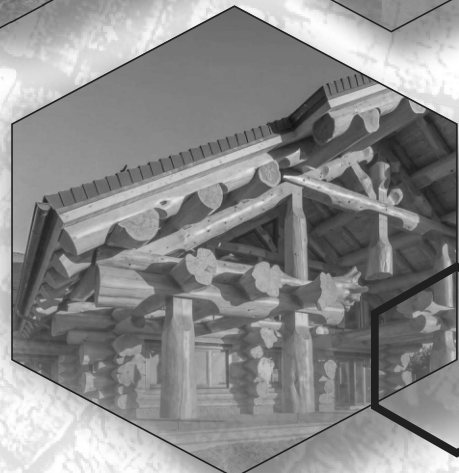
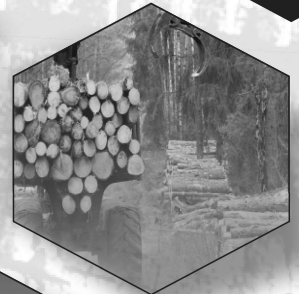
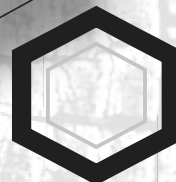
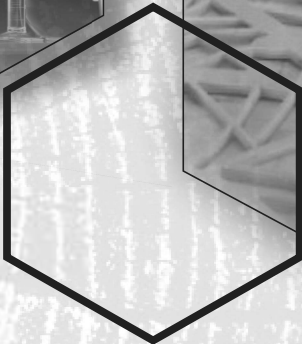
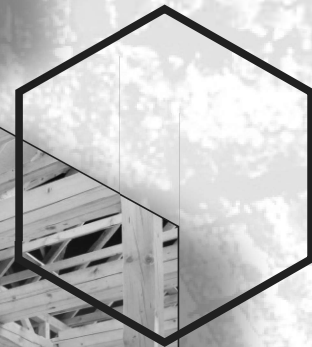


Дерево

ISSN 0011-9008

1/2022

обрабатывающая промышленность



ДЕРЕВО

ISSN 0011-9008

обработывающая ПРОМЫШЛЕННОСТЬ

1/2022

Учредитель: Редакция журнала
«Деревообрабатывающая промышленность»
Основан в апреле 1952 г.

Журнал включен в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук по группе научных специальностей 05.21.00 – Технология, машины и оборудование лесозаготовок, лесного хозяйства, деревопереработки и химической переработки биомассы дерева.

Редакционная коллегия:



Главный редактор
Сафин Руслан Рушанович
д.т.н., профессор

ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет»

Торопов Александр Степанович, д.т.н., профессор
ФГБОУ ВО «Поволжский государственный технологический университет»

Царев Евгений Михайлович, д.т.н., профессор
ФГБОУ ВО «Поволжский государственный технологический университет»

Черных Михаил Михайлович, д.т.н., профессор
ФГБОУ ВО «Ижевский государственный технический университет им. Калашникова»



Зам. главного редактора
Разумов Евгений Юрьевич
д.т.н., профессор

Czech University of Life Sciences Prague,
Faculty of Forestry and Wood Sciences,
Czech Republik



Зам. главного редактора
ответственный за
международную ред. коллегию
Štefan Barčík, Prof. ing., Ph.D.

Technical university in Zvolen,
Faculty of environmental and
manufacturing technology,
Slovakia

Сафин Рушан Гареевич, д.т.н., профессор
ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет»

Башикиров Владимир Николаевич, д.т.н., профессор
ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет»

Хасанишин Руслан Ромелевич, д.т.н., доцент
ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет»

Гаспарян Гарик Давидович, д.т.н., профессор
ФГБОУ ВПО «Братский государственный университет»

Григорьев Игорь Владиславович, д.т.н., профессор
ФГБОУ ВО «Арктический государственный агротехнологический университет»

Мазуркин Петр Матвеевич, д.т.н., профессор
ФГБОУ ВО «Поволжский государственный технологический университет»

Романов Евгений Михайлович, д.с.-х.н., профессор
ФГБОУ ВО «Поволжский государственный технологический университет»

Рыкунин Станислав Николаевич, д.т.н., профессор
ФГБОУ ВПО «Мытищинский филиал МГТУ им. Баумана»

Семенов Юрий Павлович, д.т.н., профессор
ФГБОУ ВПО «Мытищинский филиал МГТУ им. Баумана»

Dr. prof. Vlado Goglia
University of Zagreb, Croatia

Dr. prof. Ruzica Beljo Lucic
University of Zagreb, Croatia

Dr. prof. Nencho Delijski
University of Forestry, Bulgaria

Dr. prof. Ladislav Dzurenda
Technical University, Slovakia

Dr. prof. Etele Csanady
University of West Hungary

Dr. prof. Alfred Teischinger
BOKU University of Natural Resources and Applied Life Sciences,
Austria

Marian Babiak, PhD, Dr.h.c.prof.RNDr.
Czech University of Life Sciences Prague,
Czech Republic

Dr. PhD Monica Sarvasova Kvietkova
Czech University of Life Sciences Prague,
Czech Republic

Адрес редакции:
117303, Москва, ул. Малая
Юшуньская, д. 1, корп. 1,

journal_woodworking@mail.ru
www.dop1952.ru

© «Редакция журнала
«Деревообрабатывающая
промышленность», 2022

Свидетельство о регистрации
СМИ в Роскомпечати № 014990
Формат бумаги 60x88/8
Тираж 720 экз.

СОДЕРЖАНИЕ
НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ

Лесоинженерное дело

Ахтямов Э.Р., Кручинин И.Н., Побединский В.В., Кручинина Е.И., Чижов А.А.

Разработка требований к применению добавок из вспученного вермикулита для строительства лесовозных дорог на территориях северного, приполярного и полярного урала 3

Жалко М.Е., Бургонутдинов А.М., Бурмистрова Д.Д., Ченушкина С.В., Данилов В.В.

Разработка методов повышения транспортно-эксплуатационных показателей лесовозных автомобильных дорог, работающих в сложных природно-климатических условиях 10

Жалко М.Е.

