

Научная статья

УДК 678.031:54-112

DOI: 10.37482/0536-1036-2024-1-195-207

## Инженерная методика расчета установки извлечения бетулина из бересты березы

*А.В. Сафина, канд. техн. наук, доц.; ResearcherID: [CAA-1333-2022](https://orcid.org/0000-0002-7344-9242),*

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7344-9242>*

*Д.Ф. Зиятдинова, д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [HPC-5155-2023](https://orcid.org/0000-0003-2801-4642),*

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

*Л.Р. Назипова, инженер; ResearcherID: [HPC-5155-2023](https://orcid.org/0009-0003-9918-0397),*

*ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-9918-0397>*

*Р.Г. Сафин, д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [Q-8575-2017](https://orcid.org/0000-0002-5790-4532),*

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

*К.В. Валеев<sup>✉</sup>, канд. техн. наук, доц.; ResearcherID: [HPC-5151-2023](https://orcid.org/0000-0002-5537-9332),*


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

Казанский национальный исследовательский технологический университет, ул. К. Маркса, д. 68, г. Казань, Россия, 420015; alb\_saf@mail.ru, Ziatdinova2804@gmail.com, lnazipova@internet.ru, safin@kstu.ru, kirval116@mail.ru<sup>✉</sup>

Поступила в редакцию 20.03.23 / Одобрена после рецензирования 23.06.23 / Принята к печати 26.06.23

**Аннотация.** Анализ современного состояния процесса извлечения бетулина из бересты березы показал актуальность внедрения на малых предприятиях лесопромышленного комплекса периодической технологии экстрагирования с применением в качестве растворителя толуола. Приведены схема экстракционной установки, состоящей из экстрактора, испарителя, конденсатора, флорентины, сборника экстракта, а также принцип работы этой установки. Процесс имеет 2 стадии: при нахождении сырья по отношению к толуолу в состоянии покоя и при экстрагировании сырья непрерывной подачей свежего экстрагента. Разработана инженерная методика расчета экстрактора, позволяющая определить его габаритные размеры (диаметр, высоту) и длительность отдельных стадий процесса экстракции. Продолжительность 1-й стадии рассчитывается решением дифференциального уравнения теплопроводности Фика при граничных условиях I рода; 2-й – с учетом того, что из экстрактора непрерывно отводят экстракт бетулина и вводят свежий экстрагент. В последнем случае содержание бетулина в экстрагенте изменяется не только во времени, но и по высоте экстрактора. Разработанное математическое описание и последующее моделирование позволило получить расчетные кривые распределения бетулина в бересте в разные моменты времени, а также сопоставить экспериментальные и расчетные данные по кинетике среднего содержания бетулина в бересте и толуоле для каждой стадии. При этом кинетические кривые среднего содержания бетулина в бересте на 2-й стадии приведены для различных высот экстрактора. Установлено, что оптимальная продолжительность 1-й стадии составляет 20 мин, а при непрерывной подаче свежего экстрагента с расходом 22,5 кг/ч на 2-й стадии скорость процесса увеличивается в 6 раз. Это значительно сокращает общую продолжительность экстракции при заданных параметрах процесса. Показана необходимость ввода 3-й стадии – стабилизации содержания бетулина по высоте слоя и по сечению частиц.

© Сафина А.В., Зиятдинова Д.Ф., Назипова Л.Р., Сафин Р.Г., Валеев К.В., 2024

 Статья опубликована в открытом доступе и распространяется на условиях лицензии CC BY 4.0

**Ключевые слова:** бетулин, экстракция, береста, инженерная методика, математическая модель

**Для цитирования:** Сафина А.В., Зиятдинова Д.Ф., Назипова Л.Р., Сафин Р.Г., Валеев К.В. Инженерная методика расчета установки извлечения бетулина из бересты березы // Изв. вузов. Лесн. журн. 2024. № 1. С. 195–207. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-1-195-207>

Original article

## The Engineering Procedure for Calculating the Plant for Betulin Extraction from Birch Bark

*Al'bina V. Safina*, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.; ResearcherID: [CAA-1333-2022](https://orcid.org/0000-0002-7344-9242), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7344-9242>

*Dilara F. Ziatdinova*, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [HPC-5155-2023](https://orcid.org/0000-0003-2801-4642), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2801-4642>

*Leysan R. Nazipova*, Engineer; ResearcherID: [HPC-5155-2023](https://orcid.org/0009-0003-9918-0397), ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-9918-0397>

*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*<sup>✉</sup>, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.; ResearcherID: [HPC-5151-2023](https://orcid.org/0000-0002-5537-9332), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5537-9332>

Kazan National Research Technological University, ul. K. Marksa, 68, Kazan, Republic of Tatarstan, 420015, Russian Federation; alb\_saf@mail.ru, Ziatdinova2804@gmail.com, lnazipova@internet.ru, safin@kstu.ru, kirval116@mail.ru<sup>✉</sup>

Received on March 20, 2023 / Approved after reviewing on June 23, 2023 / Accepted on June 26, 2023

