

Научная статья/Research article

УДК 664.8.022.1

DOI: 10.36718/1819-4036-2026-3-240-251

**Александр Викторович Гаврилов**

Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского, Симферополь, Россия

tehfac@mail.ru

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЫПАРИВАНИЯ ПИЩЕВЫХ СИСТЕМ В СВЧ ПОЛЕ

*Цель исследования – провести экспериментальные исследования кинетики и энергетики предлагаемой технологии выпарки с применением адресной доставки энергии к полярным молекулам с помощью электромагнитных источников энергии СВЧ-диапазона в инновационной выпарной установке. Установлены кинетические зависимости влияния мощности ЭМП, уровня давления, концентрации и вида продукта на удаление влаги и скорость парообразования. Определены динамические параметры при регулировании мощности ЭМП. Обоснована схема предлагаемого вакуум-выпарного аппарата с электромагнитными источниками энергии, при которой получен конечный продукт с концентрацией 90 % сухих веществ. Были проведены экспериментальные исследования на яблочном соке. Исследуемые параметры, влияющие на паропроизводительность установки: влияние давления, удельной мощности электромагнитного поля (ЭМП) и вида продукта. По результатам экспериментов получены зависимости, свидетельствующие, что во время всего процесса скорость выпаривания оставалась постоянной, до конечной концентрации продукта 80–90 %. При этом температура процесса составляет 35–40 °С, что позволяет уменьшить уровень термического воздействия на объект сушки (продукт), это положительно сказывается на качестве и ценности готового продукта, так как позволяет сохранить его биологически активные и термолабильные компоненты, витамины, чего невозможно обеспечить при высоких температурах процесса. Полученные данные свидетельствуют, что при выпаривании пищевых систем возможно перейти от граничных условий третьего рода к условиям второго рода при использовании принципа адресной доставки энергии к полярным молекулам сырья с помощью сверхвысокочастотного (СВЧ) поля. На основании экспериментальных данных предложена критериальная модель, с помощью которой можно точно рассчитать паропроизводительность микроволновой вакуумной выпарной установки. Полученный по предложенной технологии продукт обладает хорошим внешним видом, консистенцией, не имеет постороннего запаха, не подгоревший, что наблюдается в классических выпарных установках. Это приводит к увеличению срока хранения и высокому качеству готового продукта.*

**Ключевые слова:** микроволновое поле, моделирование, энергетическая эффективность, процесс выпаривания, критериальная модель, скорость выпаривания, давление, концентрация, пищевой продукт, мощность

**Для цитирования:** Гаврилов А.В. Экспериментальные исследования выпаривания пищевых систем в СВЧ поле // Вестник КрасГАУ. 2026. № 3. С. 240–251. DOI: 10.36718/1819-4036-2026-3-240-251.

**Alexander V. Gavrilo**

V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol, Russia

tehfac@mail.ru

## EXPERIMENTAL STUDIES OF FOOD SYSTEMS EVAPORATION IN A MICROWAVE FIELD

*The objective of the study is to experimentally investigate the kinetics and energetics of the proposed evaporation technology using targeted energy delivery to polar molecules using microwave electromagnetic energy sources in an innovative evaporation unit. Kinetic relationships were established for the inf-*

fluence of microwave electromagnetic power, pressure, concentration, and product type on moisture removal and the rate of vaporization. Dynamic parameters for regulating the microwave electromagnetic power were determined. The design of the proposed vacuum evaporator with electromagnetic energy sources was substantiated, yielding a final product with a dry matter concentration of 90 %. Experimental studies were conducted on apple juice. The parameters influencing the unit's vapor productivity were the influence of pressure, specific electromagnetic field (EMF) power, and product type. Based on the experimental results, relationships were obtained indicating that the evaporation rate remained constant throughout the process, up to a final product concentration of 80–90 %. The process temperature is 35–40 °C, which reduces the thermal impact on the drying object (product). This positively impacts the quality and value of the finished product, as it preserves its biologically active and heat-sensitive components, including vitamins, which is impossible to achieve at high process temperatures. The obtained data indicate that during the evaporation of food systems, it is possible to transition from boundary conditions of the third kind to conditions of the second kind using the principle of targeted energy delivery to the polar molecules of the raw material using a microwave field. Based on the experimental data, a criteria model is proposed for accurately calculating the steam capacity of a microwave vacuum evaporator. The product obtained using the proposed technology has a good appearance and consistency, is free of foreign odor, and is not burnt, which is observed in traditional evaporators. This leads to an increased shelf life and high quality of the finished product.

**Keywords:** microwave field, modeling, energy efficiency, evaporation process, criteria model, evaporation rate, pressure, concentration, food product, power

**For citation:** Gavrillov AV. Experimental studies of food systems evaporation in a microwave field. *Bulletin of KSAU*. 2026;(3):240-251. (In Russ.). DOI: 10.36718/1819-4036-2026-3-240-251.

**Введение.** Высокий спрос на сухофрукты и концентраты ежегодно возрастает и их ассортимент расширяется. Актуальным вопросом является модернизация технологий обезвоживания сельскохозяйственного сырья и оборудования для их реализации. В этом вопросе имеются проблемы, которые необходимо решать [1–3].

Концентраты пищевых продуктов производят выпариванием, а затем сушкой. Эти процессы физически различны, при том что задача общая – максимально удалить влагу из сырья. На первом этапе пищевой продукт выпаривают, а на втором – высушивают. Процесс выпаривания в 2–3 раза менее энергоемкий и более производительный, чем сушка. В процессе выпаривания происходит теплопередача и с ростом концентрации продукта увеличивается вязкость и гидродинамический слой, растет термическое сопротивление и продукт начинает перегреваться и подгорать. Поэтому на предприятиях ограничивают концентрацию в пределах 35–55 % с последующей передачей полуфабриката в сушильное оборудование, где получают готовый продукт [4–6].

