

Особенности кинетики микроволновой сушки яблок

Анатолий Н. Поперечный¹
Борис Ю. Байда¹

oborud@kaf.donnuet.ru
bayda.boris@mail.ru

 0009-0007-5931-3545
 0009-0007-4157-3269

¹ Донецкий национальный университет экономики и торговли имени Михаила Туган-Барановского, пр-кт Театральный 28, Донецк, 283001, Россия

Аннотация. Сушка является одной из наиболее энергоёмких операций пищевой технологии, существенно влияющей на качество готового продукта. Целью работы является исследование кинетики микроволновой сушки яблок и установление рациональных режимов процесса. В качестве объекта исследования выбраны плоды яблоки сорта Антоновка, нарезанные кубиками с размером грани 4,5; 7,5 и 10 мм, исходной влажностью 80–86 %. Эксперименты проводили на лабораторной СВЧ-установке с объёмным резонатором при подводимой мощности 200, 300 и 400 Вт. Влажность образцов определяли весовым методом на электронных весах SNUGP-300, температуру – термопарами ХК-0,25 с регистрацией прибором ЭПП-09 и дублированием инфракрасным термометром АР-360А. Получены кривые сушки и скорости сушки, а также температурные кривые слоя яблок при различных режимах СВЧ-нагрева. Установлено, что процесс носит трёхпериодный характер: прогрев материала, период постоянной скорости (от 80 до 20 % влажности) с интенсивным удалением адсорбционной и осмотической влаги, и период падающей скорости (от 30 до 10 % влажности) с удалением структурной влаги клеток. Показано, что определяющим параметром, влияющим на продолжительность сушки и качество продукта, является плотность теплового потока: с повышением мощности продолжительность сушки сокращается, а кусочки приобретают пористую структуру с улучшенной восстановительной способностью. Сравнительный анализ органолептических и физико-химических показателей сушёных яблок, полученных при СВЧ-нагреве, подтвердил их соответствие установленным требованиям. Полученные экспериментальные данные могут быть использованы при проектировании промышленных СВЧ-сушилок и в технологии производства яблочных порошков для пищевой промышленности.

Ключевые слова: микроволновая сушка, СВЧ-нагрев, яблоки, кинетика сушки, влажность, скорость сушки, температурные кривые, яблочный порошок.

Features of the kinetics of microwave drying of apples

Anatoly N. Poperechny¹
Boris Y. Baida¹

oborud@kaf.donnuet.ru
bayda.boris@mail.ru

 0009-0007-5931-3545
 0009-0007-4157-3269

¹ Donetsk National University of Economics and Trade named after Mykhailo Tugan-Baranovsky, 28, Teatralny Ave, Donetsk, 283001, Russia

Abstract. Drying is one of the most energy-intensive operations in food technology and has a substantial impact on the quality of the finished product. The aim of this work is to investigate the kinetics of microwave drying of apples and to determine the rational process parameters. The objects of study were Antonovka apples cut into cubes with edge sizes of 4.5, 7.5 and 10 mm and an initial moisture content of 80–86%. The experiments were carried out on a laboratory microwave installation with a volume resonator at supplied powers of 200, 300 and 400 W. The moisture content of the samples was determined gravimetrically using SNUGP-300 electronic scales; the temperature was measured with ChK-0.25 thermocouples and recorded by an EPP-09 instrument, duplicated with an AP-360A infrared thermometer. Drying curves, drying rate curves and temperature curves of the apple layer were obtained for different microwave heating modes. The process was found to be three-period: heating of the material, the period of constant rate (from 80 to 20% moisture) with intensive removal of adsorption and osmotic moisture, and the period of falling rate (from 30 to 10% moisture) with the removal of structural cell moisture. It was shown that the heat flux density is the governing parameter that affects the drying time and the product quality: as the power increases, the drying time is reduced, and the pieces acquire a porous structure with improved rehydration capacity. A comparative analysis of the organoleptic and physico-chemical characteristics of dried apples obtained by microwave heating confirmed their compliance with the established requirements. The experimental data obtained can be used in the design of industrial microwave dryers and in the technology of apple powder production for the food industry.

