



Научная статья

УДК 630\*86(045)

DOI: 10.37482/0536-1036-2022-3-179-190

### Кинетические закономерности процесса водно-щелочного гидролиза березовой коры в СВЧ-поле

*Е.Н. Коптелова, канд. техн. наук, доц.;* Researcher ID: [AAI-4768-2020](https://orcid.org/0000-0002-0500-0582),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0500-0582>

*Н.А. Кутакова<sup>✉</sup>, канд. техн. наук, доц.;* Researcher ID: [T-1150-2019](https://orcid.org/0000-0001-8195-2115),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8195-2115>

*С.И. Третьяков, канд. техн. наук, проф.;* Researcher ID: [S-2192-2019](https://orcid.org/0000-0003-1783-5349),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1783-5349>

*А.В. Фалева, мл. науч. сотр.;* Researcher ID: [AAZ-1879-2020](https://orcid.org/0000-0002-8565-6871),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8565-6871>

Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002; [elen-koptelova@yandex.ru](mailto:elen-koptelova@yandex.ru), [n.kutakova@narfu.ru](mailto:n.kutakova@narfu.ru)<sup>✉</sup>, [s.tretyakov@narfu.ru](mailto:s.tretyakov@narfu.ru), [a.bezumova@narfu.ru](mailto:a.bezumova@narfu.ru)

Поступила в редакцию 30.10.20 / Одобрена после рецензирования 29.12.20 / Принята к печати 11.01.21

**Аннотация.** Березовая кора состоит из бересты (корки) и луба. Береста содержит до 50 % экстрактивных веществ и служит сырьем для получения ценных биологически активных веществ, в том числе бетулина. Отличительной чертой структуры бересты является наличие поперечно-сшитого полимера – суберина. Его мономеры – субериновые кислоты – нашли применение в производстве смазок и масел, инсектицидов, фунгицидов, полимеров, полиэфиров, покрытий и др. Общепринятым способом выделения солей субериновых кислот из бересты является ее исчерпывающий гидролиз водным или водно-спиртовым раствором гидроксида калия или натрия. Нами предложена активация сырья в процессе гидролиза путем использования электромагнитного поля сверхвысоких частот (СВЧ-гидролиз). Извлечение суберина из бересты – одновременно химический и массообменный процесс. Образующиеся при гидролизе соли субериновых кислот диффундируют к поверхности частиц бересты и переходят в гидролизат. Лимитирующей стадией массообмена при гидролизе бересты становится внутренняя диффузия в порах (массопроводность). Анизотропия структуры бересты затрудняет математическое описание кинетики массопереноса в диффузионном процессе. Процесс внутренней диффузии при СВЧ-гидролизе характеризуется регулярным режимом начиная с 4-й минуты. Установлены кинетические закономерности данного процесса, определена эффективность диффузии в тангенциальном и продольном направлениях. С увеличением размеров частиц бересты и по длине (тангенциальное направление), и по ширине (продольное направление) происходит увеличение скорости процесса гидролиза и степени извлечения суберина. Определены коэффициенты внутренней диффузии при СВЧ-гидролизе коры. Наибольшее значение получено для фракции с размером частиц 3...4,5 мм (береста), наименьшее – для фракции менее 1 мм (луб). Показано,

что для повышения выхода суберина из березовой коры после ее измельчения следует отделять мелкую фракцию – луб, бересту важно резать вдоль волокна.

**Ключевые слова:** березовая кора, береста, суберин, СВЧ-поле, водно-щелочной гидролиз, коэффициент диффузии

**Для цитирования:** Коптелова Е.Н., Кутакова Н.А., Третьяков С.И., Фалева А.В. Кинетические закономерности процесса водно-щелочного гидролиза березовой коры в СВЧ-поле // Изв. вузов. Лесн. журн. 2022. № 3. С. 179–190. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-3-179-190>

Original article

### Kinetics of Water-Alkaline Hydrolysis of Birch Bark in a Microwave Field

*Elena N. Koptelova*, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [AAI-4768-2020](https://orcid.org/0000-0002-0500-0582), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0500-0582>

*Natal'ya A. Kutakova*<sup>✉</sup>, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [T-1150-2019](https://orcid.org/0000-0001-8195-2115), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8195-2115>

*Sergey I. Tret'yakov*, Candidate of Engineering, Prof.; ResearcherID: [S-2192-2019](https://orcid.org/0000-0003-1783-5349),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1783-5349>

*Anna V. Faleva*, Junior Research Scientist; ResearcherID: [AAZ-1879-2020](https://orcid.org/0000-0002-8565-6871),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8565-6871>

Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; [elen-koptelova@yandex.ru](mailto:elen-koptelova@yandex.ru), [n.kutakova@narfu.ru](mailto:n.kutakova@narfu.ru)<sup>✉</sup>, [s.tret'yakov@narfu.ru](mailto:s.tret'yakov@narfu.ru), [a.bezumova@narfu.ru](mailto:a.bezumova@narfu.ru)

Received on October 30, 2020 / Approved after reviewing on December 29, 2020 / Accepted on January 11, 2021

