

Научная статья

УДК 664.8.022.1

DOI: 10.55196/2411-3492-2025-4-50-142-150

Анализ процесса экстрагирования растительного сырья под действием электромагнитного поля СВЧ-диапазона

Александр Викторович Гаврилов

Крымский федеральный университет имени В. И. Вернадского, улица Научная, 1, Симферополь,
Республика Крым, Россия, 295492

tehfac@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3382-0307>

Аннотация. В настоящей статье проводится анализ процесса экстрагирования растительного сырья под действием электромагнитного поля СВЧ-диапазона. Производство и переработка пищевых продуктов питания связаны с энергоемкостью. Выбросы и отходы пищевых производств являются загрязнителями атмосферы, гидросферы и литосферы. При этом пищевые технологии отстают в практическом внедрении инновационных проектов от других отраслей экономики, так как проблемы пищевых энерготехнологий в мире комплексно не исследованы. В связи с этим в настоящей статье проводится анализ процесса экстрагирования растительного сырья под действием электромагнитного поля СВЧ-диапазона, состоящего из элементов макро- микро- и наномасштабного размера. Причем именно на объекты микро- и наномасштабного размера направлены пищевые технологии. Эти объекты, обладая большим диффузионным сопротивлением, определяют, как правило, энергоемкость технологии, степень использования сырья и сохранность пищевого потенциала. По этой причине в отходах остается до 15–20% целевых компонентов, которые находятся в микро- и нанокapиллярах и не извлекаются традиционными технологиями. Использование инновационных технологий в пищевой промышленности позволит создать принципиально новые продукты, не имеющие современных аналогов. Создание таких технологий должно основываться на комплексном анализе энергетических, теплофизических и биотехнологических явлений. Основными процессами пищевых технологий, которые следует интенсифицировать, являются процессы тепломассопереноса. Именно они определяют как энергетiku, так и качество готового продукта. Проведено экспериментальное исследование микроволновых экстракторов и сравнение их энергетической эффективности с традиционным оборудованием. Предложен принцип адресного подведения энергии с помощью электромагнитного поля. Разработана модель, с помощью которой можно рассчитывать эффективность процесса массообмена для экстрагирования пищевых продуктов в электромагнитном поле, получать высококачественный продукт при минимальных энергетических затратах и при пониженных температурах.

Ключевые слова: диффузионное сопротивление, пищевые технологии, энергетические ресурсы, пограничный слой, нанотехнологии, бародиффузия, экстрагирование

Для цитирования: Гаврилов А. В. Анализ процесса экстрагирования растительного сырья под действием электромагнитного поля СВЧ-диапазона // Известия Кабардино-Балкарского государственного аграрного университета им. В. М. Кокова. 2025. № 4(50). С. 142–150. DOI: 10.55196/2411-3492-2025-4-50-142-150

Благодарности. Автор выражает благодарность руководству Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского за поддержку и допуск в лаборатории для проведения экспериментальных исследований и получение данных для написания научной статьи.

Original article

Analysis of the extraction process of plant raw materials under the influence of a microwave electromagnetic field

Aleksandr V. Gavrilo

V.I. Vernadsky Crimean Federal University, 1 Nauchnaya Street, Simferopol, Republic of Crimea, Russia, 295492

tehfac@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3382-0307>

Abstract. The production and processing of food products is associated with energy intensity. Emissions and waste from food production are pollutants of the atmosphere, hydrosphere, and lithosphere. At the same time, food technologies lag behind in the practical implementation of innovative projects compared to other sectors of the economy. However, the problems of food energy technologies are not comprehensively addressed in the world. They consist of elements of macro-, micro-, and nano-scale dimensions. Moreover, the objects of micro- and nano-scale size are in the focus of food technology in this article. Analysis of the extraction process of plant raw materials under the influence of a microwave electromagnetic field these objects, which have a high diffusion resistance, typically determine the energy intensity of the technology, the degree of raw material utilization, and the preservation of nutritional potential. As a result, up to 15–20% of the target components remain in the waste, trapped in micro- and nano-capillaries that cannot be extracted using traditional technologies. The use of innovative technologies in the food industry will allow the creation of fundamentally new products that do not have modern counterparts. The development of such technologies should be based on a comprehensive analysis of energy, thermophysical, and biotechnological phenomena. The main processes in food technology that should be intensified are those related to heat and mass transfer. These processes determine both the energy content and the quality of the final product. Experimental study of microwave extractors has been conducted, and its energy efficiency has been compared with that of traditional equipment. The principle of targeted energy delivery using an electromagnetic field has been proposed. A model has been developed to calculate the efficiency of the mass transfer process for extracting food products in an electromagnetic field. The developed microwave extractor allows for the production of high-quality products with minimal energy consumption and at reduced temperatures.