Повышение морозоустойчивости дорожных одежд лесовозных автомобильных дорог 18

Физико-механические процессы в деревообработке

Лукаш А.А., Глотова Т.И., Малышева Н.П., Путрова Н.П., Чернышев О.Н.

Экспресс-метод определения себестоимости продукции при расчете технико-экономических показателей деревообрабатывающих цехов 24

Разумов Е.Ю., Байгильдеева Е.И., Сафина А.В., Сафин Р.Г.

Получение бетулина высокой степени очистки 33

Скурыдин Ю.Г., Скурыдина Е.М., Хабибуллина А.Р., Байгильдеева Е.И.

Физико-механические характеристики композиционных материалов из древесины березы, гидролизованной в присутствии перекиси водорода 41

Лукаш А.А., Глотова Т.И., Романов В.А., Феллук А., Чернышев О.Н.

Определение прочности склеивания при нормальном отрыве для разработки новых клеевых составов 55

Сафин Р.Г., Просвирников Д.Б., Арсланова Г.Р., Валеев К.В., Зиатдинова Д.Ф., Гурьянов Д.А.

Математическое описание процесса экстракции фенольных соединений 62

Артёмов А.В., Ершова А.С., Бурындин В.Г., Савиновских А.В.

Изучение изменений прочностных показателей пластиков без связующего по потере массы при биоразложении 71

Сафина А.В., Абдуллина Д.Р., Зиатдинова Д.Ф., Сафин Р.Г., Тимербаев Н.Ф., Валеев К.В.

Моделирование процесса извлечения бетулина из бересты березы 80

Химическая технология древесины

Строганова М.С., Жильникова Н.А.

Методика оценки самоочищающей способности водоема при влиянии стоков сульфат-целлюлозного производства 90

Чирков Д.Д., Захаров П.С., Шкуро А.Е., Ершова А.С.

Термомеханическая активация наполнителей для древесно-минеральных полимерных композиционных материалов 103

9. Hui-wang Cui, Guan-ben Du. Development of a novel polyvinyl acetate type emulsion curing agent for urea formaldehyde resin. *Wood Science and Technology*, 2013. vol. 47 (1). pp. 105–119. DOI: 10.1007/s00226-012-0489

10. Matthew Edoga. Ethylated Urea-Ether-Modified Urea-Formaldehyde Resins, Part I: Structural and Physic chemical Properties. *Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies*, 2006. vol. 5(9). pp. 121 - 136.

11. Nadir Ayrimis, Jin-Heon Kwon, Seung-Hwan Lee, Tae-Hyung Han and Chan-Woo Park. Microfibrillated-cellulose-modified urea-formaldehyde adhesives with different F/U molar ratios for wood-based composites. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2016. vol. 30(18). pp. 2032–2043. DOI: 10.1080/01694243.2016.1175246

12. Razinkov E.M. The use of fluorosilicate ammonium as a hardener of urea-formaldehyde resins / E.M. Razinkov, L.V. Ponomarenko // *News of higher educational institutions - Forestry magazine*. - 2001. - No. 5 - 6. - pp. 76-80.

13. Glazkov S.S. Modification of urea-formaldehyde resins with latexes / S.S. Glazkov, B.C. Boldyrev // *Woodworking industry*. - 1997. - No. 4. - pp. 15-18.

14. Plotnikov, N.P. Modification of urea -formaldehyde binders for the production of particle board / N.P. Plotnikov, G.P., Plotnikova // *Bulletin of KrasGAU*. - 2013. - No. 11. - pp. 152 - 158.

15. Popov, V.M. Intensive technology for creating glue joints of increased strength on the basis of polymer adhesives subjected to joint influence of physical fields / V.M. Popov, A.V. Latynin, D.S. Grigoriev // *Modern trends in the development of science and technology*. - 2016. - No. 4. - pp. 89–92.

16. Ugryumov, S.A. Kinetics of swelling and water absorption of particle boards with a water-repellent additive / S.A. Ugryumov, E.A. Borovkov, A.B. Shcherbakov // *Bulletin of KSTU: periodic scientific journal*. - Kostroma: KSTU, 2004. - No. 9. - S. 99 - 101.

17. Tsvetkov, V.E. Evaluation of the adhesion work of the modified phenol -formaldehyde oligomer / V.E. Tsvetkov, S.A. Ugryumov // *Forestry Bulletin*. - 2009. - No. 4. - S. 127 - 129.

18. Shishakov E.P. Fillers and catalysts effect on the physicochemical properties of urea-formaldehyde resins / E.P. Shishakov, S.I. Shpak, P.A. Chubis, M.O. Shevchuk // *Trudy BGTU [Proceedings of BSTU], series 4. Chemistry, Organic Substances Technology and Biotechnology*, 2015. pp. 102–108.

19. Ebnesajjad, S. *Surface Treatment of Materials for Adhesive Bonding* / S. Ebnesajjad. – Amsterdam: William Andrew, 2014. – 337 p.

20. Zamilova A.F.. Influence of polarization of the walnut plywood in the process of preparation on its water and moisture absorption / A.F. Zamilova, M.F. Galikhanov // *AIP Conference Proceedings*. – 2016. – Vol. 1767.– pp. 020038.

©**Lukash A.A.** – Grand PhD of Technical Sciences, Professor of the Department of woodworking technology, Bryansk State University of Engineering and Technology (BSUET), e-mail: mr.luckasch@yandex.ru; **Glotova T.I.** – PhD of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of woodworking technology, BSUET, e-mail: glotowa.tatjana2016@yandex.ru; **Romanov V.A.** – PhD of Technical Sciences, Head of the Department of woodworking technology, BSUET, e-mail: vromanov62@mail.ru; **Felluh A.** – graduate student of the Department of woodworking technology, BSUET, e-mail: fellouhabdo@gmail.com; **Chernyshev O.N.** – PhD of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Mechanical Wood Processing and Industrial Safety, Ural State Forestry University, e-mail: olegch62@mail.ru.