**Abstract.** Birch bark consists of silver bark and bast. Silver bark contains up to 50 % of extractives and serves as a raw material for obtaining valuable biologically active substances (BAS), including betulin. A distinctive feature of the birch bark structure is a cross-linked polymer, suberin. Its monomers are suberic acids. They have found use in the production of lubricants, oils, insecticides, fungicides, polymers, polyesters, coatings, etc. A common method for extracting suberic acid salts from silver bark is exhaustive hydrolysis with an aqueous or water-alcohol solution of alkali (NaOH or KOH). We have proposed the activation of raw materials during hydrolysis by using an ultrahigh-frequency electromagnetic field (microwave hydrolysis). Isolation of suberin from silver bark is both a chemical and mass transfer process. Salts that are formed during hydrolysis of suberic acids diffuse to the surface of silver bark particles and pass into the hydrolysate. The limiting stage of mass transfer during birch bark hydrolysis is internal diffusion in the pores (mass conductivity). The anisotropy of the silver bark structure complicates the mathematical description of the mass transfer kinetics in the diffusion process. The process of internal diffusion during microwave hydrolysis is characterized by a steady regime starting from the 4th minute. The kinetics of this process and the effectiveness of diffusion in the tangential and longitudinal directions were determined. As the size of birch bark particles increases in both length (tangential direction) and width (longitudinal direction), the rate of the hydrolysis process and the degree of suberin isolation increase. Internal diffusion coefficients during microwave bark hydrolysis were determined. The highest value was obtained for fractions with a particle size of 3–4.5 mm (silver bark); the lowest – for fractions less than 1 mm (bast). The article shows that the small fraction (bast)



should be separated and silver bark should be cut along the fiber in order to increase the yield of suberin after birch bark grinding.

**Keywords:** birch bark, silver bark, suberin, microwave field, water-alkaline hydrolysis, diffusion coefficient

**For citation:** Koptelova E.N., Kutakova N.A., Tret'yakov S.I., Faleva A.V. Kinetics of Water-Alkaline Hydrolysis of Birch Bark in a Microwave Field. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2022, no. 3, pp. 179–190. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-3-179-190>

### Введение

Березовая кора имеет 2 слоя: наружный – корка (береста), внутренний – луб. По своему химическому составу они значительно отличаются друг от друга. Береста представляет наибольший интерес для химической переработки, так как содержит до 50 % экстрактивных веществ [3] и служит сырьем для получения ценных продуктов и биологически активных веществ, в том числе бетулина.

Отличительной чертой структуры бересты является наличие полимера суберина, содержание которого в ней составляет 20...30 % [18]. Суберин представляет собой поперечно-сшитый полифенол, в котором алифатические, или так называемые субериновые, кислоты связаны с ароматическими полифенолами [19, 20]. Основная функция суберина – защита тканей от потери воды, минеральных и питательных веществ [16, 22, 31]: он пропитывает клеточные оболочки, в результате чего происходит их опробкование. В качестве гидрофобного барьера суберин важен для поддержания устойчивости к патогенам [28].

Субериновые кислоты нашли применение в производстве смазок и масел, инсектицидов, фунгицидов и других продуктов [27]. Представляют интерес для изготовления средств защиты растений [30], пленкообразующих средств и покрытий [13, 14], пенополиуретана и древесно-стружечных плит с высокой прочностью [29], средств защиты кожи [21], служат связующими при получении плитных материалов [12]. Данные мономеры позволяют синтезировать уникальные функциональные полиэфиры, в том числе биоразлагаемые [32]. Высокая термостойкость субериновых кислот вместе с олигомерно-полимерной природой открывают новые перспективы использования суберина в качестве макромономера при разработке полимерных материалов на биологической основе. Это способствует повышению ценности остатков лесозаготовки, богатых суберином [19]. Субериновые кислоты березовой коры по аналогии с кислотами из коры черной ольхи, вероятно, могут обладать антибактериальной или антигрибковой активностью [3].

Извлечение суберина из бересты является одновременно химическим и массообменным процессом. Исследованиями [4, 8, 9] показано, что лимитирующей стадией массообмена в бересте и других растительных материалах становится внутренняя диффузия в порах (массопроводность). Максимальная массопроводность наблюдается в поперечном направлении, минимальная – в радиальном. Анизотропия бересты затрудняет математическое описание кинетики массопереноса в диффузионных процессах (экстракция, сушка). Общепринятый способ выделения солей субериновых кислот из бересты – ее исчерпыва-

ющий гидролиз водным или водно-спиртовым раствором гидроксида калия или натрия последовательным (после извлечения бетулина) [11] или совмещенным способом [1]. Деполимеризация в среде органических растворителей, включая алифатические спирты, протекает полнее [23], чем при использовании других растворителей.

С целью интенсификации процессов химической переработки древесного сырья применяют различные активирующие воздействия. Так, для извлечения бетулина предложено активировать бересту в условиях неизобарного парокрекинга [6] или ударно-акустическими импульсами, щелочной гидролиз и экстракцию бетулина спиртом проводить одновременно [10]; для различных растительных материалов – применять ультразвуковое воздействие или сверхкритическую экстракцию диоксидом углерода [24] и другими флюидами [17]. Однако данные способы усложняют технологию и повышают энергоемкость процесса.