Keywords: diffusion resistance, food technologies, energy resources, boundary layer, nano technologies, barodiffusion, extraction

For citation: Gavrilo A.V. Analysis of the process of extracting plant raw materials under the influence of an electromagnetic field of the microwave range. *Izvestiya of Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V.M. Kokov.* 2025;4(50):142–150. (In Russ.). DOI: 10.55196/2411-3492-2025-4-50-142-150

Acknowledgements. The author expresses gratitude to the management of the Crimean Federal University named after V.I. Vernadsky for support and access to the laboratory to conduct experimental research and obtain data for writing a scientific article.

Введение. Наибольший расход энергии наблюдается в пищевой промышленности, особенно в процессах, связанных с термообработкой пищевого сырья [1–3]. Необходимо рассматривать вопросы по эффективному использованию энергии и увеличивать энергетический КПД пищевых технологий. Это, в свою очередь, снизит себестоимость продукта и приведет к сохранению полезных элементов продукта [4–6]. Проведение процесса при пониженных температурах повышает сохране-

ние качественных характеристик продукта [7–9]. Однозначного ответа на решение данных вопросов нет.

Главная задача в переработке пищевого сырья – это безопасность и наличие полезно-активных веществ. В утилизированных компонентах переработки сырья содержатся полезные пищевые элементы, стоимость которых больше цены получаемого продукта. Данные компоненты расположены внутри капилляров на глубине от 5 нм и глубже, и

извлекать их очень сложно. При помощи существующего оборудования эти процессы осуществить сложно и даже невозможно.

Необходимо процессы обезвоживания (выпаривание, экстрагирование, сушка и другие) осуществлять по принципу адресного направления энергии (АНЭ). Проведение процессов по предложенному принципу приведет к сокращению затрат энергии, снижению температуры воздействия на сырье и получению более высококачественного пищевого продукта.

Поиск новых принципов и оборудования для тепловой обработки сырья в настоящее время не дал результатов. В настоящее время наиболее распространены микроволновые генераторы [10–12]. Воздействие на продукт электромагнитного поля (ЭМП) исследуется многими специалистами в различных странах. Вопрос очень актуальный [13–15]. В различных странах разработаны конструкции сушилок с использованием ЭМП. С помощью них производят чипсы из овощей и фруктов, различные сушеные фрукты и овощи. В Турецком университете исследовали экстрагирование фенолов из черники в состоянии порошка 60%-ным водным раствором этанола, и был получен экстракт с содержанием сухих веществ 85%.

Анализ проведенных исследований подтверждает использование ЭМП в обработке

пищевых продуктов актуальным. Но много вопросов еще не изучено (увеличение конечной концентрации пищевых продуктов, уменьшение воздействия температуры на сырье, затраты энергии). Обозначенные проблемы необходимо решать [3, 15].

Цель исследования – разработка новых технологий обезвоживания пищевого сырья и оборудования на принципе микроволновых источников энергии с адресным направлением энергии.

Материалы, методы и объекты исследования. Для реализации адресного направления энергии к молекулам в капиллярах сырья с помощью ЭМП будем учитывать вид и свойства продукта. В экспериментальных исследованиях будем регулировать выход жидкости из микро- и наномасштабных объектов сырья. Извлечение жидкости зависит от мощности оборудования и от структуры сырья.

Проведем классификацию процессов обезвоживания (механические, гидродинамические, тепловые, массообменные и комбинации из них). Особый интерес представляют комбинированные процессы. С их помощью возможно разрешить проблемы обезвоживания пищевых продуктов.

Представим процесс обезвоживания продуктов в ЭМП следующей схемой (рис. 1).