**Abstract.** The analysis of the current state of the process of betulin extraction from birch bark has shown the relevance of the implementation of periodic extraction technology using toluene as a solvent at small enterprises of the timber industry complex. This article presents the scheme of an extraction plant consisting of an extractor, an evaporator, a condenser, a florentine flask, an extract collector, as well as the principle of the plant operation. The extraction process is carried out in two stages: when the raw material is at rest in relation to toluene and when the raw material is extracted by continuous feeding of fresh extractant. The engineering procedure for calculating the extractor has been developed, allowing to determine its overall dimensions (diameter and height) and the duration of individual stages of the extraction process. The duration of the first stage has been calculated by solving Fick's differential equation of mass conductivity under boundary conditions of the first kind. The duration of the second stage has been calculated considering the fact that betulin extract is continuously withdrawn from the extractor and fresh extractant is injected. In the latter case, the betulin content in the extractant varies not only in time, but also with the height of the extractor. The developed mathematical description and subsequent modeling made it possible to obtain the calculated curves of betulin distribution in birch bark at different points in time, as well as to compare the experimental and calculated data on the kinetics of the average betulin content in birch bark and toluene for each stage. Meanwhile, the kinetic curves of the average betulin content in birch bark at the second stage are presented for different heights of the extractor. It has been established that the optimal duration of the first stage is 20 min,



and with the continuous feeding of fresh extractant with a flow rate of 22.5 kg/h at the second stage, the process speed increases by 6 times. This significantly reduces the total extraction time under the specified process parameters. The necessity for the introduction of the third stage (the stabilization period of the betulin content over the layer height and the cross-section of particles) has been shown.

**Keywords:** betulin, extraction, birch bark, engineering procedure, mathematical model

**For citation:** Safina A.V., Ziatdinova D.F., Nazipova L.R., Safin R.G., Valeev K.V. The Engineering Procedure for Calculating the Plant for Betulin Extraction from Birch Bark. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2024, no. 1, pp. 195–207. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-1-195-207>

### *Введение*

В настоящее время бетулин, извлекаемый из бересты березы, нашел применение в различных отраслях промышленности в качестве ценного компонента лекарственных средств и биологически активных добавок, обладающих противовирусными, антиоксидантными и антибактериальными свойствами [3, 4, 15–17, 20]. Стоимость бетулина на рынке варьирует от 30 до 60 тыс. р./кг в зависимости от чистоты продукта. При этом основная доля поставки бетулина приходится на зарубежные страны. Сложившиеся современные экономические и производственные условия диктуют необходимость разработки отечественных экстракционных технологий получения бетулина.

Исследование процесса извлечения бетулина из бересты березы базируется на классических положениях теории диффузионного извлечения из пористых тел [1], а вопросам технологического и аппаратного обеспечения процесса посвящено множество работ. Анатомическое строение, химический состав и основные направления химической переработки коры березы, практические рекомендации и способы интенсификации процесса экстракции бетулина из бересты березы отражены в монографии С.И. Третьякова и др. [13]. Кинетические закономерности диффузионных процессов при экстракции коры березы изучены в работах [2, 18].

Значительное количество исследований посвящено различным способам получения бетулина с использованием растворителей. Так, А.Н. Кислицын с соавторами [9] рассмотрел метод извлечения бетулина с помощью органического растворителя – уайт-спирита. Экстракцию вели в течение 2 ч при температуре 150–155 °С. Далее экстракт обрабатывали щелочью, отфильтровывали, высушивали и дополнительно перекристаллизовывали. Выход бетулина составил 21 %.

Способ получения бетулина из измельченной коры экстракцией метил-трет-бутиловым эфиром представлен в патенте М.С. Юнусова и др. [8]. Процесс экстракции состоял из 3 стадий. На 1-й стадии смесь кипятили в течение 2 ч. На 2-й проводили фильтрацию экстракта от остатков исходного сырья, добавляли новую порцию метил-трет-бутилового эфира и кипятили смесь в течение еще 40 мин. Этот этап повторяли 4 раза. На 3-м этапе экстракт обрабатывали щелочью для удаления натриевых солей кислотных компонентов экстракта, затем промывали водой и сушили безводным раствором сульфата магния. Далее продукт очищали кипячением с добавлением гексана. Нерастворимую в гексане часть отфильтровывали, высушивали на воздухе и получали бетулин с выходом 16 % от сухой массы коры.

В статье Б.Н. Кузнецова и др. [5] описан способ получения бетулина посредством гидролиза коры. Смесь, состоящую из измельченной коры, гидроксида натрия и воды, нагревали при температуре 95–100 °С в течение 3–6 ч при постоянном перемешивании, затем снижали температуру до 70–75 °С и добавляли этиловый спирт. После этого смесь доводили до кипения при перемешивании в течение 30–40 мин. Горячую реакцию массу фильтровали с дальнейшим упариванием фильтрата. На последнем этапе экстракт просушивали при комнатной температуре. Выход экстракта бетулина в результате составил 20–30 % от массы сухой коры.

В статье [14] описан способ получения бетулина в аппарате Сокслета с использованием водного раствора изопропилового спирта в соотношении 9:1. После проведения 3-часовой экстракции экстракт охлаждали. Выпавший осадок отфильтровывали и высушивали на воздухе. Выход бетулина – 13 % от массы сухой коры.

В работе [11] рассмотрен способ извлечения бетулина посредством гидролиза щелочью. Процесс экстракции состоял из 3 этапов. На 1-м этапе происходило измельчение сырья и осуществлялся его гидролиз в водном растворе 15–25%-й щелочи при интенсивном перемешивании. На 2-м этапе проводили осаждение бетулина выпариванием при давлении 110–120 кПа. На 3-м этапе экстракт фильтровали, осадок промывали водой и сушили. Выход бетулина составил 35 % от массы сухой коры.

