



ТЕХНОЛОГИЯ ХИМИЧЕСКОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ДРЕВЕСИНЫ И ПРОИЗВОДСТВО ДРЕВЕСНО-ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ

Научная статья

УДК 678.031:54-112

DOI: 10.37482/0536-1036-2025-4-173-184

Экстракция биологически активных веществ из коры и листьев деревьев семейства Salicaceae

Р.Г. Сафин, д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: Q-8575-2017,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5790-4532>

К.В. Валеев[✉], канд. техн. наук, доц.; ResearcherID: HPC-5151-2023,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5537-9332>

Д.Ф. Зиятдинова, д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: U-1572-2017,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2801-4642>

Казанский национальный исследовательский технологический университет, ул. К. Маркса, д. 68, г. Казань, Россия, 420015; safin@kstu.ru, kirval116@mail.ru[✉], Ziatdinova2804@gmail.com

Поступила в редакцию 09.10.24 / Одобрена после рецензирования 11.12.24 / Принята к печати 13.12.24

Аннотация. Описан процесс экстракции биологически активных веществ из недревесных частей деревьев (коры и листьев) ивы и осины. Приведено аппаратное оформление извлечения салицина и кверцетина из коры и листьев деревьев семейства Salicaceae. Представлена методика экспериментального исследования и получения биологически активных веществ. Выявлено, что увеличение расхода экстрагента с 20 до 100 л/мин при одинаковой температуре (75 °С) и 95%-й пропитке приводит к 2-кратному ускорению процесса. Описано изменение локальной температуры по слоям материала. Определено небольшое отставание в нагреве последующих слоев материала на 1–2 мин, которое обусловлено тепловыми инерциями материала и особенностями теплопередачи внутри слоя. Для достижения полного прогревания требуется время 7 мин. Построена кинетическая кривая концентрации извлеченных биологически активных веществ в экстракте. Итоговые зависимости и сравнительные данные позволяют рекомендовать рациональные режимы экстракции биологически активных веществ из коры и листьев деревьев ивы и осины. По результатам исследования рекомендована оптимальная температура экстракции кверцетина – 50 °С. Также было выявлено, что повышение температуры до 75 °С приводит к заметному увеличению выхода салицина. Кроме того, обнаружено: наибольшее количество кверцетина содержится в осине (1,4 %), причем в листьях его больше, чем в коре, на 11,4 %; основное количество салицина находится в коре обеих пород, но в коре ивы отмечается превышение на 35 %; рациональная концентрация растворителя составляет 60 %; продолжительность экстракции равна 40–45 мин.

Ключевые слова: Salicaceae, экстракция, переработка, биологически активные вещества, салицин, кверцетин, листья, кора

Благодарности: Исследование проведено с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Наноматериалы и нанотехнологии» Казанского национально-го исследовательского технологического университета.



Для цитирования: Сафин Р.Г., Валеев К.В., Зиятдинова Д.Ф. Экстракция биологически активных веществ из коры и листьев деревьев семейства Salicaceae // Изв. вузов. Лесн. журн. 2025. № 4. С. 173–184. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-4-173-184>

Original article

Extraction of Biologically Active Substances from the Bark and Leaves of Trees of the Salicaceae Family

Rushan G. Safin, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [Q-8575-2017](https://orcid.org/0000-0002-5790-4532),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5790-4532>

Kirill V. Valeev✉, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [HPC-5151-2023](https://orcid.org/0000-0002-5537-9332), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5537-9332>

Dilara F. Ziatdinova, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [U-1572-2017](https://orcid.org/0000-0003-2801-4642),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2801-4642>

Kazan National Research Technological University, ul. K. Marksa, 68, Kazan, 420015, Russian Federation; safin@kstu.ru, kirval116@mail.ru✉, Ziatdinova2804@gmail.com

Received on October 9, 2024 / Approved after reviewing on December 11, 2024 / Accepted on December 13, 2024

Abstract. The process of extraction of biologically active substances from non-woody parts of trees (bark and leaves) of willow and aspen is described in the article. The instrumentation for extracting salicin and quercetin from the bark and leaves of trees of the Salicaceae family is presented. A method for experimental research and obtaining of biologically active substances is presented. It has been found that an increase in the extractant consumption from 20 to 100 l/min at the same temperature (75 °C) and 95 % impregnation leads to a 2-fold acceleration of the process. Local temperature changes across the layers of the material have been described. A slight lag in heating of subsequent layers of the material by 1–2 min has been determined, which is due to the thermal inertia of the material and the peculiarities of heat transfer within the layer. It takes 7 min to achieve full heating. A kinetic curve of the concentration of extracted biologically active substances in the extract has been constructed. The resulting dependencies and comparative data allow us to recommend rational modes of extraction of biologically active substances from the bark and leaves of willow and aspen trees. According to the results of the research, the optimal temperature for quercetin extraction has been recommended to be 50 °C. It has also been found that increasing the temperature to 75 °C leads to a noticeable increase in the yield of salicin. Moreover, it has been revealed that the largest amount of quercetin is found in aspen (1.4 %), with 11.4 % more quercetin in the leaves than in the bark; the main amount of salicin is found in the bark of both species, but in willow bark there is an excess of 35 %; the rational solvent concentration is 60 %; the duration of extraction is 40–45 min.