Для обезвоживания применяют мембранные технологии. Но в основном они нашли применение при опреснении и очистке сточных вод, а для концентрирования пищевых продуктов их в основном не используют. Также используют технологии криоконцентрирования, при которых полу-

чают готовый продукт хорошего качества [7–9]. Но энергозатраты в таких технологиях высокие и конечная концентрация готового продукта составляет 50 % сухих веществ. По этой причине для обезвоживания пищевого сырья на пищевых предприятиях применяют выпаривание. Этот процесс хорошо себя зарекомендовал, так как имеет высокую производительность и легко осуществляется [10–12]. Но проблема с вязкостью продукта при увеличении концентрации остается нерешенной. С ростом температуры и термического сопротивления конечную концентрацию продукта в классических выпарных установках невозможно увеличить более 35–55 %.

Поэтому необходимо разработать новую технологию выпарки и оборудование для ее осуществления, с помощью которых концентрация будет на уровне 90 % содержания сухих веществ.

**Цель исследования** – провести экспериментальные исследования кинетики и энергетики предлагаемой технологии выпарки с применением адресной доставки энергии к полярным молекулам с помощью электромагнитных источников энергии СВЧ-диапазона в инновационной выпарной установке.

**Задачи:** определить зависимости влияния мощности ЭМП, уровня давления, концентрации и вида продукта на удаление влаги и скорость парообразования; динамические параметры при регулировании мощности ЭМП; по результатам

экспериментальных исследований получить критериальную модель процесса для выпаривания пищевых систем по принципу адресной доставки энергии в предложенной микроволновой выпарной установке.

**Объекты и методы.** Объектами исследований являются инновационная технология выпаривания сельскохозяйственного сырья и получение концентрированных продуктов; процессы инновационной энергоэффективной вакуум-

выпарной установки. Основным элементом оптимизации – показатели энерготехнологий процесса выпаривания. Для проведения экспериментальных исследований выбраны различные пищевые продукты, которые после определенной подготовки (разбавления с водой) были обозначены как пищевые системы. Объекты исследований и диапазон экспериментального моделирования представлены в таблице 1.

Таблица 1

**Объекты исследований и диапазон экспериментального моделирования**  
**Objects of research and range of experimental modeling**

Объект исследования	Растворитель	Давление, МПа	Температура, °С	Мощность, Вт	Концентрация с.в., %	
					начальная	конечная
Сок яблочный	Вода	0,01–0,02	45–50	200–900	11,6	45,8
Сок эхинацеи	Вода	0,01–0,02	45–50	200–900	13,5	36,3
Сок свекольный	Вода	0,01–0,02	45–50	200–900	12,2	81,3
Молоко	Вода	0,01–0,02	45–50	200–900	12	29
Паста томатная	Вода	0,01–0,02	45–50	200–900	16	54,8

Экспериментальные исследования были проведены в лабораториях ФГАОУ ВО «КФУ им. В.И. Вернадского» на факультете механизации и пищевых технологий.

Одним из основных факторов для выбора объектов исследования был большой спрос на данные продукты: концентраты различных соков, молочные продукты и томатная паста.

Для экспериментальных исследований процесса выпаривания использовали микроволновую вакуумную установку. Для сбора данных текущих параметров процесса использовали компьютеризированный комплекс, который в on-line режиме отражал основные характеристики процесса.

Экспериментальные исследования для выявления оптимальных параметров и эффективности процесса проводили при значениях мощности электромагнитного поля и остаточного давления в следующих диапазонах:

- мощность ЭМП – от 200 до 900 Вт;
- остаточное давление – от 10 до 20 кПа.

Экспериментальным образцом пищевой системы являлся яблочный сок.

Методики определения качественных характеристик получаемого продукта:

– для определения органических кислот и углеводов в концентрированном яблочном соке использовалась методика высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ) [13]. В ка-

честве рабочей колонки применялась колонка Supelcogel C610H. Для проведения анализа концентрированный яблочный сок разбавлялся дистиллированной водой в соотношении 1 : 10;

– определение биологически активных (фенольных) соединений, фурфурола и гидроксиметилфурфурола в концентрированном яблочном соке, применялась методика высокоэффективной жидкостной хроматографии ВЭЖХ [14]. Перед проведением анализа разбавление концентрированного яблочного сока не производилось.

Определение сравнительных качественных показателей получаемых продуктов проводили при следующих параметрах:

– при получении продукта в сушильном вакуум-выпарном аппарате по традиционной (существующей) технологии температура кипения пищевой системы  $t_{\text{кип}} = 65\text{--}70$  °С, остаточное давление  $P_{\text{ост}} = 40\text{--}50$  кПа, время процесса  $t = 300$  мин; конечная концентрация с.в. (сухих веществ) продукта  $X = 69,5$  °Brix;

– при получении продукта по предлагаемому способу в СВЧ-вакуум-аппарате температура кипения пищевой системы  $t_{\text{кип}} = 35\text{--}40$  °С, остаточное давление  $P_{\text{ост}} = 10\text{--}20$  кПа, время процесса  $t = 120$  мин; конечная концентрация с.в. (сухих веществ) продукта  $X = 67$  °Brix.

Перерасчет качественных показателей для концентрированного яблочного сока в мг/кг или г/кг был произведен на сухой вес продукта. Ре-

зультаты определения качественного состава получаемого продукта разными методами приведены в таблице 2.