В патенте [10] описан способ получения бетулина в экстракторе проточного типа при непрерывном противоточном движении бересты и растворителя, не смешивающегося с водой. Процесс экстракции состоял из нескольких этапов. На 1-м проводили экстракцию толуолом. При достижении давления в экстракторе 120–130 кПа сбрасывали давление до атмосферного и отбирали экстракт в выдувной резервуар, в котором осуществлялось испарение растворителя. На 2-м этапе пар конденсировался, конденсат во флорентине разделялся на толуол и воду, которые использовали повторно. На 3-м этапе сгущенный экстракт промывали и высушивали. Заявляемый способ позволял получать бетулин высокой чистоты (до 99 %) с минимальными энергозатратами.

Проведенный анализ существующих исследований показал, что в процессах извлечения бетулина используются различные подходы к подбору экстрагентов. В настоящее время многие работы посвящены организации способов экстрагирования с использованием толуола.

В.И. Рощин с соавторами [6] предложил способ получения бетулина с применением смеси толуола и петролейного эфира. Экстракцию проводили в течение 5 ч. После извлечения горячий экстракт сливали, фильтровали, кристаллизовали и высушивали. Выход экстракта составил от 16 до 25 %.

Ю.И. Стернин разработал способ получения бетулина [7], предусматривающий измельчение коры, разделение ее на бересту и луб и последующую экстракцию бересты толуолом. Измельченную бересту перемешивали с толуолом в течение 1,5–3,0 ч при температуре 90–110 °С. Затем раствор фильтровали при температуре 40–50 °С и охлаждали в течение 6–10 ч до температуры менее 15 °С, но не ниже 5 °С. Выпавшие кристаллы бетулина перемешивали с маточным раствором, фильтровали, промывали чистым толуолом, снова фильтровали и сушили. Выход бетулина составил до 30 % от массы сухой коры.

Представленные способы извлечения бетулина толуолом довольно разнообразны. Однако для принятия технических решений и успешной промышленной реализации экстракционной технологии необходимо создать инженерную методику расчета, которая позволит с допустимой точностью произвести оптимизацию и построение статических и динамических характеристик процесса.

Существующие теоретические основы ресурсосберегающих технологий и результаты проведенных на кафедре переработки древесных материалов Казанского национального исследовательского технологического университета научных работ показали перспективность периодической технологии экстрагирования бетулина из бересты березы с помощью толуола [12, 19]. Цель – предложить инженерную методику расчета данного способа на основе ранее представленных исследований.

#### Объекты и методы исследования

Разработка инженерной методики расчета основывается на теоретических положениях и лабораторных исследованиях с использованием математического описания и последующего моделирования.

Для исследования процесса периодической экстракции бетулина из бересты была создана пилотная установка, принципиальная схема и внешний вид которой представлены на рис. 1.

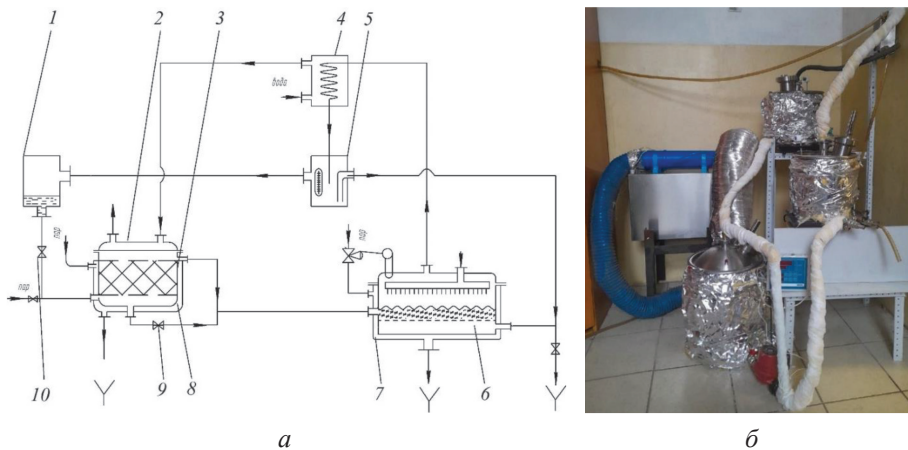


Рис. 1. Принципиальная схема (а) и внешний вид (б) установки для экстракции бетулина: 1 – сборник экстрагента; 2 – охлаждаемая крышка экстрактора; 3 – экстрактор; 4 – конденсатор; 5 – флорентина; 6 – испаритель; 7, 8 – рубашка; 9 – вентиль отвода экстрагента; 10 – вентиль подвода экстрагента

Fig. 1. Schematic diagram (a) and external appearance (b) of the betulin extraction plant: 1 – extractant collector; 2 – cooled extractor cover; 3 – extractor; 4 – condenser; 5 – florentine flask; 6 – evaporator; 7, 8 – jacket; 9 – extractant withdrawal valve; 10 – extractant feed valve

Экстракция бетулина из бересты осуществляется в 2 стадии: при нахождении сырья по отношению к толуолу в состоянии покоя и при экстрагировании сырья непрерывной подачей свежего экстрагента. На 1-й стадии в экстрактор загружают измельченную бересту березы, туда же заливают заданный объем толуола, нагретого в сборнике экстракта до температуры кипения, в заданном

соотношении с берестой. В процессе экстрагирования происходит повышение концентрации бетулина в толуоле, ведущее к снижению скорости экстракции. Поэтому на 2-й стадии процесса из экстрактора непрерывно отводят экстракт бетулина и вводят свежий экстрагент. Для этого в нижнюю часть экстрактора постоянно подают свежий экстрагент с одинаковой скоростью, вытесняя тем самым экстракт с верхней части в испаритель. В испарителе вода кипит, а образующиеся пары проходят через слой экстракта и испаряют экстрагент. Пары экстрагента и воды поступают по трубопроводу в конденсатор и конденсируются. Конденсат стекает во флорентину, в которой происходит сепарация воды и толуола. Тoluол из флорентины перетекает через сборник экстрагента в экстрактор. После завершения экстракции оставшийся в экстракторе экстракт переводят в испаритель, где происходит полное выпаривание толуола.