Keywords: Salicaceae, extraction, processing, biologically active substances, salicin, quercetin, leaves, bark

Acknowledgements: The research was conducted using the equipment of the Center for Collective Use “Nanomaterials and Nanotechnologies” of the Kazan National Research Technological University.

For citation: Safin R.G., Valeev K.V., Ziatdinova D.F. Extraction of Biologically Active Substances from the Bark and Leaves of Trees of the Salicaceae Family. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2025, no. 4, pp. 173–184. (In Russ.).

<https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-4-173-184>

Введение

Изучение процессов экстракции фенольных соединений из растительного сырья является важным направлением исследований в химии, биохимии фармацевтической, пищевой и медицинской промышленности. Фенольные соединения представляют собой обширный и разнородный класс органических веществ, которые играют ключевую роль в растительном метаболизме, обладают широким спектром биологической активности и важны в фармакологии [10, 14]. Фенолгликозиды и флавоноиды, особенно те, которые содержатся в растениях семейства ивовых *Salicaceae*, заслуживают особого внимания из-за множества их полезных свойств [3]. Одним из самых известных фенолгликозидов является салицин, извлекаемый из коры ивы и осины и служащий сырьем для синтеза ацетилсалициловой кислоты (аспирина) [6, 8, 15, 16].

Процесс экстракции фенольных соединений из растительного сырья характеризуется многоступенчатостью и включает несколько основных стадий. Важность каждой стадии обусловлена необходимостью максимального извлечения целевых соединений при минимизации потерь и необратимых изменений в активных компонентах [2, 4, 5, 11].

Экстрагирование древесного растительного сырья и зелени протекает в 4 стадии. На 1-й стадии экстрагент проникает внутрь сырья. На 2-й происходит растворение искомых веществ, находящихся в сырье. На 3-й экстрагируемые вещества путем молекулярной диффузии извлекаются из клеток растительного сырья. На последней стадии растворенные биологически активные вещества отводятся от поверхности экстрагируемого вещества в окружающую среду экстрагента [9, 17].

Для максимального выхода веществ высокой чистоты экстракцию следует проводить в кратчайшие сроки при оптимальных режимах, т. к. увеличение длительности процесса приводит к извлечению и сопутствующих веществ [12, 13].

Скорость внутренней диффузии от фронта растворения до поверхности пористой части заметно ниже скорости молекулярной диффузии вследствие извилистости пор, влияния их стенок и других факторов [18].

В работе Л.А. Гришковой и др. [1] описан способ переработки коры осины, включающий: измельчение коры осины *Populus tremula* L. в роторно-ножевой мельнице при начальной влажности 45 %; экстракцию биологически активных веществ органическими растворителями (бензин марки АИ-95) в экстракторе батарейного типа в течение 3,5 ч при температуре 100–120 °С; выпаривание экстрагента для производства витаминного концентрата; обработку жома острым паром в течение 30–60 мин для удаления бензина; экстракцию жома водой в продолжение 1–3 ч; сепарацию экстракта от жома; выделение дубильных веществ.

Е.В. Ломако и Н.А. Кузьмичева [7] исследовали влияние различных добавок на степень извлечения флавоноидов из древесного растительного сырья семейства *Salicaceae*. Эксперименты показали, что использование растворов мирамистина и полигексаметиленбигуанида гидрохлорида для экстрагирования флавоноидов из листьев ивы остролистной привело к получению экстрактов с содержанием флавоноидов в 2–4 раза выше, чем при использовании 70%-го этанола.

Juliana F. Soares et al. [19] приведены сведения о выходе экстрактов, извлеченных из отходов деревьев ивы и осины семейства Salicaceae методом сверхкритической флюидной экстракции. В работе представлены кинетические кривые зависимости выхода флавоноидов, состав экстрактов по жирным кислотам от температуры (40, 60 и 80 °C) и давления (15, 20 и 25 МПа). Температура экстракции 80 °C и давление 25 МПа обеспечивают наибольший выход экстрактов (7,7 г сухого экстракта / 100 г сушеных семян тополя черного) и содержание полиненасыщенных жирных кислот в экстракте (65,1 %). Также после подбора кинетических параметров кривых экстракции были определены скорости экстракции и массовое соотношение сырья к экстрагенту.

I. Jerković et al. [16] проведена сверхкритическая флюидная экстракция, исследовано влияние давления, температуры и предварительного замачивания в воде плодов прутняка обыкновенного (*Vitex agnus-castus* L.) на выход экстрактивных веществ и эфирных масел.

На сегодняшний день разработаны разнообразные способы и аппаратные оформления процессов экстракции, однако выявлено, что выход биологически активных веществ зависит от места произрастания, концентрации и вида экстрагента, температуры и продолжительности экстракции и т. д., поэтому актуален поиск рациональных технологических параметров, влияющих на извлечение биологически активных веществ из деревьев ивы и осины.

Целью данной работы является определение оптимальных режимных параметров экстракции водно-спиртовым раствором биологически активных веществ из ивовых деревьев семейства Salicaceae, произрастающих в Республике Татарстан: расхода экстрагента, температуры, продолжительности пропитки сырья и экстракции.