Предложенная программа исследований заключалась в отображении на экране термограмм убыли влаги из камеры установки и значений скорости удаления влаги (г/мин). Масса конденсата в сборнике регистрировалась на весах. Следовательно, выход пара фиксировался с высокой точностью.

Масса сухих веществ объектов исследования высушивалась и взвешивалась на аналитических весах Radwag AS 220/C с ошибкой  $\pm 0,0004$  г. Концентрация сухих веществ в соках, молочных продуктах и томатной пасте измерялась рефрактометром Hanna Instruments HI 96801.

Процесс выпаривания пищевых систем проходил под воздействием ЭМП СВЧ-диапазона. Таймер СВЧ-установки тарировался цифровым секундомером с погрешностью  $\pm 0,2$  %.

Температура растворов измерялась электронным контактным термометром DAN-1000 с погрешностью  $0,5$  °С, а с термопарой –  $1,5$  °С.

Для безопасной работы микроволновой выпарной установки важно, чтобы не было утечки ЭМП, которое негативно воздействует на организм человека и производительность установки.

Поэтому установка должна быть герметичной и не пропускать электромагнитные волны. Утечку микроволнового поля определяли многофункциональным измерителем напряжения ЭМП Tenmars TM-190, который показывал, в каком месте и какая степень утечки. Погрешность составляла 2 дБ на 2,45 ГГц.

Степень разряжения определялась стандартным вакуумметром класса точности 0,4 и создавалась вакуум-насосом TW-1A.

Органические кислоты и углеводы в концентрированных соках определялись по методике с использованием высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ) [13, 14].

**Результаты и их обсуждение.** Эксперименты были проведены на стенде. Схема экспериментального стенда представлена на рисунке 1.

Экспериментальный стенд представлен камерой выпаривания (1), конденсатором (2), водоохладителем (3), сборником для конденсата (4), вакуум-насосом (5), ИВК (6), вакуумметром (8), блоком электроники (9) и управления (10). Паропровод (7) соединяет камеры выпаривания и конденсатора. БЭУ регулирует мощность и время. Процессор (6) ПК обеспечивал обработку поступающей информации.

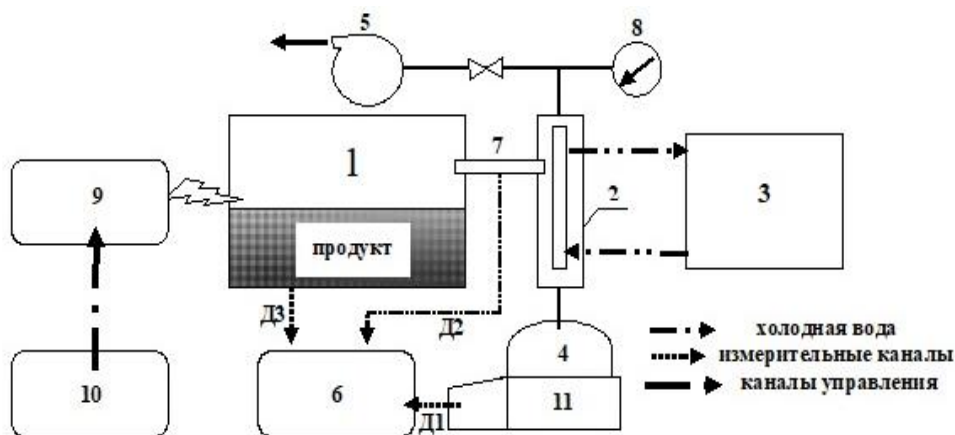


Рис. 1. Схема экспериментального стенда  
Scheme of the experimental stand

При работе стендовой установки значения исследуемых параметров поступали через датчики на измерительно-вычислительный комплекс (6). Показатели количества влаги поступали от весов (11) через датчик Д1; значения температуры пара в паропроводе (7) – через датчик Д2; показатели объема и концентрации продукта в камере выпаривания (1) – через дат-

чик Д3. Разработанная программа для ИВК, в соответствии с полученными значениями (кинетики удаления влаги из камеры, термограмм), предусматривала автоматическое построение графиков зависимостей, отображающихся на мониторе ИВК.

Варьируемыми параметрами были мощность магнетрона, объем продукта и его концентрация.

При проведении экспериментов одним из этапов являлось определение влияния мощности электромагнитных источников, давления, концентрации, вида продукта на удаление влаги и скорость парообразования и разработка критериальной модели процесса в соответствии с полученными результатами.

Зависимости влияния исходных параметров на удаление влаги из продукта представлены на

рисунках 2–4. Исходным продуктом выбран яблочный сок.

*Влияние давления.* Исследования влияния давления проводились при минимальных значениях, при которых температура процесса была в пределах 35–40 °С, что очень важно при переработке пищевых продуктов. Зависимость температуры выпаривания от давления представлена на рисунке 2.

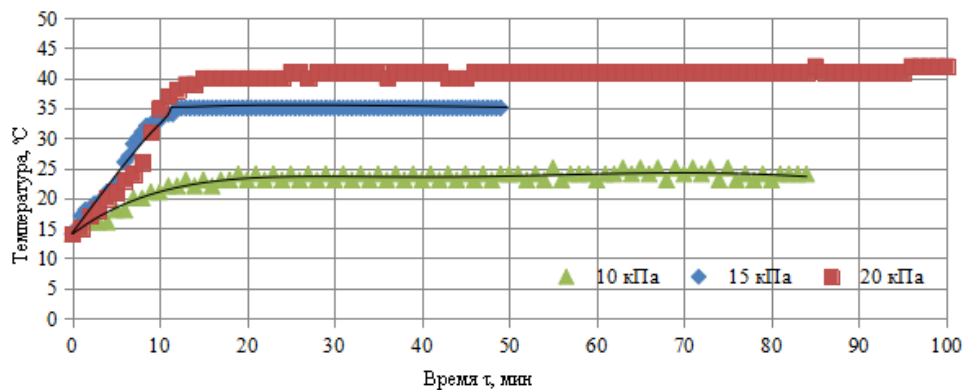


Рис. 2. Зависимость температуры выпаривания от давления  
*Dependence of evaporation temperature on pressure*

Температура выпаривания стабильная (35–40 °С), что важно при переработке термолабильного пищевого сырья (рис. 2). Конструкция установки герметичная и сохраняет вакуум, что важно для безопасности процесса.

