

Исследование технологических методов экстракции инулина из корней обыкновенного цикория (*Cichorium intybus* L.)

Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А.Тимирязева, г. Москва, Российская Федерация

А. Х.-Х. Нугманов, И. А. Бакин, А. С. Мустафина, П. Н. Шаповалова

КОРРЕСПОНДЕНЦИЯ:

Игорь Алексеевич Бакин
E-mail: bakin@rgau-msha.ru

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Нугманов, А. Х.-Х., Бакин, И. А., Мустафина, А. С., & Шаповалова, П. Н. (2024). Исследование технологических методов экстракции инулина из корней обыкновенного цикория (*Cichorium intybus* L.). *Хранение и переработка сельхозсырья*, 32(4), 33-44. <https://doi.org/10.36107/spfr.2024.4.597>

ПОСТУПИЛА: 17.02.2024

ДОРАБОТАНА: 22.11.2024

ПРИНЯТА: 16.12.2024

ОПУБЛИКОВАНА: 27.12.2024

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

автор сообщает об отсутствии конфликта интересов.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при финансовой поддержке РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева по гранту «Разработка технологических приемов и сверхкритических методов получения растительных экстрактов сельскохозяйственного сырья» по Программе «Приоритет-2030» (соглашение № 075-15-2023-220 от 16 февраля 2023 года).



АННОТАЦИЯ

Введение: Корни цикория (*Cichorium intybus* L.) являются ценным источником биоактивных компонентов, таких как инулин, которые широко используются в производстве обогащенных продуктов питания. Однако традиционные методы водной экстракции, основанные на настаивании, характеризуются длительным временем обработки и низкой эффективностью. Выбор оптимальных параметров экстракции представляет собой сложную задачу, которую можно эффективно решить с помощью методов математического моделирования.

Цель: Целью исследования было изучение и оптимизация технологических параметров экстракции компонентов из корней обыкновенного цикория (*Cichorium intybus* L.) с использованием микроволновой обработки.

Материалы и методы: Объектом исследования были корни цикория сорта Ярославский 1 (*Cichorium intybus* L. var. *sativum* DC.). Для характеристики использовались стандартные аналитические методы. Определение нестационарных концентрационных полей в растительном сырье проводилось путем решения модифицированного уравнения Лысанова В.М. с использованием численных методов.

Результаты: В ходе исследования установлено, что при традиционном настаивании концентрация целевых веществ в экстракте достигала $5,92 \pm 0,01$ % через 185 минут. При дополнительном микроволновом воздействии мощностью 180 Вт сопоставимые значения концентрации были достигнуты за 7 минут. Расчет параметров модели массообмена показал увеличение коэффициента молекулярной диффузии до $5,535 \times 10^{-11}$ м²/с, что привело к 25-кратному ускорению диффузии целевых компонентов.

Заключение: Применение микроволновой обработки значительно повышает эффективность экстракции биоактивных соединений из корней цикория, существенно сокращая время обработки. Адаптированная модель массообмена и её графические решения предоставляют надежную основу для определения оптимальных параметров процесса экстракции.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

корни цикория; *Cichorium intybus* L.; инулин; микроволновая экстракция; модель массообмена; коэффициент молекулярной диффузии; биоактивные соединения; оптимизация экстракции; обогащенные продукты питания

Research on Technological Methods for Extracting Inulin from Common Chicory Roots (*Cichorium Intybus L.*)

Russian State Agrarian University –
Moscow Timiryazev Agricultural
Academy, Moscow, Russian Federation

Albert Kh.-Kh. Nugmanov, Igor A. Bakin, Anna S. Mustafina,
Polina N. Shapovalova

CORRESPONDENCE:

Igor A. Bakin,

E-mail: bakin@rgau-msha.ru

FOR CITATIONS:

Nugmanov, A.Kh.-Kh., Bakin, I.A.,
Mustafina, A.S., Shapovalova, P.N. (2024).
Research on technological methods
for extracting inulin from common
chicory roots (*Cichorium Intybus L.*).
Storage and Processing of Farm Products,
32(4), 33-44. [https://doi.org/10.36107/
spfp.2024.4.597](https://doi.org/10.36107/spfp.2024.4.597)

RECEIVED: 17.02.2024

REVISED: 22.11.2024

ACCEPTED: 16.11.2024

PUBLISHED: 27.12.2024

DECLARATION OF COMPETING

INTEREST: none declared.

ACKNOWLEDGEMENTS

The research was funded by Russian
State Agrarian University - Moscow
Timiryazev Agricultural Academy under
the grant "Development of technological
methods and supercritical methods of
obtaining plant extracts of agricultural
raw materials" within the framework of
the «Priority 2030» Program (Agreement
No. 075-15-2023-220
February 16, 2023).

ABSTRACT

Introduction: Chicory roots (*Cichorium intybus L.*) are a valuable source of bioactive components, such as inulin, which are widely utilized in the production of enriched food products. However, traditional water extraction methods based on infusion are characterized by lengthy processing times and low efficiency. The selection of optimal extraction parameters represents a complex problem that can be effectively addressed using mathematical modeling techniques.

Purpose: To investigate and optimize the technological parameters of component extraction from common chicory roots (*Cichorium intybus L.*) using microwave-assisted treatment.

Materials and Methods: The research utilized chicory roots of the Yaroslavsky 1 variety (*Cichorium intybus L. var. sativum DC.*). Standard analytical methods were employed for characterization. The determination of non-stationary concentration fields in plant raw materials was performed by solving the modified Lysanov V.M. equation using numerical approaches.

Results: The findings revealed that during traditional infusion, the concentration of target compounds in the extract reached $5.92 \pm 0.01\%$ after 185 minutes. In contrast, the application of microwave irradiation at 180 W enabled the achievement of comparable concentrations within just 7 minutes. Parameter estimation for the mass transfer model indicated that the molecular diffusion coefficient increased to $5.535 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$, resulting in a 25-fold acceleration of diffusion processes for the target components.

