

Рациональные параметры ультразвуковой экстракции биоактивных веществ из зверобоя

Алексей В. Дранников	¹	drannikov@list.ru	 0000-0002-3060-8688
Яна П. Домбровская	¹	yana_dombrovskaya@inbox.ru	 0000-0003-2363-7648
Анна А. Дерканосова	¹	aa-derk@yandex.ru	 0000-0002-9726-9262
Игорь Е. Шабанов	²	mks36@mail.ru	
Дмитрий С. Китаев	¹	kitaevdm01@mail.ru	
Наталья Л. Клейменова	¹	klesha78@list.ru	 0000-0002-1462-4055

¹ Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия
² ООО «КБ МКС», пр-т Ленинский, 172, г. Воронеж, 394033, Россия

Аннотация. Проведено исследование по определению рациональных параметров ультразвуковой экстракции биологически активных веществ (БАВ) из зверобоя (*Hypericum perforatum* L.). В качестве варьируемых факторов выбраны: температура экстрагента (X_1), гидромодуль (X_2) и время экспозиции (X_3). Для проведения эксперимента применены центральное композиционное ротатбельное униформпланирование и полный факторный эксперимент, включающий 20 опытов. Полученные экспериментальные данные обработаны с использованием математических методов, в результате чего построены нелинейные регрессионные модели второго порядка, описывающие выход сухих веществ (Y_1) и антиоксидантную активность (Y_2). Проведён анализ степени влияния каждого фактора на критерии оценки. Установлено, что наибольшее влияние на оба критерия оказывает температура экстрагента, наименьшее — время экстрагирования. Оптимальные диапазоны варьирования факторов составили: $X_1 = 47\text{--}50,8\text{ }^\circ\text{C}$, $X_2 = 1:19,8\text{--}1:21\text{ г/см}^3$, $X_3 = 14,7\text{--}21,6\text{ мин}$. В этих условиях обеспечивается выход $Y_1 = 49,362\text{--}50,5\text{ г/кг}$ и антиоксидантная активность $Y_2 = 387,89\text{--}410,50\text{ мг/дм}^3$. Разработана конструкция прямоточного экстрактора, позволяющего реализовать непрерывный процесс экстракции с ультразвуковым воздействием. Применение данного оборудования обеспечивает повышение эффективности извлечения БАВ, сокращение времени экстрагирования, снижение расхода экстрагента и сохранение ценных свойств экстракта. Полученные результаты могут быть использованы для масштабирования процесса и внедрения в технологии производства фитопрепаратов и функциональных пищевых продуктов на основе зверобоя.

Ключевые слова: ультразвуковая экстракция, зверобой, биологически активные вещества, оптимизация, математическое моделирование, гидромодуль.

Rational Parameters for Ultrasonic Extraction of Bioactive Compounds from *Hypericum perforatum*

Aleksej V. Drannikov	¹	drannikov@list.ru	 0000-0002-3060-8688
Yana P. Dombrovskaya	¹	yana_dombrovskaya@inbox.ru	 0000-0003-2363-7648
Anna A. Derkanosova	¹	aa-derk@yandex.ru	 0000-0002-9726-9262
Igor' E. Shabanov	²	mks36@mail.ru	
Dmitrij S. Kitaev	¹	kitaevdm01@mail.ru	
Natalya L. Klejmenova	¹	klesha78@list.ru	 0000-0002-1462-4055

¹ Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia
² KB MKS LLC, 172 Leninsky Ave., Voronezh, 394033, Russia

Abstract. A study was conducted to determine the optimal parameters for ultrasonic extraction of biologically active compounds (BAC) from St. John's wort (*Hypericum perforatum* L.). The selected variable factors included extractant temperature (X_1), solid-to-liquid ratio (X_2), and exposure time (X_3). The experimental design was based on a central composite rotatable uniform design and a full factorial experiment with a total of 20 runs. The collected experimental data were processed using mathematical methods, resulting in second-order nonlinear regression models describing the dry matter yield (Y_1) and antioxidant activity (Y_2) of the extracts. An analysis of the regression coefficients revealed that extractant temperature had the strongest influence on both output parameters, while exposure time had the weakest. The optimal parameter ranges were identified as follows: $X_1 = 47\text{--}50.8\text{ }^\circ\text{C}$, $X_2 = 1:19.8\text{--}1:21\text{ g/cm}^3$, $X_3 = 14.7\text{--}21.6\text{ minutes}$. Under these conditions, the yield of dry matter ranged from 49.362 to 50.5 g/kg and antioxidant activity from 387.89 to 410.50 mg/dm³. A direct-flow extractor design was proposed, enabling a continuous extraction process with ultrasonic treatment. The implementation of this equipment improves the efficiency of BAC extraction, reduces extraction time and solvent consumption, and preserves the biological properties of the extract. The results obtained are suitable for scaling up and can be applied in the development of industrial technologies for producing herbal medicinal products and functional food ingredients based on St. John's wort.

Keywords: ultrasonic extraction, hypericum perforatum, bioactive compounds, optimization, mathematical modeling, solid-to-liquid ratio.