Из рисунка 2 видно, что рост давления ведет к повышению температуры кипения сока и, как следствие, к негативным последствиям – сок-

ращению пищевой ценности конечного продукта, который подвергается высокому тепловому режиму и длительной обработке.

Следующий шаг: определить, как влияет давление на концентрирование продукта. Зависимость величины концентрации от давления представлена на рисунке 3.

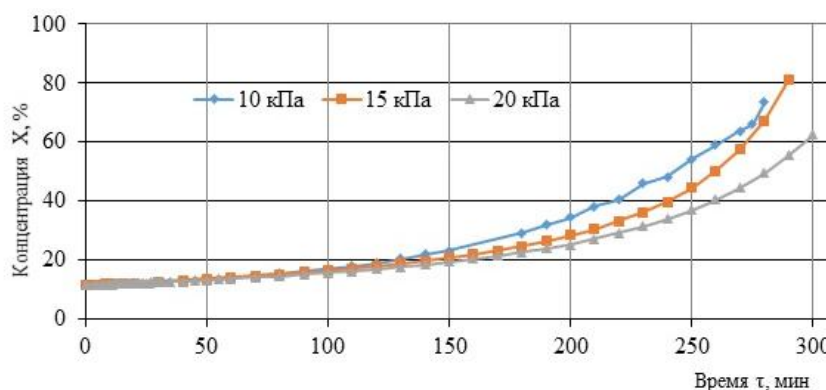


Рис. 3. Зависимость величины концентрации от давления  
*The dependence of the concentration value on pressure*

Аналогичные выводы можно сделать и по поводу изменения концентрации продукта – рост давления приводит к уменьшению концентрации продукта (см. рис. 3).

Определим паропроизводительность ( $W$ ). Зависимость скорости выпаривания от давления представлена на рисунке 4. Зависимость построена в широком диапазоне концентраций продукта.

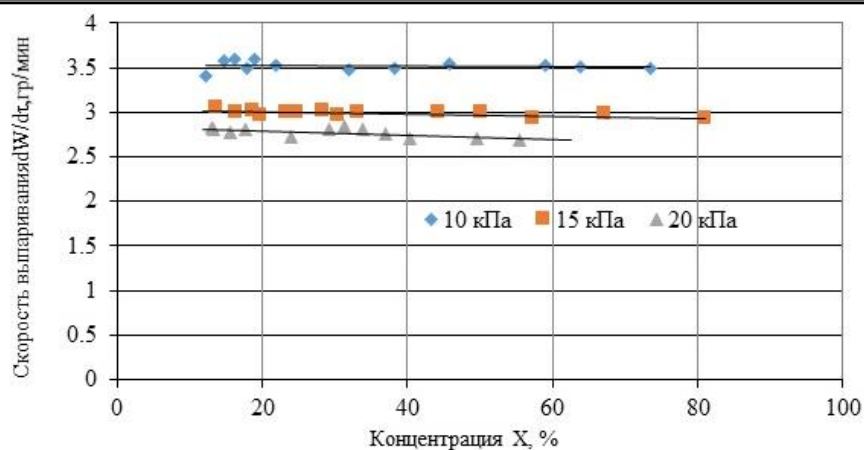


Рис. 4. Зависимость скорости выпаривания от давления  
Dependence of evaporation rate on pressure

Скорость выпаривания напрямую зависит от давления в установке и не зависит от значения концентрации (см. рис. 4). С увеличением давления в установке скорость выпаривания снижается.

На основании экспериментальных исследований установлено, что выпаривание в установке необходимо проводить при низком давлении, которое обеспечивает меньшую температуру кипения. Процесс пройдет за короткое время и при минимальных энергетических затратах. Осуществление процесса при таких условиях приведет к получению продукта с более высокой концентрацией и пищевой ценностью, что является главным при выпаривании.

Экспериментальные исследования проведены в широком диапазоне влияния давления в процессе выпаривания, а также на работу предлагаемой установки.

Следующим этапом для определения эффективности процесса выпаривания рассмотрим влияние мощности ЭМП.

*Влияние мощности ЭМП.* В исследованиях заданы исходные параметры: давление – 10 кПа, концентрация яблочного сока и объем, составляющий 1 л. Зависимость температуры выпаривания яблочного сока от мощности ЭМП представлена на рисунке 5.