Conclusion: Microwave-assisted extraction significantly enhances the efficiency of bioactive compound recovery from chicory roots, drastically reducing processing time. The adapted mass transfer model and its graphical solutions provide a robust framework for determining the optimal parameters for the extraction process.

KEYWORDS

chicory roots; *Cichorium intybus L.*; inulin; microwave-assisted extraction; mass transfer model; molecular diffusion coefficient; bioactive compounds; extraction optimization; enriched food products



ВВЕДЕНИЕ

Учитывая стремление к потреблению натуральных продуктов, перспективной задачей является производство пищевых биологически активных соединений пребиотической направленности в виде инулиновых экстрактов из растительного сырья, а также их использование в технологии обогащенной продукции (Ozcan et al., 2024). В ряде исследований описаны полифруктозаны, представляющие собой смесь коротких цепочек глюкозы и фруктозы, которые извлекаются в основном из корней цикория или топинамбура (Кайшев и соавт., 2018; Титова и соавт., 2016; Гулюк и соавт., 2017). Основную долю рынка производителей инулин-содержащих биологически активных препаратов занимают страны, лидирующие в производстве данного биополимера, такие как Бельгия, Нидерланды, Голландия, Франция, США. В больших объемах инулиновые экстракты производятся и реализуются в Китайской Народной Республике, где выработка инулина увеличивается и достигает более 100 тыс. тонн в год (Кайшев и соавт., 2018; Гулюк и соавт., 2014). В России инулин в промышленных масштабах не производится, поставляется в основном в виде импортируемого сырья (Кайшев и соавт., 2018). Таким образом актуальна задача разработки технологии получения инулина с использованием отечественной сырьевой базы и технологий.

Важной технологической операцией извлечения инулина является экстрагирование комплекса полисахаридов из измельченного сырья. Интенсивность выхода веществ определяется кинетическими особенностями диффузионного процесса (Гулюк и соавт., 2014; Бакин и соавт., 2014; Redondo-Cuenca et al., 2021), а также зависит от ряда факторов (температура, величина гидромодуля, продолжительность процесса, степень измельчения сырья и др.) (Гулюк и соавт., 2014). Оптимизация этих параметров проведена в большинстве случаев для традиционных способов экстракции (Ankan et al., 2023).

На практике извлечение полисахаридов производится водой в качестве экстрагента. Известным способом ускорения экстракции становится механическое перемешивание или встряхивание при одновременном нагревании, в большинстве случаев до 80 °C (Toneli et al., 2008). Lingyun et al. (2007) показали, что при температуре от 65 °C до 76 °C наибольший выход веществ происходит

за 20 минут. На практике установлено, что при повышении температуры до кипения, время извлечения сокращается до 10...15 минут (Laurenzo et al., 1999). Однако следует учесть, что при увеличении температуры ухудшается эффективность последующей стадии осаждения инулина (Saengthongpinit et al., 2005). Повышение температуры процесса приводит к снижению содержания инулина при непрерывной переработке. При низкой скорости экстрагирования и высокой температуре (до 140 °C) в шнековом экстракционном аппарате происходят значительные сдвиговые напряжения, воздействие на клетки растительного сырья приводит к деградации инулина (Ankan et al., 2023).

Ускорение перехода целевых компонентов достигается рядом воздействий как на сырье, так и на экстрагент. Известно несколько способов интенсификации экстракции за счет механических колебаний, вибрационных, ультразвуковых, импульсных, дискретно-импульсных и др. эффектов (Бакин и соавт., 2014; Milic et al., 2022). Однако, применение новых методов воздействия, таких как СВЧ, ограничено в большинстве случаев лабораторными или полупромышленными установками (Kardelen et al., 2023; Demirci et al., 2023). Перспективным становится изучение и использование в технологии экстракции новых физических эффектов подготовки растительного сырья, в частности сверхвысокочастотного излучения.

Выбор потенциально наиболее эффективного метода экстракции для определенных биологически активных соединений является сложной задачей (Ozcan et al., 2024). Актуальной задачей становится разработка новых экологически чистых передовых технологий извлечения биоактивных соединений для их последующего безопасного использования, снижения воздействия на окружающую среду и максимального повышения эффективности экстракции. Эти «зеленые» технологии должны быть направлены на увеличение выхода веществ, при сокращении времени работы оборудования (Chemat et al., 2017).

Новым методом воздействия на сырье считается экстракция с помощью СВЧ-облучения, имеющая потенциал для применения в перерабатывающей промышленности (Титова и соавт., 2016; Petkova et al., 2018; Milić et al., 2022). При использовании СВЧ-воздействия экстрагирование водой при вы-

сокой температуре и под давлением парциальных паров в растительной массе обеспечивается в большей степени извлечение и автогидролиз полисахаридов, исключая использования химических веществ (Tsubaki et al., 2017; Zhang et al., 2022). Однако, малоизученным остается механизм внутренней диффузии в межклеточном пространстве, а также представляет практический интерес поиск новых технологических приемов экстрагирования, дающих больший выход и экстрактивность применительно к конкретным группам компонентов растительного сырья.

Цель текущего исследования: анализ и оптимизация технологических параметров извлечения экстрактивных компонентов из корней цикория обыкновенного (*Cichorium intybus L.*) при СВЧ — обработке.

Исследовательские вопросы:

- (1) Определить характеристики сырья и технологические параметры обработки, влияющие на процесс экстрагирования;

- (2) Сформулировать задачу массопереноса и диффузии полифруктозанов из корней цикория при СВЧ-воздействии для решения дифференциальных уравнений Лысянского В.М.;
- (3) Описать решение модели массопереноса численными методами и найти рациональные режимы извлечения экстрактивных веществ корней цикория.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Материалы

В качестве объекта растительного источника полифруктозанов изучен раннеспелый корневой цикорий обыкновенный (*Cichorium intybus L.*), сорта Ярославский 1 (*var. sativum DC.*), урожая 2023 года, выращенный на полях селекционного центра и экспериментальной базе ВНИИО-филиала ФГБНУ ФНЦО, Московской области. Сорт, согласно данным Государственного реестра селекционных достижений, выведен в 2022 году, его внешний вид представлен на Рисунке 1.