Для цитирования

Дранников А.В., Домбровская Я.П., Дерканосова А.А., Шабанов И.Е., Китаев Д.С., Клейменова Н.Л. Рациональные параметры ультразвуковой экстракции биоактивных веществ из зверобоя // Вестник ВГУИТ. 2025. Т. 87. № 2. С. 30–37. doi:10.20914/2310-1202-2025-2-30-37

For citation

Drannikov A.V., Dombrovskaya Y.P., Derkanosova A.A., Shabanov I.E., Kitaev D.S., Kleimenova N.L. Rational Parameters for Ultrasonic Extraction of Bioactive Compounds from *Hypericum perforatum*. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2025. vol. 87. no. 2. pp. 30–37. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2025-2-30-37

Введение

Зверобой (*Hypericum perforatum L.*) – одно из наиболее изученных лекарственных растений, широко применяемое в традиционной и современной медицине благодаря своим антидепрессивным, противовоспалительным, антимикробным и антиоксидантным свойствам [1].

Основными биологически активными веществами зверобоя являются флавоноиды, нафтодиантроны, флороглюцины, дубильные вещества, эфирное масло [2].

Для извлечения этих соединений из растительного сырья используются различные методы экстракции, среди которых ультразвуковая экстракция (УЗЭ) зарекомендовала себя как эффективный и экономически выгодный способ.

Ультразвуковая экстракция основана на явлении кавитации, которое возникает под действием ультразвуковых волн. Кавитационные пузырьки, образующиеся в растворителе, разрушают клеточные стенки растительного материала, что способствует более интенсивному выделению целевых соединений. Преимуществами ультразвуковой экстракции являются сокращение времени экстракции, снижение расхода растворителя и повышение выхода биологически активных веществ [3–6].

Результаты и обсуждение

Для исследования взаимодействия различных факторов, влияющих на процесс экстракции зверобоя с применением ультразвука, применяются математические методы планирования эксперимента [7, 8].

Математическое описание данного процесса получено эмпирически. При этом его математическая модель имеет вид уравнения регрессии, найденного статистическими методами на основе экспериментов. Математическая модель изучаемого процесса представлена в виде полинома второй степени [7, 8]

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i X_i + \sum_{i=1}^n b_{ii} X_i^2 + \sum_{i \leq j}^n b_{ij} X_i X_j,$$

где b_0 – свободный член уравнения, равный средней величине отклика при условии, что рассматриваемые факторы находятся на средних, «нулевых», уровнях; X – масштабированные значения факторов, которые определяют функцию отклика и поддаются варьированию; b_{ij} – коэффициенты двухфакторных взаимодействий, показывающие, насколько изменяется степень влияния одного фактора при изменении величины другого; b_{ii} – коэффициенты квадратичных эффектов, определяющие нелинейность выходного параметра от рассматриваемых факторов; i, j – индексы факторов; n – число факторов в матрице планирования.

Выбираем следующие основные факторы, влияющие на процесс экстракции зверобоя

с применением ультразвука: X_1 – температура экстрагента (воды), °C, X_2 – гидромодуль, X_3 – время экспозиции, мин.

Все эти факторы не коррелируемы между собой. Пределы изменения исследуемых факторов приведены в таблице 1.

Таблица 1.

Пределы изменения входных факторов

Table 1.

Limits of change in input factors

Условия планирования Planning conditions	Код. значение Coded value	Значения факторов в точках плана Values of factors in the points of the plan		
		X_1	X_2	X_3
		$t, ^\circ\text{C}$	$M, \text{г/см}$	$\tau, \text{мин.}$
Основной уровень Basic level	0	60	1:15	15
Интервал варьирования Variation interval	Δ	13	6	7
Верхний уровень Top level	+1	73	1:21	22
Нижний уровень Lower level	-1	47	1:9	8
Верхняя «звездная» точка Top "star" point	+1,681	82	1:25	27
Нижняя «звездная» точка Low "star" point	-1,681	38	1:5	3

Выбор интервалов изменения входных факторов обусловлен технологическими условиями процесса экстракции зверобоя с применением ультразвука, а также технико-экономическими показателями процесса [5, 10–12].

Критериями оценки влияния входных факторов на процесс экстрагирования являются: Y_1 – выход сухих веществ, отнесенный на 1 кг зверобоя, г/кг; Y_2 – антиоксидантная активность извлеченных веществ отнесенная к объему экстрагента, мг/дм³.

Выбор критериев оценки Y обусловлен их наибольшей значимостью для процесса экстракции зверобоя с применением ультразвука. Так, Y_1 определяет количество сухих веществ, которые остаются после удаления воды из экстракта, и позволяет судить о концентрации биологически активных веществ (БАВ) и других полезных соединений, содержащихся в растении, Y_2 определяет биологическую ценность полученного экстракта. Программа исследования была заложена в матрицу планирования эксперимента.

Для исследования применяем центральное композиционное ротатабельное униформпланирование и полный факторный эксперимент ПФЭ 2³. Число опытов в матрице планирования для трех входных параметров равно 20. Порядок опытов рандомизировали посредством таблицы случайных чисел, что исключает влияние неконтролируемых параметров на результаты эксперимента. При их обработке применяем следующие статистические критерии: Кохрена, Стьюдента, Фишера [7, 8]. В результате получаем нелинейные уравнения регрессии, описывающие данный процесс:

$$Y_1 = 51,6 + 3,20 \cdot X_1 + 3,09 \cdot X_2 + 2,6 \cdot X_3 - 0,2655 \cdot X_1 X_2 - 0,2172 \cdot X_1 X_3 - 0,2267 \cdot X_2 X_3 - 1,80 \cdot X_1^2 - 1,06 \cdot X_2^2 - 1,10 \cdot X_3^2 \quad (1)$$

$$Y_2 = 332,64 - 57,69 \cdot X_1 + 11,04 \cdot X_2 - 4,83 \cdot X_3 + 2,18 \cdot X_1 X_2 - 0,9586 \cdot X_1 X_3 + 0,2208 \cdot X_2 X_3 + 15,32 \cdot X_1^2 - 2,92 \cdot X_2^2 - 11,01 \cdot X_3^2 \quad (2)$$

Анализ уравнений регрессии (1) и (2) позволяет выделить факторы, влияющие на рассматриваемый процесс. На критерии оценки наибольшее влияние оказывает температура экстрагента, наименьшее – время экспозиции. Причем знак «плюс» перед коэффициентом при линейных членах указывает на то, что при увеличении входного параметра значение выходного параметра увеличивается.