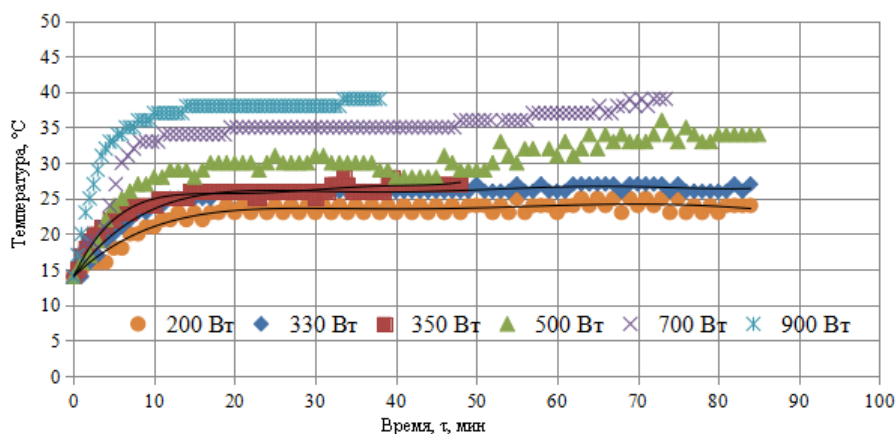


Рис. 5. Зависимость температуры выпаривания яблочного сока от мощности ЭМП  
Dependence of the apple juice evaporation temperature on the EMF power

Был исследован широкий диапазон процесса, при котором температура при всех режимах оставалась постоянной, что соответствует получению качественного продукта (см. рис. 5).

Мощность ЭМП влияет на время процесса и значение конечного концентрирования сока. Рост концентрации яблочного сока от мощности ЭМП представлен на рисунке 6.

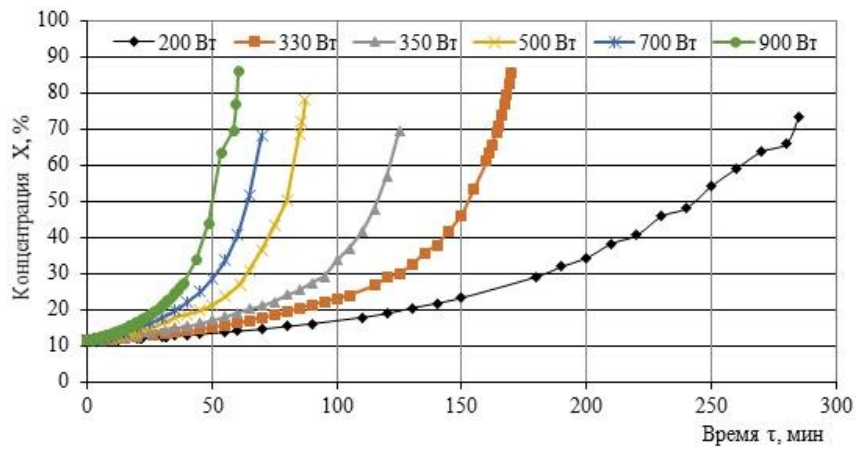


Рис. 6. Рост концентрации яблочного сока от мощности ЭМП  
Increase in apple juice concentration due to EMF power

Из рисунка 6 видно, что с увеличением мощности возрастает концентрация пищевого раствора и сокращается время процесса.

Мощность ЭМП непосредственно влияет на паропроизводительность установки. Зависимость скорости выпаривания от мощности ЭМП представлена на рисунке 7. На представленном графике видно, что мощность от 200 до 900 Вт изменяется в 5 раз.

В результате исследований получены зависимости (см. рис. 7), которые отражают, что во время опытов во всем диапазоне скорость парообразования не изменялась, вплоть до концентрации 90 %, и не зависела от температуры. Температура во время процесса постоянная и не превышала 40 °С (см. рис. 5).

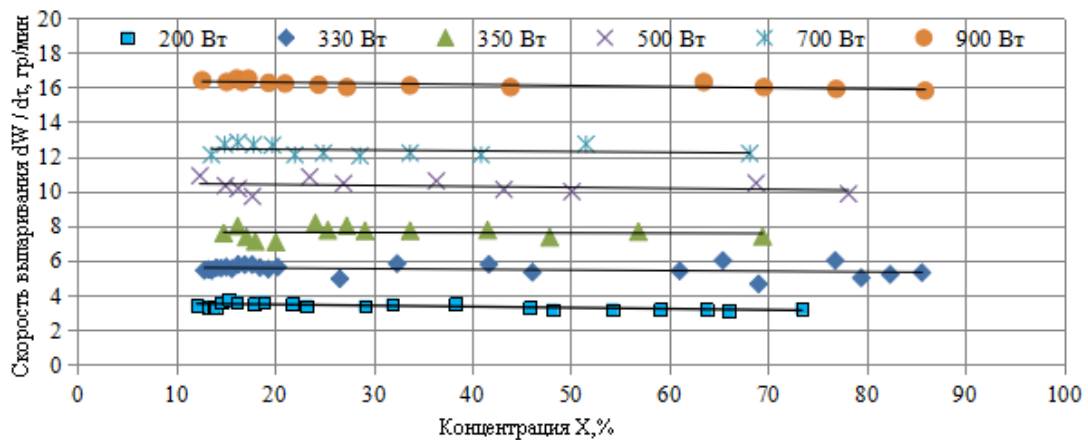


Рис. 7. Зависимость скорости выпаривания от мощности ЭМП  
Dependence of evaporation rate on EMF power

Представленные зависимости подтверждают принцип адресной доставки энергии и ее селективного действия на компонентный состав исследуемой пищевой системы, заключающийся в явлении специфического влияния электромагнитного поля СВЧ-диапазона на полярные молекулы компонентов, к которым относится в том числе и влага (вода), содержащаяся в продукте. Воздействие ЭМП на полярные молекулы влаги вызывает их колебание, в результате и нагрев пищевой системы во всем объеме исследуемо-

го образца, что ведет к выпариванию влаги и концентрации сухих веществ пищевого продукта. При этом, благодаря пониженному давлению, процесс обезвоживания протекает при температурах, которые не оказывают влияние на распад термолабильных комплексов (витамины, биологически активные вещества, микроэлементы и пр.), что свидетельствует о сохранении качества и пищевой ценности продукта (табл. 2).

