

УДК 66.061.34; 577.19

ИЗУЧЕНИЕ КИНЕТИКИ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ЭКСТРАКЦИИ БИОЛОГИЧЕСКИ АКТИВНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ИЗ СЫРЬЯ *THYMUS VULGARIS* L. В ВОДНО-СПИРТОВОЙ СРЕДЕ

Никита Сергеевич Цветов¹, Лидия Николаевна Середа¹,
Анфиса Евгеньевна Палий², Оксана Михайловна Шевчук²

¹Федеральный Исследовательский Центр «Кольский Научный Центр» РАН
184209, Мурманская область, г. Апатиты ул. Ферсмана, д.14

²Никитский ботанический сад – Национальный научный центр РАН
298648, Республика Крым, г. Ялта, пгт. Никита, Никитский спуск, 52
E-mail: l.sereda@ksc.ru, n.tsvetov@ksc.ru, onlabor@yandex.ru,
oksana_shevchuk1970@mail.ru

Изучение кинетики технологического процесса экстракции крайне необходимо в технологии переработки растительного сырья. Основными подходами математического описания получаемых результатов, являются моделирование массопереноса в соответствии со вторым законом Фика с вычислением коэффициентов диффузии и аппроксимация кинетических зависимостей уравнениями кинетики псевдо-реакции второго порядка. Тимьян обыкновенный (*Thymus vulgaris* L.) – многолетний, эфиромасличный полукустарник, произрастающий по всему миру, является перспективным источником флавоноидов и полифенольных кислот, обуславливающих его терапевтические свойства. Целью работы являлось изучение кинетики ультразвуковой экстракции биологически активных соединений в водно-спиртовой среде из надземной массы тимьяна. Экстракты получены методом ультразвуковой экстракции. Общее содержание полифенолов определялось по реакции с реактивом Фолина-Чокалтеу, флавоноидов – по реакции комплексообразования с хлоридом алюминия, содержание хлорогеновой, феруловой и бензойной кислот – методом ВЭЖХ. Экспериментальные данные аппроксимированы уравнением реакции второго порядка. Установлены кинетические параметры процесса извлечения целевых соединений. Результаты исследования могут быть использованы при оптимизации процессов ультразвуковой экстракции фитокомпонентов из сырья представителей рода *Thymus* L. и применены в фармацевтической, косметологической и пищевой промышленности.

Ключевые слова: *Thymus vulgaris* L.; ультразвуковая экстракция; кинетические параметры; флавоноиды; полифенольные кислоты

Введение

В технологии экстракционной переработки растительного сырья важное значение имеет изучение кинетики технологического процесса и знание основных параметров, характеризующих массоперенос в системе «твердое тело – жидкость». Существует несколько подходов к математическому описанию процессов экстракции.

Один подход основан на моделировании массопереноса в соответствии со вторым законом Фика и вычислением коэффициентов диффузии при выходе процесса на стационарный режим [20, 23]. При этом следует учитывать, что процесс экстракции включает быструю и медленную стадии [7]. Быстрая стадия связана с растворением метаболитов растений, находящихся в основном в межклеточном пространстве или в клетках с разрушенными при измельчении стенками, что обеспечивает более полный контакт цитоплазмы с растворителем. Медленная стадия протекает за счет диффузии метаболитов, оставшихся в растительной матрице, и наступает стационарный, или «регулярный», режим, контролирующийся диффузией [18]. Для описания кинетики реакции на основе второго закона Фика, необходимо учитывать некоторые допущения и граничные условия:

- твердые пористые частицы симметричны и имеют шарообразную форму или форму пластин;
- частицы считаются псевдо-гомогенными, а концентрация экстрагируемого вещества внутри частицы зависит только от времени и радиуса (или толщины);
- экстрагируемое вещество одинаково распределено в твердой матрице;
- смесь частиц растительного материала и растворителя считается гомогенной, а концентрация экстрагируемого вещества зависит только от времени;
- массоперенос экстрагируемого вещества осуществляется только лишь за счет диффузии, а коэффициент диффузии не зависит от времени;
- диффузия целевого вещества происходит параллельно с возможной диффузией других веществ, но эти процессы протекают независимо друг от друга;
- отсутствует или пренебрежимо мало препятствие в переносе массы экстрагируемого вещества из пор твердой фазы в объем растворителя, таким образом, концентрация экстрагируемого вещества в растворе внутри поры такая же, как и в объеме растворителя.