Степень влияния параметров относительно друг друга в уравнении (1): $b_1: b_2 = 1,036$; $b_1: b_3 = 1,231$; $b_2: b_3 = 1,188$.

Степень влияния параметров относительно друг друга в уравнении (2): $b_1: b_2 = 5,226$; $b_1: b_3 = 11,944$; $b_2: b_3 = 2,286$.

Полученные уравнения нелинейные.

В результате выполнения 20 опытов получена информация о влиянии факторов и построена математическая модель процесса, позволяющая рассчитать выход сухих веществ и антиоксидантную активность извлеченных веществ внутри выбранных интервалов варьирования входных факторов.

На рисунках 1–3 показаны кривые равных значений выходных параметров, которые несут смысл номограмм и представляют практический интерес.

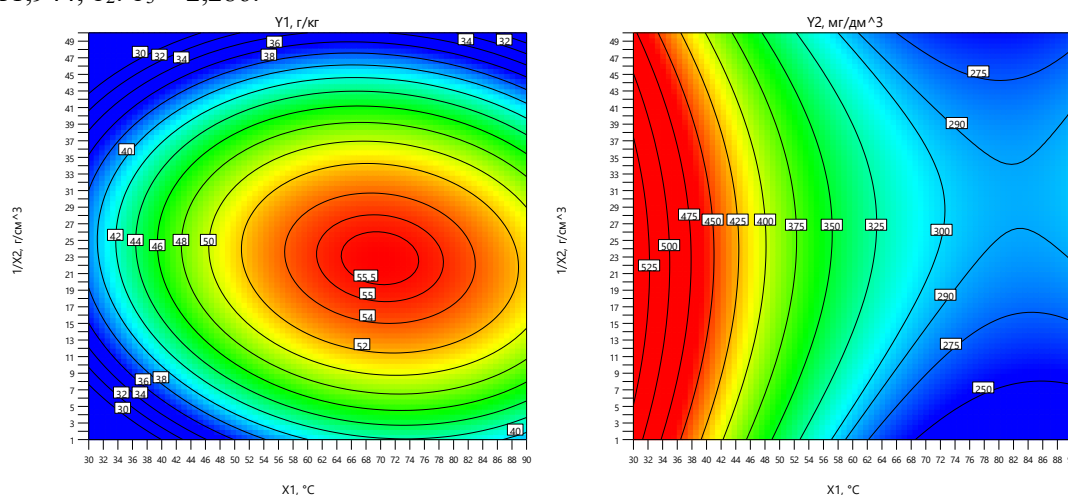


Рисунок 1. Номограмма для определения выхода сухих веществ (г/кг) и антиоксидантной активности (мг/дм³) в зависимости от температуры экстрагента и гидромодуля

Figure 1. Nomogram for determining the output of dry matter (g/kg) and antioxidant activity (mg/dm³) depending on the temperature of the extractant and the hydraulic module

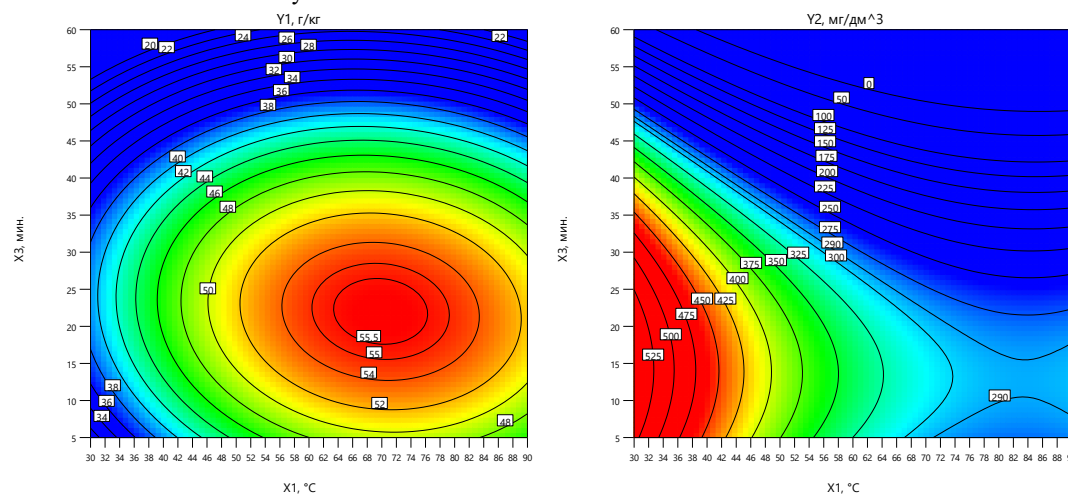


Рисунок 2. Номограмма для определения выхода сухих веществ (г/кг) и антиоксидантной активности (мг/дм³) от температуры экстрагента и времени экспозиции

Figure 2. Nomogram for determining the output of dry matter (g/kg) and antioxidant activity (mg/dm³) depending on the temperature of the extractant and the exposure time

