии в жидкости и по параметру общей пористости материала, который является функцией коэффициента извилистости и коэффициента формы пор [16].

$$D_{\text{эфф}} = 0,9 \cdot D_{\text{св}} \cdot \xi_{\mu}^{4,3}, \quad (11)$$

где $D_{\text{св}}$ – свободный коэффициент диффузии, $\text{м}^2/\text{с}$; ξ_{μ} – пористость материала, долей единицы.

Граничные условия для решений системы уравнений (2) – (11) задаются следующими выражениями:

Концентрация органических соединений в пропитывающей жидкости изменяется от 0 (в начале процесса) и далее на каждой итерации в зависимости от потока органических соединений на предыдущем шаге, таким образом, начальная концентрация органических веществ в экстрагенте равна нулю (12). В дальнейшем – по мере насыщения экстрагента – концентрация извлекаемого компонента в растворе определяется по уравнению (13).

$$C''_{\text{орг}}(y = 0; \tau = 0) = 0, \quad (12) \quad C''_{\text{орг}}(y = 0; \tau = \tau_{\text{диф}}) = \frac{J \cdot f_{\text{пор}} \cdot m_{\text{ч}}}{m_{\text{ж}}} \cdot \tau_{\text{диф}}, \quad (13)$$

где $\tau_{\text{диф}}$ – время диффузии, с ; $f_{\text{пор}}$ – удельная поверхность пор, $\text{м}^2/\text{кг}$; $m_{\text{ч}}$ – масса чаги, кг ; $m_{\text{ж}}$ – масса жидкости, кг .

Концентрацию органических соединений в жидкой фазе стенок капилляров в начальный период процесса считаем равной максимально возможному равновесному значению:

$$C''_{\text{орг}}(y = y_1; \tau = 0) = C''_{\text{орг}}|_{\text{рав}}. \quad (14)$$

По мере истощения материала и соответствующего снижения концентрации органических веществ ниже максимально возможного равновесного значения расчет проводится по значению концентрации, определяемой как отношение величины целевого компонента, оставшегося в материале, к массе жидкости, находящейся в стенках капилляров:

$$C''_{\text{орг}}(y = y_1; \tau = \tau_{\text{диф}}) = \frac{m_{\text{орг}}|_{\tau=\tau_{\text{диф}}}}{C_{\text{ж}} \cdot m_{\text{сух.в}}}, \quad (15)$$

где $m_{\text{орг}}|_{\tau=\tau_{\text{диф}}}$ – масса органических веществ, кг ; $m_{\text{сух.в}}$ – масса сухого вещества, кг .

Таким образом, система уравнений (2) – (15) описывает процесс экстрагирования в режиме «атмосферного давления».

При достижении концентрации раствора, находящегося в капиллярах, заданного значения, осуществляется переход к режиму вакуумирования.

Понижение давления в рабочем объеме обуславливает вскипание жидкости в капиллярах. Образующийся пар выталкивает экстрагент, способствуя молярному переносу экстрагента с растворенными веществами вдоль капилляра в растворитель. При этом происходит деформация и разрушение межфазного диффузионного пограничного слоя при общем перемешивании объема жидкости (рис. 3). Стадия продолжается до тех пор, пока система содержит необходимую энергию для поддержания процесса кипения.

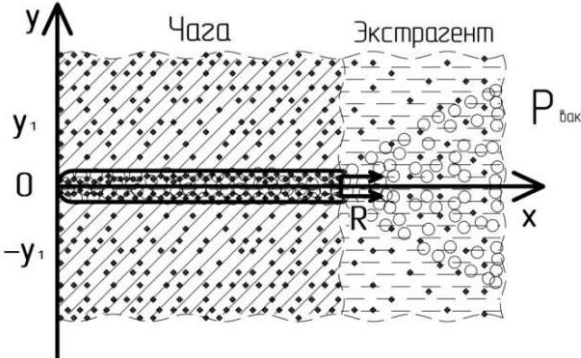


Рис. 3. Режим «вакуумирования»

Математическое описание процесса экстрагирования в режиме «вакуумирования» содержит расчет кинетики тепломассопереноса при изменении параметров паровой фазы в аппарате (внешняя задача) и расчет параметров внутреннего тепломассопереноса при вакуумном вскипании раствора в капиллярах и молярном переносе органических веществ в экстрагент.