Другой подход основан на аппроксимации кинетических зависимостей уравнениями кинетики псевдо-реакции второго порядка, исходя из формы кривой зависимости выхода целевых веществ от времени. В сравнении с другими моделями, например псевдо-реакции первого порядка, уравнения для второго порядка оказываются предпочтительнее [8]. Одними из первых исследований, в которых применялся подобный подход, стали работы [9, 15-17], посвященные извлечению водорастворимых компонентов и алкалоидов, позднее данный кинетический анализ стал активно применяться для процессов экстракции полифенолов [5-6, 10-11, 13, 19, 22].

Среди важных с точки зрения фармакогнозии полифенолов можно отметить полифенольные кислоты и флавоноиды, которые способны поглощать активные формы кислорода, регулировать активность различных ферментов, клеточные циклы, функции ДНК и белков, перекисное окисление липидов, а также обладают доказанной фармацевтической значимостью для человека.

Важным источником указанных соединений являются представители семейства яснотковых (*Lamiaceae* Martinov), в частности, тимьян обыкновенный (*Thymus vulgaris* L.) – многолетний, эфиромасличный полукустарник, произрастающий по всему миру в жарких, засушливых условиях, исследования которого зачастую связаны с определением хемотипов, основанных на преобладании монотерпенов в эфирном масле. Однако, поскольку тимьян обыкновенный содержит в своем составе апигенин, лютеолин, цирсимаритин, генкванин, ксантомикрол, хинную, розмариновую, кофейную, *p*-кумаровую, *p*-гидроксibenзойную, гентизовую, сиринговую, феруловую кислоты, изучение процессов экстракции этих соединений водно-спиртовыми смесями, является актуальной задачей [14, 21].

Таким образом, целью настоящей работы являлось изучение кинетики ультразвуковой экстракции биологически активных соединений в водно-спиртовой среде из надземной массы *Thymus vulgaris* L., культивируемого на Южном берегу Крыма в условиях сухих субтропиков средиземноморского типа в коллекции ароматических и лекарственных растений Никитского ботанического сада.

Материалы и методы

Объектом исследования служило сырье (надземная травянистая масса) тимьяна обыкновенного, собранная во II декаде мая 2024 г. в фазу массового цветения (ВВСН 65) на интродукционно-экспериментальных участках коллекции лаборатории ароматических и лекарственных растений ФГБУН «НБС–ННЦ» РАН, расположенного в зоне сухих субтропиков Южного берега Крыма. Регистрация фенологических фаз

производилась по методике [1] с последующим переводом в международную шкалу BVCH [12].

Подготовка растительного материала включала в себя воздушно-теньевую сушку и хранение в соответствии с [2], измельчение и просеивание через сито с диаметром отверстий 1 мм.

Экстрагирование проводилось методом ультразвуковой экстракции в предварительно термостатированной до 45°C ультразвуковой ванне УЗК 3.557.001 ТУ (Спецмаш, Россия) с частотой 25 кГц и максимальной мощностью 110 Вт в течение 10, 20, 30, 40, 50 и 60 минут с использованием гидромодуля (соотношение массы сухого растительного материала к объёму экстрагента) 1:20 и дальнейшим центрифугированием в течении 10 минут в лабораторной центрифуге IKA mini G (IKA-Werke GmbH & Co, Германия) при 6000 об/мин.

Общее содержание полифенолов (total phenolic content (TPC)) определялось по реакции с реактивом Фолина-Чокалтеу, для этого к 1 мл 0.2 М реактива Фолина-Чокалтеу добавляли 200 мкл экстракта и 800 мкл 5% карбоната натрия, общее содержание флавоноидов (total flavonoid content (TFC)) – по реакции комплексообразования с хлоридом алюминия, для чего к 1 мл 2 % раствора хлорида алюминия добавляли 1 мл экстракта в соответствии с [3]. Полученные смеси термостатировали при 25°C в течение 60 минут. В работе использовались экстракты, разбавленные в 20 раз. Содержание исследуемых компонентов выражали в мг эквивалента галловой кислоты (gallic acid equivalent (GAE)) и рутина (rutin equivalent (RE)) на 1 г сухого растительного материала. Оптическая плотность растворов измерялась на фотоколориметре UNICO-2100 (UNICO, США) при длинах волн 765 и 420 нм.