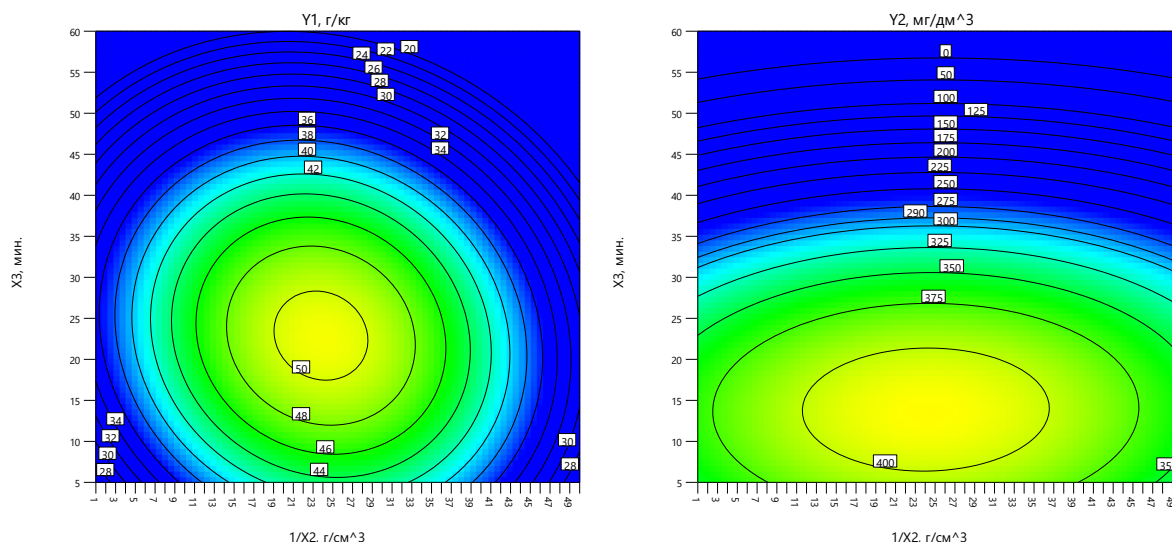


Рисунок 3. Номограмма для определения выхода сухих веществ (г/кг) и антиоксидантной активности (мг/дм³) от гидромодуля и времени экспозиции

Figure 3. Nomogram for determining the output of dry matter (g/kg) and antioxidant activity (mg/dm³) depending on the hydraulic module and the exposure time

Задача оптимизации сформулирована следующим образом: найти такие режимы, которые бы в широком диапазоне изменения входных параметров процесса экстракции доставляли максимальный выход сухих веществ и антиоксидантную активность [8]. На рисунках 4, 5 представлены зависимости выхода сухих веществ и антиоксидантной активности экстракта от входных параметров. Общая математическая

постановка задачи оптимизации представлена в виде следующей модели:

$$q = q(Y_1, Y_2) \xrightarrow{x \in D} \text{opt};$$

$$D: Y_1(X_1, X_2, X_3) \xrightarrow{x \in D} \max$$

$$Y_2(X_1, X_2, X_3) \xrightarrow{x \in D} \max.$$

$$Y_i \geq 0, i = \overline{1, 2}; X_j \leq [-2; 2], j = \overline{1, 3}$$

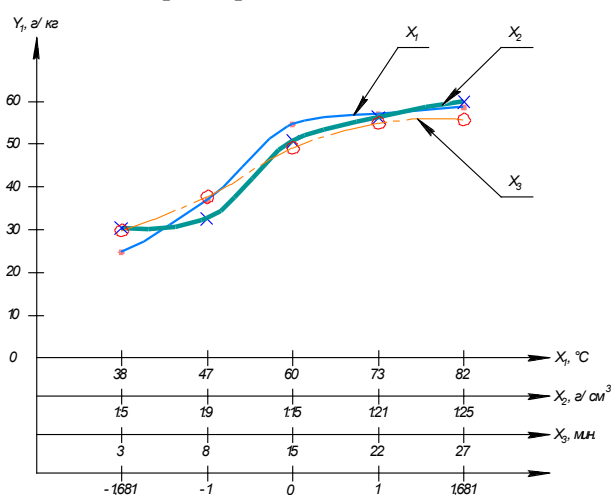


Рисунок 4. Зависимость выхода сухих веществ от входных параметров

Figure 4. Dependence of the dry matter output on the input parameters

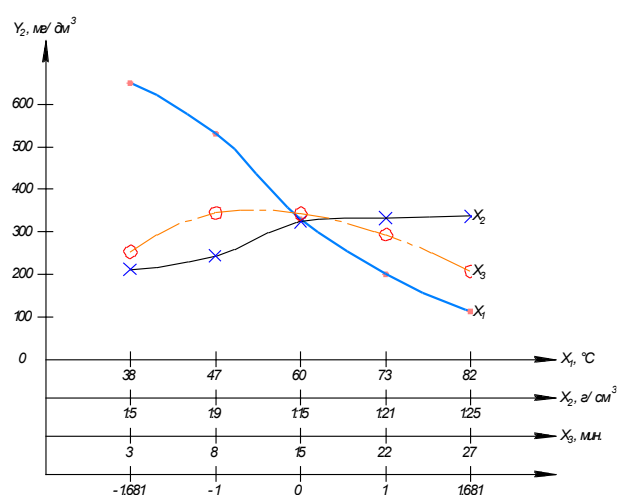


Рисунок 5. Зависимость выхода антиоксидантов от входных параметров

Figure 5. Dependence of antioxidant yield on input parameters

Согласно критерию оптимизации для принятия окончательного решения по выбору оптимальных режимов исследуемого процесса была решена компромиссная задача (таблица 2).