Удаление экстрагента из проэкстрагированной бересты осуществляют десорбцией водяным паром (на схеме не показано). Таким образом, экстрагент и флорентинная вода циркулируют в замкнутой системе и не попадают в окружающую среду.

Трехкратный отбор частиц бересты по высоте слоя в процессе эксперимента производили через 3 пробоотборника, установленных в верхней части экстрактора. Содержание бетулина в экстракте определяли удалением экстрагента путем вакуумирования.

Задачей инженерной методики расчета процесса экстракции является установление габаритных размеров экстрактора, а именно диаметра и высоты.

При цилиндрическом оформлении экстрактора, приняв его высоту равной:

$$H = 2d, \quad (1)$$

где  $d$  – диаметр экстрактора, м,

получаем соотношение для расчета рабочего объема аппарата:

$$V = \frac{\pi d^3}{2}. \quad (2)$$

С другой стороны, требуемый рабочий объем экстрактора определяется заданной производительностью  $Q$  и продолжительностью экстракции  $\tau$ :

$$V = Q\tau. \quad (3)$$

Из совместного решения уравнений (2) и (3) получаем соотношение для расчета диаметра аппарата:

$$d = \sqrt[3]{\frac{2Q\tau}{\pi}}. \quad (4)$$

Продолжительность процесса экстракции задается формулой

$$\tau = \tau_I + \tau_{II},$$

где  $\tau_I$ ,  $\tau_{II}$  – продолжительность 1-й и 2-й стадий экстракции соответственно, с.

На 1-й стадии экстракция идет в толуоле без его обновления, все частицы находятся в одинаковых условиях, поэтому процесс извлечения бетулина из бересты можно рассматривать на примере одной частицы. Скорость локального изменения содержания бетулина в бересте определяется законом Фика. Бересту в первом приближении можно представить в виде бесконечной пластины, поэтому дифференциальное уравнение массопроводности Фика запишем так:

$$\frac{\partial C_W}{\partial \tau} = a_m \frac{\partial^2 C_W}{\partial x^2}, \quad (5)$$

где  $C_W$  – содержание бетулина в бересте, кг/кг;  $a_m$  – массопроводность бересты, м<sup>2</sup>/с;  $x$  – координата локальной точки в частице бересты, м.

Содержание бетулина в бересте определяется из выражения

$$C_W = \frac{m_6}{m_c}, \quad (6)$$

где  $m_6$  – масса бетулина, кг;  $m_c$  – масса сырья, кг.

Начальное условие для уравнения (5) находим через начальное содержание бетулина в бересте:

$$C_W(x; \tau) \Big|_{\tau=0} = C_W(x; 0) = C_{WH}. \quad (7)$$

Граничное условие для дифференциального уравнения (5) определяется текущим содержанием бетулина в толуоле:

$$C_W(x; \tau) \Big|_{x=0} = C_W(0; \tau) = \frac{1}{K} C_D(\tau), \quad (8)$$

где  $K$  – коэффициент распределения бетулина между берестой и толуолом;  $C_D$  – содержание бетулина в толуоле,

$$C_D = \frac{m_6}{m_t},$$

$m_t$  – масса толуола, кг.

Скорость изменения текущего содержания бетулина в толуоле

$$\frac{\partial C_D}{\partial \tau} = \frac{a_m f}{C_W + M} \frac{\partial C_W}{\partial x} \Big|_{x=0}, \quad (9)$$

где  $f$  – удельная поверхность, м<sup>2</sup>/г;  $M$  – модуль процесса экстракции.

Совместное решение дифференциальных уравнений (5), (9) определяет локальное изменение содержания бетулина на 1-й стадии экстракции при краевых условиях (7), (8) и позволяет установить продолжительность 1-й стадии.

На 2-й стадии процесса из экстрактора непрерывно отводят экстракт бетулина и вводят свежий экстрагент. В этом случае содержание бетулина в толуоле изменяется не только во времени, но и по высоте экстрактора.

Локальное изменение содержания бетулина в экстрагенте на 2-й стадии при применении идеальной модели вытеснения будет описываться дифференциальным уравнением

$$\frac{\partial C_D}{\partial \tau} = W \frac{\partial C_D}{\partial h} + \frac{a_m f}{C_W + M} \frac{\partial C_W}{\partial x} \Big|_{x=0}, \quad (10)$$

где  $W$  – скорость прохождения экстрагента через слой материала, м<sup>2</sup>/с;  $h$  – координата высоты экстрактора, м.

Первый член в правой части уравнения отражает изменение локального содержания бетулина в экстрагенте за счет конвективного переноса экстракта со скоростью, определяемой по формуле

$$W = \frac{4Q_D}{\varepsilon \pi d^2},$$

где  $Q_D$  – расход свежего экстрагента, кг/с;  $\varepsilon$  – порозность слоя.

Второй член уравнения (10) отражает изменение локального содержания бетулина в экстрагенте за счет стока массы бетулина из бересты в экстракт.