Определение количественного содержания полифенольных кислот, проводилось методом высокоэффективной жидкостной хроматографии на жидкостном хроматографе «Миличром А-02» (ЭкоНова, Россия) с колонкой ProntoSil-120-5-C18 AQ (Bishoff, Германия) (длина 75 мм, диаметр 2 мм, размер частиц 5 мкм). Градиентное элюирование осуществлялось смесью 0,2М LiClO₄ – 0,05М HClO₄ (А) и ацетонитрила (В): 6 мин 0% В, 6 - 30 мин 0 - 40% В. Скорость потока составляла 100 мкл/мин. Объём пробы экстракта, разбавленного в 5 раз смесью ацетонитрил: вода (1:1) – 2 мкл. Детектирование осуществлялось при длине волны 210 нм. Градуировка производилась с использованием стандартных образцов хлорогеновой, феруловой и бензойной кислот. Градуировочные зависимости были определены в концентрационном диапазоне 6,25 – 100 мкг/мл.

Согласно [9] скорость экстракции биологически активных веществ v записывается как:

$$v = \frac{dY_t}{dt} = k(Y^{eq} - Y_t)^2,$$

где Y_t – выход целевых веществ в момент времени t , Y^{eq} – величина равновесного выхода целевых веществ, k – константа скорости.

Это уравнение после интегрирования и разделения переменных с граничными условиями, что при $t = 0$ $Y_t = 0$, приобретает вид:

$$Y_t = \frac{kt(Y^{eq})^2}{1 + ktY^{eq}}$$

Для нахождения кинетических параметров – Y^{eq} и k – уравнение линеаризуется в координатах $\frac{t}{Y_t}$ от t :

$$\frac{t}{Y_t} = \frac{1}{Y^{eq}} t + \frac{1}{k(Y^{eq})^2}$$

Тогда из наклона прямой, описываемой этим уравнением, можно найти равновесный выход, а из величины сдвига, зная Y^{eq} , – константу скорости.

Начальная скорость процесса экстракции, то есть скорость при $t = 0$, записывается как:

$$v^0 = k(Y^{eq})^2$$

Время выхода процесса на стационарный режим, t_R , контролирующееся диффузией выражается как:

$$t_R = \frac{1}{kY^{eq}}$$

При применении математического аппарата, основанного на втором законе Фика, в общем случае скорость изменения концентрации экстрагируемого вещества во времени описывается уравнением:

$$\frac{\partial Y_t}{\partial t} = \nabla(-D\nabla Y_t),$$

где D – коэффициент диффузии.

Для сферических частиц:

$$\frac{Y_t}{Y^{eq}} = 1 - \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left(-\frac{Dn^2\pi^2 t}{r^2}\right),$$

где r – радиус частицы растительного материала.

Это уравнение может быть линеаризовано в координатах $\ln\left(\frac{Y_t}{Y_{TPC/TFC}^{eq} - Y_t}\right)$ от t ,

тогда, зная радиус частицы, из наклона прямой вычисляется коэффициент диффузии:

$$\ln\left(\frac{Y_t}{Y^{eq} - Y_t}\right) = \frac{D\pi^2}{r^2} t + \ln\left(\frac{\pi^2}{6}\right)$$

Химические анализы проводились в 3-кратной повторности. Расчеты производились в MS Excel 2021 (Microsoft, США).

Результаты и обсуждение

Как видно из сравнения экспериментальных и расчетных данных кинетика процесса экстракции целевых веществ хорошо описывается уравнением псевдо-реакции второго порядка. Некоторые случаи отклонения экспериментальных данных от расчетных, а также относительно большие величины стандартного отклонения могут объясняться неоднородностью растительного сырья. Так, например, в работе [23] указывается, что структура органа растения, а, следовательно, и геометрия частиц растительного материала, влияет на процесс экстракции. Частицы измельченных листьев

имеют геометрию пластин, а измельченных стеблей – цилиндров. В настоящей же работе экстракция проводилась из всей надземной части растений тимьяна, без отделения листьев и цветков от стеблей, что обуславливало смешанную геометрию частиц.