Перспективным методом активации сырья является использование электромагнитного поля сверхвысоких частот (ЭМП СВЧ). В последние годы проявляется огромный интерес к интенсификации извлечения компонентов из растительного сырья при помощи ЭМП СВЧ [25, 26]. Ранее нами установлено [2], что обработка бересты посредством воздействия на нее волнами СВЧ-поля в 2 раза сокращает продолжительность процесса водно-щелочного гидролиза при извлечении суберина по сравнению с традиционными способами.

Изучение литературных данных позволило выявить, что математический алгоритм процесса водно-щелочного гидролиза березовой коры фактически не разработан. Не установлены кинетические закономерности данного процесса, не определена эффективность диффузии веществ через различные поверхности бересты (в тангенциальном и продольном направлениях).

Цель исследования – изучение кинетических закономерностей процесса водно-щелочного гидролиза бересты при получении суберина с использованием СВЧ-поля, определение коэффициентов внутренней диффузии при СВЧ-гидролизе.

#### *Объекты и методы исследования*

Объектом исследования служила техническая березовая кора АО «Архангельский целлюлозно-бумажный комбинат», отобранная с линии окорки балансов. Высушенную кору измельчали на дробилке истирающего действия и подвергали фракционированию на ситах, в ходе которого выделили фракции, состоящие преимущественно из бересты (3...4,5 мм) и луба (менее 1 мм).

Влажность и общую зольность коры определяли по методике, описанной в [7]. Влажность бересты составила 2,5 %, луба – 6,5 %; зольность бересты – 1,35 %, луба – 1,87 %.

Для изучения кинетических закономерностей СВЧ-гидролиза готовили методом ручной резки модельные образцы бересты с фиксированными размерами в тангенциальном и продольном направлениях: 2,5 × 2,5; 2,5 × 5,0; 2,5 × 10,0 и 5,0 × 5,0 мм. Для получения данных, близких к производственным, измельчали сухую березовую кору на дробилке истирающего (луцильного) действия типа dr. Koerner, mode II.

Геометрические характеристики полученных фракций коры, измельченной на дробилке, и модельных образцов бересты ручной резки приведены в табл. 1. Эквивалентный радиус частиц рассчитывали по формуле

$$\frac{1}{R^2} = \frac{1}{R_1^2} + \frac{1}{(6R_2)^2} + \frac{1}{(16R_3)^2},$$

где  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  – полудлина ребра частички бересты в тангенциальном, продольном и радиальном направлениях соответственно, мм.

Таблица 1

**Геометрические характеристики (мм) образцов коры и бересты**

Table 1

**Geometric characteristics of bark and silver bark samples**

Вид измельчения	Фракции коры / размеры частиц бересты*	Эквивалентный радиус
Истирающее измельчение	Менее 1	0,21
	1...2	0,24
	2...3	0,24
	3...4,5	0,24
Ручная резка	2,5 × 2,5	1,22
	2,5 × 5,0	1,23
	2,5 × 10,0	1,23
	5,0 × 5,0	2,36

\*1-е число – в поперечном, 2-е – в продольном измерении.

Эквивалентный радиус частиц при истирающем измельчении существенно меньше, чем при ручной резке. Для фракций коры 1...2, 2...3 и 3...4,5 мм получены совпадающие значения. Для образцов ручной резки с одинаковыми поперечными размерами установлен один и тот же (или равный) показатель, при увеличении размеров в 2 раза он повышался в 1,9 раза.

По результатам определения фракционного состава коры наибольшими фракциями были менее 1 мм (35,4 %) (луб) и 3...4,5 мм (31,5 %) (береста); фракции 1...2 мм (19,0 %) и 2...3 мм (13,0 %) совместно составляют 1/3 часть измельченной коры. Присутствовало незначительное количество частиц размером 4,5...5 мм (1,0 % от общей массы коры).

Экстрактивные вещества выделены из приготовленных образцов этиловым спиртом при помощи установки с СВЧ-камерой на основе бытового генератора ЭМП СВЧ [5, 15]. Извлечение суберина из проэкстрагированной бересты осуществляли методом водно-щелочного гидролиза в СВЧ-камере при оптимальных условиях, установленных ранее с использованием планированного эксперимента [2]. Гидролиз проводили 5 %-м водным раствором гидроксида калия при гидромодуле 1:15.

Для исследования кинетики извлечения суберина отбирали пробы гидролизата: в начале процесса через каждые 2 мин, в конце – через каждые 3 мин. Общая продолжительность процесса составила 15 мин. Получаемые гидролизаты нейтрализовали 1 М раствором соляной кислоты до pH 4...6. Выделившийся осадок субериновых кислот отфильтровывали, промывали водой до нейтральной реакции и сушили при комнатной температуре до постоянной массы. Выход суберина рассчитывали по отношению к массе коры.

## Результаты исследования и их обсуждение

Выход бетулина-сырца из измельченной сортированной коры (без мелкой фракции – луба) составил 12,4 и 16,7 % от абсолютно сухой коры (а. с. к.) для фракций 2...3 и 3...4,5 мм соответственно.