Keywords: microwave drying, MW heating, apples, drying kinetics, moisture content, drying rate, temperature curves, apple powder.

Введение

Процессы сушки влажных материалов являются одними из наиболее энергоёмких в пищевой технологии; от них во многом зависит качество готовых продуктов. Поэтому интенсификация процесса, способствующая экономии энергии, повышению качества продукта

и расширению возможностей управления процессом, остаётся актуальной на протяжении десятков лет. Основной ассортимент сухофруктов, вырабатываемых в России, – виноград, абрикосы, сливы, вишни и семечковые плоды (яблоки и груши) [1, 2, 7, 16].

Яблоки – самая распространённая плодовая культура: на её долю приходится более 80%

Для цитирования

Поперечный А.Н., Байда Б.Ю. Особенности кинетики микроволновой сушки яблок // Вестник ВГУИТ. 2026. Т. 88. № 3. С. 58–63. doi:10.20914/2310-1202-2026-3-58-63

For citation

Poperechny A.N., Baida B.Y. Features of the kinetics of microwave drying of apples. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2026. vol. 88. no. 3. pp. 58–63. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2026-3-58-63

всех площадей, занятых семечковыми. Многие сорта яблок хорошо выдерживают транспортирование и длительное хранение, в большом количестве плоды используют для различных способов консервирования и сушки. В плодах в среднем содержится 86,5% воды. Для удлинения сроков использования плодов их подвергают переработке, одним из важнейших способов которой является сушка. Для сушки используют кисло-сладкие сорта яблок, которые после очистки не очень быстро темнеют (например, Антоновку), с содержанием сухих веществ не менее 12%. Продолжительность конвективной сушки при температуре воздуха 85–90 °С составляет 12–14 часов [2–5].

Сушёные яблоки являются хорошим источником легкоусваиваемых сахаров (содержат от 8 до 15%) и микроэлементов (до 0,5% различных минеральных солей), а в семенах одного среднего плода содержится около суточной нормы йода [21, 22]. Например, яблоки сорта Антоновка в 100 г при калорийности 48 ккал содержат: 0,3 г белков, 11,5 г углеводов, 0,02 мг витамина В₁, 4,9 мг витамина С, 16 мг кальция и 86 мг калия. Семена яблок содержат ядовитый гликозид амигдалин и в пищевой промышленности не используются.

Разрабатываются новые прогрессивные схемы производства и методы использования низких температур как факторов, ускоряющих ведение процесса и улучшающих качество конечного продукта. Внедрение в овощесушильную промышленность прогрессивных методов обезвоживания пищевых продуктов (сублимации, сушки в кипящем и аэрокипящем слое, термоизлучением, микроволновой, распыливанием и кондуктивным способом) позволит улучшить качество сушёной продукции и расширить её ассортимент [4, 5, 8, 17].

Одной из самых эффективных известных методик обработки пищевого сырья с целью значительного сокращения продолжительности процесса, энергозатрат и увеличения сроков хранения продукции является микроволновая технология [6, 9, 10]. При выборе параметров электромагнитного поля (частоты и напряжённости) необходимо обеспечить эффективную работу СВЧ-генератора и подвод удельной мощности заданной величины с учётом диэлектрических свойств пищевого сырья и необходимой глубины проникновения электромагнитного поля [18, 19, 20].

Цель работы – исследование кинетики микроволновой сушки яблок сорта Антоновка при различных режимах подводимой мощности

СВЧ-нагрева и установление рациональных параметров процесса для получения сушёного продукта высокого качества.

Материалы и методы

Работы, проведённые по сушке овощей и фруктов с использованием энергии сверхвысокой частоты (СВЧ), показывают, что этот способ обладает рядом преимуществ по сравнению с конвективной сушкой [11, 12, 13]. Проникающий эффект микроволн и высокое поглощение их молекулами воды интенсифицирует процесс сушки [14, 15]. Поглощённая энергия быстро превращается в теплоту внутри кусочков, вследствие чего давление во внутренних слоях повышается до такой степени, что частицы не только не уменьшаются, а увеличиваются в объёме и сохраняют его при досушке. В результате получается пористый сушёный продукт с улучшенной способностью восстановления. При этом время, необходимое для восстановления сушёного продукта, составляет около 10 мин (для продукта, полученного конвективным общепринятым способом, – 20–25 мин).