Параметры парогазовой фазы определяются интенсивностью испарения жидкости с открытой поверхности и отводом паровоздушной смеси в вакуумную систему, а их изменение представлено дифференциальными уравнениями:

$$\frac{dp_{п}}{d\tau} = \frac{FR' \cdot T_{пг}}{V_{св\mu}} j_{п} - p_{п} \left(\frac{\Pi_{с,п}}{V_{св}} - \frac{1}{T} \frac{dT_{пг}}{d\tau} \right), \quad (16) \quad \frac{dp_{г}}{d\tau} = -p_{г} \left(\frac{\Pi_{вн}}{V_{св}} - \frac{1}{T} \frac{dT_{пг}}{d\tau} \right), \quad (17)$$

$$\frac{dT_{пг}}{d\tau} = \left[-\frac{\Pi_{сгг}}{V_{св}} + \frac{F \cdot R' \cdot T_{ж} \cdot j_{п} \cdot c_{п}}{V_{св}(p_{г} \cdot c_{г} + p_{п} \cdot c_{п})} \right] \cdot T_{пг}, \quad (18)$$

где $p_{г}$, $p_{п}$ – давление газа и пара, соответственно, Па; $T_{пг}$ – температура парогазовой смеси, °С; F – площадь жидкости, м²; R' – универсальная газовая постоянная, Дж/(кмоль·К); $j_{п}$ – плотность потока испаряющейся жидкости, кг/(м²·с); $\Pi_{сгг}$ – производительность системы удаления парогазовой смеси, м³/с; $c_{г}$, $c_{п}$ – теплоемкость газа и пара, соответственно, Дж/(кг·К).

При достижении давления в аппарате равном значению, при котором начинается кипение жидкости, давление в аппарате будет определяться уравнением Антуана:

$$\ln P = A - \frac{B}{T_{ж} + C} \quad (19)$$

где A , B , C – константы уравнения Антуана.

Принимая во внимание, что кипящая жидкость моментально заполняет всё свободное пространство аппарата, изменение температуры жидкости будет прямо пропорционально производительности конденсатора и обратно пропорционально объему аппарата:

$$\frac{dT_{ж}}{d\tau} = -\frac{\Pi_{кон}}{V_{ап}} \cdot T_{ж} \quad (20)$$

где $\Pi_{кон}$ – объемная производительность конденсатора, м³/с.

При решении задачи внутреннего молярного переноса целевого компонента при вакуумном вскипании (внутренней задачи), который обусловлен плотностью экстрагента, его проницаемостью и динамической вязкостью используется уравнение массопереноса (2), где скорость движения жидкости по капилляру определяется уравнением Пуазейля (4). При этом давление внутри частицы определяется давлением в системе на стадии настаивания, т.е. равно атмосферному значению, а давление на поверхности частицы определяется по уравнению (20).

Далее давление в системе вновь поднимают до атмосферного и инициируют нагрев смеси. При переходе в область повышенного давления вскипание в капиллярах мгновенно прекращается. Пары влаги, находящиеся в капиллярах, конденсируются, создавая в них вновь разрежение. За счет создавшегося перепада давления новые порции растворителя заполняют поры и капилляры матрицы. Таким образом, повторяются стадии пропитки, молекулярной диффузии и молярного переноса. При этом насыщенный целевым компонентом раствор внутри капилляров периодически заменяется на менее концентрированный из общего объема смеси. Циклы повторяются до достижения необходимой степени извлечения целевого компонента.

Представленная система уравнений (1) – (20) описывает процесс водно-вакуумной экстракции чаги, характеризуя взаимосвязанные процессы вариации давления в аппарате и внутреннего теплопереноса.

Результаты

Для установления адекватности представленного математического описания реальной физической картине были сопоставлены результаты экспериментальных исследований и математического моделирования процесса.

Экспериментальные данные получены на лабораторном оборудовании при исследовании кинетики водно-вакуумной экстракции березового гриба чага в широком диапазоне изменения режимных параметров [17]. Экспериментальные данные по изменению показателей пористости и удельной поверхности пор относительно различных зон гриба получены методом адсорбционной пирометрии.

Данные математического моделирования получены на основе решения математической модели методом конечных разностей с использованием программного средства Visual Basic for Applications.