Начальное условие определяется концентрацией бетулина в экстрагенте в конце 1-й стадии экстракции  $C_{D_{\text{кон}}}(\tau_1)$ :

$$C_D(h; \tau) \Big|_{\tau=0} = C_D(h; 0) = C_{D_{\text{кон}}}(\tau_1). \quad (11)$$

Граничное условие дифференциального уравнения (10) зависит от содержания бетулина в свежем экстрагенте:

$$C_D(h; \tau)_{h=0} = D(0, \tau) = 0. \quad (12)$$

Текущие продолжительность и координаты высоты экстрактора, на которой рассматривается процесс, связаны соотношением

$$\tau = \frac{h}{W}. \quad (13)$$

Зная продолжительность 2-й стадии процесса экстракции, по (13) можно рассчитать диаметр и высоту экстрактора:

$$H = \tau_{II} W.$$

Подставив (13) в дифференциальное уравнение (5), получим локальные изменения содержания бетулина в бересте по высоте:

$$\frac{\partial C_W}{\partial h} = W a_m \frac{\partial^2 C_W}{\partial x^2}. \quad (14)$$

Из этого уравнения видим, что локальное содержание бетулина в бересте меняется как по сечению, так и по высоте –  $C_W(x; h)$ .

Начальное распределение бетулина в бересте равномерно по всей высоте, а его величина определяется конечным значением после 1-й стадии экстракции:

$$C_W(x; h) = C_W(x; \tau_1). \quad (15)$$

Граничное условие  $C_W(0; h)$  связано с содержанием бетулина в толуоле:

$$C_W(0; h) \Big| = \frac{1}{K} C_D(h; \tau_{II}). \quad (16)$$

Совместное решение уравнений (10), (14) при краевых условиях (11), (12), (15) и (16) определяет динамические кривые бетулина в бересте и экстракте на 2-й стадии экстракции.

Последующая обработка результатов моделирования позволит рекомендовать рациональные режимные параметры процесса экстракции бетулина из бересты березы, а именно гидромодуль и скорость экстрагента, продолжительность отдельных стадий и геометрические размеры экстрактора.

#### *Результаты исследования и их обсуждение*

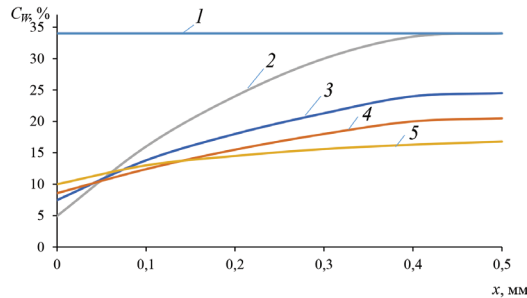
Данные для моделирования: толщина частиц бересты  $S = 1$  мм;  $m_c = 1$  кг; исходное содержание бетулина в бересте – 0,34 кг/кг; исходная масса бетулина – 0,340 кг; температура экстракции – 110 °С;  $M = 2,5$ ; начальная масса толуола – 2,5 кг;  $a_m = 7,8 \cdot 10^{-11}$  м<sup>2</sup>/с;  $K = 0,9$ .



На рис. 2 приведены расчетные кривые распределения бетулина в частице бересты в различные моменты времени. Зависимости получены моделированием процесса с помощью дифференциальных уравнений (5) и (9) при краевых условиях (7) и (8). Анализ кривых показывает, что расчетное содержание бетулина по толщине частицы со временем падает, но на ее поверхности ( $x = 0$ ) возрастает. Это объясняется насыщением толуола бетулином.

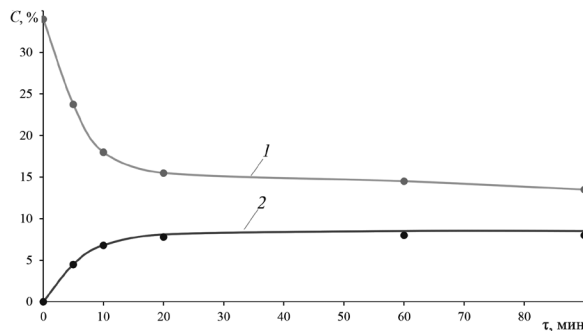
Рис. 2. Распределение бетулина в бересте по сечению частицы при продолжительности экстракции, мин: 1 – 0; 2 – 5; 3 – 10; 4 – 20; 5 – 90

Fig. 2. Distribution of betulin in birch bark over the cross-section of particles, with the extraction duration of, min: 1 – 0; 2 – 5; 3 – 10; 4 – 20; 5 – 90



На рис. 3 приведены расчетные и экспериментальные данные по кинетике среднего содержания бетулина в бересте и толуоле. Для оценки воспроизводимости экспериментальных данных опыты повторялись 3-кратно (на графиках приведены средние арифметические значения). Из анализа кривых рис. 3 видно, что за первые 20 мин из бересты уходит 23 % бетулина, а в течение следующих 70 мин – лишь 2,5 %, что говорит о резком падении скорости процесса экстракции на этом участке. Данный факт объясняется, как видно из рис. 2, уменьшением градиента содержания бетулина по сечению бересты вследствие увеличения его начальной концентрации на поверхности при  $x = 0$ . Поэтому продолжительность 1-й стадии экстракции при гидромодуле  $M = 2,5$  целесообразно ограничить 20 мин.