Задачи исследования: поиск кинетических зависимостей процессов пропитки и извлечения биологически активных веществ от температуры и расхода экстрагента; установление степени влияния режимов процесса на выход кверцетина и салицина.

Объекты и методы исследования

Для проведения экстракции фенольных соединений использовали отходы деревьев семейства Salicaceae – кору и листья ивы и осины (рис. 1), – собранные в Республике Татарстан в апреле–мае 2024 г. Хранение образцов осуществляли в герметичной емкости не более 10 сут. Сушку сырья проводили в сушилке кипящего слоя при температуре 50–60 °C. Литературный обзор показал целесообразность применения в качестве экстрагента водно-спиртового раствора, обеспечивающего максимальный выход фенольных соединений.



Рис. 1. Отходы деревьев семейства Salicaceae: а – ива (*Salix*); б – осина (*Populus tremula*)

Fig. 1. The Salicaceae family tree waste: а – willow (*Salix*); б – aspen (*Populus tremula*)

Для определения рациональных параметров экстракции была разработана установка (рис. 2). Она состоит из теплообменника 1, выпарного аппарата 2, терморегулятора (ТРМ) 3, пробоотборников 4, 4.1, управляющих клапанов 5 и 10, нагревателя 6, центробежного насоса 7, расходомера 8, экстракционной емкости 9, смотрового окна 11, уровнемеров 12, емкости для нагрева экстрагента 13.

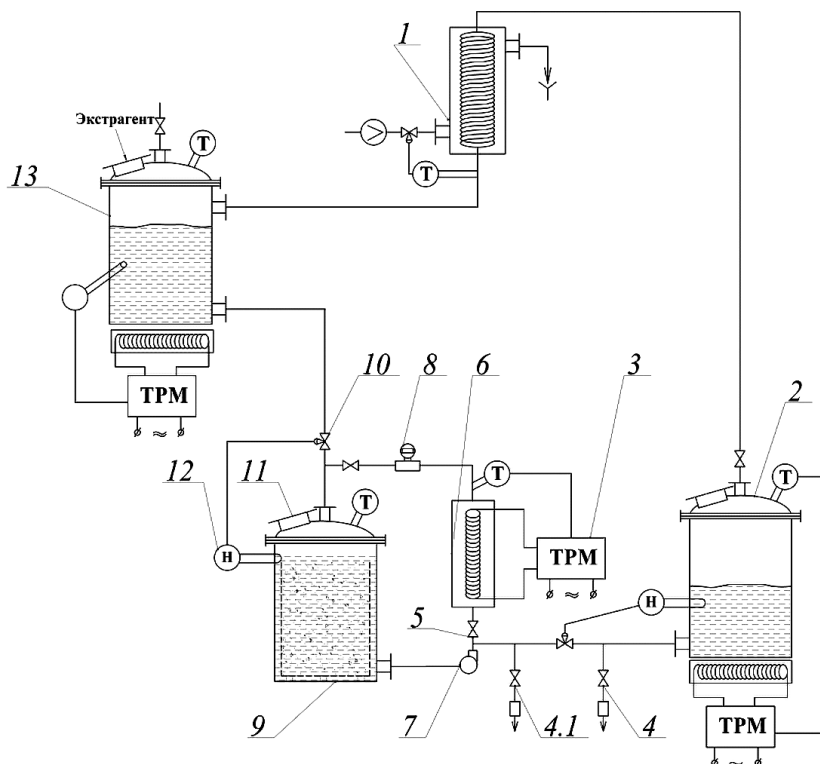


Рис. 2. Принципиальная схема установки для экстракции фенольных соединений из деревьев осины и ивы

Fig. 2. The schematic diagram of the plant for the extraction of phenolic compounds from aspen and willow trees

Растительное сырье, измельченное до размеров 1–2 мм, с начальной влажностью – 60 %, засыпали в фильтровальный мешок, затем загружали в экстрактор 9. Далее экстрактор герметизировали крышкой и в верхнюю часть экстрактора подавали нагретый экстрагент из емкости 13. После заполнения экстракционной емкости экстрагентом включали центробежный насос 7 для создания циркуляционного потока и нагреватель 6. Начальная температура сырья составляла 20–25 °С, а экстрагента – 70–75 °С. Температура сырья в экстракторе варьировала в пределах 25–75 °С. Концентрация спиртового раствора была 40–80 %. Температуру экстрагента поддерживали с помощью проточного нагревателя 6, датчика температуры и терморегулятора 3. Количество экстракта в экстракторе контролировали с помощью датчика уровня жидкости 12 и регулирующего клапана 10.

Расход экстрагента (20, 60, 100 л/мин) при пропитке материала устанавливали клапаном 5 и расходомером 8. Концентрацию экстрагента во всех слоях сырья определяли отбором проб сверху через смотровое окно 11 каждые 4 мин. Температуру замеряли с помощью хромель-копелевых датчиков на разных вы-

сотах материала: 15, 250, 490 мм. Общая высота слоя составляла 500 мм. Конечный продукт из выпарного аппарата 2 выгружали через пробоотборник 4 и отправляли на дальнейшее исследование.