На рисунке 4 представлены результаты проверки адекватности физического и математического моделирования. На графиках сплошными линиями изображены данные, полученные расчетным путем, точками – результаты экспериментов.

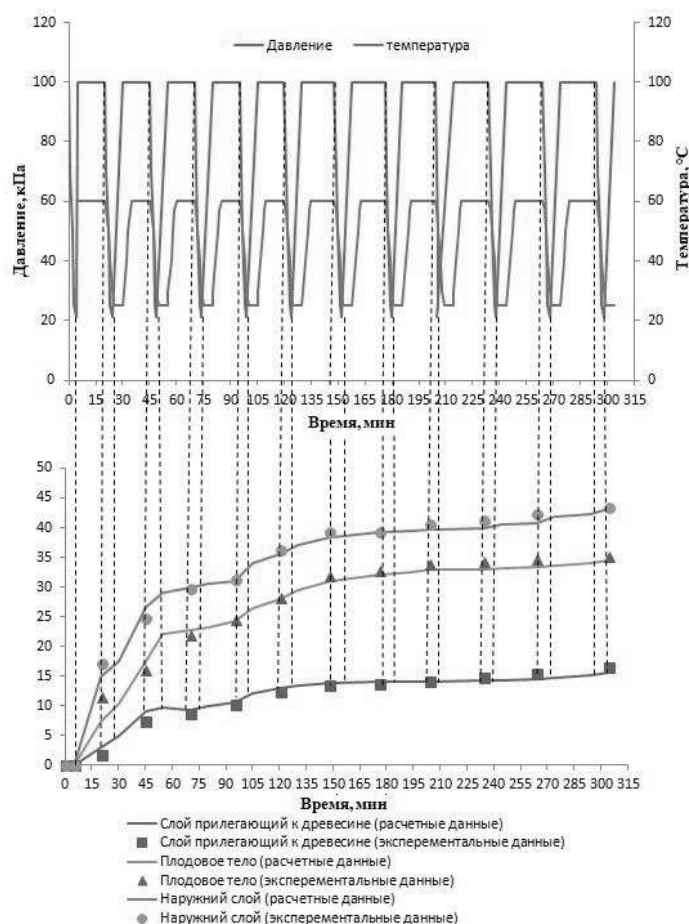


Рис. 4. Экспериментальное исследование и математическое моделирование водно-вакуумной экстракции

В результате математического моделирования установлено, что продолжительность стадии предварительного вакуумирования сухого сырья составляет 4-5 минут. Настаивание при атмосферном давлении оптимально осуществлять в течение 15-20 минут, а последующее вакуумирование – в течение 10 минут. Таким образом, продолжительность одного цикла «настаивание при атмосферном давлении-вакуумирование» составила 25-30 минут. Условием окончания процесса водно-вакуумной экстракции является вымывание целевого компонента в материале до заданного конечного значения. Установлено, что для достижения 30 % концентрации экстрактивных веществ в чаге необходимо провести 11 циклов чередования указанных стадий, включая начальную стадию предварительного вакуумирования в течение 5 минут. Общая продолжительность водно-вакуумной экстракции чаги составит 304 минуты или 5,06 часа.

Проверка на адекватность разработанной математической модели реальным процессам проводилась по известной методике путем статистической обработки опытных данных [18]. Расхождение между расчетными и экспериментальными данными составляет 13 %.

Заключение

Анализ современных способов извлечения биологически активных веществ из растительного сырья и факторов интенсификации экстракционных процессов позволил установить, что одним из перспективных способов является водно-вакуумная экстракция *Inonotus obliquus* (березового гриба чага), заключающаяся в чередовании стадий настаивания при атмосферном давлении, последующего постепенного понижения давления и выдержки при постоянном пониженном давлении в циклическом режиме. В соответствии с физической картиной процесса разработана математическая модель процесса, представленная в виде взаимосвязанных математических описаний каждой стадии процесса и предполагающая решение внешней задачи (тепломассообмена экстрагента с материалом и паровой фазой) и внутренней задачи (тепломассопереноса внутри материала). Проверка адекватности

представленного математического описания осуществлялась посредством сопоставления расчетных данных с результатами экспериментальных исследований. Обработка данных методами математической статистики показала, что среднеквадратичное отклонение экспериментальных данных от расчетных не превышает 13 %. Удовлетворительная сходимость результатов физического и математического моделирования свидетельствует о том, что разработанная математическая модель адекватно описывает процесс водно-вакуумной экстракции чаги и может быть использована для отработки режимных параметров процесса. В результате последующего моделирования была определена продолжительность отдельных стадий и общая продолжительность процесса водно-вакуумной экстракции *Inonotus obliquus*.