УДК 674.816

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССА ЭКСТРАКЦИИ ФЕНОЛЬНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Р.Г. Сафин, Д.Б. Просвирников, Г.Р. Арсланова, К. В. Валеев, Д.Ф. Зиатдинова, Д.А. Гурьянов

В работе представлено физическое и математическое описание процесса экстракции фенольных соединений из растительного сырья, в частности из коры и листьев деревьев семейства «Salicaceae». Описана методика проведения экспериментальных и аналитических исследований и процесса экстракции. Определено влияние расхода экстрагента на скорость пропитки частиц. Оптимальное

значение расхода экстрагента, равное 100 л/мин, способствовало более быстрому проникновению растворителя внутрь частиц. Были получены расчетные и экспериментальные значения изменения температуры по слоям материала и кинетика концентрации извлеченных экстрактивных веществ в экстракте. Выявлено, что нагрев слоев материала различается в пределах 1-2 минуты, а полное время нагрева составило 7 минут. Оптимальная длительность процесса экстракции составляет 35-45 минут.

Ключевые слова: математическое описание, экстракция, фенольные соединения, семейство «Salicaceae».

Введение

В настоящее время экстракция отдельных компонентов из различных видов растительного сырья является одним из распространённых технологических процессов во многих отраслях промышленности. Особое внимание уделяется исследованиям в области физиологии и биохимии растительного сырья, связанных с разнообразием и биологическим действием фенольных соединений — веществ вторичного метаболизма, образующихся в растениях [1].

Большинство фенольных соединений являются фармакологически активными веществами, обладающими биологической активностью по отношению к живым организмам. К наиболее распространенным видам фенольных соединений с высокой биологической активностью относят фенолгликозиды и флавоноиды, содержащиеся в коре и листьях деревьев семейства ивовых «Salicaceae» [2, 3].

Главной стадией в процессе извлечения фенольных соединений является процесс экстракции. Суть процесса заключается в выделении полезных веществ из пористого твердого тела путем избирательной растворимости. Экстрагирование происходит путем диффузии извлекаемых веществ из пор растительных клеток в окружающую жидкую среду [4,5]. При экстрагировании древесного сырья и зелени наблюдаются следующие стадии:

- 1) проникновение экстрагента в сырье через первичную и вторичную стенки растительной клетки;
- 2) смачивание веществ, находящихся внутри клеток;
- 3) растворение веществ, находящихся в полостях клетки на ее стенках;
- 4) массоперенос веществ через клеточные стенки путем молекулярной диффузии;
- 5) массоотдача веществ от поверхности материала в окружающую жидкую среду.

Из основного уравнения массопередачи следует, что количество вещества, протифундировавшего через некоторый слой, прямо пропорционально времени экстракции. Однако необходимо стремиться к максимальному извлечению в кратчайшие сроки, максимально используя все прочие факторы, ведущие к интенсификации процесса. Слишком высокая продолжительность процесса экстракции приводит к загрязнению вытяжек сопутствующими веществами [6].

На подвижной границе (фронте растворения) концентрация раствора равна концентрации насыщения. В периферийном слое создается поле концентраций, изменяющееся в пространстве и времени. Его можно представить в виде поверхностей одинаковых концентраций (изоконцентрационных), постепенно перемещающихся вглубь пористого тела. Их вид зависит от размеров, формы и структуры пористого тела, размеров и формы пор. На поверхности пористого тела концентрация извлекаемого компонента меньше, и больше, чем в основном объеме растворителя. Скорость диффузии вещества от фронта растворения к поверхности пористой частицы меньше скорости молекулярной диффузии вследствие извилистости пор, блокировки диффузионного потока инертным скелетом, торможения движения молекул стенками пор и других факторов [7,8]. При экстрагировании растительного сырья происходят три типа процессов – внутренний массоперенос, массоперенос через диффузионный подслой и конвективный массоперенос [9].

Целью работы является математическое описание и анализ результатов математического моделирования и экспериментальных данных процесса экстракции фенольных соединений.

Материалы исследований и математическое описание процесса экстракции фенольных соединений

На установке для циркуляционной экстракции (рис.1) были проведены экспериментальные исследования по экстракции фенольных соединений. Для исследования использовали измельченное

сырье - кора и листья ивы (*Salix*) и осины (*Populus tremula*) семейства (*Salicaceae*), собранные в Республике Татарстан в Лаишевском районе в период май -июнь 2018-2020 гг., проходящее сквозь сито с диаметром отверстий 2 мм.

Измельченный материал помещался в экстрактор установки (рис. 1), в который также подавался экстрагент (водно-этанольный раствор). Экстрагент, проходя через слой сырья сверху вниз, пропитывал его, насыщался экстрактивными веществами и, при помощи циркуляционного насоса 8, поступал в нижнюю часть испарителя 6, где нагревался и выпаривался. Образовавшиеся пары экстрагента поднимались в конденсатор паров 5, где конденсировались. Конденсат эжекторным насосом 4, через нагревательный элемент 3, вновь подавался в верхнюю часть экстрактора 1. Оставшийся выпаренный экстракт сливался и поступал на сушку.

Сырье и экстрагент имели начальную температуру 20 °С. Экстрагент, концентрация этанола в котором варьировалась от 40 до 80 %, подавался в верхнюю часть экстрактора посредством работы циркуляционного насоса, прокачивающего экстрагент через проточный нагревательный элемент. Температура экстрагента варьировалась от 25 до 75 °С.

При исследовании процесса пропитки материала экстрагентом во время экстракции каждые 4 минуты после подачи экстрагента отбирались пробы и весовым методом определялось содержание экстрагента в материале. Расход экстрагента регулировался вентилем и расходомером и составлял 20, 60, 100 л/мин. Начальное влагосодержание сырья составило 60 % [10].

Также, при нагревании сырья во время циркуляции экстрагента, измерялась температура в слоях материала на высотах 15, 250, 490 мм. Общая высота слоя материала составляла 500 мм.