Изменение усредненного количества экстрактивных веществ в экстракте при экстрагировании определяли путем отбора проб (масса 10 г) через пробоотборник 4.1 каждые 10 мин, пробы упаривали, досушивали и взвешивали.

Содержание экстрагента в сырье при пропитке вычисляли как отношение разности масс пропитанного (m) и абсолютно сухого (m_c) материала (коры и листьев) к массе максимально пропитанного сырья m_{max} :

$$C_3 = \frac{m - m_c}{m_{max}} \cdot 100 \%$$

Для определения исходного содержания экстрактивных веществ в коре и листьях осины и ивы проводили исчерпывающую экстракцию в аппарате Сокслета с использованием 200 г 60%-го водно-спиртового раствора. После завершения экстрагирования из экстракта выпаривали экстрагент до достижения вязкого состояния и темно-оранжевого цвета. Упаренный экстракт переливали в выпарительную чашу и досушивали при температуре 50 °С в вакуумном сушильном шкафу до постоянного веса. Содержание кверцетина и салицина в экстрактах определяли жидкостным хроматографом PerkinElmer Flexar (табл. 1).

Таблица 1

Исходное содержание (%) кверцетина и салицина в коре и листьях осины и ивы
The initial content (%) of quercetin and salicin in the bark and leaves of aspen and willow

Вещество	Осина		Ива	
	кора	листья	кора	листья
Кверцетин	1,42	1,56	0,34	1,37
Салицин	1,10	0,28	1,72	0,32

Параметры процесса извлечения фенольных соединений (в т. ч. кверцетина) и фенолгликозидов (салицина) из отходов ивовых деревьев варьировали в соответствии с табл. 2.

Таблица 2

Режимы пропитки и экстрагирования коры и листьев осины и ивы
The modes of impregnation and extraction of aspen and willow bark and leaves

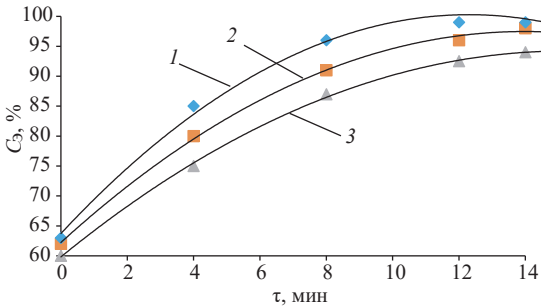
Фракция	Температура экстракции, °С	Концентрация спиртового раствора, %	Продолжительность обработки, мин	Гидроמודуль
Листья	25, 50, 75, 80	40, 60, 80	15, 30, 45	1:65
Кора	40, 50, 75	40, 60, 80	15, 30, 45	1:100

Результаты исследования и их обсуждение

Данные измерения содержания экстрагента в коре осины представлены на рис. 3. Точками показаны экспериментальные значения, линиями – аппроксимационные зависимости.

Рис. 3. Кинетика пропитки коры осины при различных расходах экстрагента, л/мин: 1 – 100; 2 – 60; 3 – 20 (τ – продолжительность процесса)

Fig. 3. The kinetics of aspen bark impregnation at various extractant consumption rates, l/min: 1 – 100; 2 – 60; 3 – 20 (τ – duration of the process)

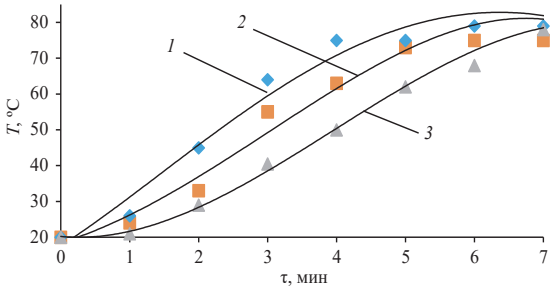


Из рис. 3 видно, что увеличение расхода экстрагента с 20 до 100 л/мин при одинаковой температуре (75 °С) и 95%-й пропитке приводит к 2-кратному ускорению процесса.

На рис. 4 представлена кинетика температуры по слоям измельченной коры осины при циркуляции экстрагента с расходом 100 л/мин.

Рис. 4. Кинетическая зависимость температуры (T) по слоям коры осины при циркуляционной экстракции при высоте слоя, мм: 1 – 490; 2 – 250; 3 – 15

Fig. 4. The kinetic dependence of temperature (T) in layers of aspen bark during circulation extraction at layer height, mm: 1 – 490; 2 – 250; 3 – 15

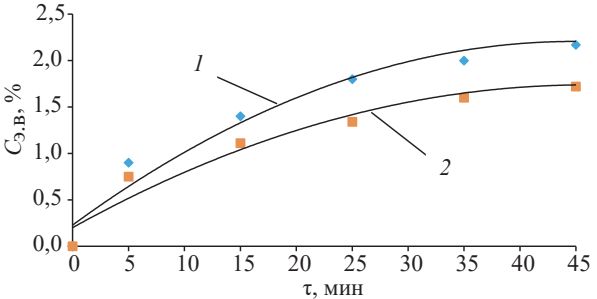


Анализ зависимостей показывает, что первый слой материала быстрее достигает заданной температуры (75 °С) в отличие от последующих слоев. Наблюдаемое небольшое отставание в нагреве последующих слоев материала на 1–2 мин обусловлено тепловыми инерциями материала и особенностями теплопередачи внутри слоя. Прогрев всех слоев достигается за 7 мин.