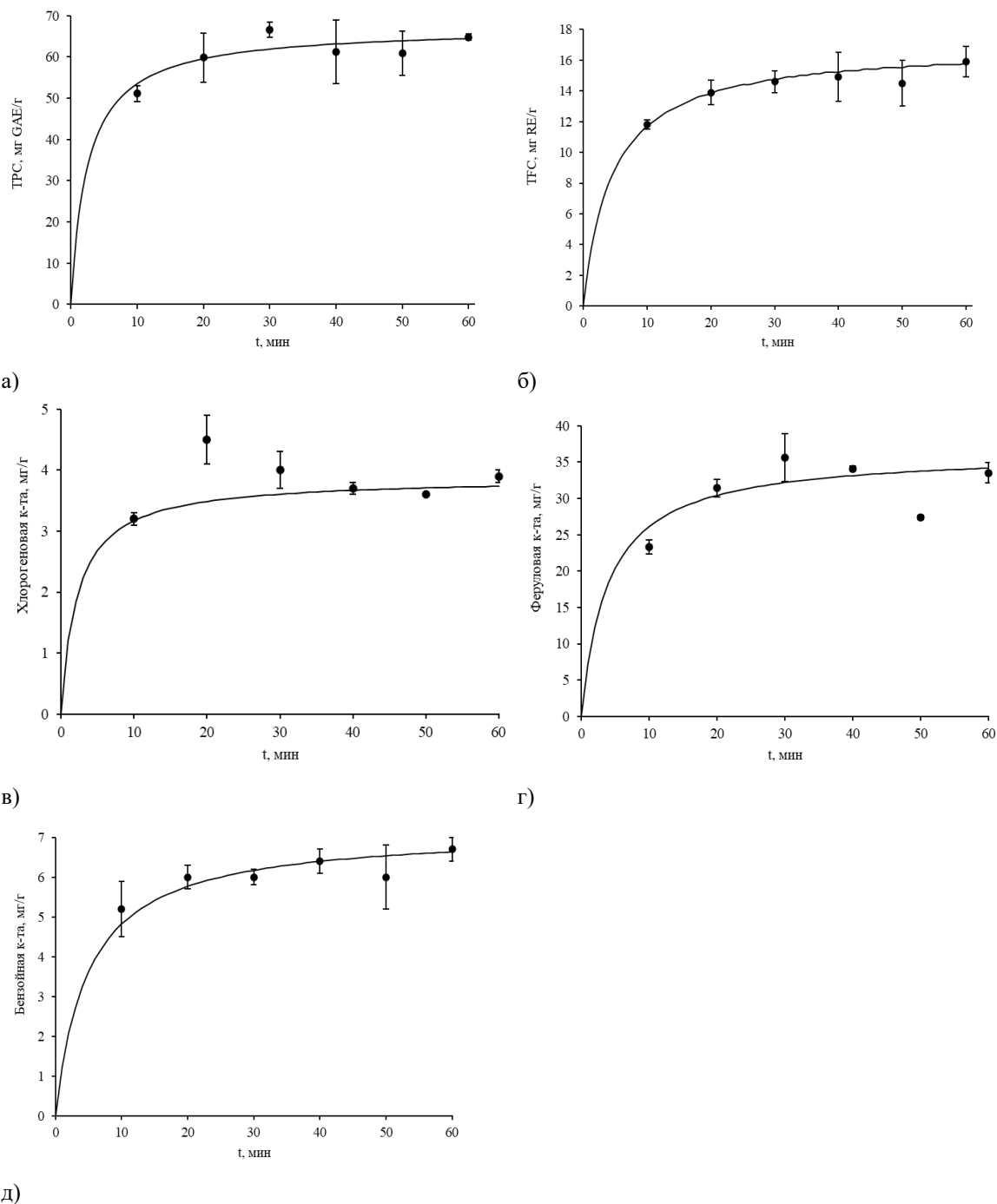


Рис. 1 Экспериментальные данные (•) и результаты аппроксимации кинетическим уравнением псевдо-реакции второго порядка (—) зависимости выхода суммы полифенолов (а), флавоноидов (б), хлорогеновой (в), феруловой (г) и бензойной (д) кислот от продолжительности экстракции