Преимущества сушки СВЧ заключаются также в возможности регулирования и поддержания определённой температуры материала, значительной интенсификации процесса обезвоживания и улучшения качества сушёных продуктов.

Проведены экспериментальные исследования по сушке яблок сорта Антоновка, нарезанных кубиками с размером грани 4,5; 7,5 и 10 мм в условиях диэлектрического нагрева – в микроволновом поле СВЧ-установки (рисунок 1).

Учитывая перспективность использования яблочных выжимок с целью получения из них сухого пектина, проведены также предварительные исследования по их сушке при СВЧ-нагреве.

Яблоки перед сушкой подвергались мойке, затем очищались от кожицы и удалялись сердцевинки. Для того чтобы нарезанные на кубики яблоки не темнели при сушке и последующем хранении, они сульфитировались путём погружения в раствор сернистой или лимонной кислоты 0,15%-ной концентрации на 2 мин. После стекания излишнего раствора яблоки загружались в сетчатую диэлектрическую кювету 8 с подставкой из диэлектрика и помещались на сушку в СВЧ-камеру.

Для определения количества влаги, которая испарялась за счёт подвода микроволновой энергии, через определённое время нагрева заложенная в камеру кювета (рисунок 2)

с продуктом вынималась из камеры и взвешивалась на электронных лабораторных весах типа SNUGP-300. В это же время замерялась температура продукта с помощью термопар ХК – 0,25 и прибора ЭПП-09, а также дублировалась ИК-термометром АР-360А. После этого образец опять помещался в рабочую камеру для продолжения опыта.

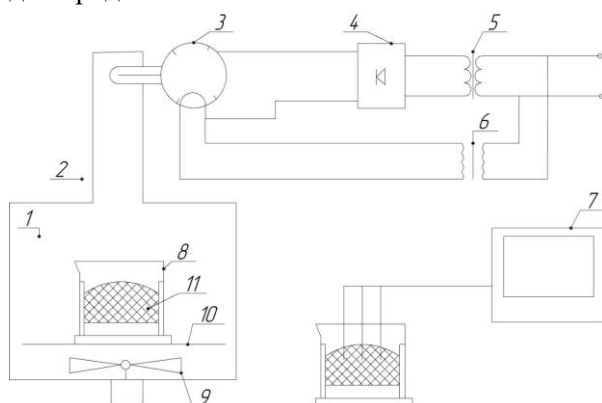


Рисунок 1. Схема экспериментальной установки для исследования процессов нагрева в СВЧ-поле: 1 – рабочая камера (объемный резонатор); 2 – волновод; 3 – магнетрон; 4 – выпрямитель; 5 – анодный трансформатор; 6 – накальный трансформатор; 7 – самописец ЭПП-09; 8 – стакан; 9 – диссектор; 10 – подставка; 11 – заготовка

Figure 1. Diagram of the experimental setup for studying heating processes in a microwave field: 1 – working chamber (volume resonator); 2 – waveguide; 3 – magnetron; 4 – rectifier; 5 – anode transformer; 6 – filament transformer; 7 – EPP-09 chart recorder; 8 – beaker; 9 – dissector; 10 – stand; 11 – workpiece

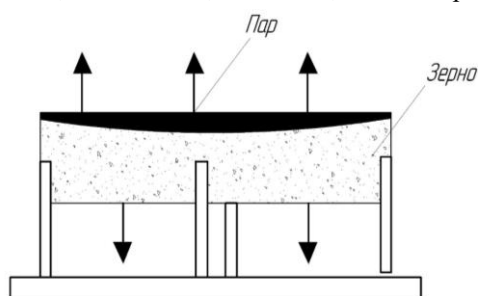


Рисунок 2. Экспериментальная кювета для исследования процессов микроволнового обезвоживания продуктов

Figure 2. Experimental cuvette for studying the processes of microwave dehydration of products

Результаты

По результатам опытов экспериментальных исследований строились графические зависимости, представленные на рисунках 3 и 4.