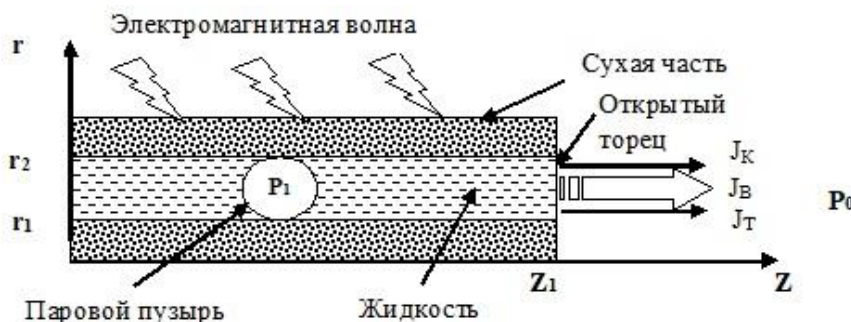


Рисунок 1. Схема процесса обезвоживания продуктов в ЭМП:

z, r – координаты

Figure 1. Diagram of the process of food dehydration in an electromagnetic field:

z, r – coordinates

Схема наглядно показывает воздействие ЭМП на сухую часть продукта. Она радиопроницаемая. Электромагнитное излучение достигает жидкости внутри капилляра и воздействует на молекулы, которые являются полярными. В установке создается давление

P_0 . При подаче ЭМП микроволны проникают через сухую часть продукта к жидкости. Осуществляется процесс диссипации микроволновой энергии и образуется пар. Чтобы образовался паровой пузырь, температура должна быть максимальной. Процесс прохо-

дит в глубине капилляра. Давление возрастает, и происходит разрыв капилляра по причине небольшого объема жидкой среды и большой концентрации энергии. В результате разрыва капилляра жидкость выходит на поверхность, откуда удаляется. С поверхности влагу можно удалить обычным конвективным способом (пример комбинированного процесса обезвоживания пищевых продуктов).

Выполненный анализ справедлив и для процессов экстрагирования, и для процессов сушки.

Для процессов выпаривания в ЭМП такой анализ выполнен в [15]. Массовый баланс выражает поток влаги и пара из жидкой прослойки и складывается из конвективного (J_K), термодиффузионного (J_T) и бародиффузионного (J_B) потока (рис. 1) при следующих коэффициентах массоотдачи ($\beta_K, \beta_T, \beta_B$), поверхностях контакта фаз (F_b, F_{Kb}, F_{Bi}) и разности парциальных давлений ($\Delta P_P, \Delta P_T, \Delta P_B$):

$$J = J_K + J_T + J_B = \beta_K \cdot F_i \cdot (\Delta P_P) + \beta_T \cdot F_{Ki} \cdot (\Delta P_T) + \beta_B \cdot F_{Bi} \cdot (\Delta P_B). \quad (1)$$

Доказательства подтверждены экспериментальными исследованиями, проведенными на модели сырья (рис. 2). Капилляр сырья был заполнен водой с чернилами. В оболочке модели было 3 капилляра. Модель размещали в термостате и в микроволновом генераторе [16]. Образование гидродинамического потока из каналов капилляров сырья подтвержден видеофиксацией. Было установлено, что источник зарождения парообразования наиболее четко выражен в капиллярах, находящихся близко к источнику энергии (генератору). Такой бародиффузионный процесс возможно контролировать с помощью регулирования мощности источника энергии и его направления излучения, учитывая структуру пищевого сырья и диаметр капилляров. Подтверждается процесс диссипации микроволновой энергии и образования пара с последующим разрывом капилляра и выходом жидкости на поверхность.

Результаты исследования. Для проведения экспериментальных исследований был разработан микроволновой экстрактор, конструкция которого принципиально отличается от традиционных экстракторов (рис. 3).

Сравнение традиционного и предложенного экстракторов приведено в таблицах 1, 2.