С помощью программы для ЭВМ были найдено 36 возможных решений нахождения оптимальных значений Y_1 и Y_2 . В результате были получены рациональные интервалы изменения параметров (таблица 3).

Таблица 2.
Оптимальные интервалы параметров
Table 2.

Optimal parameter intervals

	Цель Target	Нижний предел Lower limit	Верхний предел Upper limit
$X_1, ^\circ\text{C}$	[-1; 1]	47	73
$X_2, \text{г/см}^3$	[-1; 1]	9	21
$X_3, \text{мин.}$	[-1; 1]	8	22
Y_1	Max	35,924	55,771
Y_2	Max	225,729	464,135

Таблица 3.

Результаты оптимизации

Optimization results

X ₁ , °C	X ₂ , г/см ³	X ₃ , мин.	Y ₁ , г/кг	Y ₂ , мг/дм ³
47–50,8	1:19,8– 1:21	14,7– 21 6	49,362– 50 5	387,89– 410 50

Для получения экстракта зверобоя в промышленности предложен прямоточный экстрактор, который позволяет не только ускорить процесс экстрагирования, но и сохранить биологическую ценность экстракта.

Прямоточный экстрактор (рисунок 6) работает следующим образом. В загрузочный бункер 5 непрерывно подается предварительно измельченный зверобой, который с помощью питателя 6 направляется через загрузочное отверстие 2 в камеру предварительной экстракции 12 горизонтального корпуса 1. Одновременно в камеру 12 поступает экстрагент (горячая вода) через отверстия, расположенные по всей длине

полого шнека 9. Продукт интенсивно перемешивается с экстрагентом с помощью винтовой наливки 10, закрепленной на полом шнеке 9, который в свою очередь приводится во вращение посредством привода 8.

Далее смесь измельченного зверобоя и экстрагента перемещается по длине экстрактора и поступает через прутья 11, выполняющих роль перегородки, в камеру экстракции с ультразвуком 13, где смесь перемешивается лопатками 15, закрепленными на полом вала 14. В эту же камеру дополнительно подается экстрагент (горячая вода) через отверстия, расположенные по всей длине полого вала 14 в камере 13 и одновременно смесь подвергается воздействию ультразвука с помощью источника ультразвука 17 для более эффективного извлечения экстрактивных веществ из зверобоя.

После этого смесь конусным шнеком 16 направляется в зону перфорированного участка 4, где происходит постепенный отжим жидкой фракции (экстракта) через отверстия в полом сборнике 7 по мере продвижения продукта по длине экстрактора. Полученный готовый экстракт выводится из сборника 7 через патрубок 21, а твердая фракция (жом зверобоя) через разгрузочное отверстие 3.

Для поддержания необходимой температуры в рабочей зоне экстрактора и более интенсивного проведения процесса экстракции предусмотрена паровая рубашка 18 в которую через патрубок 19 подается водяной пар, а отвод его конденсата осуществляется через патрубок 20 [13].

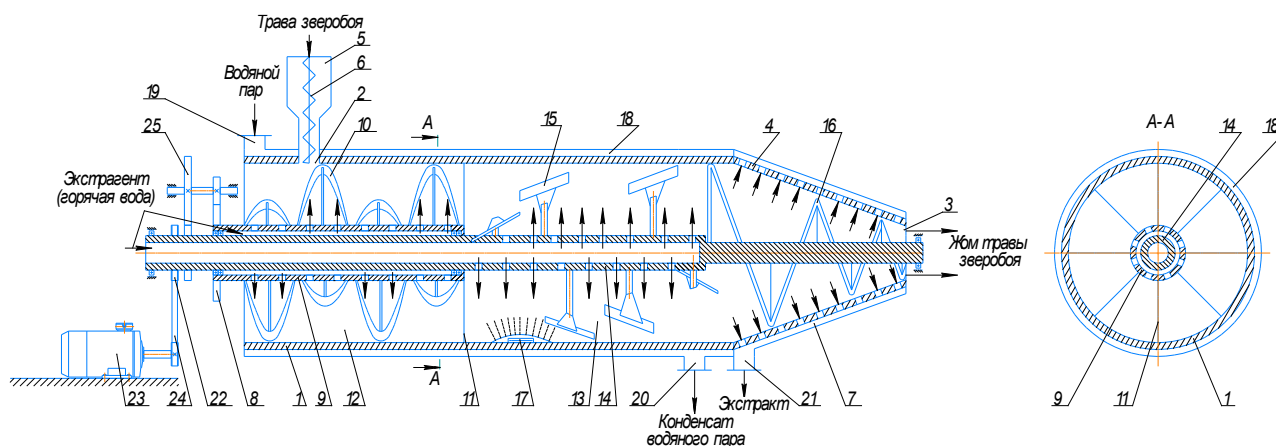


Рисунок 6. Прямоточный экстрактор: 1 – горизонтальный корпус; 2 – загрузочное отверстие; 3 – разгрузочное отверстие; 4 – перфорированный участок; 5 – загрузочный бункер; 6 – питатель; 7 – полый сборник; 8 – привод; 9 – полый шнек; 10 – винтовая навивка; 11 – прутья; 12 – камера предварительной экстракции; 13 – камера экстракции с УЗ; 14 – полый вал; 15 – лопатки; 16 – конусный шнек; 17 – источник УЗ; 18 – паровая рубашка; 19 – патрубок подачи водяного пара; 20 – патрубок отвода конденсата водяного пара; 21 – патрубок отвода экстракта; 22 – привод; 23 – электродвигатель; 25 – клиноременная передача; 25 – зубчатая передача