Период постоянной скорости удаления влаги (с 80 до 20%) продолжается около 40 мин и характеризуется ростом температуры продукта; при этом влага интенсивно испаряется.

На этом этапе удаляется адсорбционная и осмотическая влага. Для определения значения постоянной скорости удаления влаги можно использовать общую формулу:

$$W = W_0 - N \cdot \tau ; \quad (1)$$

где W_0 – начальная влажность продукта, %; W – текущая влажность продукта, %; N – текущая скорость процесса удаления влаги, %/мин; τ – текущее время периода, мин.

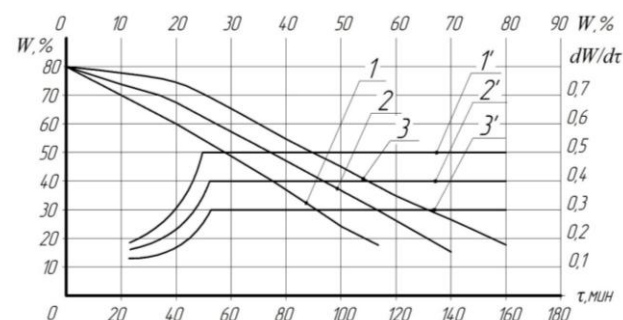


Рисунок 3. Кривые сушки (1–3) и скорости сушки (1'–3') слоя яблок в зависимости от потребляемой мощности СВЧ-нагрева: 1 – 200 Вт; 2 – 300 Вт; 3 – 400 Вт

Figure 3. Drying curves (1–3) and drying rate curves (1'–3') of the apple layer as a function of microwave heating power: 1 – 200 W; 2 – 300 W; 3 – 400 W

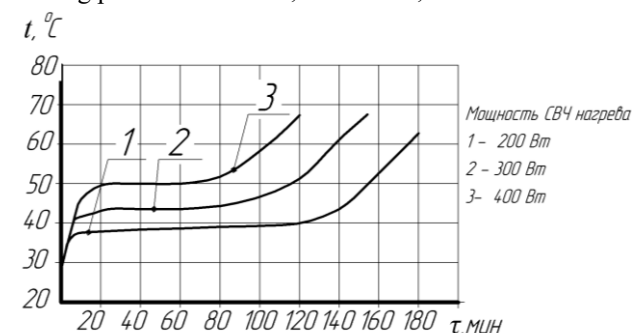


Рисунок 4. Температурные кривые яблок при сушке в зависимости от мощности СВЧ-нагрева: 1 – 200 Вт; 2 – 300 Вт; 3 – 400 Вт

Figure 4. Temperature curves of apples during drying as a function of microwave heating power: 1 – 200 W; 2 – 300 W; 3 – 400 W

Третий этап – период падающей скорости удаления влаги – отражает снижение влажности продукта с 30% до 10% за достаточно длительный промежуток времени (40 мин). На этом этапе удаляется структурная влага, которая содержится в растительных клетках.

Обсуждение

Анализ кривых изменения температуры, приведённых на рисунке 4, показывает, что основным параметром, определяющим процесс сушки, является плотность теплового потока.

Она оказывает решающее влияние на продолжительность процесса и качество продукта. С повышением мощности продолжительность сушки резко сокращается. Поглощённая микроволновая энергия быстро превращается в теплоту внутри кусочков яблок, вследствие чего давление во внутренних слоях продукта повышается до такой степени, что кусочек не сжимается, а даже увеличивается в объёме при окончательной досушке продукта. В результате возможно получить сушёный пористый продукт с улучшенной способностью восстанавливаться.

Таким образом, полученные экспериментальные и расчётные данные кинетики сушки яблок согласуются с теоретическими закономерностями сушки влагосодержащего растительного сырья [3, 5].