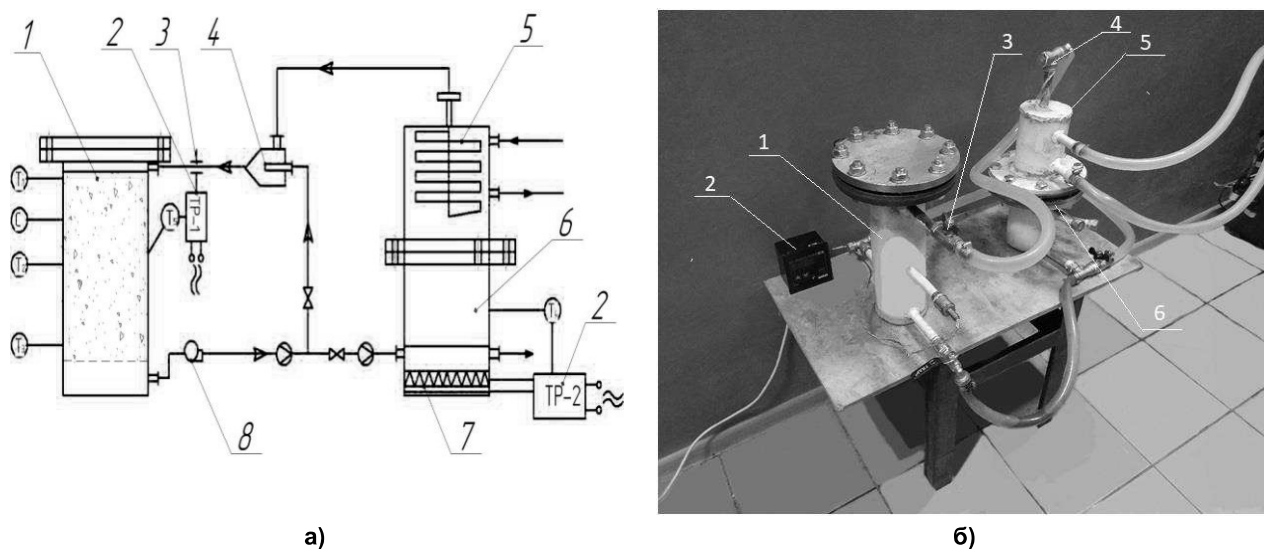


Рис. 1. Экспериментальная установка для экстракции растительного сырья: принципиальная схема (а) и внешний вид (б): 1 – экстрактор; 2 – регулятор температуры; 3 – проточный нагревательный элемент; 4 – эжекторный насос; 5 – конденсатор паров; 6 – испаритель; 7 – индукционная плита; 8 – циркуляционный насос

Математическое описание процесса экстракции фенольных соединений состоит из уравнения движения жидкости в капилляре частицы с принудительной циркуляцией экстрагента, которое запишется в виде полной скорости движения жидкости (м/с) [11]:

$$V_n = \frac{\cos\theta}{4} \frac{\sigma}{\mu_{жс}} \frac{r}{l_ч} \varphi_{mp} \cdot g \cdot \cos\varphi \cdot \tau + \frac{r^2 \Delta p}{2\mu_{жс} l_{жс}} \quad (1)$$

где r – радиус капилляра, м; θ – краевой угол смачивания пропитывающим раствором поверхности материала; $l_ч$ – толщина частицы, м; $\mu_{жс}$ – вязкость пропитывающего раствора, Па·с; σ – поверхностное натяжение пропитывающего раствора, Н/м; τ – время пропитки, с; φ_{mp} – коэффициент трения; g – ускорение свободного падения, м/с²; φ – угол наклона частиц; Δp – разность давлений снаружи и внутри частицы, Па.

В уравнении (1) первое слагаемое – скорость, приобретаемая жидкостью от сил капиллярного всасывания, второе – скорость, теряемая жидкостью от сил трения, третье - скорость, приобретаемая жидкостью от сил, возникающих при наличии принудительной циркуляции (закон Пуазейля).

Изменение содержания экстрагента в частице описывается уравнением [12]:

$$\frac{dC_3}{dl_q} = - \frac{j_{жк}}{k_m \cdot \rho_{0ч}} \quad (2)$$

Учитывая, что поток жидкости в частице определяется поперечными размерами пор или пористостью частицы ε и скоростью жидкости v_n :

$$j_{жк} = v_n \rho_{жк} \varepsilon \quad (3)$$

в котором v_n , определяется по (1), можно записать:

$$\frac{dC_3}{dl_q} = - \frac{v_n \rho_{жк} \varepsilon}{k_m \cdot \rho_{0ч}} \quad (4)$$

Поделив обе части (4) на $d\tau$, или, если учесть, что $dl_q = v_n d\tau$, получим:

$$\frac{dC_3}{d\tau} = - \frac{v_n \rho_{жк} \varepsilon}{k_m \cdot \rho_{0ч}} \frac{dl_q}{d\tau} \quad (5)$$

или

$$\frac{dC_3}{d\tau} = - \frac{v_n^2 \rho_{жк} \varepsilon}{k_m \cdot \rho_{0ч}} \quad (6)$$

В уравнении (6) коэффициент массопроводности (m^2/c) k_m можно определить расчетным или экспериментальным путем.

Изменение температуры частицы во время принудительного обтекания нагретым экстрагентом описывается выражением [13]:

$$\frac{\partial l_{cl}}{\partial \tau} = a \cdot \frac{\partial^2 t_{cl}}{\partial l_{cl}^2} \quad (7)$$

с начальным условием

$$t_{cl}(0, l_{cl}) = t_{clнач} \quad (8)$$

и граничным условием

$$\alpha(t_3 - t_{cl}) = - \lambda_{cl} \left. \frac{\partial t_{cl}}{\partial l_{cl}} \right|_{l_{cl}=0}, \quad (9)$$

где коэффициент теплоотдачи может быть определен как [14]:

$$\alpha = 0.01 \frac{\lambda}{h} (\text{Re} \cdot \text{Pr} \cdot \text{Ga})^{1/3} \quad (10)$$

в случае турбулентного обтекания, $\text{ккал}/\text{м}^2 \cdot \text{час} \cdot \text{°C}$ и:

$$\alpha = 0,67 \frac{\lambda}{h} \text{Re}^{1/3} \cdot \text{Pr}^{1/2} \cdot \text{Ga}^{2/9} \quad (11)$$

в случае ламинарного, $\text{ккал}/\text{м}^2 \cdot \text{час} \cdot \text{°C}$.