Рисунок 1

Раннеспелый корневой цикорий Ярославский 1 (*Cichorium intybus L. var. sativum DC.*)

Figure 1

Early-Ripening Root Chicory Yaroslavsky 1 (*Cichorium intybus L. var. sativum DC.*)



Образцы корнеплодов перед переработкой в течение четырех месяцев хранились в условиях овощехранилища ВНИИО — филиала ФГБНУ ФНЦО. Параметры хранения: температурный режим $2...3 \pm 0,1^\circ\text{C}$ и относительная влажность воздуха $75...80 \pm 1\%$. Корнеплоды размещались в пластмассовых ящиках с полиэтиленовыми вкладышами. Содержание в сырье сухих веществ и инулина, соответственно $21,6 \pm 0,1\%$ и $18 \pm 0,1\%$ ¹.

Методы

Извлечение целевых компонентов (полифруктозанов) корней цикория обыкновенного (*Cichorium intybus L.*) реализовано традиционным методом мацерации, с периодическим встряхиванием суспензии один раз в 10 минут, при контролируемых параметрах температуры ($60 \pm 0,1^\circ\text{C}$), для соотношения сырье/экстрагент 1 к 3, до достижения равновесия в системе «твердое тело-экстрагент». Сравнимый метод интенсификации процесса экстрагирования реализован при дополнительном СВЧ воздействии от единичного облучателя (магнетрона) мощностью 180 Вт, при размещении облучаемого резервуара объемом 1 л в камере и при постоянном перемешивании.

В исследовании применялись стандартные и оригинальные методы: влажность измельченного растительного сырья по ГОСТ 28561–90 «Продукты переработки плодов и овощей. Методы определения сухих веществ или влаги», с использованием прибора МХ-50 («А&D Co., LTD», (Япония); сухие вещества в жидких извлечениях по ГОСТ ISO 2173–2013 «Продукты переработки фруктов и овощей. Рефрактометрический метод определения растворимых сухих веществ»; геометрических параметров измельченного растительного сырья с помощью цифрового микрометра Мегеон-80800 (при погрешности измерений 0,01 мм); плотность экстрактов по ГОСТ 29030–91 «Продукты переработки плодов и овощей. Пикнометрический метод определения относительной плотности и содержания растворимых сухих веществ»; физическая плотность растительного сырья находилась расчетным путем по правилу аддитивности, с учетом данных

химического состава сырья и плотностей составляющих компонентов.

В работе использован модифицированный метод определения концентрации полифруктозанов в рафинате (Sarkar et al., 2021), основанный на составлении и решении уравнений материальных балансов процесса экстракции, исходя из известных данных по содержанию активных компонентов в сырье. При этом данные по начальному количеству переносимых в экстракт веществ взяты из ранее проведенных авторами исследований и известных литературных данных о химическом составе рассматриваемого сырья.

Методика расчета нестационарных полей концентраций растительного сырья основана на решении известного дифференциального уравнения Лысянского В.М. переноса массы (Xiao yang et al., 2023; Jiang et al., 2023). Адаптация уравнений массопереноса и диффузии проведена к изучаемым объектам экстрагирования, с формулированием условий однозначности и технологических ограничений. Численное решение моделей массопереноса основывалось на аппроксимации производных функций разностными отношениями.

Процедура исследования

Изучение кинетических закономерностей экстрагирования проводилось при сравнении известного метода мацерации и при дополнительном СВЧ облучении. Предварительно сырье (корневой цикорий) измельчалось терочной машиной до размера стружки $0,27 \pm 0,001$ мм. Значение гидромодуля принято 1 к 3, при контролируемой температуре. В ходе опытов определялся химический состав для пяти партий сырья, после чего рассчитывались усредненные значения для сырья заданной влажности. Расчет нестационарных полей концентраций проводился с использованием дифференциальных уравнений массопереноса, при допущении, что задача является одномерной, а форма частиц приближена к тонкой пластине. В расчетах изменение значений концентрации извлекаемого компонента выражалось через объемную концентрацию

¹ Государственный реестр селекционных достижений, допущенных к использованию. Том 1. Сорта растений. <https://gossortrf.ru/registry/gosudarstvennyy-reestr-selektionnykh-dostizheniy-dopushchennykh-k-ispolzovaniyu-tom-1-sorta-rasteni/yaroslavskiy-1-tsikoriy-kornevoy/>

экстрактивных веществ. Значения равновесных концентраций целевого вещества при моделировании приняты по эмпирическим данным. С использованием программного обеспечения дифференциальные уравнения решались численными методами при заданных начальных и граничных условиях, с получением табличных и графических данных для последующего анализа и сопоставления.

Анализ данных

Статистическая обработка экспериментальных данных (при пятикратной повторности) проводилась с использованием критерия Стьюдента, при доверительной вероятности 0,95. В исследовании, для решения алгебраических и дифференциальных уравнений, вывода таблиц и графиков, при анализе полученных результатов, использовались программные продукты: PTC Mathcad 14 (Education University Edition), Microsoft Excel (AcademicEdition), Graph 4.4.2 (Open source application).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В этом исследовании изучен современный подход к извлечению из растений биологически активных веществ. Микроволновая экстракция стала новой зеленой технологией, позволяющей уменьшить продолжительность процесса экстрагирования, стоимость, а также повысить выход целевых

компонентов. Изученный механизм извлечения основан на испарении влаги внутри растительных клеток при нагреве с помощью микроволнового облучения, последующем увеличении парциального давления пара в клетке и их разрушении. Данные явления подтверждены в опытах при сравнении метода извлечения полифруктозанов из корней цикория методом мацерации и при СВЧ облучении. Важным моментом исследования стало моделирование условий извлечения для их прогнозирования и определения технологического потенциала способа переработки корней цикория.