В результате водно-щелочного гидролиза проэкстрагированной коры в ЭМП СВЧ получены образцы суберина. Зависимость выхода суберина для различных фракций коры от продолжительности обработки в СВЧ-поле представлена на рис. 1.

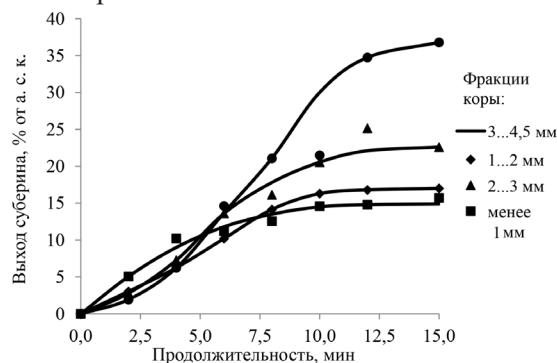


Рис. 1. Зависимость выхода суберина от продолжительности СВЧ-гидролиза для фракций коры, полученных истирающим измельчением

Fig. 1. Dependence of the suberin yield on the microwave hydrolysis duration for bark fractions obtained by abrasive grinding

При анализе зависимостей (рис. 1) обнаружено, что с увеличением размеров фракции выход суберина возрастает. Выход варьирует в интервале 15,7...36,8 % и достигает максимума (в пределах принятого диапазона продолжительности) для фракции 3...4,5 мм (береста). Для других фракций коры выход суберина оказывается на плато при продолжительности гидролиза 10...12 мин, но на меньшем уровне. Минимальный выход 15,7 % наблюдается при гидролизе коры с размером частиц менее 1 мм (луб).

Зависимость выхода суберина от продолжительности процесса СВЧ-гидролиза при различной степени измельчения бересты путем ручной резки (модельные образцы) показана на рис. 2. Выход рассчитан по отношению к абсолютно сухой бересте (а. с. б.).

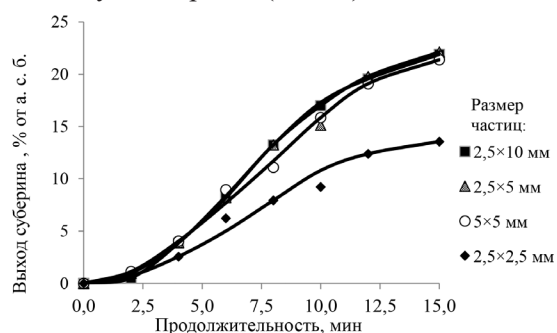


Рис. 2. Зависимость выхода суберина от продолжительности СВЧ-гидролиза при различной степени измельчения бересты (модельные образцы)

Fig. 2. Dependence of the suberin yield on the microwave hydrolysis duration at different degrees of birch bark grinding (model samples)

В опытах с модельными образцами бересты ручной резки (рис. 2) максимальный выход 22,1 % (15 мин) также достигается при гидролизе образцов наибольшего размера, однако плато не наблюдается. Выход продукта из образца бересты с наименьшими размерами стремится к стабилизации начиная с 12-й мин, но не превышает 13 %. Эти закономерности отражают способность коры березы к самосепарации в процессе измельчения: луб легко крошится и составляет основу мелких фракций, поэтому выход суберина из них значитель-

но ниже, чем из крупных фракций. Следовательно, трудоемкая операция по ручному предварительному отделению луба от бересты может быть заменена механическим сортированием измельченной сухой коры.

На представленных кинетических кривых (рис. 2) видно, что увеличение размеров частиц в продольном направлении не приводит к значительным изменениям выхода суберина (варьирование в пределах 21,4...22,1 % от а. с. б.). Однако увеличение размеров частиц в тангенциальном направлении влечет за собой резкое повышение выхода суберина (с 13,6 до 21,4 % от а. с. б.), т. е. бересту важно резать вдоль волокна.

При обработке данных по кинетике СВЧ-гидролиза исследовали зависимость степени недоизвлечения суберина ( $E$ ), равной отношению остаточного содержания суберина к его исходному содержанию в коре, от продолжительности процесса по кинетическому уравнению, соответствующему регулярному режиму извлечения:

$$E = Be^{-\mu^2 Fo},$$

где  $B$  – безразмерный коэффициент, определяемый экспериментальным путем;  $\mu$  – коэффициент, равный корню характеристического уравнения (для частиц, приведенных к шарообразной форме, принимающий значение  $\pi$ );  $Fo$  – диффузионный критерий Фурье,

$$Fo = D \frac{\tau}{R^2},$$

$D$  – коэффициент внутренней диффузии,  $m^2/c$ ;  $\tau$  – продолжительность экстракции, с;  $R$  – приведенный радиус частицы бересты, м.

Для определения коэффициента внутренней диффузии уравнение  $E = Be^{-\mu^2 Fo}$  логарифмировали. На рис. 3, *a*, *б* представлены логарифмические зависимости  $\ln E$  от продолжительности процесса. Графики позволяют сделать вывод о том, что линейные зависимости, соответствующие регулярному режиму процесса извлечения, наблюдаются после 4-й минуты проведения СВЧ-гидролиза, совмещенного с диффузией суберина из бересты.