**Сравнение показателей качества концентрированного сока яблочного, полученного по традиционному (существующему) методу и инновационному (предлагаемому) методу**  
**Comparison of quality indicators of concentrated apple juice obtained by the traditional (existing) method and the innovative (proposed) method**

Показатель	Традиционная (существующая) технология с применением вакуум-выпарного аппарата	Предлагаемая технология с применением инновационного СВЧ вакуум-выпарного аппарата
Влажность, %	30,50±0,2	20,09±0,2
Сухое вещество, %	69,50±0,2	79,91±0,2
Плотность, кг/дм <sup>3</sup> (при 20 °С)	1,3244±0,0005	1,3104±0,0005
5-Гидроксиметилфурфурол, мг/кг	37,1±0,8	2,1±0,1
Фурфурол, мг/кг	3,0±0,1	0,3±0,1
Процианидин В1, мг/кг	128,8±5,4	143,3±6,8
(+)-D-Катехин, мг/кг	75,3±3,8	85,5±4,0
Процианидин В2, мг/кг	215,8±6,3	222,5±7,1
Хлорогеновая кислота, мг/кг	2310,3±33,9	2439,7±29,6
Процианидин С1, мг/кг	100,6±4,8	102,8±6,2
(-)-Эпикатехин, мг/кг	347,5±7,3	373,1±9,5
Флоридзин, мг/кг	26,0±0,9	30,6±0,8
Рутин, мг/кг	5,3±0,2	6,4±0,3
Флоретин, мг/кг	10,9±1,1	14,4±1,6
Лимонная кислота, г/кг	1,0±0,1	1,0±0,1
Яблочная кислота, г/кг	63,0±0,3	63,6±0,5
Глюкоза, г/кг	308,7±2,6	308,3±3,1
Фруктоза, г/кг	646,4±2,5	648,4±3,0
Сумма сахаров, г/кг	955,0±5,1	956,7±6,1

В представленных данных таблицы 2 видно, что при применении предлагаемой технологии сушки продукта витамины, биологически активные вещества, полифенолы, каротиноиды сохраняются в более полном объеме по сравнению с существующей технологией. Фурфурол и гидроксиметилфурфурол кратно ниже в сравнении с существующим методом. Содержание сахара, органических кислот, одних из основных компонентов продукта, не уменьшается в сравнении с существующим методом сушки. Качественный состав готового продукта, полученного по предлагаемой технологии, более близок к нативному содержанию его в свежих плодах.

По такому принципу проведены исследования для выбранных продуктов и пищевых систем (см. табл. 1). Результаты представлены в зависимости от повышения концентрации исследуемого продукта.

Степень повышения концентрации пищевых систем представлена на рисунке 8. В экспериментах было выбрано давление 10 кПа и мощность ЭМП 200 Вт.

Из рисунка 8 видно, что для продуктов и модельных растворов на водной основе соответствует одинаковая степень концентрации.

Результаты обобщены методом теории подобия. Для каждого опыта рассчитывали энергетическое воздействие

$$Bu = \frac{N}{W \cdot r}, \quad (1)$$

где  $Bu$  – значение энергетического воздействия;  $N$  – мощность ЭМП, Вт;  $W$  – скорость извлечения влаги, кг/с;  $r$  – теплота парообразования, Дж/кг.

В каждом опыте была определена безразмерная паропроизводительность ( $W$ ), полученная делением базового числа энергетического воздействия ( $Bu_B$ ) на текущее ( $Bu_T$ ).

Все экспериментальные данные обработаны и представлена критериальная модель

$$W = \frac{W}{W_6} = 0,575 \cdot Bu^{-1} \cdot \Omega^{0,98} \cdot P^{-0,58}. \quad (2)$$

Обобщенные экспериментальные данные представлены на рисунке 9.

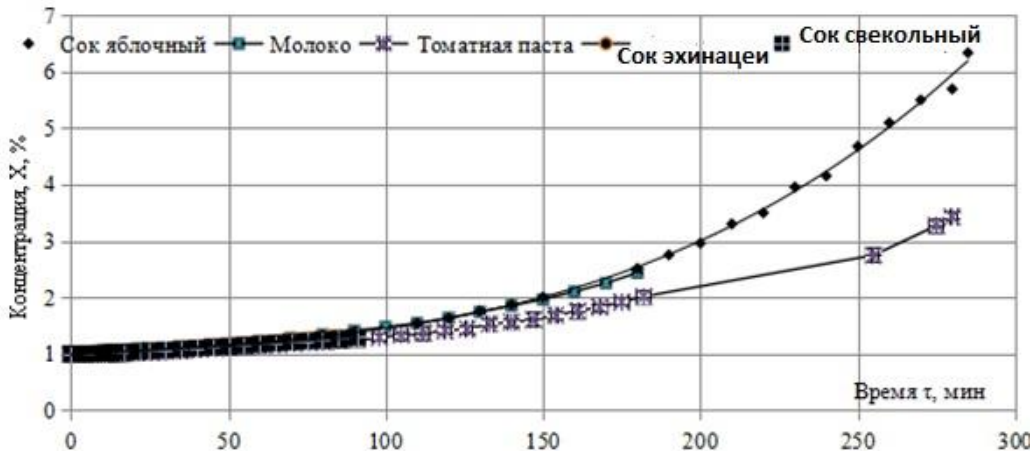


Рис. 8. Степень повышения концентрации пищевых систем  
The degree of increased concentration of food systems