Результаты исследований могут быть использованы при разработке и аппаратурном оформлении технологических процессов извлечения биологически активных веществ на лесозаготовительных и фармацевтических предприятиях.

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.

Литература

1. Кароматов И.Д., Муродова М.М. Чага, березовый гриб // Биология и интегративная медицина. 2017. №2. С. 164-179.
2. Шариков А.М., Пашенова Н.В., Нешумаев Д.А., Новицкий Н.А. Исследование антибиотической активности гриба чаги в отношении возбудителя туляремии // Тихоокеанский медицинский журнал. 2010. №1. С. 64-65.
3. Корсун В.Ф., Краснопольская Л.М., Корсун Е.В., Авхукова М.А. Противоопухолевые свойства грибов // М.: Практическая медицина, 2012. - 210 с.
4. Шашкина М.Я., Шашкин П.Н., Сергеев А.В. Химические и медико-биологические свойства чаги // Химико-фармацевтический журнал. 2006. Т. 40. № 10. С. 37-44.
5. Liuping Fan, Shaodong Ding, Lianzhong Ai, KequanDeng (2012) A water-soluble polysac-charide from chaga mushroom had potential as a natural antitumor agent with immunomodulatory activity. // CarbohydrPolym. 2012 Oct 1;90(2):870-4. Epub 2012 Jun 17. PMID: 22840014.
6. Губернаторов В.В., Хасаншин Р.Р., Сафин Р.Р. Применение чаги в медицине и биомедицинских технологиях // В сборнике: Молодежь и XXI век - 2017. материалы VII Международной молодежной научной конференции: в 4 томах. 2017. С. 296-298.
7. Шашкина М.Я., Шашкин П.Н., Сергеев А.В. Чага, Чаговит, Чагалюкс в лечебной и профилактической практике // М.: Эдас. 2009. – 64 с.
8. Сафин Р.Г., Губернаторов В.В., Сафина А.В., Хузеев М.В. Обзор современных исследований в области извлечения биологически активных веществ из березового гриба чага для фармацевтических и пищевых отраслей промышленности // Деревообрабатывающая промышленность. 2019. № 3. С. 93-103.
9. Голованчиков А.Б., Грачева Н.В. Основные закономерности процесса экстрагирования чаги в электрическом поле // Вестник ТГТУ. 2011. №4. С. 950-957.
10. Рыбальченко А.С., Голицын В.П., Комарова Л.Ф. Исследование экстракции солодкового корня // Химия растительного сырья. – 2002. – №4. – С. 55-59.
11. Галяветдинов Н.Р., Воронин А.Е. Переработка древесной зелени с последующим получением полезных продуктов // Вестник Казанского технологического университета. 2014. Т. 17. № 5. С. 138 -140.
12. Гуськов А.А., Родионов Ю.В., Анохин С.А., Гливенко ва О.А., Плотникова С.В. Технология вакуумно-импульсного экстрагирования растворимых веществ из крапивы и хмеля // Инновационная техника и технология. 2018. № 2. С. 23-27.
13. Способ экстрагирования материалов: пат. № 2163827 РФ. заявл. 98113349/12, 06.07.1998; опубл. 10.03.2001.
14. Сафина А.В., Губернаторов В.В., Гараев Р.Р., Разумов Е.Ю. Интенсификация процесса водной экстракции чаги путем периодического понижения давления среды // Деревообрабатывающая промышленность. 2017. № 2. С. 50-53.
15. Safin R.R., Mukhametzyanov S.R., Gubernatorov V.V. Water vacuum-oscillating extraction of chaga / В сборнике: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Scientific-Practical Conference on Quality Management and Reliability of Technical Systems 2019. 2019. С. 012086.

16. Тепляков Ю.А., Рудобашта С.П., Нечаев В.М., Климов А.М. Расчет кинетики процессов экстрагирования из твердых материалов с различной структурой // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2009. Т. 15. № 3. С. 553-560.