На рис. 5 представлены кинетические кривые изменения концентрации биологически активных веществ в экстракте из коры осины и ивы при температуре 50 °С.

Рис. 5. Кинетические зависимости концентрации извлеченных экстрактивных веществ ($C_{э.в.}$) из коры в экстракте: 1 – осины; 2 – ивы

Fig. 5. The kinetic dependences of the concentration of extracted extractive substances in the extract of: 1 – aspen; 2 – willow



Исследование показывает, что максимальное извлечение биологически активных веществ происходит уже через 40–45 мин процесса. По истечении этого времени суммарный выход биологически активных веществ заметно снижается, указывая на зависимость хода экстракции от внутренних диффузионных ограничений и равновесных концентраций. Анализ кривых позволя-

ет утверждать, что объем извлеченных экстрактивных веществ из коры осины больше, чем из коры ивы.

На рис. 6 графически изображены зависимости выхода кверцетина из коры осины и ивы от концентрации экстрагента при температурах 40, 50 и 75 °C.

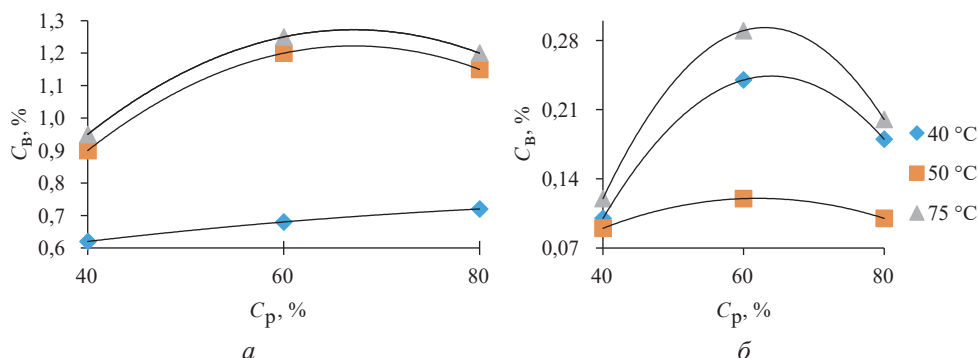


Рис. 6. Зависимость выхода кверцетина (C_b) из коры от концентрации экстрагента (C_p): а – осины; б – ивы

Fig. 6. The dependence of the yield of quercetin (C_b) from the bark on the concentration of the extractant (C_p) in: а – aspen; б – willow

Из зависимостей видно, что при экстракции коры деревьев семейства Salicaceae выход кверцетина может достигать 1,27 % а. с. в. при 60%-й концентрации этанола в растворе и температуре 50 °C. Различия в генетическом наборе и метаболизме ивы и осины могут значительно влиять на содержание кверцетина и других флавоноидов. Кора ивы и осины имеют различия в химическом составе и структуре фенольных соединений, что воздействует на их поведение при различных температурных режимах. Температурные условия играют важную роль в переходе кверцетина из сырья в экстрагент. Более низкие значения способствуют сохранению структуры флавоноидов, в то время как высокие приводят к их деструкции. Это обуславливает уменьшение выхода кверцетина. При температуре экстракции 50 °C кверцетина из осины можно получить больше, чем при 40 и 75 °C, при этой температуре создаются мягкие условия экстракции для сохранения и извлечения флавоноидов.

Кверцетин, извлекаемый из коры ивы, демонстрирует меньшую разницу в выходах при изменении температуры, чем кверцетин из коры осины. Это связано с различиями в динамике экстракции двух видов коры. Разница в составе также влияет на реактивность и протекание химических преобразований при повышенных температурах, что, в свою очередь, сказывается на конечном выходе.

На рис. 7 представлены зависимости выхода салицина из коры обеих пород от концентрации спиртового растворителя при температурах 50, 75 и 80 °C.

Анализ полученных данных показывает, что наибольший выход салицина из коры осины (0,91 % а. с. в.) наблюдается при использовании 80%-го спиртового раствора, однако при добавлении 60%-го спиртового раствора салицина из ивы (1,4 % а. с. в.) извлекается в 1,5 раза больше, чем из осины. Также резкое повышение температуры с 50 до 75 °C способствует увеличению растворимости целевых компонентов, делая процесс экстракции более эффективным. Высокая температура ускоряет молекулярную диффузию, сокращая время, необходимое для достижения равновесия в системе экстрагента и сырья.