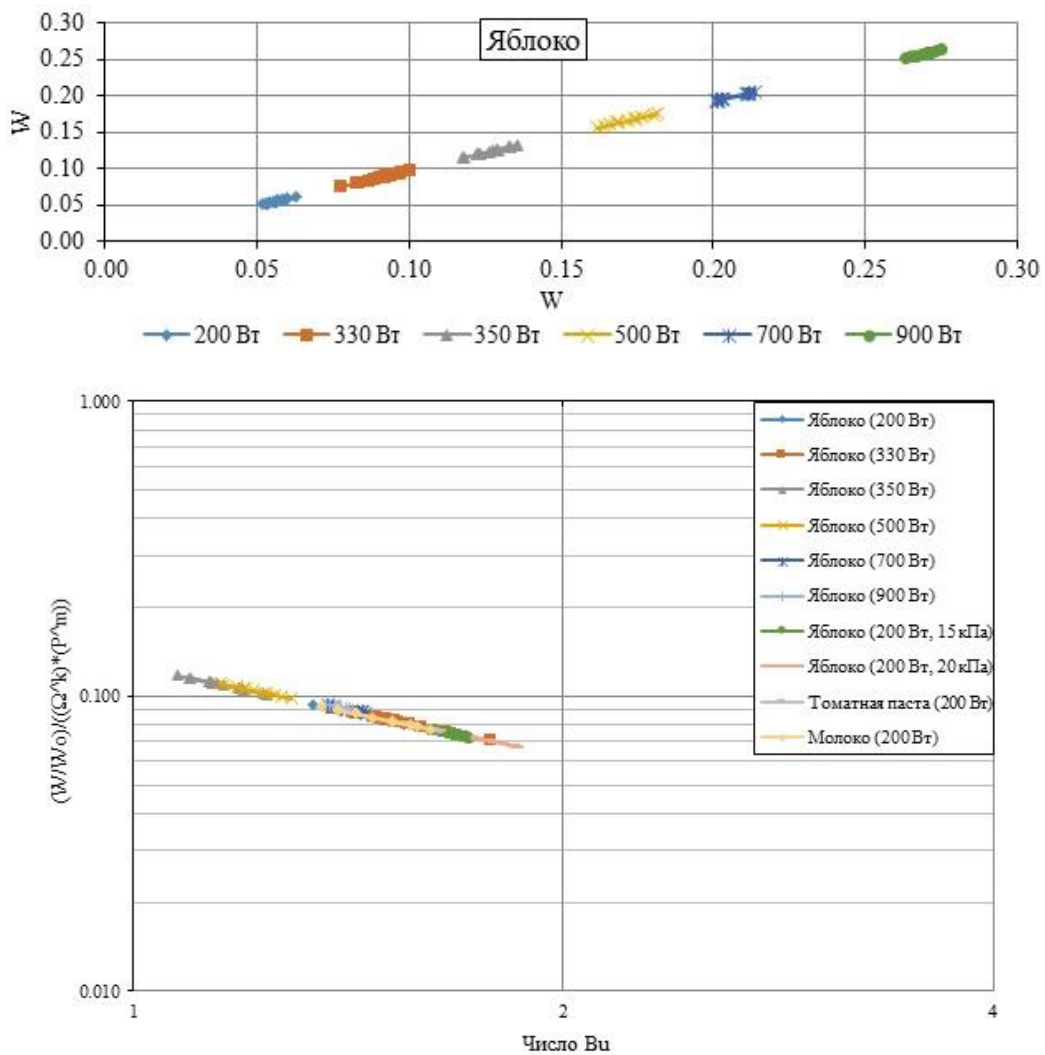


Рис. 9. Обобщенные экспериментальные данные  
Generalized experimental data

Адекватность полученного соотношения (2) проверена сравнением расчетных и экспериментальных значений параметрического комплекса безразмерной паропроизводительности ( $W$ ) установки для всех пищевых систем (см. рис. 9).

Полученная зависимость позволяет рассчитать паропроизводительность микроволновой вакуум-выпарной установки непрерывного действия при уровне безразмерной мощности  $1 \leq N \leq 2,27$ , в диапазоне безразмерного давления  $2 \leq P \leq 16$  и при уровне безразмерной теплоты фазового перехода  $3,32 \leq R \leq 4,56$ . Точность с максимальным отклонением  $\pm 8\%$ .

**Заключение.** Установлены кинетические зависимости влияния мощности ЭМП, уровня давления, концентрации и вида продукта на удаление влаги и скорость парообразования.

Определены динамические параметры при регулировании мощности ЭМП.

Использование в процессах выпаривания принципа воздействия ЭМП СВЧ-диапазона путем адресной доставки энергии к полярным молекулам воды (влаги внутри капилляров) позво-

ляет создать установки для комплексной технологии переработки пищевого сырья при минимальных затратах энергии и повысить конечную концентрацию готового продукта до 90 % сухих веществ при низкой температуре 40 °С.

По полученным данным предложена критериальная модель в безразмерной форме, которая может использоваться при разработке выпарных установок с вакуумом в СВЧ-поле.

Полученный по предложенной технологии продукт обладает хорошим внешним видом, консистенцией, не имеет постороннего запаха, не подгоревший, что наблюдается в классических выпарных установках. Это приводит к увеличению срока хранения и высокому качеству готового продукта. Предлагаемая технология выпаривания пищевых систем является коммерчески привлекательной на рынке.