Сравнительный анализ качественных характеристик яблок показал, что продукты, высушенные с использованием СВЧ-энергоподвода, по органолептическим и физико-химическим характеристикам соответствуют установленным требованиям.

Высушенные яблоки в дальнейшем могут поступать на измельчение в дробилку, где они измельчаются в порошок с размером частиц не более 1,5 мм. Измельчённые порошки поступают затем на сита отсева, где разделяются на две фракции: 1) порошок с крупностью не более 0,25 мм в количестве 50–60%; 2) порошок

с крупностью помола более 0,25 мм в количестве 40–50%. Яблочный порошок с влажностью не более 6% фасуют в полимерные мешки и герметизируют [7].

Заключение

В результате проведённых экспериментальных исследований кинетики микроволновой сушки яблок сорта Антоновка установлено, что процесс носит трёхпериодный характер: прогрев материала, период постоянной скорости удаления влаги (с 80 до 20% влажности) и период падающей скорости (с 30 до 10% влажности).

Показано, что определяющим параметром, влияющим на продолжительность процесса и качество продукта, является плотность теплового потока. С повышением подводимой мощности с 200 до 400 Вт продолжительность сушки сокращается, при этом готовый продукт приобретает пористую структуру и обладает улучшенной способностью к восстановлению (около 10 мин против 20–25 мин для конвективной сушки).

Полученные экспериментальные и расчётные данные согласуются с теоретическими закономерностями сушки влагосодержащего растительного сырья и могут быть использованы при проектировании промышленных СВЧ-сушилок и в технологии производства яблочных порошков, отвечающих требованиям пищевой промышленности.

Литература

- 1 Соснин М.Д., Шорсткий И.А. Сушка яблочных чипсов с применением интеллектуальной обработки низкотемпературной атмосферной плазмой // Техника и технология пищевых производств. 2023. Т. 53. № 2. С. 368–383. doi: 10.21603/2074-9414-2023-2-2442
- 2 Поперечный А.Н., Байда Б.Ю., Плетминцев И.А. Кинетика сушки яблочных выжимок в псевдоожиженном слое // Вестник ВГУИТ. 2025. Т. 87. № 2 (104). С. 126–133. doi: 10.20914/2310-1202-2025-2-126-133
- 3 Драников А.В., Домбровская Я.П., Сухоруков Е.М., Кулигин Д.Р. Исследование процесса сушки термолабильных продуктов с использованием тепловых насосов // Вестник ВГУИТ. 2026. Т. 88. № 1 (105). С. 107–113. doi: 10.20914/2310-1202-2026-1-107-113
- 4 Ермолаев В.А. Исследование работы установок для конвективной и вакуумной сушки на примере обезвоживания яблок // Вестник ВСГУТУ. 2025. № 2 (97). С. 68–77. doi: 10.53980/24131997_2025_2_68
- 5 Иночкина Е.В., Касьянов Г.И. Математическое моделирование процесса обезвоживания растительного сырья // Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник). 2021. № 1. С. 152.
- 6 Бурак Л.Ч., Завалей А.П. Эффективность комбинированного воздействия ультразвука и микроволн при обработке пищевых продуктов. Обзор // Техника и технология пищевых производств. 2024. Т. 54. № 2. С. 342–357. doi: 10.21603/2074-9414-2024-2-2510
- 7 Кравцов В.А., Поперечный А.Н. Микроволновая сушка плодового сырья, перспективы развития // Научно-техническое творчество по процессам и оборудованию пищевых производств: сб. тез. докл. II Всерос. (с междунар. участием) науч.-практ. интернет-конф., Донецк, 17–18 октября 2024 г. Донецк: ДонНУЭТ им. М. Туган-Барановского, 2024. С. 44–45.
- 8 Коденцова В.М., Рисник Д.В., Бессонов В.В. и др. Яблочные выжимки как источник функциональных пищевых ингредиентов: обзор предметного поля // Хранение и переработка сельхозсырья. 2023. № 2. С. 231–242. doi: 10.36107/spfp.2023.371
- 9 Taghinezhad E., Kaveh M., Szumny A. et al. Qualitative, energy and environmental aspects of microwave drying of pre-treated apple slices // Scientific Reports. 2023. V. 13. № 1. P. 16152. doi: 10.1038/s41598-023-43358-6
- 10 Rasooli Sharabiani V., Kaveh M., Abdi R. et al. Estimation of moisture ratio for apple drying by convective and microwave methods using artificial neural network modeling // Scientific Reports. 2021. V. 11. № 1. P. 8914. doi: 10.1038/s41598-021-88270-z
- 11 Kriaa K., Nassar A.F. Comparative study of pretreatment on microwave drying of Gala apples (*Malus pumila*): Effect of blanching, electric field and freezing // LWT – Food Science and Technology. 2022. V. 165. P. 113693. doi: 10.1016/j.lwt.2022.113693