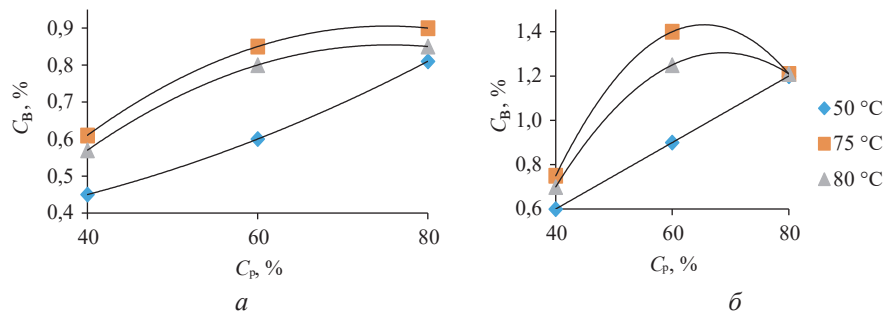


Рис. 7. Выхода салицина из коры в зависимости от концентрации экстрагента:
 a – осины; b – ивы

Fig. 7. The yield of salicin from the bark depending on the concentration of the extractant in: a – aspen; b – willow

На рис. 8 показаны зависимости выхода кверцетина из листьев осины и ивы от концентрации экстрагента при температурах 25, 50, 75 и 80 °С.

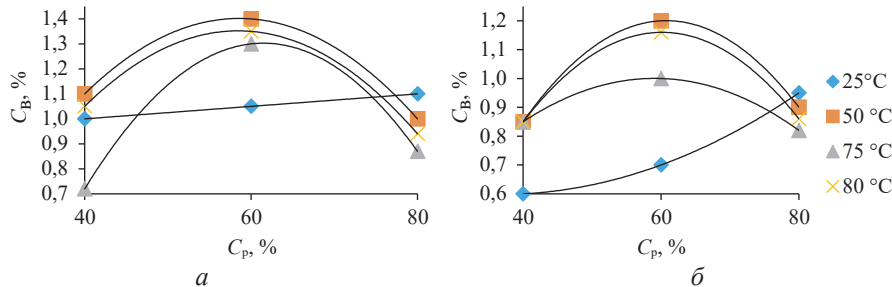


Рис. 8. Выхода кверцетина из листьев в зависимости от концентрации экстрагента:
 a – осины; b – ивы

Fig. 8. The yield of quercetin from the leaves depending on the concentration of the extractant in: a – aspen; b – willow

Как видно по представленным данным, наибольший выход кверцетина из осины и ивы наблюдается при температуре 50 °С в случае применения 60%-го раствора этанола. Объем извлечения кверцетина из листьев осины в среднем выше, чем из листьев ивы. Также низкая концентрация экстрагента и температура менее 50 °С замедляют диффузию, что ведет к уменьшению растворимости.

На рис. 9 представлены результаты сравнительного анализа зависимости выхода салицина из листьев от температуры (25–80 °С) экстракции при продолжительности обработки 45 мин.

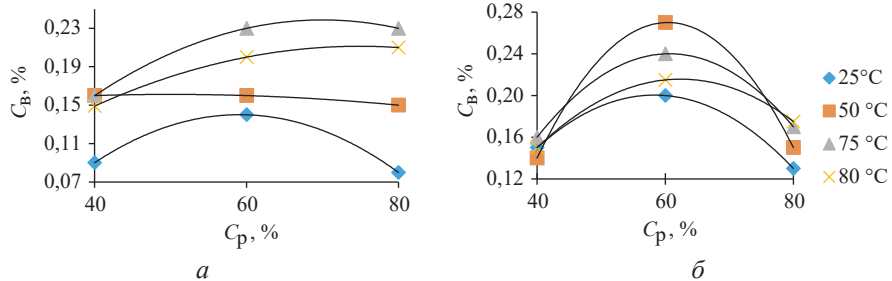


Рис. 9. Зависимость выхода салицина из листьев от концентрации экстрагента:
 a – осины; b – ивы

Fig. 9. The dependence of the yield of salicin from the leaves on the concentration of the extractant in: a – aspen; b – willow

Анализ данных показывает, что оптимальной концентрацией экстрагента является 60%-й спиртовой раствор при температуре экстракции для осины – 75 °С, для ивы – 50 °С.

В табл. 3 приведены данные по максимальному выходу кверцетина и салицина из листьев и коры деревьев семейства ивовых.

Таблица 3

Выход кверцетина и салицина (%) из коры и листьев осины и ивы
The yield of quercetin and salicin (%) from aspen and willow bark and leaves

Вещество	Осина		Ива		Температура экстракции, °С
	кора	листья	кора	листья	
Кверцетин	1,24	1,40	0,29	1,20	50
Салицин	0,91	0,23	1,40	0,26	50, 75

Примечание: Концентрация растворителя – 60–65 %; продолжительность экстракции – 40–45 мин.

Анализ данных таблицы показывает, что:
содержание кверцетина в осине наивысшее по сравнению с ивой, при этом в листьях его больше, чем в коре, на 11,4 %;

основной объем салицина находится в коре обоих пород, но в коре ивы отмечается превышение на 35 % по сравнению с осиной;

степень извлечения кверцетина из коры и листьев осины и ивы составляет 85–89 %, а салицина – 81–82 %;

Режимные значения технологических параметров экстрагирования должны быть следующими: концентрация растворителя – 60 %; продолжительность – 40–45 мин; температура для извлечения кверцетина – 50 °С; салицина – 75 °С.