Безразмерные критерии, входящие в (10), (11), имеют следующие значения: $\text{Re} = \frac{4\delta^*}{\mu g}$, где δ^* – плотность орошения в $\text{кг}/\text{м} \cdot \text{сек}$, то есть количество жидкости, орошающей 1 м периметра частицы в сек; $\text{Pr} = \frac{3600C_3 \mu g}{\lambda}$; $\text{Ga} = \frac{g h^3}{v^2}$, где h – высота поверхности, м.

Коэффициент температуропроводности a в (7) определяется по формуле:

$$a = \frac{\lambda_{cl}}{c_{cl} \rho_{cl}} \quad (12)$$

Поток диффундирующего растворенного вещества (экстрактивные вещества) опишется согласно первому закону Фика ($\text{кг}/\text{м}^2 \cdot \text{с}$) и определится как:

$$j_{\text{эв}} = D_{\text{эв}} \frac{dC_{\text{эв}}}{dl_{\text{ч}}}, \quad (13)$$

где $C_{\text{эв}}$ – концентрация экстрактивных веществ, %; $D_{\text{эв}}$ – коэффициент диффузии, зависящий от параметров растворителя, проникающих частиц и температуры, $\text{см}^2/\text{с}$, $l_{\text{ч}}$ – длина частицы.

Выразив из (13) $C_{\text{эв}}$ и дифференцируя по $\partial\tau$, получим:

$$\frac{dC_{\text{эв}}}{d\tau} = -\frac{j_{\text{эв}}}{D_{\text{эв}}} \frac{dl_{\text{ч}}}{d\tau}, \quad (14)$$

где $j_{\text{эв}} = \frac{dG_{\text{эв}}}{A_{\text{ч}} m_{\text{ч}} d\tau}$, а $\frac{dl_{\text{ч}}}{d\tau} = v_n$ – скорость движения жидкости, определяемая по уравнению (1), $G_{\text{эв}}$ – количество диффундирующих экстрактивных веществ, г; τ – продолжительность процесса диффузии, с; $m_{\text{ч}}$ – масса слоя, г; $A_{\text{ч}}$ – удельная поверхность частиц материала, $\text{м}^2/\text{г}$.

В упрощенном виде уравнение (14) запишется в виде:

$$\frac{dC_{\text{эв}}}{d\tau} = -\frac{j_{\text{эв}} v_n}{D_{\text{эв}}}. \quad (15)$$

Коэффициент диффузии $D_{\text{эв}}$ (для каждого вида экстрактивных веществ имеет свои значения), который можно назвать коэффициентом массопроводности, по своей величине значительно ниже коэффициента свободной диффузии вследствие уменьшения площади переноса вещества (влияние пористости и капиллярной структуры пористого тела) [15].

Для решения уравнений, представленных в выше, был выбран метод конечных разностей [16], в основе которого лежит замена дифференциальных уравнений конечно-разностными выражениями. Блок-схема алгоритма расчета, позволяющая моделировать все стадии процесса экстракции фенольных соединений, представлена на рис. 2.

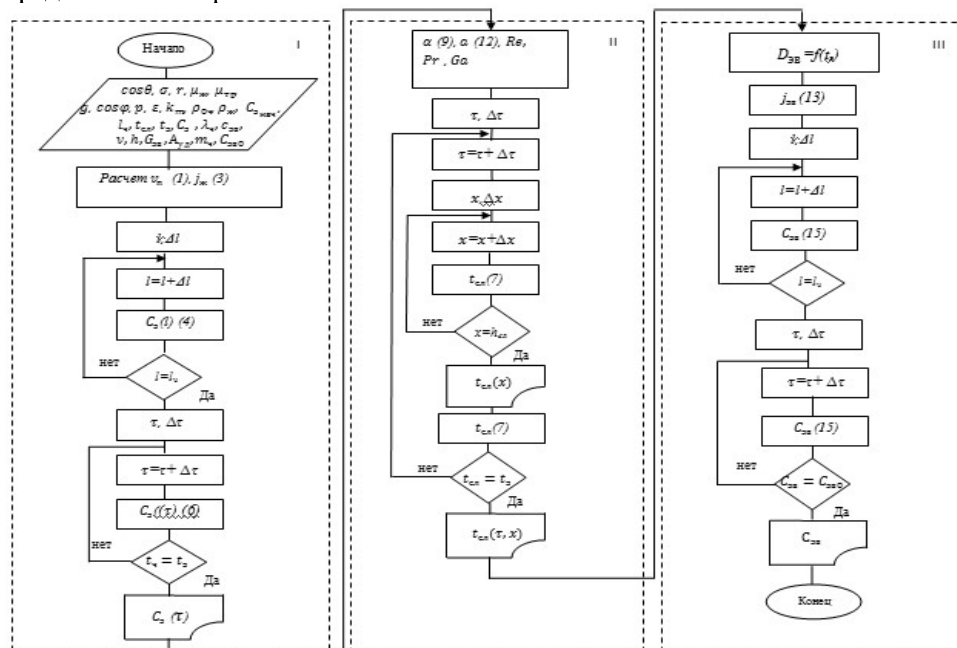


Рис. 2. Блок-схема алгоритма расчета процесса экстракции фенольных соединений

Алгоритм расчета поделен на 3 секции: 1-ая секция позволяет рассчитать параметры процесса пропитки растительного сырья в присутствии экстрагента, 2-ая секция позволяет рассчитать изменение температуры, 3-я секция описывает расчет концентрации экстракта.