- 12 Bai J.W., Zhang L., Aheto J.H. et al. Effects of different pretreatment methods on drying kinetics, three-dimensional deformation, quality characteristics and microstructure of dried apple slices // *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 2023. V. 83. P. 103216. doi: 10.1016/j.ifset.2022.103216
- 13 Mierzwa D. Convective drying of apple enhanced with microwaves and ultrasound — process kinetics, energy consumption, and product quality approach // *Applied Sciences*. 2024. V. 14. № 3. P. 994. doi: 10.3390/app14030994
- 14 Vicas S.I., Teusdea A.C., Carbutar M. et al. Phenolic content, antioxidant capacity, and browning impact of apple slices during microwave drying: a chemometric approach // *Processes*. 2023. V. 11. № 6. P. 1601. doi: 10.3390/pr11061601
- 15 Aksüt B., Dursun S.K., Polatçı H., Taşova M. Effects of microwave dryers on the properties of Jerusalem artichoke: physico-chemical, thermo-physical, energy consumption // *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*. 2023. V. 57. № 1. P. 28–43. doi: 10.1080/08327823.2023.2166005
- 16 Beigi M., Torki M. Experimental and ANN modeling study on microwave dried onion slices // *Heat and Mass Transfer*. 2021. V. 57. P. 787–796. doi: 10.1007/s00231-020-02997-5
- 17 Wang Y., Zhao H., Deng H. et al. Influence of pretreatments on microwave vacuum drying kinetics, physicochemical properties and sensory quality of apple slices // *Polish Journal of Food and Nutrition Sciences*. 2019. V. 69. № 3. P. 297–306. doi: 10.31883/pjfn/110734
- 18 Wiktor A., Landfeld A., Matys A. et al. Selected quality parameters of air-dried apples pretreated by high pressure, ultrasounds and pulsed electric field — a comparison study // *Foods*. 2021. V. 10. № 8. P. 1943. doi: 10.3390/foods10081943
- 19 Horuz E., Bozkurt H., Karataş H., Maskan M. Simultaneous application of microwave energy and hot air to whole drying process of apple slices: drying kinetics, modeling, temperature profile and energy aspect // *Heat and Mass Transfer*. 2018. V. 54. P. 425–436. doi: 10.1007/s00231-017-2152-y
- 20 Aghilinategh N., Rafiee S., Gholikhani A. et al. A comparative study of dried apple using hot air, intermittent and continuous microwave: evaluation of kinetic parameters and physicochemical quality attributes // *Food Science & Nutrition*. 2015. V. 3. № 6. P. 533–539. doi: 10.1002/fsn.3241
- 21 Гаврилов Н.И., Поздняков Д.В., Устинова М.Э. Обзор способов сушки пищевых продуктов // *Инновационные технологии пищевых производств: сб. тез. докл. IV Всерос. науч.-практ. конф. (с междунар. участием), Севастополь, 22–25 декабря 2021 г. Севастополь: СевГУ, 2021. С. 49–51.*
- 22 Кох Д.А. Исследование химического состава сока из плодов мелкоплодных яблонь, произрастающих на территории Красноярского края // *Ползуновский вестник*. 2021. № 3. С. 30–34. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2021.03.004