Данные кинетического анализа определяемых веществ приведены в таблице 1. Видно, что константы скорости экстракции сильно варьируют в зависимости от типа целевого вещества. Время выхода на стационарный режим не превышает 5 минут. Коэффициенты диффузии для суммы полифенолов и флавоноидов – близки и составляют около 1×10^{-11} м²/сек, что может быть связано с достаточно большим усреднением параметров процесса для множества извлекаемых метаболитов. Для

хлорогеновой и феруловой кислот коэффициенты диффузии составляют порядка 3×10^{-11} м²/сек. Для бензойной кислоты коэффициент диффузии близок к значению для суммы полифенолов и флавоноидов.

Полученные в настоящей работе коэффициенты диффузии различных метаболитов близки по порядкам к величинам, приведенным в других работах. Так, для кинетики извлечения суммы танинов из листьев табака обыкновенного и коры дуба Фрайнетто водой при перемешивании [20], были получены величины коэффициентов диффузии при предельном разбавлении (или большом времени экстракции) $4,5 \times 10^{-11}$ м²/сек и $8,37 \times 10^{-11}$ м²/сек соответственно.

Таблица 1

Кинетические параметры процесса экстракции целевых веществ
из растительного сырья *Thymus vulgaris* L.

	Y^{eq} , мг/г	k , 1/мин	t_R , мин	$D \times 10^{11}$, м ² /сек
TPC	67,2	5,8	2,6	0,982
TFC	17,0	13,0	4,5	0,978
Хлорогеновая кислота	3,9	117,2	2,2	3,161
Феруловая кислота	36,4	7,0	3,9	3,382
Бензойная кислота	7,2	28,5	4,9	1,066

Известно, что диффузия метаболитов может зависеть от размера частиц растительного материала [7]. Так, в работе [18] представлены результаты моделирования кинетики экстракции протеинов из семян растений томата с использованием щелочных растворов при перемешивании. Экспериментальные данные были описаны с помощью уравнений второго закона Фика и получены значения коэффициентов диффузии для различных размеров частиц растительного материала. Показано, что экстракция из измельченных семян с размером частиц 0,5 – 0,63 мм хорошо описывается выбранной моделью, а коэффициент диффузии составляет $2,92 \times 10^{-11}$ и $3,02 \times 10^{-11}$ м²/сек для отношения массы растительного сырья к объему растворителя 1:100 и 1:50 соответственно. Для более крупных частиц, имеющих диаметр 1,0 – 1,5 мм, экспериментальные данные плохо описываются математическими уравнениями, а полученные коэффициенты диффузии составляют $1,13 \times 10^{-11}$ и $1,21 \times 10^{-11}$ м²/сек соответственно. В тоже время, в работе [23] подробно изучена кинетика экстракции дитерпеновых лактонов из листьев и стеблей андрографиса метельчатого с помощью 0, 60, 70 и 80% водного этанола при нагревании и перемешивании. Показано, что при сравнении пяти диапазонов размера частиц растительного материала: 0.10 – 0.30, 0.30 – 0.45, 0.45 – 0.60 и 0.60 – 0.80 мм, размер частиц практически не влиял на кинетику процесса, а коэффициенты диффузии, полученные для разных комбинаций условий (экстрагент, температура, размер частиц растительного материала) варьировались от $8,43 \times 10^{-14}$ до $52,1 \times 10^{-14}$ м²/сек, что на несколько порядков отличается от величин, полученных другими авторами в подобных работах. Частицы используемого в настоящей работе растительного материала имели размер до 1 мм, что, несмотря на неоднородность растительного материала, позволило получить кинетические параметры, близкие к упоминаемым в литературе.