Рис. 3. Кинетические кривые средних значений: содержания бетулина в бересте (1) и в толуоле (2)  
Fig. 3. Kinetic curves of the average betulin content values in birch bark (1) and in toluene (2)



Средняя скорость процесса экстракции на 1-й стадии определяется так:

$$N_1 = \frac{\Delta C}{\Delta \tau} = \frac{39 - 16}{20} = 1,15 \text{ \%}/\text{мин.}$$

В следующие 20 мин скорость процесса составляет

$$N_1 = \frac{16 - 14,5}{20} = 0,075 \text{ \%}/\text{мин.} \quad (17)$$

На 2-й стадии экстракцию ведут с подачей свежего экстрагента, поэтому концентрация экстракта, в отличие от 1-й стадии, зависит не только от продолжительности, но и от текущей высоты аппарата, на которой идет процесс экстрагирования.

На рис. 4 представлены динамические кривые содержания бетулина в бересте, полученные при подаче свежего экстрагента с расходом 22,5 кг/ч, рассчитанные на текущих высотах:  $h_1 = 0$ ;  $h_2 = 1/2H$ ;  $h_3 = H$ . Анализ кривых рис. 4 показывает, что локальные концентрации бетулина в исходной бересте (после 1-й стадии экстракции) одинаковы на разных высотах экстрактора. С увеличением текущей высоты экстрактора скорость удаления бетулина замедляется. Это связано с повышением локальной концентрации бетулина в толуоле с увеличением высоты.

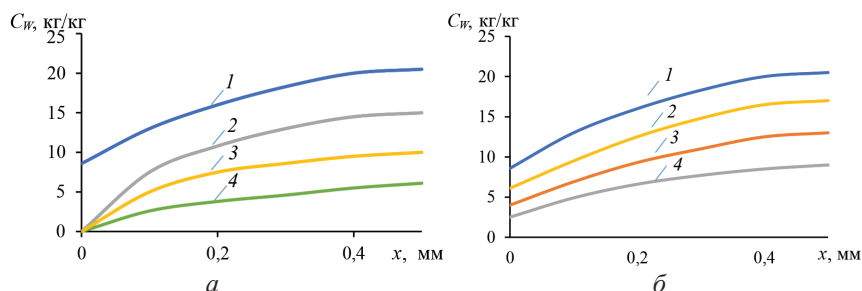
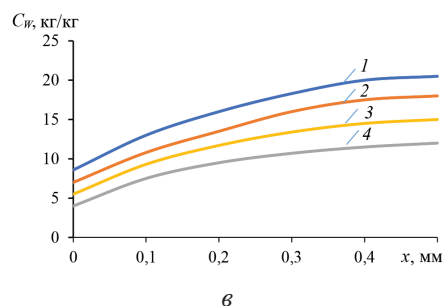


Рис. 4. Динамика локальных значений содержания бетулина в бересте на разных высотах экстрактора:  $a$  – 0 м;  $b$  –  $1/2H$ ;  $в$  –  $H$  (обозначения 1–4 – см. рис. 2)

Fig. 4. Dynamics of the local betulin content values in birch bark at different heights of the extractor:  $a$  – 0 m;  $b$  –  $1/2H$ ;  $в$  –  $H$  (figures 1–4 correspond to figures 1–4 in fig. 2)



На рис. 5 приведены экспериментальные и расчетные данные по изменению среднего содержания бетулина в бересте на разных высотах экстрактора (рис. 5,  $a$ ) и по всему аппарату (рис. 5,  $b$ ) с течением времени. Анализ кривых рис. 5,  $a$  показывает, что расхождение между расчетными и экспериментальными результатами по высоте аппарата возрастает с 15 до 20 %. Экспериментальные данные говорят о более низком содержании бетулина в бересте с увеличением высоты отбора проб. Это объясняется тем, что начальные условия выбраны без учета продолжительности 1-й стадии процесса экстракции, до момента достижения свежим растворителем моделируемой высоты.

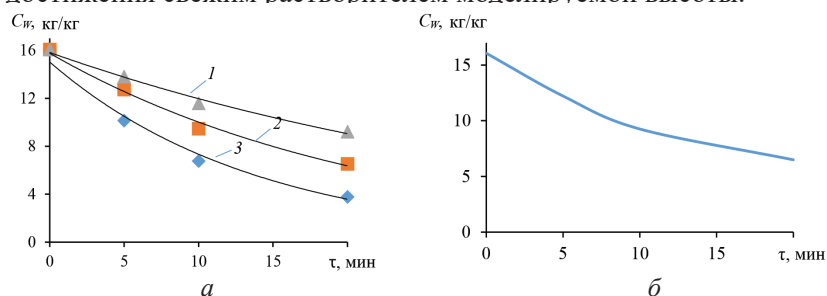


Рис. 5. Зависимость среднего содержания бетулина в бересте от продолжительности процесса экстракции:  $a$  – на высотах экстрактора: 1 – 0 м; 2 –  $1/2H$ ; 3 –  $H$ ;  $b$  – по всему аппарату

Fig. 5. Dependence of the average betulin content in birch bark on the duration of the extraction process:  $a$  – at the heights of: 1 – 0 m; 2 –  $1/2H$ ; 3 –  $H$ ;  $b$  – throughout the device

Общий анализ кривых на рис. 4 и 5 свидетельствует о том, что в конце 2-й стадии экстракции содержание бетулина в бересте разное по сечению частиц и по высоте экстрактора. Поэтому при организации процесса экстракции следует предусмотреть 3-ю стадию – стабилизацию содержания бетулина по высоте и по сечению частиц.