Определение характеристик перерабатываемого сырья

Исходя из результатов ранее проведенных исследований по расчету диффузионных характеристик сырья (Бакин и соавт., 2014), а также рекомендаций по предварительной подготовке сырья (Данилин и соавт., 2020), выбраны диапазоны размеров 1...3 мм. В данном исследовании корневой цикорий измельчался терочной машиной с крупными отверстиями в виде капель, размер и форма которых представлена на Рисунке 2 (а). Получаемые таким образом измельченные частицы (Рисунок 2 (б)) представляли собой по форме стружку (в расплавленном состоянии тонкую пластинку), с характерным геометрическим размером h_q .

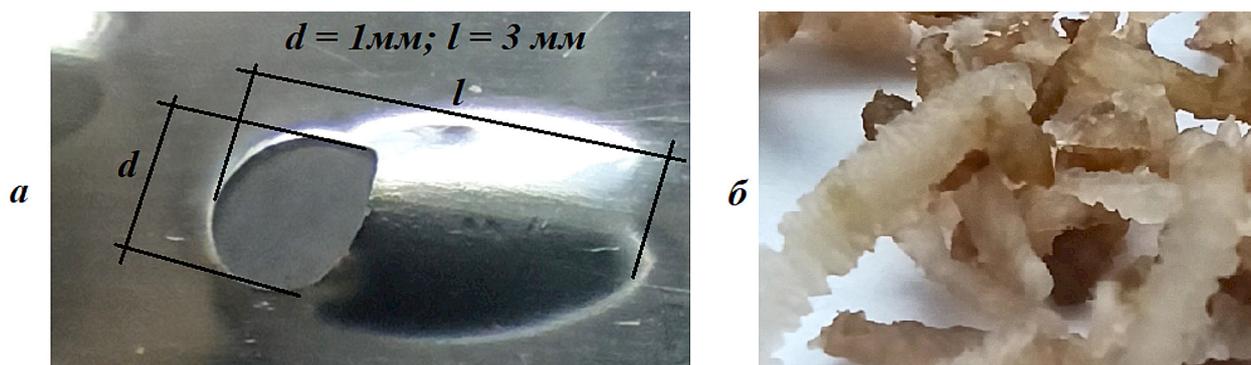
Для оценки разброса размеров толщины получаемой стружки было измерено 300 образцов, после усреднения полученных данных, принято,

Рисунок 2

Размер и форма терочной поверхности (а), используемая для измельчения объекта экстрагирования (б)

Figure 2

Size and Shape of the Grating Surface (a) Used for Grinding the Extraction Object (b)



что толщина измельченной частички (h_q) равна $0,27 \pm 0,001$ мм.

По результатам экспериментального определения влажности измельченного растительного сырья для пяти партий сырья рассчитано среднее значение 64,1%. Химический состав корневого цикория установлен из данных результатов исследователей (Вьютнова и соавт., 2019). Обобщенные результаты выборки представлены в виде фиксированного диапазона (Таблица 1).

Таблица 1

Химический состав корней цикория обыкновенного, %

Table 1

Chemical Composition of Common Chicory Roots, %

Влага	Белки	Жиры	Сахара	Инулин
72...77	1,0...1,2	0,1...0,3	1,0...6,0	12,0...30,0
Клетчатка	Зола	Фосфор	Калий	Кальций
1,3...1,8	1,1...1,9	0,3...0,4	1,3...1,4	0,3...0,4

Примечание. Из Вьютнова и соавт. (2019)

Note. From V'yutnova et al. (2019)

Данные по усредненным значениям химического состава изученных образцов экстрагирования, рассчитанные по методике описанной Е.П. Широковым (Широков, 1985), к приведенной исходной массе на основе реальной влажности объекта экстрагирования, приведены в Таблице 2.

Таблица 2

Усредненные данные химического состава корней цикория обыкновенного

Table 2

Average Chemical Composition Data of Common Chicory Roots

Влага, %	Белки, %	Жиры, %	Углеводы, %
64,10	1,72	0,29	30,5
Зола, %	Фосфор, %	Калий, %	Кальций, %
0,46	0,45	1,96	0,52

Из данных расчета усредненного химического состава следует, что содержание водорастворимых веществ в объекте составляет $29,4 \pm 0,01$ %. Исходя из полученных значений химического состава образцов определена физическая плотность объекта экстрагирования, на основе правила аддитивности и известных данных плотностей составляющих компонентов. По данным работы (Андреева и со-

авт., 2020) принято, что исходные значения плотности сырьевых компонентов (кг/м^3): минеральные вещества, 2160; вода, 1000; белковые компоненты, 330; жиры, 930; углеводы, 1580. Значение расчетной физической плотности составило $856,4 \text{ кг/м}^3$.

В экспериментальных исследованиях экстрагирования методом мацерации продолжительность достижения равновесной концентрации составила 3 часа, при среднем значении концентрации сухих веществ $5,92 \pm 0,01$ %. Среднее значение физической плотности экстракта, полученного методом мацерации, при его температуре $20 \pm 0,1$ °C, пикнометрическим методом (для пикнометра объемом 100 мл) равно 1026 кг/м^3 .

Проведение эксперимента в выбранных диапазонах изменения температуры ($60 \pm 0,1$ °C), связано с известными данными, что использование высоких температур может привести к увеличению нежелательных сопутствующих веществ в экстракте (Ruiz-Aceituno, et al., 2016). Результаты исследований Redondo-Cuenca et al. (2021) согласуются с выбранным нами диапазоном температур, когда наилучшие результаты экстракции инулина были достигнуты при температуре от 60 до 80 °C.