Заключение

Выявлено, что увеличение расхода экстрагента и интенсивный режим пропитки, такой, как при использовании циркуляционного потока, эффективны для улучшения скорости проникновения экстрагента в сырье и способствуют 2-кратному ускорению экстракции целевых компонентов.

По результатам экспериментов определены рациональные режимные параметры экстракции биологически активных веществ из деревьев ивы и осины: продолжительность – 40–45 мин; температура экстрагента при извлечении кверцетина – 50 °С, салицина – 75 °С; концентрация водного раствора этанола – 60 %. При переработке листьев ивы температура экстрагента при извлечении салицина и кверцетина – 50 °С.

Обнаружено, что в листьях ивы содержание кверцетина больше, чем в коре (в листьях – на 1,2 %, в коре – на 0,29 %), а салицина в листьях обеих пород в несколько раз меньше (ива – на 0,26 %, осина – на 0,23 %), чем в коре (ива – на 1,4 %, осина – на 0,91 %).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. А. с. СССР 986380. Способ переработки осиновой коры / Л.А. Гришкова, Е.А. Демченко, В.Е. Ковален, В.Я. Ланд, И.И. Маркичев, В.Б. Некрасова.
Grishkova L.A., Demchenko E.A., Kovalen V.E., Land V.Ya., Markichev I.I., Nekrasova V.B. *Method of Processing Aspen Bark*: Author’s Certificate USSR 986380. (In Russ.).

2. Блажей А., Шутый Л. Фенольные соединения растительного происхождения. М.: Мир, 1977. 240 с.

Blazhej A., Shutyj L. *Phenolic Compounds of Plant Origin*. Moscow, Mir Publ., 1977. 240 p. (In Russ.).

3. Дементьева Т.М. Изучение коры и побегов ивы вавилонской (*Salix babylonica* L.) и гибрида ивы вавилонской и ивы белой (*Salix babylonica* L. × *Salix alba* L.), произрастающих на Северном Кавказе: дис. ... канд. фарм. Наук. Пятигорск, 2016. 154 с.

Dement'eva T.M. *Study of the Bark and Shoots of the Babylonian Willow (Salix babylonica L.) and the Hybrid of the Babylonian Willow and the White Willow (Salix babylonica L. × Salix alba L.), Growing in the North Caucasus*: Cand. Diss. Pharm. Sci. Diss., 2016. 154 p. (In Russ.).

4. Демченкова Е.Ю. Стандартизация лекарственного растительного сырья и фитопрепаратов на содержание антиоксидантов амперометрическим методом: автореф. дис. ... канд. фарм. наук. Москва, 2012. 25 с.

Demchenkova E.Yu. *Standardization of Medicinal Plant Raw Materials and Phyto-preparations for Antioxidant Content Using the Amperometric Method*: Cand. Pharm. Sci. Diss. Abs. Moscow, 2012. 25 p. (In Russ.).

5. Жматова Г.В., Неведов А.Н., Гордеев А.С., Килимник А.В. Методы интенсификации технологических процессов экстрагирования биологически активных веществ из растительного сырья // Вестн. ТГТУ. 2005. Т. 11, № 3. С. 701–707.

Zhmatova G.V., Nefedov A.N., Gordeev A.S., Kilimnik A.B. Intensification Methods of Extracting Biologically Active Substances from Vegetative Raw Materials. *Vestnik TGTU* = Transactions TSTU, 2005, vol. 11, no. 3, pp. 701–707. (In Russ.).

6. Литвиненко В.И. Химия природных флавоноидов и создание препаратов при комплексной переработке растительного сырья: автореф. дис. ... д-ра хим. наук. Харьков: ХНИИХФИ, 1990. 29 с.

Litvinenko V.I. *Chemistry of Natural Flavonoids and Creation of Preparations During Complex Processing of Plant Raw Materials*: Doc. Chem. Sci. Diss. Abs. Kharkiv, Kharkiv Research Chemical-Pharmaceutical Institute, 1990. 29 p. (In Russ.).

7. Ломако Е.В., Кузьмичева Н.А. Применение поверхностно-активных веществ в анализе лекарственного растительного сырья, содержащего флавоноиды // Вестн. фармации. 2014. № 3(65). С. 42–49.

Lomako E.V., Kuzmichova N.A. Application of Surfactants in the Analysis of Medicinal Vegetative Raw Material Containing Flavonoids. *Vestnik farmatsii*, 2014, no. 3(65), pp. 42–49. (In Russ.).

8. Масленникова К.А., Конюхова О.М., Канарский А.В. Фенолгликозиды растений семейства Salicaceae // Вестн. Казанск. технол. ун-та. 2014. Т. 17, № 14. С. 383–386.

Maslennikova K.A., Konyukhova O.M., Kanarskii A.V. Phenolglycosides of Plants of the Salicaceae Family. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta* = Herald of Technological University, 2014, vol. 17, no. 14, pp. 383–386. (In Russ.).

9. Матвеев Е.В., Величко Н.А., Ушанов С.А., Айюшина Е.Н. Математическая модель процесса экстракции древесной зелени *Juniperus sibirica* бургсд водным раствором этилового спирта // Проблемы современной аграрной науки: материалы Междунар. заоч. науч. конф. Красноярск, 2015. С. 169–174.