Таким образом, полученные данные в каждой секции, являются исходными данными для решения последующей секции. Для реализации представленного алгоритма расчета были использованы такие среды программирования как QBasic, MS Excel [17].

Анализ результатов математического моделирования и экспериментальных данных процесса экстракции фенольных соединений

Для анализа представленного математического описания были просчитаны ключевые дифференциальные уравнения (6), (7), (15), и использованы экспериментальные значения, полученные на установке (рис. 1)

Результаты измерения содержания экстрагента в сырье и расчетов уравнения (6) представлены на рис. 3. Точками показаны экспериментальные значения (по 2 параллельных опыта), линиями – расчетные значения.

Как видно из рис. 3 достижение максимального содержания экстрагента в сырье наблюдается для всех трех случаев подачи экстрагента с разницей примерно в 0,5-1 мин. Увеличение расхода экстрагента (при одинаковой температуре 75 °С) способствует более быстрому проникновению его внутрь частиц, что объясняется гидродинамикой потока в слое измельченных частиц. Увеличивая скорость подачи экстрагента, увеличивается перепад давления в слоях материала, что способствует ускорению процесса пропитки. Так, увеличение расхода экстрагента с 20 до 100 л/мин способствует увеличению конечного содержания экстрагента в сырье на 6 %. При проведении процесса экстракции нельзя ограничиваться лишь естественной пропиткой, это приводит к увеличению продолжительности экстракции. Поэтому, интенсификация пропитки путем создания циркуляционного потока обеспечивает быстрый старт процессов экстракции [9].

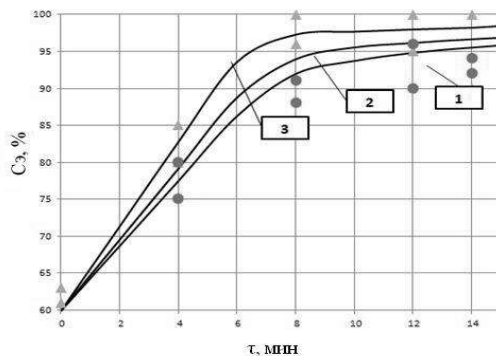


Рис. 3. Кинетика пропитки при различных расходах экстрагента: 1 – 20 л/мин, 2 – 60 л/мин, 3 – 100 л/мин

Также повышенные скорости жидкости способствуют отведению извлеченных веществ из слоя материала, что при условии подачи свежего экстрагента с постоянной концентрацией растворителя создает максимальный градиент концентраций.

На рис. 4. представлены результаты расчета и экспериментальные значения (точки) распределения температуры в слоях материала при нагревании во время циркуляции экстрагента. Как видно из рис. 4 первый слой (490 мм), наиболее близкий к подаче горячего экстрагента (температура 75 °С), нагревается быстрее остальных. Однако нагрев остальных слоев наблюдается с небольшим отставанием (1-2 мин), что в условиях продолжительной экстракции (до 60 мин) не является препятствием.

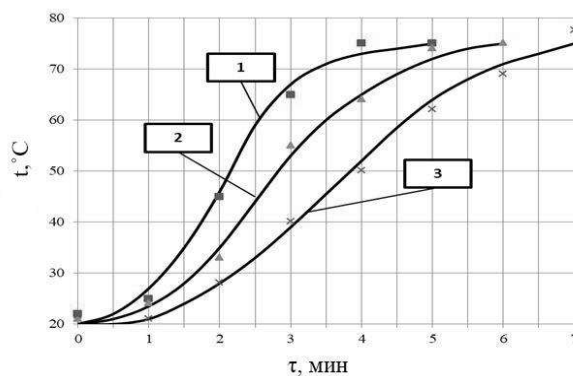


Рис. 4. Кинетика температуры по слоям материала при циркуляционной экстракции: 1 – высота слоя 490 мм, 2 – высота слоя 250 мм, 3 – высота слоя 15 мм

На рисунке 5 представлены кинетические зависимости концентрации извлеченных веществ в экстрактах ивы и осины, а также расчетные значения изменения концентраций. Экстракция проводилась с концентрацией экстрагента 80 %.

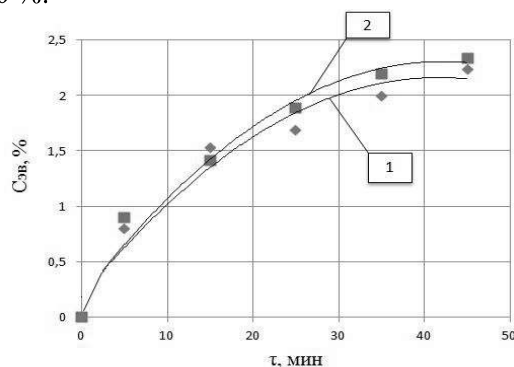


Рис. 5. Кинетические зависимости концентрации извлеченных экстрактивных веществ в экстракте: 1 – осина, 2 – ива

Исследования показывают, что экстрагирование растительного сырья в течение 35-45 минут показывает одинаковый суммарный максимальный выход извлеченных экстрактивных веществ в це лом.

Заключение

В соответствии с физикой процесса экстракции растительного сырья разработано математическое описание процесса экстракции фенольных соединений. По результатам проведенных исследований установлено, что увеличение расхода экстрагента способствует более быстрому проникновению растворителя внутрь частиц и ускорению отведения извлеченных веществ из слоя материала. Увеличение расхода экстрагента с 20 до 100 л/мин способствует увеличению конечного содержания экстрагента в сырье на 6 %. Определено, что распределение температуры в слоях материала достигает своего максимума в течение 7 минут, а оптимальная длительность процесса экстракции составляет 35-45 минут.