Решение модели массопереноса

В предыдущих работах по изучению процесса извлечения инулина из различных растительных источников, сообщалось, что наиболее важными факторами, влияющими на извлечение и качество инулина, являются время и условия проведения процесса (Kanakasabai et al., 2023; Mangguali et al., 2024). Mangguali et al. (2024) и Kardelen et al. (2023) продемонстрировали, что использование микроволн, при экстракции водой растворимых пищевых волокон является решающим фактором, влияющим на эффективность и скорость экстракции. Механизм извлечения объясняется ускоренным объемным нагревом частиц сырья, разрывом слабых водородных связей. Диффузия растворенных веществ от частиц образцов при этом значительно увеличивается при переходе растворенных веществ в экстрагент (Zhenzhou et al., 2016).

Нами изучен процесс массопереноса, осуществляемого за счет разности содержания переносимого компонента на поверхности и внутри дисперсных

частиц растительного сырья. Принято допущение, что форма стружки условно приближена к тонкой пластине. Для расчета нестационарных полей концентраций использовались дифференциальные уравнения массопереноса (при одномерной задаче) в следующем виде:

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} = -D(\tau) \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}, \quad (1)$$

где C — концентрация извлекаемого компонента в объеме измельченной стружки, кг/м³; x — координата глубины частицы, м; τ — текущее время процесса, $D(\tau)$ — коэффициент молекулярной диффузии в твердой фазе, изменяющийся по времени, м²/с.

Из уравнения (1) следует, что параметр (C) в нем выражается объемной величиной, поэтому в расчетах значения концентрации целевых веществ как в экстракте, так и в исходном растительном сырье, выражен в величинах объемной плотности (кг/м³), которые пересчитываются по соотношению:

$$C = \frac{Cx(\%) \cdot \rho}{100}, \quad (2)$$

где $Cx(\%)$ — концентрация компонента в исходном сырье, %; ρ — плотность экстрагента, кг/м³.

Расчетные значения объемной концентрации экстрактивных веществ как в полученном экстракте, так и в исходном сырье, составили соответственно 60,74 кг/м³ и 251,78 кг/м³.

Для нахождения коэффициента распределения φ , являющегося отношением равновесных концентраций экстрактивного компонента в двух взаимодействующих фазах, в рассматриваемом случае для жидкой (экстракт) и твердой (рафинат) при постоянной температуре, использовано выражение (3):

$$\varphi = \frac{x}{y}, \quad (3)$$

где x — равновесная концентрация в экстракте, кг/м³, y — равновесная концентрация в рафинате, кг/м³.

С использованием программного обеспечения для заданных параметров рассчитано значение коэффициента распределения, которое составило 0,61.

Предложено для частиц экстрагента, непосредственно примыкающих к поверхностным слоям,

в соответствии с выражением (1), значение массового потока (q_{Π}) определять по формуле:

$$q_{\Pi} = -D_I \left(\frac{\partial C}{\partial n} \right)_{\Pi}, \quad (4)$$

где D_I — коэффициент массопроводности, м²/с; $\left(\frac{\partial C}{\partial n} \right)_{\Pi}$ — градиент концентрации на поверхности частиц сырья, кг/м.

Изменение значений коэффициента диффузии, с учетом выражения (4) и граничных условий:

$$D(\tau) = \frac{q_{\Pi}(\tau) \cdot h_{\text{ч}}}{2 \cdot \Delta C_{\text{ч}}(\tau)}, \quad (5)$$

где $\Delta C_{\text{ч}}(\tau)$ — функция изменения концентрации в единичном объеме сырья, кг/м³.

В тоже время удельное количество извлекаемых веществ можно найти из уравнения массопереноса (Бакин и соавт., 2014):

$$q_{\Pi} = \frac{dM}{F \cdot d\tau}, \quad (6)$$

где dM — общая масса извлекаемых экстрактивных веществ; F — площадь массообмена, м²; $d\tau$ — продолжительность процесса, с.

Граничные условия сформулированы из предположения, что в начальный момент экстракции в растворителе отсутствовали экстрактивные вещества, что соответствует периодическому способу извлечения. В конечный момент времени концентрация принята равной равновесной, определяемой эмпирическим способом. Изменение массового расхода целевых веществ описывается линейным уравнением $M(\tau) = a\tau + 0$.

С учетом сделанных предположений, уравнение (6) принимает вид:

$$q_{\Pi}(\tau) = \frac{d(a \cdot \tau)}{d\tau} \cdot \frac{1}{F} = a \cdot F^{-1}, \quad (7)$$

где a — коэффициент, отражающий скорость переноса массы вещества в ядро экстрагента, кг/с.

Площадь контакта поверхности частиц растительного сырья с экстрагентом, в случае формы в виде тонкой пластины, находится в виде:

$$F = S_{\text{ч}} k_{\text{ч}}, \quad (8)$$

где S_c — поверхность одной частицы, m^2 ; k_c — число элементарных объемов, соприкасающихся с экстрагентом, шт.

Анализ графических зависимостей адаптированной модели массопереноса

Проведено численное решение математической модели массопереноса (1) применительно к объекту исследования, для двух вариантов метода экстрагирования (при воздействии СВЧ излучения (+) и без него (-)), относительно приведенной массы исходного растительного сырья в один килограмм. Параметры, принятые для решения дифференциального уравнения (7) численным методом, представлены в Таблице 3.

В результате решения модели (7) переноса целевых веществ из корневого цикория в прикладном пакете *Mathcad* построены зависимости изменения

полей концентраций целевого вещества по глубине пластины в зависимости от продолжительности без воздействия (а) и с воздействием (б) СВЧ-излучения (Рисунок 3).

Как следует из полученных графических зависимостей (Рисунок 3), среднеобъемная концентрация растворимых в экстрагенте веществ в частицах растительного сырья уменьшается до равновесной за 185 минут при обычной мацерации, а при СВЧ воздействии — за 7 минут, что подтверждает сделанное предположение о возможности интенсификации процесса.