Что касается констант скорости псевдо-реакции второго порядка, в литературе встречаются различные данные, с которыми, в целом, сопоставимы и величины, полученные в настоящей работе. Так кинетика экстракции водорастворимых веществ из заболони растений липы при нагревании и перемешивании была изучена в работе [9]. Экспериментальные данные описывались кинетическими уравнениями псевдо-реакции второго порядка. Было получено, что в зависимости от температуры, константы скорости варьируются от 1,974 до 6,804 1/мин (с учетом гидромодуля). Эта же группа ученых

позднее сравнила качество аппроксимации экспериментальных данных с помощью различных кинетических уравнений [8]. В работах французских учёных [15-17] подробно изучен процесс экстракции протопина из дымянки лекарственной при нагревании и перемешивании. Моделирование полученных данных осуществлялось, как с помощью уравнений псевдо-реакции второго порядка, так и уравнений второго закона Фика [16]. Константы скорости экстракции достигали 320 1/мин для соотношения массы растительного сырья к массе растворителя 4:100 и температуры 75 °С [17], а коэффициенты диффузии варьировались от $1,7 \times 10^{-11}$ до $4,1 \times 10^{-11}$ м²/сек в зависимости от условий экстракции.

Описание экстракции при перемешивании и нагревании полифенолов из листьев растений оливы, кэроба, жмыха и плодов растений красного винограда, а также растений зверобоя, моринги и разных видов растений полыни с помощью кинетических уравнений псевдо-реакции второго порядка широко применяется в работах греческих ученых [5-6, 10-11, 22]. Например, константы скорости для извлечения полифенолов из жмыха плодов растений красного винограда с помощью растворов уксусной и лимонной кислот, варьируются от 1,53 до 6,98 г/мг×мин [22]. Для водно-глицериновых смесей константы скорости экстракции полифенолов из растений зверобоя трёхграннолистного составляют порядка 0,012 – 0,015 г/мг×мин, а коэффициенты диффузии $1,52 – 1,78 \times 10^{-11}$ м²/сек [11]. Полифенолы из различных видов полыни экстрагируются с константами скорости порядка 0,558 – 1,882 г/мг×мин и коэффициентами диффузии $3,85 – 10,00 \times 10^{-12}$ м²/сек [19]. В случае ультразвуковой экстракции полифенолов из кожуры клубней растений картофеля водно-глицериновыми и водно-этанольными смесями константы скорости достигают 0,053 – 0,259 г/мг × мин, а коэффициенты диффузии $0,33 – 0,46 \times 10^{-11}$ м²/сек [10]. Рассчитанные в настоящей работе численные значения параметров экстракции также согласуются с известными в литературе данными.

Заключение

Была изучена кинетика процесса ультразвуковой экстракции биологически активных веществ из растительного сырья *Thymus vulgaris*. Полученные данные кинетического анализа позволяют заключить, что целевые группы компонентов могут быть извлечены с помощью ультразвуковой экстракции в течение 20 минут. Экспериментальные данные достаточно хорошо согласуются с аппроксимационным уравнением реакции второго порядка. Получены кинетические параметры экстракции: равновесный выход – 67,2; 17,0; 3,9; 36,4; 7,2 мг/г, константы скорости – 5,8; 13,0; 117,2; 7,0; 28,5 1/мин, коэффициенты диффузии – 0,982; 0,978; 3,161; 3,382; 1,066 м²/сек, для общего содержания полифенолов, флавоноидов, хлорогеновой, феруловой, бензойной кислот, соответственно.

Результаты исследования могут быть использованы при оптимизации процессов ультразвуковой экстракции фитокомпонентов из травы представителей рода *Thymus* L. и применены в фармацевтической, косметологической и пищевой промышленности.

Финансирование работы

Работа выполнена в рамках государственного задания НИЦ-НБС РАН № FNNS-2024-0009 и ФИЦ КНЦ РАН № FMEZ-2023-0012.