Рисунок 2. Модель капилляра сырья в микроволновом генераторе

Figure 2. Model of the capillary of raw materials in a microwave generator

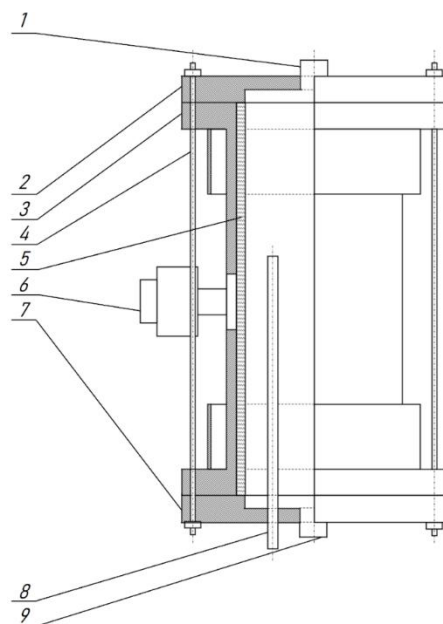


Рисунок 3. Схема и общий вид микроволнового экстрактора

Figure 3. Diagram and general view of the microwave extractor

Таблица 1. Традиционные экстракторы
Table 1. Traditional extractors

Механизм	Процесс конвективной диффузии в капиллярах сырья
Преимущество	Конструкция устройства проста в обслуживании
Ограничения	В процессе экстрагирования с ростом температурного режима процесс ускоряется, но при этом теряются полезные вещества в сырье, которые являются термолабильными
Проблемы	Для сохранения качества готового продукта и термолабильных веществ в сырье ограничиваются уровнем температуры, и продолжительность процесса измеряется многими часами, сутками (фармацевтические производства), годами (коньячные технологии). Извлекаются только растворимые компоненты. Содержимое микрокапилляров традиционные технологии не извлекают
Перспективы	Решение проблемы отсутствует

Предложенный экстрактор с микроволновым излучением работает на принципе адресного направления энергии (табл. 2).

С помощью вакуумного микроволнового экстрактора провели исследование различных пищевых продуктов: шиповника и кофейного шлама. Температура кипения пищевых систем не превышала 40 °С, что очень важно для термолабильных веществ. Шлам от кофе загрязняет окружающую среду, но при этом

имеет большое количество ценных элементов, таких как кофейное масло, содержащее кофеин (их количество составляет 15% от общего объема). С помощью традиционных принципов извлечь эти вещества не представляется возможным. В связи с этим необходимо спроектировать микроволновой экстрактор, который справится с поставленной задачей. Принцип в микроволновом экстракторе – механическая диффузия.

Таблица 2. Микроволновой экстрактор
Table 2. Microwave Extractor

Механизм	Объемный подвод энергии непосредственно к молекулам растворителя. Осуществляется при граничных условиях II рода. Используются электромагнитные генераторы микроволнового диапазона
Преимущество	Комбинированное действие диффузионных и гидродинамических движущих сил обеспечивает извлечение полиэкстрактов, существенно снижает продолжительность процесса, увеличивает выход целевых компонентов
Ограничения	Молекулы сырья или экстрагента должны быть полярными

В процессе экстрагирования необходимо правильно выбрать экстрагент, из которых известные – гексан, нефрас, но они очень токсичные. Этанол безопасен, но он обладает минимальными характеристиками массопереноса.

Выполнены экспериментальные исследования для различных экстрагентов и определена зависимость процесса массопереноса от теплофизических и биотехнологических явлений. Процесс массопереноса для различных экстрагентов представлен на рисунке 4. Удельная мощность процесса задана 1,2 кВт/кг раствора шлам–экстрагент.

При традиционном способе (рис. 4а) гексан и нефрас эффективнее, чем спирт, а в ЭМП эффективнее работает спирт (рис. 4б). Кроме этого, экстрагирование в ЭМП с помощью спирта позволяет извлечь больше масла и полезных веществ, чем при использовании гексана и нефраса, и сократить время процесса в 15 раз. Спирт, по сравнению с другими экстрагентами, попадая в полученный экстракт, дополняет его ароматическими компонентами, что более привлекательно.

Был изучен процесс экстрагирования с помощью спирта традиционным способом и под влиянием ЭМП при различных температурах (рис. 5).

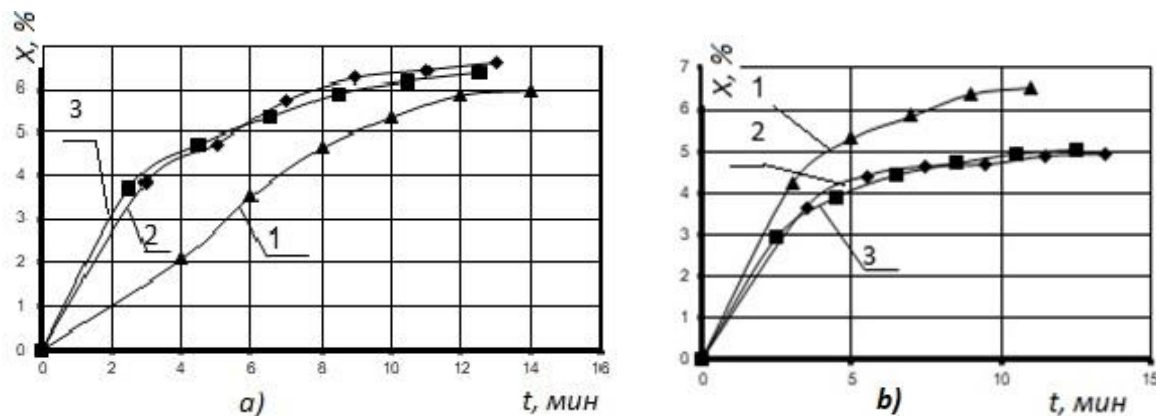


Рисунок 4. Процесс массопереноса для различных экстрагентов:

1 – спирт; 2 – нефрас; 3 – гексан

a – традиционный способ (термостат); *b* – в ЭМП

Figure 4. Mass transfer process for various extractants:

1 – alcohol; 2 – nefras; 3 – hexane

a – traditional method (thermostat); *b* – in EMF

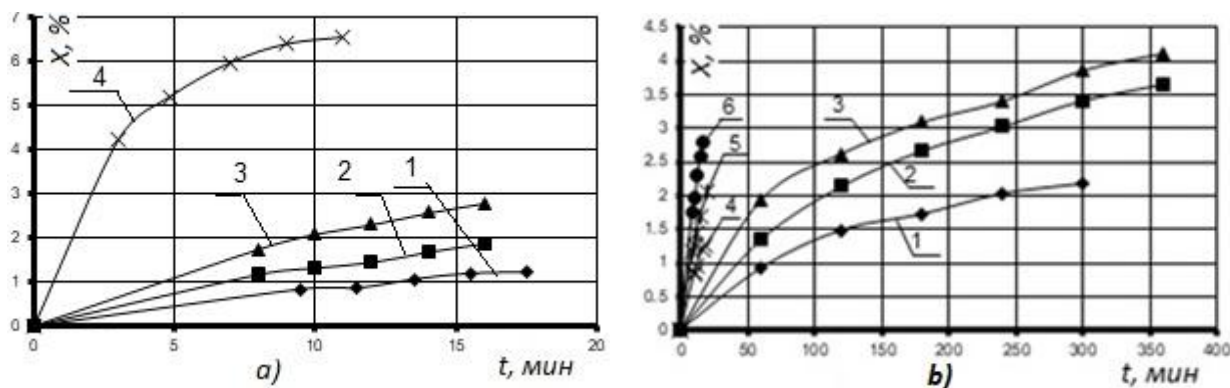


Рисунок 5. *a* – Экстрагирование в ЭМП при различной температуре спирта:

1 – 40 °C; 2 – 50 °C; 3 – 60 °C; 4 – 80 °C (кипение);

b – зависимости экстрагирования спиртом от подведенной энергии:

(1–3 традиционный способ; 4–6 в ЭМП);

1 и 4 – 40 °C; 2 и 5 – 50 °C; 3 и 6 – 60 °C

Figure 5. *a* – Extraction in EMF at different alcohol temperatures:

1 – 40 °C; 2 – 50 °C; 3 – 60 °C; 4 – 80 °C (boiling);

b – dependence of alcohol extraction on the applied energy:

(1 – 3 traditional method; 4–6 in EMF);

1 and 4 – 40 °C; 2 and 5 – 50 °C; 3 and 6 – 60 °C

Анализируя кривые (рис. 4 и 5), делаем вывод, что в ЭМП при росте температуры (температура кипения растворителя в пределах 40–60 °C) возрастает скорость процесса и извлечения полезных веществ. Это происходит от турбулизации пограничного слоя (рис. 5*b*).

Для проведения исследования процесса экстракции разработан микроволновой экстрактор. Эксперименты были проведены на кофейном шламе. В результате экспериментов установлены основные параметры процесса и режимы работы экстрактора.

Основные условия при экстрагировании – значение подведенной энергии, толщина слоя и расход экстрагента.

Экспериментально определено: 1) расход экстрагента должен быть $1,5 \cdot 10^{-6}$ – $4,5 \cdot 10^{-6}$ м³/с, при этом процесс проходит в тонком слое сырья и при эффективном массопереносе; 2) толщина слоя продукта должна быть $1,5 \cdot 10^{-2}$ – $3,5 \cdot 10^{-2}$ м.

Экспериментально определено, что с увеличением расхода экстрагента пропорционально возрастает объем извлечения экстрак-

тивных полезных веществ из кофейного шлама, а время процесса снижается в 2,2 раза, что связано с уменьшением диффузионного сопротивления. А с увеличением скорости процесса в 2,0–3,0 раза эффективность процесса массоотдачи возрастает в 3,0–5,0 раз.