Литература

1. Пояркова Н. М., Сапарклычева С. Е. Физиологическая роль фенольных соединений // *Аграрное образование и наука*. – 2019. – № 4. – С. 14
2. Литвиненко В. И. Химия природных флавоноидов и создание препаратов при комплексной переработке растительного сырья: автореф. дис. ... д-ра хим. наук: 15.00.02. – Харьков: ХНИИХФИ, 1990. – 29 с.
3. Сафина А.В., Арсланова Г.Р., Тимербаева А.Л., Зиятдинова Д.Ф. Анализ современного состояния технологий процесса экстракции биологически активных веществ из осины и ивы // *Деревообрабатывающая промышленность*. – 2019. - №4. - С. 51-62.
4. Жматова Г. В. Методы интенсификации технологических процессов экстрагирования биологически активных веществ из растительного сырья // *Вестник ТГТУ*. – 2005. –Т. – 11. - № 3. – 1085 с.
5. Просвирников Д. Б., Арсланова Г. Р. Исследования процесса экстракции и фенольных соединений коры осины и ивы // *Международная научно-практической конференции «История, современное состояние и перспективы инновационного развития науки»*. – Самара, 2021. - С. 75-78.
6. Сафина А. В., Арсланова Г. Р., Зиятдинова Д. Ф., Ахметова Д. А., Сафин Р. Г., Халитов Р. А. Определение коэффициента массопроводности с учетом сложного строения растительных клеток в процессе экстракции // *Деревообрабатывающая промышленность*. – 2020. – № 1. – С. 33-44.
7. Сафина А. В., Тимербаев Н. Ф., Зиятдинова Д. Ф. Экстракция ценных компонентов из лесосечных отходов // *Известия высших учебных заведений. Лесной журнал*. – Архангельск: «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова». – 2018. – № 1. – С. 109-119.
8. Сафина А. В., Арсланова Г. Р., Зиятдинова Д. Ф., Сафин Р. Г., Халитов Р. А. Моделирование процесса экстрагирования биологически активных веществ из осины и ивы // *Деревообрабатывающая промышленность*. – 2020. – № 2. – С. 56-63.
9. R. G. Safin D. B. Prosvirnikov G. R. Arslanova Parametric Multidimensional Modeling of Extraction Processes in the Wood Chemical, Food and Pharmaceutical Industries // *Proceedings of the 7th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2021)*. – 2021. –pp. 286-297.

10. Просвирников Д. Б., Арсланова Г. Р., Сафина А. В., Сафин Р. Г., Зиятдинова Д. Ф. Сравнительное исследование фенольных соединений листьев и коры деревьев семейства «Salicaceae» // Деревообрабатывающая промышленность. – 2021. – № 3. – С. 55-66.
11. Азаров В. И. Химия древесины и синтетических полимеров: учебное пособие. – 5-е изд., испр. – СПб: Издательство «Лань», 2010. – 624 с.
12. Аксельруд Г. А., Лысянский В. М. Экстрагирование. Система твердое тело-жидкость. – Ленинград: Химия, 1974. – 256 с.
13. Матвеев Е. В. Математическая модель процесса экстракции древесной зелени *Juniperus sibirica* водным раствором этилового спирта // Материалы международной заочной научной конференции «Проблемы современной аграрной науки». – Красноярск, 2015. – С. 169-174.
14. Измайлов А. В., Мальцев П. М., Мицкевич Э. Г. Математическое моделирование установившихся состояний противоточных экстракционных процессов // Теоретические основы химической технологии. – 1975. – № 5. – С. 651-653.
15. Просвирников Д. Б., Сафин Р. Г., Арсланова Г. Р. Многофакторное параметрическое моделирование процесса экстракции кверцетина из листьев ивы (*Salix*) семейства (*Salicaceae*) // Системы. Методы. Технологии. – 2021. – № 3 (51). – С. 143-150.
16. Petrovic S. S., Ivanovic J., Milovanovic S., Zizovic I. Comparative analyses of the diffusion coefficients from thyme for different extraction processes // Journal of the Serbian Chemical Society. 2012, 77, pp. 799-813.
17. Prosvirnikov, D. B. Modelling heat and mass transfer processes in capillary-porous materials at their grinding by pressure release // Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). International Conference on. – IEEE– 2017. – pp. 1-7.

© Сафин Р.Г. – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой переработки древесных материалов, ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет» (ФГБОУ ВО «КНИТУ»), e-mail: safin@kstu.ru; Просвирников Д.Б. – д-р техн. наук, профессор кафедры «Переработка древесных материалов», ФГБОУ ВО «КНИТУ», e-mail: prosvirnikov_dmi@mail.ru; Арсланова Г.Р. – ассистент кафедры «Переработка древесных материалов», ФГБОУ ВО «КНИТУ», e-mail: 94arslanovagulshat@mail.ru; Валеев К.В. – аспирант кафедры переработки древесных материалов, ФГБОУ ВО «КНИТУ», e-mail: kirval116@mail.ru; Зиятдинова Д.Ф. – д-р техн. наук, профессор, кафедры переработки древесных материалов, ФГБОУ ВО «КНИТУ», e-mail: ziatdinova2804@gmail.com; Гурьянов Д.А. – аспирант кафедры «Переработка древесных материалов», ФГБОУ ВО «КНИТУ».

UDC 674.816.

MATHEMATICAL DESCRIPTION OF THE EXTRACTION PROCESS OF PHENOLIC COMPOUNDS

R.G. Safin, G.R. Arslanova, K.V. Valeev, D.F. Ziatdinova, D.A. Guryanov

The paper presents a physical and mathematical description of the process of extraction of phenolic compounds from plant raw materials, in particular from the bark and leaves of trees of the family "Salicaceae". The method of conducting experimental and analytical studies and the extraction process is described. The effect of the extractant consumption on the rate of impregnation of particles is determined. The optimal value of the extractant flow rate, equal to 100 l/min, contributed to a faster penetration of the solvent into the particles. Calculated and experimental values of temperature changes over the layers of the material and the kinetics of the concentration of extracted extractives in the extract were obtained. It was revealed that the heating of the material layers varies within 1-2 minutes, and the total heating time was 7 minutes. The optimal duration of the extraction process is 35-45 minutes.

Key words: mathematical description, extraction, phenolic compounds, family "Salicaceae".