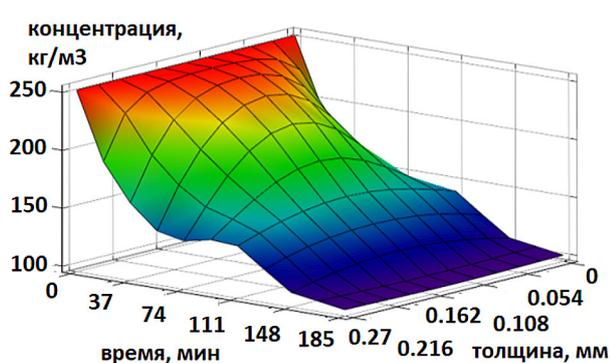
Выявленный механизм массопереноса ранее описан в проведенном исследовании по экстракции с использованием микроволн тканей клубней топинамбура (0,5 кг) с водой (1,5 л) (Sarkar et al., 2020). Показано, что увеличение мощности облучения до 900 Вт при увеличении температуры до 90 °C не обеспечивает лучшего выхода инулина. Таким

Таблица 3
Параметры модели процесса экстрагирования
Table 3
Parameters of the Extraction Process Model

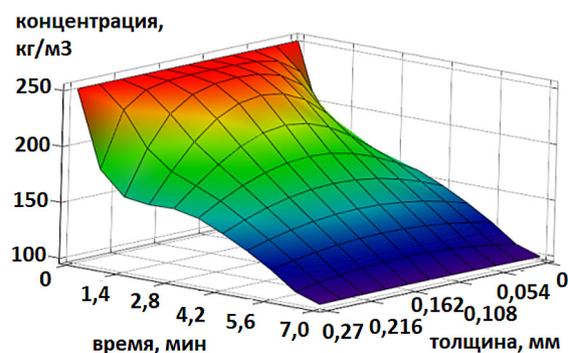
СВЧ	Масса сырья, кг	Площадь межфазной поверхности, m^2	Коэффициент молекулярной диффузии, m^2/c	Скорость переноса массы, кг/с	Коэффициент массоотдачи, м/с
-	1	8,65	$2,217 \cdot 10^{-12}$	$1,6 \cdot 10^{-5}$	$1,349 \cdot 10^{-8}$
+	1	8,65	$5,535 \cdot 10^{-11}$	$4,2 \cdot 10^{-4}$	$3,446 \cdot 10^{-7}$

Рисунок 3
Изменение полей концентрации экстрактивных веществ в объеме растительного сырья
Figure 3

Changes in the Concentration Fields of Extractive Substances Within the Volume of Plant Raw Materials



(а) метод мацерации



(б) метод СВЧ-излучения

образом сделано обобщение, что при меньшей температуре и мощности достигается лучшая чистота экстрагированного инулина.

Представленные результаты согласуются с данными Zhenzhou et al. (2016), где получены данные по увеличению выхода инулина на 20% при СВЧ обработке, чем при методе экстракции горячей водой. В тоже время авторами установлена оптимальная продолжительность в 6 минут, что меньше полученного времени обработки в нашем исследовании. Данное отличие может быть объяснено большей мощностью (450 Вт) источника облучения.

Анализ решения модели массопереноса, а также трехмерных графиков, позволяет предположить, что при любой продолжительности массообменного процесса существуют перепады концентрации растворимых в экстрагенте веществ в объеме растительной частицы. Данное явление можно объяснить, на наш взгляд тем, что существует область инерционности распространения энергии при массопереносе внутри фазы, которая уменьшается на границе раздела фаз вплоть до равновесного состояния.

Наличие граничных концентрационных скачков в течении всего процесса можно объяснить превалированием скорости уноса с поверхностных слоев переносимого компонента к скорости его доставки к поверхности. Эти перепады с увеличением времени сглаживаются, ввиду выравнивания концентрации целевых веществ на границе и в ядре экстрагента, вследствие уменьшения движущей силы массопереноса до ее предельных значений.

Ограничения исследования

Часто используемые методы повышения выхода целевых фракций биоактивных растительных соединений основаны на активных способах создания потоков растворителя. Экстрагирование фитоконпонентов является сложной технической задачей, связанной с выбором растворителя, необходимостью учета свойств исходного материала, размеров частиц, условий перемешивания фаз и массообмена. Микроволновая экстракция используется в широком диапазоне частот от 300 МГц до 300 ГГц и с длиной волны от 1 мм до 1 м, однако в данном исследовании частота ограничена на уровне

2450 МГц при длине волны 12 см, отчасти эти ограничения вызваны опасностью избыточного разрушения клеточных мембран при кавитационном кипении, но в большей степени несовершенством технологического уровня оборудования. В исследовании решалась одномерная задача нахождения нестационарных полей концентраций для тонкой пластины, чем сужается область применения модели и ее решения. Однако полученные прогнозные кинетические характеристики станут стимулом для построения адекватной теоретической модели для реальных растительных объектов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты работы демонстрируют преимущества применения СВЧ облучения для ускорения механизма массопереноса экстрактивных веществ из ядра носителя к разделу фаз применительно к корням цикория. Обработка СВЧ облучением мощностью 180 Вт позволяет достичь сопоставимые значения концентраций экстрактивных веществ, в сравнении с методом мацерации, за 7 минут. Численное решение адаптированной модели массопереноса показало, что значение коэффициента молекулярной диффузии увеличивается при СВЧ обработке до $5,535 \cdot 10^{11} \text{ м}^2/\text{с}$, таким образом ускоряется диффузия целевых компонентов в 25 раз.

Приведенные расчеты будут полезны при подборе экстракционных аппаратов, а также для анализа технологических параметров извлечения экстрактивных веществ корней цикория. Разработанная модель и графические зависимости технологических параметров извлечения экстрактивных компонентов из измельченного растительного сырья позволят ученым и практикующим специалистам выбрать лучшие методы экстракции при варьировании краевых условий проведения процесса. Тем не менее, существует необходимость в поиске доступных дополнительных технологических приемов для дальнейшего повышения выхода биоактивных соединений при предварительной обработке сырья. Необходимы дополнительные научные исследования для предоставления надежных оценок влияния кавитационных эффектов на показатели качества экстрактов, особенно учитывая потенциальное применение в пищевых продуктах пребиотической направленности.