#### Список источников

1. Kai L., Zhenyu Zh., Hong L., et al. Microwave-induced vapor-liquid mass transfer separation technology – full of breakthrough opportunities in electrified chemical processes // *Current Opinion in Chemical Engineering*. 2022. Vol. 39. P. 207–216. DOI: 10.1016/j.coche.2022.100890.
2. Bozkir H., Tekgöl 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, N 7. P. 107–123. DOI: 10.1111/jfpp.15902.
3. Delfiya D.S. Drying kinetics of food materials in infrared radiation drying: A review // *Journal of Food Process Engineering*. 2021. Vol. 45, N 2. P. 10–23. DOI: 10.1111/JFPE.13810.
4. Гербер Ю.Б., Гаврилов А.В. Устройство микроволновой вакуум-выпарной установки непрерывного действия. Патент РФ 213932. 05.10.2022.
5. Lohrasbi-Nejad S., Shahedi M., Fathi M. Comparative Study of Microwave-Assisted Vacuum Evaporation, Microwave-Assisted Evaporation, and Conventional Evaporation Methods on Physicochemical Properties of Barberry Juice // *JAST*. 2021. Vol. 23, N 2. P. 307–317. DOI: jast.modares.ac.ir/article-23-33795-en.
6. 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, N 3. P. 175–196. DOI: 10.1080/08327823.2021.1952837.
7. Burdo O.G. Electrodynamics processes as an effective solution of food industry problems // *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2021. Vol. 57, N 3. P. 330–344. DOI: 10.3103/S1068375521030030.
8. Yuan T., Bowen Ya., Nana Zh. Microwave vacuum evaporation as a potential technology to concentrate sugar solutions: A study based on dielectric spectroscopy // *Journal of Food Engineering*. 2020. Vol. 294. P. 112–126. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2020.110414.
9. 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, N 10. P. 124–136. DOI: 10.1111/jfpp.14786.
10. Asghar M.T., Yusof Y.A., Noriznan Mokhtar M. 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. Vol. 100, N 10. P. 4012–4019. DOI: 10.1002/jsfa.10446.

11. Alvi T., Khan M.K.I., Maan A.A. Modelling and Kinetic Study of Novel and Sustainable Microwave-Assisted Dehydration of Sugarcane Juice // *Processes*. 2019. Vol. 7, N 10. Art. 712. DOI: 10.3390/pr7100712.
12. Бурдо О.Г., Шит М.Л., Зыков А.В., и др. Технологии адресной доставки энергии и термотрансформации при производстве продуктов питания // Научный, информационно-аналитический и инженерный журнал. Институт энергетики. Проблемы региональной энергетики. 2016. № 2 (31). С. 55–68.
13. Costa M.P., Frasao B.S., Carneiro B.R., et al. Simultaneous analysis of carbohydrates and organic acids by HPLCDAD-RI for monitoring goat's milk yogurts fermentation // *Talanta*. 2016. N 152. P. 162–170. DOI: 10.1016/j.talanta.2016.01.061.
14. Kschonsek J., Wolfram Th., Stöckl A., et al. Polyphenolic compounds analysis of old and new apple cultivars and contribution of polyphenolic profile to the In vitro antioxidant // *Antioxidants* (Basel, Switzerland). 2018. N 7. DOI: 10.3390/antiox7010020.

### References

1. Kai L, Zhenyu Zh, Hong L, et al. 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.
2. 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.
3. Delfiya DS. 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.
4. Gerber YuB, Gavrilov AV. Device for a continuous microwave vacuum evaporator. Pat. 213932 RU. Inventions. Utility models. 05.10.2022. (In Russ.).
5. Lohrasbi-Nejad S, Shahedi M, Fathi M. Comparative Study of Microwave-Assisted Vacuum Evaporation, Microwave-Assisted Evaporation, and Conventional Evaporation Methods on Physicochemical Properties of Barberry Juice. *JAST*. 2021;23(2):307-317. DOI: jast.modares.ac.ir/article-23-33795-en.
6. 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.
7. Burdo OG. Electrodynamics processes as an effective solution of food industry problems. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2021;57(3):330-344. DOI: 10.3103/S1068375521030030.
8. Yuan T, Bowen Ya, Nana Zh. 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.
9. Chua LS, Leong CY. 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.
10. Asghar MT, Yusof YA, Noriznan Mokhtar M. 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.
11. Alvi T, Khan MKI, Maan AA. Modelling and Kinetic Study of Novel and Sustainable Microwave-Assisted Dehydration of Sugarcane Juice. *Processes*. 2019;7(10):712. DOI: 10.3390/pr7100712.
12. Burdo OG, Shit ML, Zykov AV, et al. Technologies of targeted energy delivery and thermotransformation in food production. *Scientific, information-analytical and engineering journal. Institute of Energy. Problems of regional energy*. 2016;2(31):55-68. (In Russ.).
13. Costa MP, Frasao BS, Carneiro BR, et al. Simultaneous analysis of carbohydrates and organic acids by HPLCDAD-RI for monitoring goat's milk yogurts fermentation. *Talanta*. 2016;152:162-170. DOI: 10.1016/j.talanta.2016.01.061.

14. Kschonsek J, Wolfram Th, Stöckl A, et al. Polyphenolic compounds analysis of old and new apple cultivars and contribution of polyphenolic profile to the In vitro antioxidant. *Antioxidants (Basel, Switzerland)*. 2018;7. DOI: 10.3390/antiox7010020.

Статья принята к публикации 03.02.2026 / The article accepted for publication 03.02.2026.

Информация об авторах:

**Гаврилов Александр Викторович**, доцент кафедры технологии и оборудования производства и переработки продукции животноводства, кандидат технических наук, доцент

Information about the authors:

**Alexander Viktorovich Gavrilo**v, Associate Professor at the Department of Technology and Equipment for Production and Processing of Animal Products, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