По результатам обработки кинетической зависимости, представленной на рис. 5, б, определена средняя скорость экстракции на 2-й стадии:

$$N_{II} = \frac{\Delta C}{\Delta \tau} = \frac{16 - 6,5}{20} = 0,45\%/\text{мин.} \quad (18)$$

Из данных (17), (18) можно рассчитать увеличение скорости процесса за счет подачи свежего толуола:

$$n = \frac{N_{II}}{N_I} = \frac{0,450}{0,075} = 6.$$

Таким образом, организация процесса в 2 стадии с введением свежего толуола на 2-м этапе увеличивает скорость экстракции в 6 раз и сокращает, тем самым, общее время экстракции при заданных исходных данных. При этом, в соответствии с формулами (1) и (4), появляется возможность сократить габариты экстрактора.

#### Заключение

Приведенная инженерная методика расчета позволяет рекомендовать рациональные технологические параметры экстрагирования бересты толуолом и определить основные конструктивные размеры экстрактора. Анализ результатов моделирования процесса экстракции доказал целесообразность ведения процесса в 2 последовательные стадии: при нахождении сырья по отношению к толуолу в состоянии покоя и при экстрагировании сырья непрерывной подачей свежего экстрагента. Благодаря наличию 2 стадий значительно повышается скорость извлечения бетулина. Однако, как показали исследования, к концу 2-го периода содержание бетулина в бересте и в экстрагенте как по сечению частиц, так и по высоте экстрактора становится неравномерным. Поэтому предлагаем дополнить процесс экстракции 3-й стадией с целью выравнивания содержания бетулина.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Аксельруд Г.А. Теория диффузионного извлечения веществ из пористых тел. Львов: Львов. политехн. ин-т, 1959. 234 с.

Aksel'rud G.A. *The Theory of Diffusion Extraction of Materials from Porous Bodies*. Lviv, Lviv Polytechnic Institute Publ., 1959. 234 p. (In Russ.).

2. Бадогина А.И., Третьяков С.И., Кутакова Н.А., Коптелова Е.Н. Исследование кинетических закономерностей процесса СВЧ-экстракции луба в сравнении с березовой корой // Изв. вузов. Лесн. журн. 2017. № 3. С. 164–175.

Badogina A.I., Tret'yakov S.I., Kutakova N.A., Koptelova E.N. The Comparison of Kinetics of Microwave-Assisted Extraction of Bast and Birch Bark. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2017, no. 3, pp. 164–175. (In Russ.). <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2017.3.164>

3. Ивахнюк Г.К., Скрипник И.Л., Воронин С.В. Исследование возможности применения бетулина для очистки воды от вредных примесей // Вестн. МАНЭБ. 2020. Т. 25, № 1. С. 55–61.

Ivakhnyuk G.K., Skripnik I.L., Voronin S.V. Investigation of the Possibility of Using Betulin for Purification from Water Impurities. *Vestnik IAELPS*, 2020, vol. 25, no. 1, pp. 55–61. (In Russ.).

4. Исаева А.Ю., Гребенщиков А.В. Использование бетулина в технологии пищевых продуктов // Успехи соврем. естествознания. 2012. № 6. 133 с.

Isaeva A.Yu., Grebenshchikov A.V. The Use of Betulin in Food Technology. *Advances in Current Natural Sciences*, 2012, no. 6. 133 p. (In Russ.).

5. Кузнецов Б.Н., Кузнецова С.А., Левданский В.А., Судакова И.Г., Веселова О.Ф. Совершенствование методов выделения, изучение состава и свойств экстрактов березовой коры // Химия в интересах устойчивого развития. 2005. Т. 13, № 3. С. 391–400.

Kuznetsov B.N., Kuznetsova S.A., Levdansky V.A., Sudakova I.G., Veselova O.F. Improvement of Excretion Methods and Studying the Composition and Properties of Birch Bark Extracts. *Chemistry for Sustainable Development*, 2005, vol. 13, no. 3, pp. 391–400. (In Russ.).

6. Патент № 2184120 С1 РФ, МПК С07J 53/00, С07J 63/00. Способ получения бетулина: № 2001103062/04: заявл. 02.02.2001: опубл. 27.06.2002 / В.И. Рошин, Н.Ю. Шабанова, Д.Н. Ведерников.

Roshchin V.I., Shabanova N.Yu., Vedernikov D.N. *The Method of Betulin Extraction*. Patent RF, no. RU 2184120 C1, 2002. (In Russ.).

7. Патент № 2192879 С1 РФ, МПК А61К 36/185, А61К 129/00, В01D 11/04. Способ получения бетулина: № 2002101403/14: заявл. 04.01.2002: опубл. 20.11.2002 / Ю.И. Стернин; заявитель ЗАО «СНС – фарма».

Sternin Yu.I. *The Method of Betulin Extraction*. Patent RF, no. RU 2192879 C1, 2002. (In Russ.).

8. Патент № 2270201 С1 РФ, МПК С07J 53/00, С07J 63/00. Способ получения бетулина: № 2004122278/04: заявл. 19.07.2004: опубл. 20.02.2006 / М.С. Юнусов, Н.Г. Комиссарова, Н.Г. Беленкова; заявитель Ин-т органич. химии Уфим. ИЦ РАН.

Yunusov M.S., Komissarova N.G., Belenkova N.G. *The Method of Betulin Extraction*. Patent RF, no. RU 2270201 C1, 2006. (In Russ.).