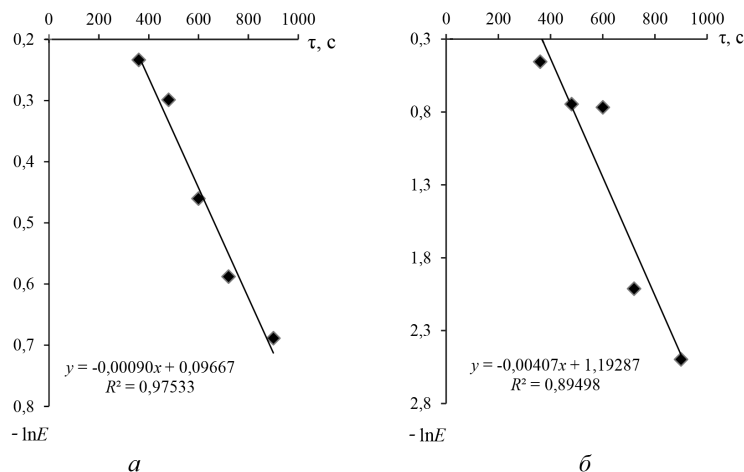


Рис. 3. Зависимость  $\ln E = f(\tau)$  при извлечении суберина из:  
*a* – модельного образца бересты ручной резки (5,0 × 5,0 мм);  
*б* – коры, измельченной на дробилке (3...4,5 мм)

Fig. 3. Dependence of  $\ln E = f(\tau)$  when extracting suberin from:  
*a* – a model sample of hand-cut silver bark (5.0 × 5.0 mm); *б* – bark  
grinded in a grinder (3–4.5 mm)

Экстраполяцией прямой линии определяли безразмерный коэффициент  $B$ , а по тангенсу угла наклона прямых ( $\operatorname{tg}\alpha$ ) рассчитывали коэффициент внутренней диффузии

$$D = \frac{R^2 \operatorname{tg}\alpha}{\pi^2}.$$

Расчетные значения коэффициентов внутренней диффузии и критерия Фурье для модельных образцов бересты ручной резки и коры, измельченной на дробилке, представлены в табл. 2.

Таблица 2

**Влияние вида измельчения и размеров березовой коры на коэффициент внутренней диффузии и критерий Фурье**

Table 2

**Influence of the grinding method and the size of birch bark on the internal diffusion coefficient and the Fourier criterion**

Вид измельчения	Фракции коры / размеры частиц бересты, мм	$B$	$\operatorname{tg}\alpha \cdot 10^3$	$D \cdot 10^{10}, \text{ м}^2/\text{с}$	$Fo \cdot 10^3$
Ручная резка	2,5 × 2,5	1,006	−0,47	0,709	43
	2,5 × 5,0	1,117	−0,94	1,441	86
	2,5 × 10,0	1,078	−0,90	1,380	82
	5,0 × 5,0	1,101	−0,90	5,079	82
Истирающее действие	Менее 1	0,819	−0,26	0,012	24
	1...2	0,820	−0,38	0,022	35
	2...3	0,885	−0,87	0,050	79
	3...4,5	3,297	−4,07	0,238	371

На рис. 4 приведены экспериментальные (маркер) и расчетные (линия) данные по кинетике процесса для измельченной отсортированной коры (фракция 3...4,5 мм). Предложенная экспоненциальная модель достаточно хорошо ( $R^2 = 0,85$ ) описывает внутреннюю диффузию и кинетику в целом.

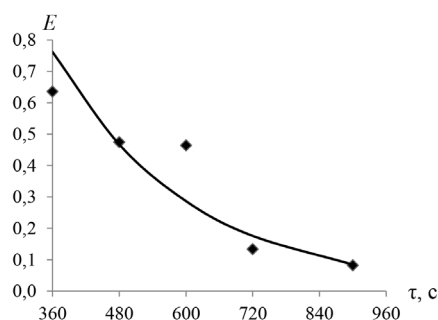


Рис. 4. Зависимость степени недоизвлечения суберина от продолжительности процесса гидролиза для коры, измельченной на дробилке (3...4,5 мм)

Fig. 4. Dependence of the degree of suberin under-recovery on the hydrolysis duration for bark grinded in a grinder (3–4.5 mm)

При водно-щелочном гидролизе модельных образцов бересты в ЭМП СВЧ наибольший коэффициент внутренней диффузии обнаружен у образца размером 5 × 5 мм, наименьший – у образца 2,5 × 2,5 мм. При увеличении размера коры в поперечном направлении наблюдается значительное повышение коэффициента диффузии. Изменения в продольном направлении на коэффициенте диффузии практически не отражаются. При гидролизе березовой коры, измельченной на дробилке, наибольший коэффициент диффузии зафиксирован у фракции 3...4,5 мм, наименьший – у фракции менее 1 мм.



Анатомическое строение березовой коры имеет значение при выборе способа измельчения ее для химической переработки. Концентрация суберина в гидролизате при использовании сырья поперечной резки относительно ствола больше, чем при продольной. С увеличением размеров бересты и по длине (тангенциальное направление), и по ширине (продольное направление) растут скорость процесса гидролиза и степень извлечения суберина.