Список литературы

1. Бейдеман И.Н. Методика фенологических наблюдений при геоботанических исследованиях. – М.-Л.: «Изд-во Акад. наук СССР», 1954. – с. 130

2. Государственная Фармакопея Российской Федерации XIV изд., 2018. – [Электронный ресурс] – URL: http://resource.rucml.ru/feml/pharmacopia/14_2/HTML/517/index.html

3. Серeda Л.Н., Цветов Н.С. Оптимизация метода ультразвуковой экстракции биологически активных соединений водно-спиртовой смесью из плодов *Vaccinium vitis-idaea* L., произрастающей на Кольском полуострове // Химия растительного сырья. – 2024. – №1. – С. 292-300. DOI: 10.14258/jcprm.20240113108

4. Anwar F., Mahrye, Khan R., Qadir R., Saadi S., Gruczynska-Sekowska E., Saari N., Brishti F.H. Exploring the Biochemical and Nutra-Pharmaceutical Prospects of Some *Thymus* Species—A Review // Chemistry & Biodiversity. – 2024. – Vol. 21(7). – P. e202400500. DOI: 10.1002/cbdv.202400500

5. Apostolakis A., Grigorakis S., Makris D.P. Optimisation and comparative kinetics study of polyphenol extraction from olive leaves (*Olea europaea*) using heated water/glycerol mixtures // Separation and Purification Technology. – 2014. – Vol. 128. – P. 89-95. DOI: 10.1016/j.seppur.2014.03.010

6. Cavdarova M., Makris D. P. Extraction kinetics of phenolics from carob (*Ceratonia siliqua* L.) kibbles using environmentally benign solvents // Waste and Biomass Valorization. – 2014. – Vol. 5. – P. 773-779. DOI: 10.1007/s12649-014-9298-3

7. Chan C.H., Yusoff R., Ngoh G C. Modeling and kinetics study of conventional and assisted batch solvent extraction // Chemical engineering research and design. – 2014. – Vol. 92(6). – P. 1169-1186. DOI: 10.1016/j.cherd.2013.10.001

8. Harouna-Oumarou H.A. Fauduet H., Porte C., Ho Y.S. Comparison of kinetic models for the aqueous solid-liquid extraction of *Tilia sapwood* in a continuous stirred tank reactor // Chemical Engineering Communications. – 2007. – Vol. 194(4). – P. 537-552. DOI: 10.1080/00986440600992511

9. Ho Y.S., Harouna-Oumarou H.A., Fauduet H., Porte C. Kinetics and model building of leaching of water-soluble compounds of *Tilia sapwood* // Separation and Purification Technology. – 2005. – Vol. 45 (3). – P. 169-173. DOI: 10.1016/j.seppur.2005.03.007

10. Karageorgou I., Grigorakis S., Lalas S., Makris D.P. Enhanced extraction of antioxidant polyphenols from *Moringa oleifera* Lam. leaves using a biomolecule-based low-transition temperature mixture // European food research and technology. – 2017. – Vol. 243. – P. 1839-1848. DOI: 10.1007/s00217-017-2887-1

11. Karakashov B., Grigorakis S., Loupassaki S., Mourtzinis I., Makris D.P. Optimisation of organic solvent-free polyphenol extraction from *Hypericum triquetrifolium* Turra using Box–Behnken experimental design and kinetics // International Journal of Industrial Chemistry. – 2015. – Vol. 6. – P. 85-92. DOI: 10.1007/s40090-015-0034-z

12. Meier U. Growth stages of mono- and dicotyledonous plants BBCH. – Quedlinburg, 2018. – p. 204. DOI: 10.5073/20180906-074619

13. Paleologou I., Vasiliou A., Grigorakis S., Makris D.P. Optimisation of a green ultrasound-assisted extraction process for potato peel (*Solanum tuberosum*) polyphenols using bio-solvents and response surface methodology // Biomass Conversion and Biorefinery. – 2016. – Vol. 6. – P. 289-299. DOI: 10.1007/s13399-015-0181-7

14. Patil S.M., Ramu R., Shirahatti P.S., Shivamallu C., Amachawadi R.G. A systematic review on ethnopharmacology, phytochemistry and pharmacological aspects of *Thymus vulgaris* Linn // Heliyon. – 2021. – Vol. 7(5). DOI: 10.1016/j.heliyon.2021.