Figure 6. Direct-flow extractor: 1 – horizontal body; 2 – loading opening; 3 – discharge opening; 4 – perforated section; 5 – loading hopper; 6 – feeder; 7 – hollow collector; 8 – drive; 9 – hollow auger; 10 – helical winding; 11 – bars; 12 – pre-extraction chamber; 13 – extraction chamber with UZ; 14 – hollow shaft; 15 – blades; 16 – cone screw; 17 – ultrasonic source; 18 – steam jacket; 19 – water steam supply pipe; 20 – water steam condensate outlet pipe; 21 – extract outlet pipe; 22 – drive; 23 – electric motor; 25 – V-belt transmission; 25 – gear transmission

Заключение

На основании проведенных экспериментальных и расчетных исследований определены рациональные параметры ультразвуковой экстракции зверобоя (*Hypericum perforatum*), включающие оптимальные значения температуры экстрагента, гидромодуля и времени обработки. Применение этих параметров обеспечивает максимальный выход биологически активных соединений (флавоноидов, нафтодиантронов, фенольных соединений) при минимальных затратах энергии и времени, что повышает эффективность производственного процесса.

Разработанный прямоточный экстрактор с интегрированным ультразвуковым воздействием обеспечивает непрерывную подачу сырья и экстрагента, равномерное распределение акустической энергии по объему смеси и сохранение биологической активности целевых веществ.

Интенсификация процесса экстракции позволяет получить экстракты с высокой концентрацией действующих веществ, что особенно важно для фармацевтического и пищевого применения.

Конструкция экстрактора направлена на улучшение качества экстракционных процессов за счёт повышения скорости извлечения и сокращения расхода растворителя. Ультразвуковая экстракция подтверждает свою эффективность как современный и экологически безопасный метод переработки растительного сырья.

Полученные экстракты зверобоя могут использоваться в производстве лекарственных средств, фиточаев, биологически активных добавок и натуральной косметики.

Результаты исследования могут быть применены для промышленного масштабирования и внедрения в линии по выпуску растительных экстрактов нового поколения.

Литература

- 1 Ковалева Н.Г. Лечение растениями. М.: Медицина, 1971. 352 с.
- 2 Постраш И.Ю. Трава зверобоя продырявленного: химический состав, свойства, применение // Вестник АПК Верхневолжья. 2021. № 1. С. 57–63.
- 3 Елапов А.А., Кузнецов Н.Н., Марахова А.И. Применение ультразвука в экстракции биологически активных соединений из растительного сырья, применяемого или перспективного для применения в медицине // Разработка и регистрация лекарственных средств. 2021. Т. 10. № 4. С. 96–116. doi: 10.33380/2305–2066–2021–10–4–96–116.
- 4 Мусифулина В.М., Омаров М.М. Сравнительная характеристика методов экстрагирования растительного сырья // Вестник Инновационного Евразийского университета. 2021. № 4(84). С. 107–112. doi: 10.37788/2021–4/107–112.
- 5 Родионова Н.С., Мануковская М.В., Коломникова Я.П., Серченя М.В. Исследование антиоксидантной активности настоек из ежевики и клюквы, приготовленных методом ультразвукового экстрагирования // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2015. № 4. С. 98–103.
- 6 Потороко И.Ю., Калинина И.В. Перспективы использования ультразвукового воздействия в технологии экстракционных процессов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Пищевые и биотехнологии. 2014. Т. 2. № 1. С. 42–47.
- 7 Щурин К.В., Волкова Е.К. Планирование и организация эксперимента: учебное пособие. 2-е изд. СПб.: Лань, 2025. 336 с. URL: <https://e.lanbook.com/book/454484> (дата обращения: 26.02.2025).
- 8 Мифтахутдинова Ф.Р. Планирование и организация эксперимента: учебное пособие. Казань: КНИТУ-КАИ, 2020. 256 с. URL: <https://e.lanbook.com/book/193510> (дата обращения: 26.02.2025).
- 9 Curtis M.J., Alexander S.P., Cirino G. et al. Planning experiments: Updated guidance on experimental design and analysis and their reporting III // British Journal of Pharmacology. 2022. Vol. 179. № 15. P. 3907–3913.
- 10 Research of process of extraction of biologically active substances (BAS) from plant raw materials in the conditions of ultrasonic extraction / E.V. Averyanova, V.N. Khmelev, S.N. Tsyganok, V.A. Shakura // 18th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM 2017: Conference Proceedings. Erlagol, Altai: IEEE, 2017. P. 255–259. doi: 10.1109/EDM.2017.7981751.
- 11 Казимова К.Ш., Ахмадуллина Ф.Ю., Акулов А.Н., Щербакова Ю.В., Никитин Е.Н. Скрининг параметров извлечения биологически активных веществ из цветов бархатцев распростертых (*Tagetes patula*) и оценка антиоксидантной активности их водных экстрактов // Химия растительного сырья. 2024. № 3. С. 250–258. doi: 10.14258/jcrpm.20240313383.
- 12 Исследование влияния условий экстракции на извлечение биологически активных веществ с антиоксидантными свойствами / Е.Г. Шубенкова, О.П. Чжу, Ю.Ю. Лобова, И.А. Лутаева // Вестник Новосибирского государственного педагогического университета. 2013. № 5(15). С. 144–148.
- 13 Пат. № 2799347 С1 РФ. МПК В01Д 11/02. Прямоточный экстрактор / А.В. Дранников, А.А. Дерканосова, А.А. Шевцов и др.; заявитель Воронежский государственный университет инженерных технологий. № 2022127060; заявл. 19.10.2022; опубл. 04.07.2023.
- 14 Hao J., Zhang J., Zhang C., Yang R., Wang H. Optimization of ultrasonic-assisted extraction of flavonoids from *Lactuca indica* L. cv. Mengzao and their antioxidant properties // Frontiers in Nutrition. 2023. Vol. 10. Art. 1065662. doi: 10.3389/fnut.2023.1065662.
- 15 Laina K.T., Samaras Y., Tzima K., Argyropoulou A., Tzakos A.G. Optimization of Combined Ultrasound and Microwave-Assisted Extraction for Enhanced Bioactive Compounds Recovery from Four Medicinal Plants: Oregano, Rosemary, *Hypericum*, and Chamomile // Molecules. 2024. Vol. 29, № 23. P. 5773. doi: 10.3390/molecules29235773.