Предложена модель, позволяющая рассчитывать активность процесса массообмена для экстрагирования в электромагнитном поле:

$$St_m = 0,004 \cdot Re^{-0,5} \cdot Sc^{0,43} \cdot V^{0,6} \cdot G^{0,33}. \quad (2)$$

Модель обобщенных переменных (2) отражает процесс массообмена – зависимость числа Стантона (St_m) от безразмерных критериев Шмидта (Sc), Рейнольдса (Re), от воздействия энергии (G) и критерия, отвечающего за структуру слоя продукта (V). Погрешность при расчетах по модели (2) составляет 17% при наименьших значениях числа Стантона.

Извлеченный из кофейного шлама концентрат в предложенном микроволновом экстракторе прошел лабораторные исследования и соответствует показателям, предъявляемым к пищевым продуктам. По микробиологическим и органолептическим критериям продукт безопасен и может быть рекомендован к использованию. С применением микроволнового экстрактора можно снизить потери полезных веществ от 4–7 до 0,1–0,3%. Разработанный микроволновой экстрактор может применяться в процессах экстрагирования для разного сельскохозяйственного сырья. В ходе экспериментального исследования микроволнового экстрактора было переработано 7 кг шлама кофейного и извлечено 0,91–1,40 кг масла кофе (около 20% от общего объема сырья). Продолжительность процесса составляет 40–90 мин.

Выводы. Были проведены экспериментальные исследования и проанализированы

явления, влияющие на процесс экстрагирования: энергетика, теплофизические и биотехнологические. Выявлено, что основной процесс в экстрагировании пищевых продуктов – тепломассоперенос, и его необходимо контролировать. Процессы тепломассопереноса определяют энергетические и качественные показатели продукта.

Специфичные моменты в процессах тепломассопереноса из элементов макро- микро- и наномасштабного размера в настоящее время слабо изучены. В связи с этим грамотное моделирование процессов обезвоживания сырья и разработка соответствующего энергоэффективного оборудования являются актуальными и перспективными для пищевой промышленности.

Был разработан микроволновой экстрактор для экстрагирования пищевых систем. Принцип работы экстрактора заключается в воздействии на пищевой продукт электромагнитного поля СВЧ-диапазона. По такому принципу возможно подвести энергию непосредственно внутрь капилляра сырья. Такое адресное подведение энергии к элементам пищевого продукта является новым принципом проведения процессов тепломассопереноса в пищевой промышленности ввиду возможности осуществления управления процессом массопереноса на стыке фаз пищевых продуктов с помощью энергетического воздействия. Установлены требования к сырью – молекулы пищевого сырья должны быть полярными.

Экспериментальная база подтвердила эффективность проведения процессов тепломассопереноса по принципу электромагнитного воздействия на полярные молекулы сырья по сравнению с известными технологиями.

Список литературы

1. Исламова О. В., Токов А. З., Атаева Ф. А. Энергоэффективность – важнейший показатель качества пищевых измельчителей // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2019. Т. 82. № 2. С. 56–62. DOI: 10.20914/2310-1202-2019-2-56-62. EDN: OKUOMG
2. A phosphotungstic acid coupled silica-nafion composite membrane with significantly enhanced ion selectivity for vanadium redox flow battery / X.-B. Yang, L. Zhao, K. Goh [et al.] // Journal of Energy Chemistry. 2020. No. 41. Pp.177–184. DOI: 10.1016/j.jechem.2019.05.022Wang
3. Гаврилов А. В. Экспериментальное моделирование процесса выпаривания водных растворов в условиях вакуума и микроволнового поля // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный

университет имени В. П. Горячкина». 2020. Т. 1(95). С. 41–50. DOI: 10.34677/1728-7936-2020-1-41-50. EDN: UFYTIA

4. Consideration of opportunities for the optimization of heat energy consumption in Industry and energetics / S. Simić, G. Orašanin, D. Golubović [et al.] // *Lecture Notes in Networks and Systems*. 2020. No. 76. Pp. 494–503. DOI: 10.1007/978-3-030-18072-0_57

5. Cüneyt Dinçer. Effect of intermittent microwave vacuum concentration on quality parameters of apple juice and sour cherry nectar and mathematical modeling of concentration // *Journal of microwave power and electromagnetic energy*. 2021. Vol. 55. Issue 3. Pp. 175–196. DOI: 10.1080/08327823.2021.1952837

6. Yuan Tao, Bowen Yan, Nana Zhang. Microwave vacuum evaporation as a potential technology to concentrate sugar solutions: A study based on dielectric spectroscopy // *Journal of food engineering*. 2020. No. 294. Pp. 112–126. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2020.110414.