Matveenko E.V., Velichko N.A., Ushanov S.V., Ayoshina E.N. Mathematical Model of the Extraction Process of *Juniperus sibirica* bursgd Wood Greenery with an Aqueous Solution of Ethyl Alcohol. *Problems of Modern Agricultural Science*: Proceedings of the International Correspondence Scientific Conference. Krasnoyarsk, 2015, pp. 169–174. (In Russ.).

10. Пояркова Н.М., Сапарклычева С.Е. Физиологическая роль фенольных соединений // Аграрн. образование и наука. 2019. № 4. Режим доступа: <https://aes.urgau.ru/ru/4-2019/32-4-2019> (дата обращения: 20.06.25).

Poyarkova N.M., Saparklycheva S.E. The Physiological Role of Phenolic Compounds. *Agrarnoe obrazovanie i nauka* = Agrarian Education and Science, 2019, no. 4. (In Russ.).

11. Рассыпнова С.С., Турецкова В.Ф., Зверев Я.Ф. Изучение противовоспалительного действия экстракта из коры *Populus tremula* (Salicaceae) и входящих в его состав фенольных соединений // Растит. ресурсы. 2010. Т. 46, № 3. С. 103–108.

Rassypnova S.S., Turetskova V.F., Zverev Ya.F. Study of the Anti-Inflammatory Effect of *Populus tremula* (Salicaceae) Bark Extract and its Constituent Phenolic Compounds. *Ras-titelnye Resursy*, 2010, vol. 46, no. 3, pp. 103–108. (In Russ.).

12. Сафин Р.Г., Просвирников Д.Б., Арсланова Г.Р., Валеев К.В., Зиятдинова Д.Ф., Гурьянов Д.А. Математическое описание процесса экстракции фенольных соединений // Деревообрабатывающая промышленность. 2022. № 1. С. 62–70.

Safin R.G., Prosvirnikov D.B., Arslanova G.R., Valeev K.V., Ziatdinova D.F., Guryanov D.A. Mathematical Description of the Extraction Process of Phenolic Compounds. *Derevoobrabativalnaya promishlennost'* = Woodworking Industry, 2022, no. 1, pp. 62–70. (In Russ.).

13. Ушанова В.М., Лебедева О.И., Девятловская А.Н. Основы научных исследований. Ч. 2. Контроль качества и экстрагирование растительного сырья. Красноярск: СибГТУ, 2004. 168 с.

Ushanova V.M., Lebedeva O.I., Devyatlovskaya A.N. *Fundamentals of Scientific Research. Part 2. Quality Control and Extraction of Plant Raw Materials*. Krasnoyarsk, Siberian State Technological University Publ., 2004. 168 p. (In Russ.).

14. Швец П., Халабала М. Кислота ацетилсалициловая – лекарство, проверенное поколениями (к столетию ацетилсалициловой кислоты) // Словакофарма ревю. Киев, 2002. С. 66–68.

Shvets P., Khalabala M. Acetylsalicylic Acid – a Medicine Tested by Generations (on the Centenary of Acetylsalicylic Acid). *Slovakofarma reviu*. Kyiv, 2002, pp. 66–68. (In Russ.).

15. Шегельман И.Р., Кузнецов А.В. Эффективное использование лесных ресурсов. Петрозаводск: ПетрГУ, 2008. 88 с.

Shegel'man I.R., Kuznetsov A.V. *Efficient Use of Forest Resources*. Petrozavodsk, Petrozavodsk State University, 2008. 88 p. (In Russ.).

16. Jokić S., Jerković I., Rajić M., Aladić K., Bilić M., Vidović S. SC-CO₂ Extraction of *Vitex agnus-castus* L. Fruits: The Influence of Pressure, Temperature and Water Presoaking on the Yield and GC–MS Profiles of the Extracts in Comparison to the Essential Oil Composition. *The Journal of Supercritical Fluids*, 2017, vol. 123, pp. 50–57.

<https://doi.org/10.1016/j.supflu.2016.12.007>

17. Safina A.V., Valeev K.V., Ziatdinova D.F. Method for Determining the Mass Conductivity Coefficient of Wood when Extracting Biologically Active Substances from it. *Journal of Physics: Conference Series*, 2022, vol. 2373, art. no. 042004.

<https://doi.org/10.1088/1742-6596/2373/4/042004>

18. Safin R.G., Prosvirnikov D.B., Arslanova G.R. 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)*. Springer, Cham, 2021, pp. 286–297. https://doi.org/10.1007/978-3-030-85230-6_34

19. Soares J.F., Zabot G.L., Tres M.V., Lunelli F.C., Rodrigues V.M., Friedrichc M.T., Pazinato C.A., Bilibio D., Mazutti M.A., Carniel N., Priamo W.L. Supercritical CO₂ Extraction of Black Poplar (*Populus nigra* L.) Extract: Experimental Data and Fitting of Kinetic Parameters. *The Journal of Supercritical Fluids*, 2016, vol. 117, pp. 270–278.

<https://doi.org/10.1016/j.supflu.2016.07.005>

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest

Вклад авторов: Все авторы в равной доле участвовали в написании статьи

Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article