References

- 1 Sosnin M.D., Shorstky I.A. Drying of apple chips using intelligent processing with low-temperature atmospheric plasma. *Technique and Technology of Food Production*. 2023. vol. 53. no. 2. pp. 368–383. doi: 10.21603/2074-9414-2023-2-2442 (in Russian).
- 2 Poperechny A.N., Baida B.Yu., Pletmintsev I.A. Kinetics of drying apple pomace in a fluidized bed. *Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies*. 2025. vol. 87. no. 2 (104). pp. 126–133. doi: 10.20914/2310-1202-2025-2-126-133 (in Russian).
- 3 Drannikov A.V., Dombrovskaya Ya.P., Sukhorukov E.M., Kuligin D.R. Study of the drying process of thermolabile products using heat pumps. *Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies*. 2026. vol. 88. no. 1 (105). pp. 107–113. doi: 10.20914/2310-1202-2026-1-107-113 (in Russian).
- 4 Ermolaev V.A. Study of the operation of installations for convective and vacuum drying on the example of dehydration of apples. *Bulletin of ESSTU*. 2025. no. 2 (97). pp. 68–77. doi: 10.53980/24131997_2025_2_68 (in Russian).
- 5 Inochkina E.V., Kasyanov G.I. Mathematical modeling of the dehydration process of plant raw materials. *Science. Technique. Technologies (Polytechnic Bulletin)*. 2021. no. 1. p. 152. (in Russian).
- 6 Burak L.Ch., Zavalei A.P. Efficiency of combined exposure to ultrasound and microwaves in food processing. *Review. Technique and Technology of Food Production*. 2024. vol. 54. no. 2. pp. 342–357. doi: 10.21603/2074-9414-2024-2-2510 (in Russian).
- 7 Kravtsov V.A., Poperechny A.N. Microwave drying of fruit raw materials, development prospects. In: *Scientific and Technical Creativity in Processes and Equipment of Food Production: Collection of abstracts of the II All-Russian (with international participation) Scientific and Practical Internet Conference, Donetsk, October 17–18, 2024. Donetsk: DonNUET named after M. Tugan-Baranovsky, 2024. pp. 44–45. (in Russian).*
- 8 Kodentsova V.M., Risnik D.V., Bessonov V.V. et al. Apple pomace as a source of functional food ingredients: a scoping review. *Storage and Processing of Agricultural Raw Materials*. 2023. no. 2. pp. 231–242. doi: 10.36107/spfp.2023.371 (in Russian).
- 9 Taghinezhad E., Kaveh M., Szumny A. et al. Qualitative, energy and environmental aspects of microwave drying of pre-treated apple slices. *Scientific Reports*. 2023. vol. 13. no. 1. article 16152. doi: 10.1038/s41598-023-43358-6.
- 10 Rasooli Sharabiani V., Kaveh M., Abdi R. et al. Estimation of moisture ratio for apple drying by convective and microwave methods using artificial neural network modeling. *Scientific Reports*. 2021. vol. 11. no. 1. article 8914. doi: 10.1038/s41598-021-88270-z.
- 11 Kriaa K., Nassar A.F. Comparative study of pretreatment on microwave drying of Gala apples (*Malus pumila*): Effect of blanching, electric field and freezing. *LWT – Food Science and Technology*. 2022. vol. 165. article 113693. doi: 10.1016/j.lwt.2022.113693.
- 12 Bai J.W., Zhang L., Aheto J.H. et al. Effects of different pretreatment methods on drying kinetics, three-dimensional deformation, quality characteristics and microstructure of dried apple slices. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 2023. vol. 83. article 103216. doi: 10.1016/j.ifset.2022.103216.
- 13 Mierzwa D. Convective drying of apple enhanced with microwaves and ultrasound — process kinetics, energy consumption, and product quality approach. *Applied Sciences*. 2024. vol. 14. no. 3. article 994. doi: 10.3390/app14030994.
- 14 Vicas S.I., Teusdea A.C., Carbutar M. et al. Phenolic content, antioxidant capacity, and browning impact of apple slices during microwave drying: a chemometric approach. *Processes*. 2023. vol. 11. no. 6. article 1601. doi: 10.3390/pr11061601.