- 16 Günther A., Pitzer C., Esser T. Apolar Extracts of St. John's Wort Alleviate the Effects of β -Amyloid Pathology in a Mouse Model of Alzheimer's Disease // *International Journal of Molecular Sciences*. 2023. Vol. 24, № 1. Art. 829. doi: 10.3390/ijms24010829.
- 17 Oludemi T., Mehmood A., Adiamo O.Q., Ghafoor K. Overview and Toxicity Assessment of Ultrasound-Assisted Extraction of Bioactive Compounds from Plant Materials // *Foods*. 2024. Vol. 13, № 19. Art. 3066. doi: 10.3390/foods13193066.
- 18 Zhang Y., Jin Y., Sun T., Chen Y., Wang S. Recent advances in ultrasound-assisted extraction of natural products // *Food Bioscience*. 2025. Art. 102500. doi: 10.1016/j.fbio.2025.102500.
- 19 Rusanova M., Rusanov K., Alekova M. et al. A Simple High-Throughput Procedure for Microscale Extraction of Bioactive Compounds from the Flowers of Saint John's Wort (*Hypericum perforatum* L.) // *Applied Sciences*. 2025. Vol. 15. № 13. P. 7334.
- 20 Milutinović M., Miladinović M., Gašić U. et al. Recovery of bioactive molecules from *Hypericum perforatum* L. dust using microwave-assisted extraction // *Biomass Conversion and Biorefinery*. 2024. Vol. 14, № 5. P. 7111–7123.