7. Effect of microwave-assisted vacuum and hot air oven drying methods on quality characteristics of apple pomace powder / Bhat Iqra Mohiuddin, Wani Shoib Mohmad, Mir Sajad Ahmad, Naseem Zahida // *Food Production, Processing and Nutrition*. 2023. Vol. 5. Article number 26. Pp. 1–17. DOI: 10.1186/s43014-023-00141-4

8. Kai Liu, Zhenyu Zhao, Hong Li, Xin Gao. Microwave-induced vapor-liquid mass transfer separation technology – full of breakthrough opportunities in electrified chemical processes // *Current Opinion in Chemical Engineering*. 2022. No. 39. Pp. 207–216. DOI: 10.1016/j.coche.2022.100890

9. Bozkir H., Tekgül Y. Production of orange juice concentrate using conventional and microwave vacuum evaporation: Thermal degradation kinetics of bioactive compounds and color values. *Journal of Food Processing and Preservation*. 2021. Vol. 46. Issue 7. Pp. 107–123. DOI: 10.1111/jfpp.15902

10. Drying kinetics of food materials in infrared radiation drying: A review / D.S.A. Delfiya, K. Prashob, S. Murali [et al.] // *Journal of Food Process Engineering*. 2021. Vol. 45. Issue 2. Pp. 10–23. DOI: 10.1111/JFPE.13810

11. Electrodynamic processes as an effective solution of food industry problems / O.G. Burdo, F.A. Trishyn, I.V. Sirotyuk [et al.] // *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2021. Vol. 57. Issue 3. Pp. 330–344. DOI: 10.3103/S1068375521030030. EDN: OIFXKU

12. Chua L.S., Leong C.Y. Effects of microwave heating on quality attributes of pineapple juice // *Journal of Food Processing and Preservation*. 2020. Vol. 44. Issue 10. Pp. 124–136. DOI: 10.1111/jfpp.14786. EDN: MZURTZ

13. Processing of coconut sap into sugar syrup using rotary evaporation, microwave and open heat evaporation techniques / M.T. Asghar, Y.A. Yusof, Mokhtar M. Noriznan [et al.] // *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2020. Vol. 100. Issue 10. Pp. 4012–4019. DOI: 10.1002/jsfa.10446

14. Decoupling thermal effects and possible non-thermal effects of microwaves in vacuum evaporation of glucose solutions / Yuan Tao, Bowen Yan, Nana Zhang [et al.] // *Journal of Food Engineering*. 2023. Vol. 338. Pp. 111–127. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2022.111257

15. Гаврилов А. В., Гербер Ю. Б. Параметры модульных микроволновых вакуум-выпарных установок // *Техника и технология пищевых производств*. 2024. Т. 54. № 1. С. 135–145. DOI: 10.21603/2074-9414-2024-1-2495. EDN: RFEYTO

16. Технологии селективного подвода энергии при выпаривании пищевых растворов / О. Г. Бурдо, А. К. Бурдо, Д. Р. Пур, И. В. Сиротюк // *Проблемы региональной энергетики*. 2017. № 1(33). С. 100–109. EDN: YLOULT

References

1. Islamova O.V., Tokov A.Z., Ataeva F.A. Energy efficiency is the most Important indicator of the quality of food grinders. *Proceedings of the Voronezh state university of engineering technologies*. 2019;82(2):56–62. (In Russ). DOI: 10.20914/2310-1202-2019-2-56-62. EDN: OKUOMG

2. Yang X.-B., Zhao L., Goh K. [et al.]. A phosphotungstic acid coupled silica-nafion composite membrane with significantly enhanced ion selectivity for vanadium redox flow battery. *Journal of Energy Chemistry*. 2020;(41):177–184. DOI: 10.1016/j.jechem.2019.05.022Wang

3. Gavrilov A.V. Experimental modeling of the process of evaporation of aqueous solutions under vacuum and microwave conditions. *Vestnik of federal state educational institution of higher professional education "Moscow state agroengineering university named after V.P. Goryachkin"*. 2020;1(95):41–50. (In Russ). DOI:10.34677/1728-7936-2020-1-41-50. EDN: UFYTIA