15. Rakotondramasy-Rabesiaka L., Havet J.L., Porte C., Fauduet H. Solid–liquid extraction of protopine from *Fumaria officinalis* L. – analysis determination, kinetic reaction and model building // Separation and Purification Technology. – 2007. – Vol. 54(2). – P. 253-261. DOI: 10.1016/j.seppur.2006.09.015

16. Rakotondramasy-Rabesiaka L., Havet J.L., Porte C., Fauduet H. Solid-liquid extraction of protopine from *Fumaria officinalis* L. – Kinetic modelling of influential parameters // Industrial crops and products. – 2009. – Vol. 29 (2-3). – P. 516-523. DOI:10.1016/j.indcrop.2008.10.001
17. Rakotondramasy-Rabesiaka L., Havet J.L., Porte C., Fauduet H. Estimation of effective diffusion and transfer rate during the protopine extraction process from *Fumaria officinalis* L // Separation and Purification Technology. – 2010. – Vol. 76(2). – P. 126-131. DOI: 10.1016/j.seppur.2010.09.030
18. Seikova I., Simeonov E., Ivanova E. Protein leaching from tomato seed – experimental kinetics and prediction of effective diffusivity // Journal of Food Engineering. – 2004. – Vol. 61(2). – P. 165-171. DOI: 10.1016/S0260-8774(03)00083-9
19. Shehata E., Grigorakis S., Loupassaki S., Makris D.P. Extraction optimisation using water/glycerol for the efficient recovery of polyphenolic antioxidants from two *Artemisia* species // Separation and Purification Technology. – 2015. – Vol. 149. – P. 462-469. DOI: 10.1016/j.seppur.2015.06.017
20. Simeonov E., Tsibranska I., Minchev A. Solid-liquid extraction from plants-experimental kinetics and modelling // Chemical Engineering Journal. – 1999. – Vol. 73(3). – P. 255-259. DOI: 10.1016/S1385-8947(99)00030-3
21. Stahl-Biskup E., Venskutonis R.P. *Thyme* // Handbook of herbs and spices. – 2012. – Vol. 1. – P. 499-525. DOI: 10.1533/9780857095671.499
22. Tzima K., Kallithraka S., Kotseridis Y., Makris D.P. Kinetic modelling for flavanol extraction from red grape (*Vitis vinifera* L.) pomace using aqueous organic acid solutions // International Food Research Journal. – 2014. – Vol. 21 (5). – P. 1919-1924
23. Wongkittipong R., Prat L., Damronglerd S., Gourdon C. Solid-liquid extraction of andrographolide from plants – experimental study, kinetic reaction and model // Separation and Purification Technology. – 2004. – Vol. 40(2). – P. 147-154. DOI: 10.1016/j.seppur.2004.02.002

Статья поступила в редакцию 10.10.2024 г.

Tsvetov N.S., Sereda L.N., Paliy A.E., Shevchuk O.M. Study the kinetics of ultrasonic extraction of biologically active compounds from raw materials of *Thymus vulgaris* L. in an aqueous-alcoholic environment // Bull. of the State Nikita Botan. Gard. – 2024. – № – P.88-96

The study of the kinetics of the extraction process is extremely necessary in the technology of processing plant raw materials. The main approaches to the mathematical description of the results obtained are the modeling of mass transfer in accordance with Fick's second law with the calculation of diffusion coefficients and the approximation of kinetic dependencies by equations of the kinetics of a pseudo-reaction of the second order. Thyme (*Thymus vulgaris* L.) is a perennial, essential oil semi-shrub growing all over the world, is a promising source of flavonoids and polyphenolic acids, which determine its therapeutic properties. The aim of the work was to study the kinetics of ultrasonic extraction of biologically active compounds in an aqueous alcohol medium from the herb *Thymus vulgaris* L. Extracts were obtained by ultrasonic extraction. The total content of polyphenols was determined by reaction with Folin-Ciocalteu reagent, flavonoids by complexation reaction with aluminum chloride, the content of chlorogenic, ferulic and benzoic acids by HPLC method. The experimental data are approximated by a second-order reaction equation. The kinetic parameters of the extraction process of the target compounds have been established. The results of the study can be used to optimize the processes of ultrasonic extraction of phytochemicals from herbs of the genus *Thymus* L. and are used in the pharmaceutical, cosmetology and food industries.

Key words: *Thymus vulgaris* L., ultrasound-assisted extraction, kinetic parameters, flavonoids, polyphenolic acids, dry subtropics