17. Сафина А.В., Губернаторов В.В., Сафин Р.Р. Определение продолжительности отдельных стадий водно-вакуумной экстракции *Inonotus obliquus* // Деревообрабатывающая промышленность. 2021. № 3. С. 41-48.

18. Митропольский А.К. Техника статистических вычислений // М.: Наука, 1971. – 576 с.

© 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; Губернаторов В.В. – старший преподаватель кафедры «Архитектура и дизайн изделий из древесины», ФГБОУ ВО «КНИТУ», e-mail: valera_gub@mail.ru.

UDC 661.123

MATHEMATICAL DESCRIPTION OF THE PROCESS OF WATER - VACUUM EXTRACTION OF INONOTUS OBLIQUUS

A.V. Safina, V.V. Gubernatorov

The article presents a mathematical model of water-vacuum extraction of Inonotus obliquus (birch fungus chaga), describing the interrelated processes of the stages of preliminary degassing of the material and sequentially alternating stages of extraction of valuable components at atmospheric pressure and in the vacuum mode. At the same time, the occurring physical phenomena are considered through the solution of the external problem (heat and mass transfer of the extractant with the material and the vapor phase) and the internal problem - heat and mass transfer inside the material. The solution of the internal problem is based on the diffusion transfer of the target component through the capillary wall into the extractant and its molar transfer under the influence of a pressure gradient inside the chaga particle. The adequacy of the developed mathematical model of water-vacuum extraction of chaga was verified by comparing the calculated data with the results of experimental studies, the discrepancy between which was 13%. Subsequent modeling of the extraction process allowed us to determine the rational time parameters of individual stages. It has been established that it is advisable to carry out the stage of preliminary degassing of crushed raw materials for 4-5 minutes, which helps to remove air and moisture vapors from the pores and capillaries of the plant matrix. The effective duration of the infusion stage at atmospheric pressure was 15-20 minutes, and subsequent vacuuming of the system and holding the mixture at reduced pressure is advisable to carry out for 10 minutes. The total duration of water-vacuum extraction of Inonotus obliquus was slightly more than 5 hours during 11 cycles of alternating stages and achieving 30% concentration of extractive substances in the chaga.

Keywords: extraction, *Inonotus obliquus*, birch fungus chaga, mathematical description, modeling, adequacy.

References

1. Karamatov I.D., Muradova M.M. [Chaga, birch mushroom] *Biologiya i integrativnaya medicina* [Biology and integrative medicine] 2017. No.2. pp. 164-179. (In Russ.)
2. Sharikov A.M., Pashenova N.V., Neshumaev D.A., Novitsky N.A. [Investigation of the antibiotic activity of the fungus chaga against the causative agent of tularemia] *Tihookeanskij medicinskij zhurnal* [Pacific Medical Journal] 2010. No.1. pp. 64-65. (In Russ.)
3. Korsun V.F., Krasnopol'skaya L.M., Korsun E.V., Avkhukova M.A. [Antitumor properties of mushrooms] *Prakticheskaya medicina* [Practical medicine] 2012. - 210 p. (In Russ.)
4. Shashkina M.Ya., Shashkin P.N., Sergeev A.V. [Chemical and biomedical properties of chaga] *Himikofarmaceuticheskij zhurnal* [Chemico-pharmaceutical journal] 2006. Vol. 40. No. 10. pp. 37-44. (In Russ.)
5. Liuping Fan, Shaodong Ding, Lianzhong Ai, Kequan Deng (2012) A water-soluble polysaccharide from chaga mushroom had potential as a natural antitumor agent with immunomodulatory activity. // *Carbohydr Polym.* 2012 Oct 1 ;90(2):870-4. Epub 2012 Jun 17. PMID: 22840014.
6. Gubernators V.V., Khasanshin R.R., Safin R.R. [Application of chaga in medicine and biomedical technologies] *V sbornike: Molodezh' i XXI vek - 2017. materialy VII Mezhdunarodnoj molodezhnoj nauchnoj konferencii: v 4 tomah* [In the collection: Youth and the XXI century - 2017. materials of the VII International Youth Scientific Conference: in 4 volumes] 2017. pp. 296-298. (In Russ.)