9. Патент № 2306318 С2 РФ, МПК С07J 53/00, С07J 63/00, С08Н 5/04. Способ химической переработки бересты: № 2005127381/04: заявл. 31.08.2005: опубл. 20.09.2007 / А.Н. Кислицын, И.Н. Клабукова, А.Н. Трофимов; заявитель ООО «Береста-ЭкоДом».

Kislitsyn A.N., Klabukova I.N., Trofimov A.N. *The Method of Birch Bark Chemical Processing*. Patent RF, no. RU 2306318 C2, 2007. (In Russ.).

10. Патент № 2683634 С1 РФ, МПК С07J 53/00, С07J 63/00, В01D 11/04. Способ получения бетулина: № 2018116921: заявл. 07.05.2018: опубл. 29.03.2019 / А.В. Сафина, Д.Ф. Зиятдинова, Н.Ф. Тимербаев, Д.М. Сайфутдинов, Р.Р. Сафин, Р.Г. Сафин, Г.Р. Арсланова, Д.А. Шайхутдинова, Д.Р. Абдуллина; заявитель ФГБОУ ВО «КНИТУ».

Safina A.V., Ziatzinova D.F., Timerbayev N.F., Sayfutdinov D.M., Safin R.R., Safin R.G., Arslanova G.R., Shaykhutdinova D.S., Abdullina D.R. *The Method of Betulin Extraction*. Patent RF, no. RU 2683634 C1, 2019. (In Russ.).

11. Патент № 2767041 С1 РФ, МПК С07J 53/00, С07J 63/00, В01D 11/04. Способ получения бетулина: № 2021117895: заявл. 21.06.2021: опубл. 16.03.2022 / Р.Г. Сафин, Д.Р. Абдуллина, Д.Ф. Зиятдинова, А.В. Сафина; заявитель ФГБОУ ВО «КНИТУ».

Safin R.G., Abdullina D.R., Ziatdinova D.F., Safina A.V. *The Method of Betulin Extraction*. Patent RF, no. RU 2767041 C1, 2022. (In Russ.).

12. Сафина А.В., Абдуллина Д.Р., Сафин Р.Г., Арсланова Г.Р., Валеев К.В. Энерго- и ресурсосберегающая технология экстрагирования бетулина из отходов бересты березы // Лесн. вестн. 2021. Т. 25, № 4. С. 99–106.

Safina A.V., Abdullina D.R., Safin R.G., Arslanova G.R., Valeev K.V. Energy-Saving Technology for Betulin Extraction from Birch Bark Waste. *Lesnoy Vestnik = Forestry Bulletin*, 2021, vol. 25, no. 4, pp. 99–106. (In Russ.). <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2021-4-99-106>

13. 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: Extraction, Application, Quality Control*: Monograph. Arkhangelsk, NArFU Publ., 2015. 180 p. (In Russ.).

14. Хлебникова Т.Б., Пай З.П., Кузнецов Б.Н., Матцата Ю.В., Кузнецова С.А., Бердникова П.В., Скворцова Г.П. Каталитическое окисление бетулина и диацетата бетулина с использованием экологически благоприятного окислителя // Журн. СФУ. Сер.: Химия. 2008. Т. 1, № 3. С. 277–285.

Khlebnikova T.B., Pai Z.P., Kuznetsov B.N., Matcata Yu.V., Kuznetsova S.A., Berdnikova P.V., Skvortsova G.P. Catalytic Oxidation of Betulin and Betulin Diacetate with Ecology Friendly Reagents. *Zhurnal Sibirskogo Federal'nogo Universiteta. Khimiya = Journal of Siberian Federal University. Chemistry*, 2008, vol. 1, no. 3, pp. 277–285. (In Russ.).

15. Alakurtti S., Mäkelä T., Koskimies S., Yli-Kauhaluoma J. Pharmacological Properties of the Ubiquitous Natural Product Betulin. *European Journal of Pharmaceutical Sciences*, 2006, vol. 29, iss. 1, pp. 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.ejps.2006.04.006>

16. Grymel M., Lalik A., Kazek-Kęsik A., Szewczyk M., Grabiec P., Erfurt K. Design, Synthesis and Preliminary Evaluation of the Cytotoxicity and Antibacterial Activity of Novel Triphenylphosphonium Derivatives of Betulin. *Molecules*, 2022, vol. 27, no. 16, art. no. 5156. <https://doi.org/10.3390/molecules27165156>

17. Hordyjewska A., Ostapiuk A., Horecka A. Betulin and Betulinic Acid in Cancer Research. *Journal of Pre-Clinical and Clinical Research*, 2018, vol. 12, no. 2, pp. 72–75. <https://doi.org/10.26444/jpccr/92743>

18. Makarevich N.A., Tret'yakov S.I., Bogdanovich N.I. Kinetic Model of Mass Transfer at Interfaces with Components of Plant Products. *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*, 2019, vol. 55, pp. 1063–1070. <https://doi.org/10.1134/S2070205119050162>

19. Safina A.V., Valeev K.V., Safin R.G. Mathematical Description of the Process of Extraction of Biologically Active Substances from Larch Wood. *AIP Conference Proceedings*, 2022, vol. 2767, iss. 1. <https://doi.org/10.1063/5.0127439>

20. Scheffler A. The Wound Healing Properties of Betulin from Birch Bark from Bench to Bedside. *Planta Medica*, 2019, vol. 85, iss. 7, pp. 524–527. <https://doi.org/10.1055/a-0850-0224>

**Конфликт интересов:** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов  
**Conflict of interest:** The authors declare that there is no conflict of interest