4. Simić S., Orašanin G., Golubović D. [et al.]. Consideration of opportunities for the optimization of heat energy consumption in Industry and energetic. *Lecture Notes in Networks and Systems*. 2020;(76):494–503. DOI: 10.1007/978-3-030-18072-0_57

5. Cüneyt Dinçer. Effect of intermittent microwave vacuum concentration on quality parameters of apple juice and sour cherry nectar and mathematical modeling of concentration. *Journal of microwave power and electromagnetic energy*. 2021;55(3):175–196. DOI: 10.1080/08327823.2021.1952837
6. Yuan Tao, Bowen Yan, Nana Zhang. Microwave vacuum evaporation as a potential technology to concentrate sugar solutions: A study based on dielectric spectroscopy. *Journal of food engineering*. 2020;(294):112–126. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2020.110414
7. Bhat Iqra Mohiuddin, Wani Shoib Mohmad, Mir Sajad Ahmad, Naseem Zahida. Effect of microwave-assisted vacuum and hot air oven drying methods on quality characteristics of apple pomace powder. *Food Production, Processing and Nutrition*. 2023;5(26):1–17. DOI: 10.1186/s43014-023-00141-4
8. Kai Liu, Zhenyu Zhao, Hong Li, Xin Gao. Microwave-induced vapor-liquid mass transfer separation technology – full of breakthrough opportunities in electrified chemical processes. *Current Opinion in Chemical Engineering*. 2022;(39):207–216. DOI: 10.1016/j.coche.2022.100890
9. Bozkir H., Tekgül Y. Production of orange juice concentrate using conventional and microwave vacuum evaporation: Thermal degradation kinetics of bioactive compounds and color values. *Journal of Food Processing and Preservation*. 2021;46(7):107–123. DOI: 10.1111/jfpp.15902
10. Delfiya D.S.A., Prashob K., Murali S. [et al.] Drying kinetics of food materials in infrared radiation drying: A review. *Journal of Food Process Engineering*. 2021;45(2):10–23. DOI: 10.1111/JFPE.13810.
11. Burdo O.G., Trishyn F.A., Sirotuk I.V. [et al.]. Electrodynamics processes as an effective solution of food industry problems. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2021;57(3):330–344. DOI: 10.3103/S1068375521030030. EDN: OIFXKU
12. Chua L.S., Leong C.Y. Effects of microwave heating on quality attributes of pineapple juice. *Journal of Food Processing and Preservation*. 2020;44(10):124–136. DOI: 10.1111/jfpp.14786. EDN: MZURTZ
13. Asghar M.T., Yusof Y.A., Noriznan Mokhtar M. [et al.]. Processing of coconut sap into sugar syrup using rotary evaporation, microwave and open heat evaporation techniques. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2020;100(10):4012–4019. DOI: 10.1002/jsfa.10446
14. Tao Yuan, Yan Bowen, Zhang Nana. Decoupling thermal effects and possible non-thermal effects of microwaves in vacuum evaporation of glucose solutions. *Journal of Food Engineering*. 2023;338:111–127. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2022.111257
15. Gavrilov A.V., Gerber Yu.B. Parameters of modular microwave vacuum evaporators. *Food Processing Engineering*. 2024;54(1):135–145. (In Russ). DOI: 10.21603/2074-9414-2024-1-2495. EDN: RFEYTQ
16. Burdo O.G., Burdo A.K., Pur D.R., Sirotuk I.V. Technologies of selective energy supply during evaporation of food solutions. *Probleme energeticii regionale*. 2017;1(33):100–109. (In Russ). <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29043965>. EDN: YLOULT

Сведения об авторе

Гаврилов Александр Викторович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технологии и оборудования производства и переработки продукции животноводства, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Крымский федеральный университет имени В. И. Вернадского», SPIN-код: 9848-4398, Researcher ID: AАН-5137-2019

Information about the author

Alexander V. Gavrilov – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Technology and Equipment for Production and Processing of Animal Products, V.I. Vernadsky Crimean Federal University, SPIN-code: 9848-4398, Researcher ID: AАН-5137-2019

Статья поступила в редакцию 03.10.2025;
одобрена после рецензирования 23.10.2025;
принята к публикации 30.10.2025.

The article was submitted 03.10.2025;
approved after reviewing 23.10.2025;
accepted for publication 30.10.2025.