7. Shashkina M.Ya., Shashkin P.N., Sergeev A.V. [Chaga, Chagovit, Chagalyux in therapeutic and preventive practice] M.: Edas. [Moscow: Edas] 2009. – 64 p. (In Russ.)
8. Safin R.G., Gubernatorov V.V., Safina A.V., Khuzeev M.V. [Review of modern research in the field of extraction of biologically active substances from birch fungus chaga for pharmaceutical and food industries] Derevoobrabatyvayushchaya promyshlennost' [Woodworking industry] 2019. No. 3. pp. 93-103. (In Russ.)
9. Golovanchikov A.B., Gracheva N.V. [Basic laws of the process of extracting chaga in an electric field] Vestnik TSTU. 2011. No. 4. pp. 950-957. (In Russ.)
10. Rybalchenko A.S., Golitsyn V.P., Komarova L.F. [Investigation of licorice root extraction] Himiya rastitel'nogo syr'ya [Chemistry of plant raw materials] 2002. – No. 4. – pp. 55-59. (In Russ.)
11. Galyavetdinov N.R., Voronin A.E. [Processing of woody greens with the subsequent obtaining of useful products] Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta [Bulletin of the Kazan Technological University] 2014. V. 17. No. 5. S. 138-140. (In Russ.)
12. Guskov A.A., Rodionov Yu.V., Anokhin S.A., Glivenkova O.A., Plotnikova S.V. [Technology of vacuum-pulse extraction of soluble substances from nettles and hops] Innovacionnaya tekhnika i tekhnologiya [Innovative equipment and technology] 2018. No. 2. pp. 23-27. (In Russ.)
13. Method of extracting materials: patent No. 2163827 Russian Federation. declared 98113349/12, 06.07.1998; publ. 10.03.2001. (In Russ.)
14. Safina A.V., Gubernatorov V.V., Garaev R.R., Razumov E.Yu. [Intensification of the process of aqueous extraction of chaga by periodically lowering the pressure of the medium] Derevoobrabatyvayushchaya promyshlennost' [Woodworking industry] 2017. No. 2. pp. 50-53. (In Russ.)
15. Safin R.R., Mukhametzyanov S.R., Gubernatorov V.V. Water vacuum-oscillating extraction of chaga / In the Collection: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Scientific-Practical Conference on Quality Management and Reliability of Technical Systems 2019. 2019. p. 012086. (In Russ.)
16. Teplyakov Yu.A., Rudobashta S.P., Nechaev V.M., Klimov A.M. [Calculation of the kinetics of extraction processes from solid materials with different structures] Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Bulletin of the Tambov State Technical University] 2009. Vol. 15. No. 3. pp. 553-560. (In Russ.)
17. Safina A.V., Gubernatorov V.V., Safin R.R. [Determination of the duration of individual stages of water-vacuum extraction of inonotus obliquus] Derevoobrabatyvayushchaya promyshlennost' [Woodworking industry] 2021. No. 3. pp. 41-48. (In Russ.)
18. Mitropolsky A.K. [Technique of statistical computing] // Moscow: Nauka, 1971. – 576 p. (In Russ.)

©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; Gubernatorov V.V. - Senior lecturer of the Department of Architecture and Design of Wood Products, KNRTU, e-mail: Valera_gub@mail.ru.

УДК 691.175

ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА БИОРАЗЛАГАЕМЫХ КОМПОЗИТОВ ДЛЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ЦЕЛЕЙ

Н.Р. Галяветдинов, Г.Ф. Илалова, К.В. Саерова, Я.Д. Погодина

В настоящее время все более актуальным становится выращивание однолетних, а также многолетних растений с закрытой корневой системой, ввиду хорошей укореняемости посадочного материала. Для этих целей широко применяют пластиковые контейнеры, которые после пересадки растений обычно выбрасывается, создавая при этом экологическую нагрузку на окружающую среду. В то же время, существует технология применения одноразовых бумажных (картонных) контейнеров. Однако использование данных методов для выращивания растений также имеет недостатки, одним из которых является низкая прочность при воздействии на нее воды. Хорошей альтернативой вышеописанных видов контейнеров является контейнеры из биоразлагаемых материалов, которые лишены всех перечисленных недостатков. По этой причине в статье представлены исследования, направленные на получение биоразлагаемого композитного материала для контейнера на основе полигидроксibuтирата и лигнина.