- 15 Aksüt B., Dursun S.K., Polatçı H., Taşova M. Effects of microwave dryers on the properties of Jerusalem artichoke: physico-chemical, thermo-physical, energy consumption. *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*. 2023. vol. 57. no. 1. pp. 28–43. doi: 10.1080/08327823.2023.2166005.
- 16 Beigi M., Torki M. Experimental and ANN modeling study on microwave dried onion slices. *Heat and Mass Transfer*. 2021. vol. 57. pp. 787–796. doi: 10.1007/s00231-020-02997-5.
- 17 Wang Y., Zhao H., Deng H. et al. Influence of pretreatments on microwave vacuum drying kinetics, physicochemical properties and sensory quality of apple slices. *Polish Journal of Food and Nutrition Sciences*. 2019. vol. 69. no. 3. pp. 297–306. doi: 10.31883/pjfn/110734.
- 18 Wiktor A., Landfeld A., Matys A. et al. Selected quality parameters of air-dried apples pretreated by high pressure, ultrasounds and pulsed electric field — a comparison study. *Foods*. 2021. vol. 10. no. 8. article 1943. doi: 10.3390/foods10081943.
- 19 Horuz E., Bozkurt H., Karataş H., Maskan M. Simultaneous application of microwave energy and hot air to whole drying process of apple slices: drying kinetics, modeling, temperature profile and energy aspect. *Heat and Mass Transfer*. 2018. vol. 54. pp. 425–436. doi: 10.1007/s00231-017-2152-y.
- 20 Aghilinategh N., Rafiee S., Gholikhani A. et al. A comparative study of dried apple using hot air, intermittent and continuous microwave: evaluation of kinetic parameters and physicochemical quality attributes. *Food Science & Nutrition*. 2015. vol. 3. no. 6. pp. 533–539. doi: 10.1002/fsn3.241.
- 21 Gavrilov N.I., Pozdnyakov D.V., Ustinova M.E. Review of methods of food drying. In: *Innovative Technologies of Food Production: Collection of abstracts of the IV All-Russian Scientific and Practical Conference (with international participation)*, Sevastopol, December 22–25, 2021. Sevastopol: SevSU, 2021. pp. 49–51. (in Russian).
- 22 Kokh D.A. Study of the chemical composition of juice from small-fruited apple trees growing in the Krasnoyarsk Territory. *Polzunovsky Bulletin*. 2021. no. 3. pp. 30–34. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2021.03.004 (in Russian).

Сведения об авторах

Анатолий Н. Поперечный д.т.н., профессор, кафедра оборудования пищевых производств, Донецкий национальный университет экономики и торговли имени Михаила Туган-Барановского, пр-т Театральный, 28, г. Донецк, 283001, Россия, oborud@kaf.donnuet.ru

 <https://orcid.org/0009-0007-5931-3545>

Борис Ю. Байда ст. преп., кафедра холодильной и торговой техники имени Осокина В.В., Донецкий национальный университет экономики и торговли имени Михаила Туган-Барановского, пр-т Театральный, 28, г. Донецк, 283001, Россия, bayda.boris@mail.ru

 <https://orcid.org/0009-0007-4157-3269>

Вклад авторов

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

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about authors

Anatoly N. Poperechny Dr. Sci. (Engin.), professor, department of food production equipment, Donetsk National University of Economics and Trade named after Mikhail Tugan-Baranovsky, 28, Teatralny Ave, Donetsk, 283001, Russia, oborud@kaf.donnuet.ru

 <https://orcid.org/0009-0007-5931-3545>

Boris Y. Baida senior lecturer, Osokin V.V. Department of Refrigeration and Trade Technolog, Donetsk National University of Economics and Trade named after Mikhail Tugan-Baranovsky, 28, Teatralny Ave, Donetsk, 283001, Russia, bayda.boris@mail.ru

 <https://orcid.org/0009-0007-4157-3269>

Contribution

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

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 03/06/2025	После редакции 30/06/2025	Принята в печать 18/08/2026
Received 03/06/2025	Accepted in revised 30/06/2025	Accepted 18/08/2026