АВТОРСКИЙ ВКЛАД

Альберт Хамед-Харисович Нугманов: формулирование замысла, разработка методологии исследования, создание моделей.

Игорь Алексеевич Бакин: получение финансирования, написание первоначального черновика рукописи.

Анна Сабирдзяновна Мустафина: подготовка, создание и презентация опубликованной работы, проверка результатов исследования.

Полина Николаевна Шаповалова: применение математических методов для анализа данных результатов исследования.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Albert Kh.-Kh. Nugmanov: conceptualization, methodology.

Igor A. Bakin: funding acquisition, writing - original draft preparation.

Anna S. Mustafina: visualization, validation.

Polina N. Shapovalova: formal analysis.

ЛИТЕРАТУРА/ REFERENCES

- Андреева, Е.В., Евсеева, С.С., Алексанян, И.Ю., & Нугманов, А.Х.-Х. (2020). Определение характеристик плодово-ягодного сырья и промежуточных продуктов технологии пигментных экстрактов. *Вестник КрасГАУ*, 10(163), 181–189. <https://doi.org/10.36718/1819-4036-2020-10-181-189>
- Andreeva, E.V., Evseeva, S.S., Aleksanyan, I.Yu., & Nugmanov, A.Kh.-Kh. (2020). Characterization of fruit and berry raw materials and intermediate products of pigment extract technology. *Bulletin of KrasGAU*, 10(163), 181–189. (In Russ.) <https://doi.org/10.36718/1819-4036-2020-10-181-189>
- Бакин, И.А., Мустафина, А.С., Алексенко, Л.А., & Лунин, П.Н. (2014). Исследование технологических процессов получения экстрактов ягод черной смородины. *Вестник КрасГАУ*, 12(99), 227–230.
- Bakin, I.A., Mustafina, A.S., Aleksenko, L.A., & Lunin, P.N. (2014). Research of technological processes for obtaining extracts of black currant berries. *Bulletin of KrasGAU*, 12(99), 227–230. (In Russ.)
- Бызов, В.А., Пучкова, Т.С., & Пихало, Д.М. (2023). Оценка показателей качества клубней топинамбура для переработки на инулин и его производные. *Пищевая промышленность*, (4), 58–62. <https://doi.org/10.52653/PPI.2023.4.4.010>
- Byzov, V.A., Puchkova, T.S., & Pikhalo, D.M. (2023). Assessment of the quality indicators of Jerusalem artichoke tubers for processing into inulin and its derivatives. *Food Industry*, (4), 58–62. (In Russ.) <https://doi.org/10.52653/PPI.2023.4.4.010>
- Вьютнова, О.М., & Новикова, И.А. (2019). Химический состав корнеплодов цикория. *Овощи России*, (1), 83–85. <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2019-1-83-85>
- V'yutnova, O.M., & Novikova, I.A. (2019). Chemical composition of chicory roots. *Vegetables of Russia*, (1), 83–85. (In Russ.) <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2019-1-83-85>
- Гулюк, Н.Г., Лукин, Н.Д., Пучкова, Т.С., Пихало, Д.М., & Гулакова, В.А. (2017). Об очистке экстракта из инулинсодержащего сырья. *Пищевая промышленность*, (2), 24–26.
- Gulyuk, N.G., Lukin, N.D., Puchkova, T.S., Pikhalo, D.M., & Gulakova, V.A. (2017). On the purification of extract from inulin-containing raw materials. *Food Industry*, (2), 24–26. (In Russ.)
- Гулюк, Н.Г., Пучкова, Т.С., Пихало, Д.М., Гулакова, В.А., & Коваленок, В.А. (2014). Исследование процесса диффузии инулина из клубней топинамбура. *Достижения науки и техники АПК*, (12), 67–69.
- Gulyuk, N.G., Puchkova, T.S., Pikhalo, D.M., Gulakova, V.A., & Kovalenok, V.A. (2014). Investigation of the inulin diffusion process from Jerusalem artichoke tubers. *Achievements of Science and Technology of the Agroindustrial Complex*, (12), 67–69. (In Russ.)
- Данилин, С.И., Родионов, Ю.Ю., Родионов, Ю.В., Чумиков, Ю.А., & Скоморохова, А.И. (2020). Совершенствование технологии получения порошков из растительного сырья. *Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК-продукты здорового питания*, (4), 150–159.
- Danilin, S.I., Rodionov, Yu.Yu., Rodionov, Yu.V., Chumikov, Yu.A., & Skomorokhova, A.I. (2020). Improving the technology of obtaining powders from vegetable raw materials. *Technologies of the Food and Processing Industry of the Agro-Industrial Complex — Healthy Food Products*, (4), 150–159. (In Russ.)
- Кайшев, В.Г., Лукин, Н.Д., Серегин, С.Н., & Корниенко, А.В. (2018). Рынок инулина в России: возможности развития сырьевой базы и необходимые ресурсы для создания современного отечественного производства. *Пищевая промышленность*, (5), 8–17.
- Kaishev, V.G., Lukin, N.D., Seregin, S.N., & Kornienko, A.V. (2018). The inulin market in Russia: Opportunities for the development of the raw material base and the necessary