Малые значения критерия Фурье говорят о высокой скорости процесса при воздействии СВЧ-поля. Увеличение критерия происходит с ростом размеров частиц коры и соответствует увеличению коэффициента внутренней диффузии.

### Заключение

Показана принципиальная возможность комплексной химической переработки технической березовой коры – отхода целлюлозно-бумажного производства – с получением бетулина и суберина. Извлечение компонентов осуществлено последовательно в электромагнитном поле сверхвысоких частот из измельченной коры. Трудоемкая операция по ручному предварительному отделению луба от бересты заменена механическим сортированием измельченной сухой коры. При обработке коры путем последовательной спиртовой экстракции и гидролиза в СВЧ-поле достигнуты максимальные выходы бетулина-сырца и суберина – 16,7 и 36,8 % от массы коры соответственно.

Установлены кинетические закономерности водно-щелочного СВЧ-гидролиза: для достижения максимального выхода суберина (более 36 %) продолжительность обработки крупной фракции коры должна быть не менее 15 мин. Определены коэффициенты внутренней диффузии: наибольшее значение ( $0,238 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2/\text{с}$ ) установлено для фракции с размером частиц 3...4,5 мм (береста), наименьшее ( $0,012 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2/\text{с}$ ) – для фракции менее 1 мм (луб). Рассчитанные значения критерия Фурье для процесса СВЧ-гидролиза свидетельствуют о высокой скорости извлечения суберина, в особенности для крупных фракций коры, и соответствуют тенденции роста коэффициента внутренней диффузии по мере увеличения размеров частиц коры, измельченной на дробилке.

Предложена экспоненциальная модель, достаточно хорошо описывающая внутреннюю диффузию в анизотропном материале (коре) и кинетику извлечения из него суберина. Показано существенное различие поведения составных частей коры в ходе СВЧ-обработки.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. А.с. 382657 СССР, МКИ<sup>1</sup> С 08h 5/04. Способ выделения бетулина и суберина: № 1472003/23-4: заявл. 14.08.1970: опубл. 23.05.1973 / Т.И. Федорищев, В.Г. Калайков. Fedorishchev T.I., Kalaykov V.G. *Method for Isolation of Betulin and Suberin*. Certificate of Authorship USSR, no. SU 382657 A1, 1973. (In Russ.).
2. Безумова А.В., Третьяков С.И., Кутакова Н.А., Коптелова Е.Н. Извлечение субериновых кислот из бересты при воздействии СВЧ-поля // *Химия растит. сырья*. 2018. № 1. С. 21–28.
- Bezumova A.V., Tret'iakov S.I., Kutakova N.A., Koptelova E.N. Extracting Suberin Acids from Birch Bark when Exposed to a Microwave Field. *Khimija Rastitel'nogo Syr'ja* =

Chemistry of Plant Raw Materials, 2018, no. 1, pp. 21–28. (In Russ.). <https://doi.org/10.14258/jcprm.2018012560>

3. Кислицын А.Н. Экстрактивные вещества бересты: выделение, состав, свойства, применение. Обзор // Химия древесины. 1994. № 3. С. 3–28.

Kislitsyn A.N. Extractive Substances of Birch Bark: Isolation, Composition, Properties and Application. Review. *Khimiya drevesiny*, 1994, no. 3, pp. 3–28. (In Russ.).

4. Коптелова Е.Н., Кутакова Н.А., Третьяков С.И. Исследование кинетики массопереноса в процессе экстрагирования бересты // Изв. вузов. Лесн. журн. 2013. № 4. С. 119–128.

Koptelova E.N., Kutakova N.A., Tretyakov S.I. Study of Mass Transfer Kinetics during Birch Bark Extraction. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2013, no. 4, pp. 119–128. (In Russ.). <http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/22b/x5.pdf>

5. Коптелова Е.Н., Кутакова Н.А., Третьяков С.И. Извлечение экстрактивных веществ и бетулина из бересты при воздействии СВЧ-поля // Химия растит. сырья. 2013. № 4. С. 159–164.

Koptelova E.N., Kutakova N.A., Tretyakov S.I. Removing the Extractives and Betulin from Birch Bark Exposed Microwave Field. *Khimija Rastitel'nogo Syr'ja* = Chemistry of Plant Raw Materials, 2013, no. 4, pp. 159–164. (In Russ.). <https://doi.org/10.14258/jcprm.1304159>

6. Кузнецов Б.Н., Левданский В.А., Еськин А.П., Полежаева Н.И. Выделение бетулина и суберина из коры березы, активированной в условиях «взрывного автогидролиза» // Химия растит. сырья. 1998. № 1. С. 5–9.

Kuznetsov B.N., Levdanskiy V.A., Es'kin A.P., Polezhayeva N.I. Isolation of Betulin and Suberin from Birch Bark Activated in Conditions of “Explosive Autohydrolysis”. *Khimija Rastitel'nogo Syr'ja* = Chemistry of Plant Raw Materials, 1998, no. 1, pp. 5–9. (In Russ.).