References

- 1 Kovaleva N.G. Treatment with Plants. Moscow: Meditsina, 1971. 352 p. (in Russian)
- 2 Postrash I.Yu. St. John's Wort (*Hypericum perforatum*): Chemical Composition, Properties, and Applications. Bulletin of the Agro-Industrial Complex of the Upper Volga Region. 2021. no. 1. pp. 57–63. (in Russian)
- 3 Elapov A.A., Kuznetsov N.N., Marakhova A.I. Application of ultrasound in the extraction of biologically active compounds from medicinal plant raw materials. *Drug Development & Registration*. 2021. vol. 10. no. 4. pp. 96–116. doi:10.33380/2305-2066-2021-10-4-96-116
- 4 Musifulina V.M., Omarov M.M. Comparative characteristics of plant material extraction methods. Bulletin of the Innovative Eurasian University. 2021. vol. 4. no. 84. pp. 107–112. doi:10.37788/2021-4/107-112
- 5 Rodionova N.S., Manukovskaya M.V., Kolomnikova Ya.P., Serchenya M.V. Study of antioxidant activity of blackberry and cranberry tinctures prepared by ultrasonic extraction. *Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies*. 2015. no. 4. pp. 98–103. (in Russian)
- 6 Potoroko I.Yu., Kalinina I.V. Prospects for the use of ultrasound in extraction technologies. Bulletin of South Ural State University. Series: Food and Biotechnology. 2014. vol. 2. no. 1. pp. 42–47. (in Russian)
- 7 Shchurin K.V., Volkova E.K. Design and Organization of Experiments: A Textbook for Universities. 2nd ed., rev. Saint Petersburg: Lan', 2025. 336 p. ISBN: 978-5-507-50674-3 (in Russian)
- 8 Miftakhutdinova F.R. Planning and Organization of Experiments: A Study Guide. Kazan: KNRTU-KAI, 2020. 256 p. ISBN: 978-5-7579-2474-8 (in Russian)
- 9 Curtis M.J., Alexander S.P., Cirino G. et al. Planning experiments: Updated guidance on experimental design and analysis and their reporting III. *British Journal of Pharmacology*. 2022. vol. 179. no. 15. pp. 3907–3913. doi:10.1111/bph.15868
- 10 Averyanova E.V., Khmelev V.N., Tsyganok S.N., Shakura V.A. Research of process of extraction of biologically active substances (BAS) from plant raw materials in the conditions of ultrasonic extraction. In: 18th Int. Conf. of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM). Erlagol, Altai: IEEE Computer Society, 2017. pp. 255–259. doi:10.1109/EDM.2017.7981751
- 11 Kazimova K.Sh., Akhmadullina F.Yu., Akulov A.N., Shcherbakova Yu.V., Nikitin E.N. Screening of extraction parameters for bioactive compounds from marigold flowers (*Tagetes patula*) and evaluation of antioxidant activity of aqueous extracts. *Chemistry of Plant Raw Material*. 2024. no. 3. pp. 250–258. doi:10.14258/jcprm.20240313383
- 12 Shubenkova E.G., Zhu O.P., Lobova Yu.Yu., Lutaeva I.A. Study of the influence of extraction conditions on the recovery of biologically active substances with antioxidant properties. Bulletin of the Novosibirsk State Pedagogical University. 2013. vol. 5. no. 15. pp. 144–148. (in Russian)
- 13 Drannikov A.V., Derkanosova A.A., Shevtsov A.A. et al. Patent No. RU2799347 C1. Russian Federation. IPC B01D 11/02. Direct-flow extractor. No. 2022127060. Filed 19.10.2022. Published 04.07.2023. Applicant: Voronezh State University of Engineering Technologies. (in Russian)
- 14 Hao J., Zhang J., Zhang C., Yang R., Wang H. Optimization of ultrasonic-assisted extraction of flavonoids from *Lactuca indica* L. cv. Mengzao and their antioxidant properties. *Frontiers in Nutrition*. 2023. vol. 10. Art. 1065662. doi:10.3389/fnut.2023.1065662
- 15 Laina K.T., Samaras Y., Tzima K., Argyropoulou A., Tzakos A.G. Optimization of Combined Ultrasound and Microwave-Assisted Extraction for Enhanced Bioactive Compounds Recovery from Four Medicinal Plants: Oregano, Rosemary, Hypericum, and Chamomile. *Molecules*. 2024. vol. 29. no. 23. p. 5773. doi:10.3390/molecules29235773
- 16 Günther A., Pitzer C., Esser T. Apolar Extracts of St. John's Wort Alleviate the Effects of β -Amyloid Pathology in a Mouse Model of Alzheimer's Disease. *International Journal of Molecular Sciences*. 2023. vol. 24. no. 1. Art. 829. doi:10.3390/ijms24010829
- 17 Oludemi T., Mehmood A., Adiamo O.Q., Ghafoor K. Overview and Toxicity Assessment of Ultrasound-Assisted Extraction of Bioactive Compounds from Plant Materials. *Foods*. 2024. vol. 13. no. 19. Art. 3066. doi:10.3390/foods13193066
- 18 Zhang Y., Jin Y., Sun T., Chen Y., Wang S. Recent advances in ultrasound-assisted extraction of natural products. *Food Bioscience*. 2025. Art. 102500. doi:10.1016/j.fbio.2025.102500
- 19 Rusanova M., Rusanov K., Alekova M. et al. A Simple High-Throughput Procedure for Microscale Extraction of Bioactive Compounds from the Flowers of Saint John's Wort (*Hypericum perforatum* L.). *Applied Sciences*. 2025. vol. 15. no. 13. p. 7334. doi:10.3390/app15137334
- 20 Milutinović M., Miladinović M., Gašić U. et al. Recovery of bioactive molecules from *Hypericum perforatum* L. dust using microwave-assisted extraction. *Biomass Conversion and Biorefinery*. 2024. vol. 14. no. 5. pp. 7111–7123. doi:10.1007/s13399-022-03442-9

Сведения об авторах

Алексей В. Дранников д.т.н., профессор, кафедра машин и аппаратов пищевых производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, drannikov@list.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-3060-8688>

Яна П. Домбровская к.т.н., доцент, кафедра машин и аппаратов пищевых производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, yana_dombrovskaya@inbox.ru

 <https://orcid.org/0000-0003-2363-7648>

Анна А. Дерканосова к.э.н., инженер, кафедра Сервиса и ресторанного бизнеса, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, aa-derk@yandex.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-9726-9262>

Игорь Е. Шабанов к.т.н., директор, ООО «КБ МКС», пр-т Ленинский, 172, г. Воронеж, 394033, Россия, mks36@mail.ru

Дмитрий С. Китаев магистр, кафедра машин и аппаратов пищевых производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, kitaevdm01@mail.ru

Наталья Л. Клейменова к.т.н., доцент, кафедра управление качеством, гостиничного дела и туризма, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, klesha78@list.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-1462-4055>

Вклад авторов

Все авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут ответственность за плагиат

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about authors

Aleksey V. Drannikov Dr. Sci. (Engin.), professor, machines and apparatuses of food production department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, drannikov@list.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-3060-8688>

Yana P. Dombrovskaya Cand. Sci. (Engin.), associate professor, machines and apparatuses of food production department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, yana_dombrovskaya@inbox.ru

 <https://orcid.org/0000-0003-2363-7648>

Anna A. Derkanosova Dr. Sci. (Engin.), professor, Department of Service and Restaurant Business, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, aa-derk@yandex.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-9726-9262>

Igor' E. Shabanov Cand. Sci. (Engin.), director, KB ISS LLC, 172 Leninsky Ave., Voronezh, 394033, Russia, mks36@mail.ru

Dmitrij S. Kitaev master student., machines and apparatuses of food production department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, kitaevdm01@mail.ru

Natalya L. Klejmenova Cand. Sci. (Engin.), associate professor, Department of Quality Management, Hospitality and Tourism, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, klesha78@list.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-1462-4055>

Contribution

All authors are equally involved in the writing of the manuscript and are responsible for plagiarism

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 11/03/2025	После редакции 08/04/2025	Принята в печать 11/04/2025
Received 11/03/2025	Accepted in revised 08/04/2025	Accepted 11/04/2025