- resources to create modern domestic production. *Food Industry*, (5), 8–17. (In Russ.)
- Титова, Л.М., & Алексанян, И.Ю. (2016). Технология инулина: основные тенденции развития отрасли и спорные вопросы. *Пищевая промышленность*, (1), 46–51.
- Titova, L.M., & Aleksanyan, I.Yu. (2016). Inulin technology: The main trends in the development of the industry and controversial issues. *Food Industry*, (1), 46–51. (In Russ.)
- Широков, Е.П. (1985). Практикум по технологии хранения и переработки плодов и овощей. Москва: Агропромиздат.
- Shirokov, E.P. (1985). Workshop on technology of storage and processing of fruits and vegetables. Moscow: Agropromizdat. (In Russ.)
- Ankan, K., Yograj, B., Anchal, A., Samandeep, K., Yogesh, K., & Rachna, S. (2023). Utilization of inulin as a functional ingredient in food: Processing, physicochemical characteristics, food applications, and future research directions. *Food Chemistry Advances*, 3, 100443. <https://doi.org/10.1016/j.focha.2023.100443>
- Chemat, F., Rombaut, N., Meullemiestre, A., Turk, M., Perino, S., Fabiano-Tixier, A.-S., & Abert-Vian, M. (2017). Review of green food processing techniques: Preservation, transformation, and extraction. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 41, 357–377. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2017.04.016>
- Demirci, K., Zungur-Bastioğlu, A., Görgüç, A., Bayraktar, B., Yılmaz, S., & Yılmaz, F. M. (2023). Microwave irradiation, evolutionary algorithm and ultrafiltration can be exploited in process intensification for high-purity and advanced inulin powder production. *Chemical Engineering and Processing—Process Intensification*, 194, 109565. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2023.109565>
- Jiang, X., Sotowa, K.-I., Tonomura, O., & Oh, T. H. (2023). Investigation of mass transfer in valve-controlled gas–liquid segmented flow. *Chemical Engineering and Processing—Process Intensification*, 194, 109578. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2023.109578>
- Kanakasabai, P., Sivamani, S., Banerjee, S., Vijay, P., & Thirumavalavan, K. (2023). Identification of optimal conditions for the extraction of inulin from chicory. *Materials Today: Proceedings*, 92(2), 737–741. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.04.246>
- Laurenzo, K. S., Navia, J. L., & Neiditch, D. S. (1999). Preparation of inulin products: *U.S. Pat. 5968365*.
- Lingyun, W., Jianhua, W., Xiaodong, Z., Da, T., Yalin, Y., Chenggang, C., Tianhua, F., & Fan, Z. (2007). Studies on the extracting technical conditions of inulin from Jerusalem artichoke tubers. *Journal of Food Engineering*, 79(3), 1087–1093. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.03.028>
- Mangguali, M., Meta, M., & Syarifuddin, A. (2024). Study of inulin content and extraction methods in several types of tubers: Review paper. *BIO Web of Conferences*, 96, 01031. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20249601031>
- Milic, A., Daničić, T., Tepić Horecki, A., Šumić, Z., Teslić, N., Bursać Kovačević, D., Putnik, P., & Pavlić, B. (2022). Sustainable extractions for maximizing content of antioxidant phytochemicals from black and red currants. *Foods*, 11, 325. <https://doi.org/10.3390/foods11030325>
- Ozcan, B. E., Tetik, N., & Aloglu, H. S. (2024). Polysaccharides from fruit and vegetable wastes and their food applications: A review. *International Journal of Biological Macromolecules*, 276(2), 134007. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.134007>
- Özcan, F. Ş., Dikmen, H., Özcan, N., Çetin, Ö., Çelik, M., & Trendafilova, A. (2024). Microwave-assisted extraction optimization of sesquiterpene lactones from *Inula helenium* roots: A sustainable approach to reduce energy consumption and carbon footprint. *Food Science & Nutrition*, 12(1), 255–267. <https://doi.org/10.1002/fsn3.3775>
- Petkova, N. T., Sherova, G., & Denev, P. P. (2018). Characterization of inulin from dahlia tubers isolated by microwave and ultrasound-assisted extractions. *International Food Research Journal*, 25(5), 1876–1884.
- Redondo-Cuenca, A., Herrera-Vázquez, S. E., Condezo-Hoyos, L., Gómez-Ordóñez, E., & Rupérez, P. (2021). Inulin extraction from common inulin-containing plant sources. *Industrial Crops and Products*, 170, 113726. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113726>
- Ruiz-Aceituno, L., García-Sarrió, M. J., Alonso-Rodríguez, B., Ramos, L., & Sanz, M. L. (2016). Extraction of bioactive carbohydrates from artichoke (*Cynara scolymus* L.) external bracts using microwave-assisted extraction and pressurized liquid extraction. *Food Chemistry*, 196, 1156–1162. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.10.046>
- Saengthongpinit, W., & Sajjaanantakul, T. (2005). Influence of harvest time and storage temperature on characteristics of inulin from Jerusalem artichoke (*Helianthus tuberosus* L.) tubers. *Postharvest Biology and Technology*, 37(1), 93–100.
- Sarkar, R., Bhowmik, A., Kundu, A., Dutta, A., Nain, L., Chawla, G., & Saha, S. (2021). Inulin from *Pachyrhizus erosus* root and its production intensification using evolutionary algorithm approach and response surface methodology. *Carbohydrate Polymers*, 251, 117042. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.117042>
- Toneli, J. T. C. L., Park, K. J., Ramalho, J. R. P., Murr, F. E. X., & Fabbro, I. M. D. (2008). Rheological characterization of chicory root (*Cichorium intybus* L.) inulin solution. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 25, 461–471. <https://doi.org/10.1590/S0104-66322008000300004>
- Tsubaki, S., Onda, A., Hiraoka, M., Fujii, S., Azuma, J., & Wada, Y. (2017). Microwave-assisted water extraction of carbohydrates from unutilized biomass. In *Water Extraction of Bioactive Compounds* (pp. 199–219). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809380-1.00007-3>
- Zhang, X., Zhu, X., Shi, X., Hou, Y., & Yi, Y. (2022). Extraction and purification of inulin from Jerusalem artichoke with response surface method and ion exchange resins. *ACS Omega*, 7(14), 12048–12055. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c00302>
- Zhenzhou, Z., He, J., Gang, L., Francisco, J., Mohamed, B., Luhui, K., Ding, O., Bals, N., & Vorobiev, E. (2016). Recent insights for the green recovery of inulin from plant food materials using non-conventional extraction technologies: A review. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 33, 47. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2015.12.023>