7. Кутакова Н.А., Богданович Н.И., Селянина С.Б., Коптелова Е.Н., Коровкина Н.В. Лабораторный практикум по технологии биологически активных веществ и углеродных адсорбентов: в 2 ч. Ч. 2. Анализ БАВ. Архангельск: САФУ, 2015. 114 с.

Kutakova N.A., Bogdanovich N.I., Selyanina S.B., Koptelova E.N., Korovkina N.V. *Laboratory Workshop on the Technology of Biologically Active Substances and Carbon Adsorbents: 2 Parts. Part 2. Analysis of BAS*. Arkhangelsk, NarFU Publ., 2015. 114 p. (In Russ.).

8. Макаревич Н.А., Третьяков С.И., Богданович Н.И. Кинетическая модель массопереноса на межфазных границах с участием компонентов растительного сырья // Физикохимия поверхности и защита материалов. 2019. Т. 55, № 6. С. 601–609.

Makarevich N.A., Tretyakov S.I., Bogdanovich N.I. Kinetic Model of Mass Transfer at Interfaces with Components of Plant Products. *Fizikokhimiya poverkhnosti i zashchita materialov* = Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces, 2019, vol. 55, no. 6, pp. 601–609. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S0044185619050164>

9. Макаревич Н.А., Богданович Н.И., Третьяков С.И., Коптелова Е.Н. Кинетическая модель межфазовых процессов с участием компонентов растительного сырья // Химия растит. сырья. 2014. № 4. С. 251–262.

Makarevich N.A., Bogdanovich N.I., Tretyakov S.I., Koptelova E.N. Kinetic Model of Interphase Processes with Participation of Components of Plant Raw Materials. *Khimija Rastitel'nogo Syr'ja* = Chemistry of Plant Raw Materials, 2014, no. 4, pp. 251–262. (In Russ.). <https://doi.org/10.14258/jcprm.201404208>

10. Патент 2264411 РФ, С1, МПК С07J 53/00 (2006.01), С07J 63/00 (2006.01). Способ получения бетулина: № 2004122661/04: заявл. 23.07.2004; опубл. 20.11.2005 / С.А. Кузнецова, Б.Н. Кузнецов, А.Г. Михайлов, В.А. Левданский.

Kuznetsova S.A., Kuznetsov B.N., Mihajlov A.G., Levdanskiy V.A. *Method for Production of Betulin*. Patent RF no. RU 2 264 411 C1, 2005. (In Russ.).

11. Патент 2618892 РФ, С1 А61К 36/185(2006.01), В01D 11/02(2006.01), А61К 129/00(2006.01). Способ комплексной переработки коры березы: № 2016120506: заявл. 25.05.2016: опубл. 11.05.2017 / Б.Н. Кузнецов, И.Г. Судакова, С.А. Кузнецова, Л.И. Гришечко, Г.П. Скворцова, Е.В. Веприкова, В.А. Левданский.

Kuznetsov B.N., Sudaikova I.G., Kuznetsova S.A., Grischechko L.I., Skvortsova G.P., Veprikova E.V., Levdanskiy V.A. *Method for Complex Processing of Birch Bark*. Patent RF no. RU 2 618 892 C1, 2017. (In Russ.).

12. Судакова И.Г., Гарынцева Н.В., Кузнецов Б.Н. Получение древесных плитных материалов с использованием связующих на основе суберина березовой коры // Химия растит. сырья. 2011. № 3. С. 65–68.

Sudaikova I.G., Garyntseva N.V., Kuznetsov B.N. Production of Wood Fiber Boards with the Use of Birch Bark Suberin-Derived Binding Agents. *Khimija Rastitel'nogo Syr'ja = Chemistry of Plant Raw Materials*, 2011, no. 3, pp. 65–68. (In Russ.).

13. Судакова И.Г., Иванов И.П., Иванченко Н.М., Кузнецов Б.Н. Защитные составы для древесины на основе суберина коры березы // Химия растит. сырья. 2005. № 1. С. 59–63.

Sudaikova I.G., Ivanov I.P., Ivanchenko N.M., Kuznetsov B.N. Protective Compositions for Wood Based on Birch Bark Suberin. *Khimija Rastitel'nogo Syr'ja = Chemistry of Plant Raw Materials*, 2005, no. 1, pp. 59–63. (In Russ.).

14. Судакова И.Г., Кузнецов Б.Н., Иванов И.П., Иванченко Н.М. Получение пленкообразующих материалов из суберина коры березы повислой // Химия растит. сырья. 2004. № 1. С. 31–34.

Sudaikova I.G., Kuznetsov B.N., Ivanov I.P., Ivanchenko N.M. Film-Forming Materials Production from Birch Bark Suberin. *Khimija Rastitel'nogo Syr'ja = Chemistry of Plant Raw Materials*, 2004, no. 1, pp. 31–34. (In Russ.).

15. Третьяков С.И., Коптелова Е.Н., Кутакова Н.А., Владимирова Т.М., Богданович Н.И. Бетулин: получение, применение, контроль качества: моногр. Архангельск: САФУ, 2015. 180 с.