References

1. Poyarkova N. M., Saparklicheva S. E. [The physiological role of phenolic compounds] Agrarnoe obrazovanie i nauka [Agricultural education and science]. – 2019. – № 4. – pp. 14. (InRuss.).
2. Litvinenko V. I. [Himiya prirodnih flavonoidov i sozдание preparatov pri kompleksnoi pererabotke rastitelnogo sirya] avtoref. dis. d-ra him. nauk 15.00.02. – 1990. – P. 29. (InRuss.).

3. Safina A. V., Arslanova G. R., Timerbaeva A. L., Ziatdinova D. F. [Analysis of the current state of technology for the extraction of biologically active substances from aspen and willow] *Derevoobrabatyvayushchaya promyshlennost* [Woodworking industry]. 2019 - № 4. - pp. 51-62. (InRuss.).
4. Jmatova G. V. [Methods of intensification of technological processes of extraction of biologically active substances from plant raw materials] *Vestnik TGTU* [Bulletin of TSTU]. – 2005. – V. – 11. - № 3. – 1085 pp.
5. Prosvirnikov D. B., Arslanova G. R. [Studies of the extraction process of phenolic compounds of aspen and willow bark] *Mejdunarodnaya nauchno-prakticheskoi konferencii «Istoriya_sovremennoe sostoyanie i perspektivi innovacionnogo razvitiya nauki»* [International scientific and practical conference "History, current state and prospects of innovative development of science"]. – Samara 2021. – 75–78. pp. (InRuss.).
6. Safina A. V., Arslanova G. R., Ziatdinova D. F., D. A. Ahmetova, R. G. Safin, R. A. Halitov. [Determination of the mass conductivity coefficient taking into account the complex structure of plant cells during extraction] *Derevoobrabatyvayushchaya promyshlennost* [Woodworking industry]. – 2020. - №1. - pp. 33-43. (InRuss.).
7. Safina A. V., Timerbaev N. F., Ziatdinova D. F., Arslanova G. R. [Extraction of valuable components from logging waste] *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Lesnoj zhurnal.* – Arhangel'sk: «Severnyj (Arkticheskij) federal'nyj universitet imeni M.V. Lomonosova» [News of higher educational institutions. Forest magazine. - Arkhangelsk: "Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov]. 2018 - № 1. - pp. 106-119. (InRuss.).
8. Safina A. V. Arslanova G. R. Ziatdinova D. F. Safin R. G. Halitov R. A. [Modeling of the extraction process of biologically active substances from aspen and willow] *Derevoobrabatyvayushchaya promyshlennost* [Woodworking industry]. 2020 - № 2. - pp. 56-63. (InRuss.).
9. R. G. Safin D. B. Prosvirnikov G. R. Arslanova Parametric Multidimensional Modeling of Extraction Processes in the Wood Chemical, Food and Pharmaceutical Industries // *Proceedings of the 7th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2021).* – 2021. –pp. 286-297. (InRuss.).
10. Prosvirnikov D. B. Arslanova G. R. Safina A. V. Safin R. G. Ziatdinova D. F. Comparative study of phenolic compounds of leaves and bark of trees of the family «Salicaceae» *Derevoobrabatyvayushchaya promyshlennost* [Woodworking industry]. 2021 - № 3. - pp. 55-66. (InRuss.).
11. Azarov V. I. [Chemistry of wood and synthetic polymers: a textbook] 5_e izd._ ispr. – SPb Izdatelstvo «Lan» [5th ed., ispr. - St. Petersburg: Publishing House «Lan»]. – 2010. – P. 624.
12. Akselrud G.A., Lisyanskii V.M. [Extraction «solid-liquid system»]. L.: « Chemistry ». - 1974. pp. 256.
13. Matveenko E. V. [Mathematical model of the extraction process of Juniperus sibirica burgsd woody greenery with an aqueous solution of ethyl alcohol] *Materiali mejdunarodnoi zaochnoi nauchnoi konferencii «Problemi sovremennoi agrarnoi nauki»* [Materials of the international correspondence scientific conference "Problems of modern agricultural science"] – Krasnoyarsk – 2015. – 169-174 pp. (InRuss.).
14. Izmailov A. V. Malcev P. M. Mickevich E. G. [Mathematical modeling of steady states of countercurrent extraction processes] *Teoreticheskie osnovi himicheskoj tehnologii.* [Theoretical foundations of chemical technology]. –1975. – № 5. –. 651-653 pp. (InRuss.).
15. Prosvirnikov D. B. Safin R. G. Arslanova G. R. [Multivariate parametric modeling of quercetin extraction process from willow leaves (Salix) family (Salicaceae)] *Sistemi. Metodi. Tehnologii* [The system. Methods. Technologies] – 2021. – № 3 (51). – 143-150 pp. (InRuss.).
16. Petrovic S. S., Ivanovic J., Milovanovic S., Zizovic I. Comparative analyses of the diffusion coefficients from thyme for different extraction processes // *Journal of the Serbian Chemocal Society.* 2012, 77, pp. 799-813.
17. Prosvirnikov, D. B. Modelling heat and mass transfer processes in capillary-porous materials at their grinding by pressure release // *Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM).* – IEEE– 2017. – pp. 1-7.

© **Safin R.G.** - Grand PhD in Engineering sciences, Professor, Head of the Department of Processing of wood materials, Kazan National Research Technological University (KNRTU), e-mail: safin@kstu.ru; **Prosvirnikov D.B.** – Grand PhD in Engineering sciences, professor of the Department of Processing of wood materials, KNRTU, e-mail: prosvirnikov_dmi@mail.ru; **Arslanova G.R.** - Assistant of the Department of Processing of wood materials, KNRTU, e-mail: 94arslanovagulshat@mail.ru; **Ziatdinova D.F.** - Grand PhD in Engineering sciences, Professor of the Department of Processing of wood materials, KNRTU, e-mail: ziatdinova2804@gmail.com; **Valeev K.V.** – postgraduate student of the Department of Processing of wood materials, KNRTU, e-mail: kirvall16@mail.ru; **Guryanov D.A.** – postgraduate student of the Department of Processing of wood materials, KNRTU.