Tret'yakov S.I., Koptelova E.N., Kutakova N.A., Vladimirova T.M., Bogdanovich N.I. *Betulin: Receiving, Use and Quality Control*. Arkhangelsk, NArFU Publ., 2015. 180 p. (In Russ.).

16. Черняева Г.Н., Долгодворова С.Я., Бондаренко С.М. Экстрактивные вещества березы. Красноярск: ИЛиД, 1986. 123 с.

Chernyaeva G.N., Dolgodvorova S.Ya., Bondarenko S.M. *Extractive Substances of Birch*. Krasnoyarsk, ILiD Publ., 1986. 123 p. (In Russ.).

17. Armbruste M., Mönckedieck M., Scherließ R., Daniels R., Wahl M.A. Birch Bark Dry Extract by Supercritical Fluid Technology: Extract Characterisation and Use for Stabilisation of Semisolid Systems. *Applied Sciences*, 2017, vol. 7, iss. 3, art. 292. <https://doi.org/10.3390/app7030292>

18. Ekman R. The Suberin Monomers and Triterpenoids from the Outer Bark of *Betula verrucosa* Ehrh. *Holzforschung*, 1983, vol. 37, iss. 4, pp. 205–211. <https://doi.org/10.1515/hfsg.1983.37.4.205>

19. Ferreira R., Garcia H., Sousa A.F., Freire C.S.R., Silvestre A.J.D., Rebelo L.P.N., Pereira C.S. Isolation of Suberin from Birch Outer Bark and Cork Using Ionic Liquids: A New Source of Macromonomers. *Industrial Crops and Products*, 2013, vol. 44, pp. 520–527. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2012.10.002>

20. Gandini A., Neto C.P., Silvestre A.J.D. Suberin: A Promising Renewable Resource for Novel Macromolecular Materials. *Progress in Polymer Science*, 2006, vol. 31, iss. 10, pp. 878–892. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2006.07.004>

21. Hamaoka S., Suzuki A., Hara M., Nishio H., Otsuka F., Uchida Y. Human Epidermal Glucosylceramides are Major Precursors of Stratum Corneum Ceramides. *Journal*

of *Investigative Dermatology*, 2002, vol. 119, iss. 2, pp. 416–423. <https://doi.org/10.1046/j.1523-1747.2002.01836.x>

22. Kolattukudy P.E. Biopolyester Membranes of Plants: Cutin and Suberin. *Science*, 1980, vol. 208, no. 4447, pp. 990–1000. <https://doi.org/10.1126/science.208.4447.990>

23. Krasutsky P.A., Carlson R.M., Kolomitsyn I.V. *Isolation of Natural Products from Birch Bark*. Patent US no. US 6,768,016 B2, 2004.

24. Krasutsky P.A., Carlson R.M., Nesterenko V.V., Kolomitsyn I.V., Edwardson C.F. *Birch Bark Processing and the Isolation of Natural Products from Birch Bark*. Patent US no. US 2005/O158414 A1, 2005.

25. Mandal V., Mohan Y., Hemalatha S. Microwave Assisted Extraction – an Innovative and Promising Extraction Tool for Medicinal Plant Research. *Pharmacognosy Reviews*, 2007, vol. 1, iss. 1, pp. 7–18.

26. *Microwave-Assisted Extraction for Bioactive Compounds*. Ed. by F. Chemat, G. Cravotto. New York, Springer, 2013. 238 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-4830-3>

27. Pinto P.C.R.O., Souza A.F., Silvestre A.J.D., Neto C.P., Gandini A., Eckerman C., Holmbom B. *Quercus suber* and *Betula pendula* Outer Barks as Renewable Sources of Oleochemicals: A Comparative Study. *Industrial Crops and Products*, 2009, vol. 29, iss. 1, pp. 126–132. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2008.04.015>

28. Pollard M., Beisson F., Li Y., Ohlrogge J.B. Building Lipid Barriers: Biosynthesis of Cutin and Suberin. *Trends in Plant Science*, 2008, vol. 13, iss. 5, pp. 236–246. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2008.03.003>

29. Rižikovs J., Zandersons J., Paže A., Tardenaka A., Spince B. Isolation of Suberinic Acids from Extracted Outer Birch Bark Depending on the Application Purposes. *Baltic Forestry*, 2014, vol. 20, no. 1, pp. 98–105.

30. Schweizer P., Felix G., Buchala A., Müller C., Métraux J.-P. Perception of Free Cutin Monomers by Plant Cells. *The Plant Journal*, 1996, vol. 10, iss. 2, pp. 331–341. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3113X.1996.10020331.x>

31. Von Wettstein-Knowles P.M. Waxes, Cutin, and Suberin. *Lipid Metabolism in Plants*. Ed. by T.S. Moore. CRC Press, 2018, pp. 127–166. <https://doi.org/10.1201/9781351074070-5>

32. Yang Y., Lu W., Zhang X., Xie W., Cai M., Gross R.A. Two-Step Biocatalytic Route to Biobased Functional Polyesters from  $\omega$ -Carboxy Fatty Acids and Diols. *Biomacromolecules*, 2010, vol. 11, no. 1, pp. 259–268. <https://doi.org/10.1021/bm901112m>

**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