Статья поступила в редакцию: 29.07.2026
Статья принята к публикации: 10.08.2026
Статья опубликована: 28.10.2026

УДК 634.8+664.8.047+66.047

DOI: 10.32743/UniTech.2026.151.10.23597

Сравнительное экспериментальное исследование комбинированного ультразвукового и СВЧ-воздействия на процесс сушки винограда

Каримова Дилдора Шукриллоевна
базовый докторант
Бухарский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Бухара

Шарипов Нодиржон Замирович
PhD, доц.
кафедры Технологические машины и оборудование, Бухарский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Бухара

Ибрагимов Равшан Рустамович
PhD, доц.
кафедры Технологические машины и оборудование, Бухарский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Бухара
E-mail: ravshanibragimov@mail.ru

A comparative experimental study of combined ultrasonic and microwave treatment in grape drying

Karimova Dildora Shukrilloevna
Doctoral Candidate (PhD student)
Bukhara State Engineering and Technical Institute
Republic of Uzbekistan, Bukhara

Sharipov Nodirjon Zamirovich
PhD, Associate Professor
Department of Technological Machines and Equipment Bukhara State Engineering and Technical Institute
Republic of Uzbekistan, Bukhara

Ibragimov Ravshan Rustamovich
PhD, Associate Professor
Department of Technological Machines and Equipment Bukhara State Engineering and Technical Institute
Republic of Uzbekistan, Bukhara

Библиографическое описание: Каримова Д.Ш., Шарипов Н.З., Ибрагимов Р.Р. Сравнительное экспериментальное исследование комбинированного ультразвукового и СВЧ-воздействия на процесс сушки винограда // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 10(151). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23597

Аннотация

Статья посвящена сравнительному экспериментальному исследованию комбинированного ультразвукового (УЗ) и СВЧ-воздействия на процесс сушки винограда сорта «Кишмиш». Актуальность работы обусловлена необходимостью сокращения продолжительности сушки и энергозатрат при сохранении качества готовой продукции. Целью исследования являлась количественная оценка синергетического эффекта при одновременном и последовательном применении УЗ и СВЧ в сравнении с их раздельным воздействием. Эксперименты проводили с использованием универсальной лабораторной установки, объединяющей конвективную камеру, ультразвуковой и СВЧ-генераторы, вакуумную систему и средства измерения массы, температуры и давления; сравнивали шесть режимов — контроль, изолированное УЗ- и СВЧ-воздействие, одновременное УЗ+СВЧ, а также последовательные комбинации СВЧ→УЗ и УЗ→СВЧ. Для количественной оценки взаимодействия факторов использовали индекс синергии, рассчитанный по принципу независимости Bliss, а статистическую значимость различий определяли методами дисперсионного анализа и апостериорных сравнений. Установлено, что одновременное УЗ+СВЧ-воздействие статистически значимо превосходит по скорости сушки как раздельные, так и последовательные режимы, обеспечивая значение индекса синергии, достоверно превышающее единицу (SI≈1,07), что подтверждает наличие положительного взаимодействия факторов. Показано, что синергетический эффект связан с разрушением воскового слоя кутикулы винограда под действием ультразвуковой кавитации, облегчающим выход влаги при объёмном СВЧ-нагреве. Комбинированный режим обеспечивает не только сокращение продолжительности процесса, но и повышение органолептического качества готового продукта при незначительном росте энергозатрат по сравнению с изолированной СВЧ-сушкой. Результаты могут быть использованы при разработке промышленных технологий энергоэффективной сушки винограда и других плодово-ягодных культур.

Abstract

This paper presents a comparative experimental study of the combined effect of ultrasonic (US) and microwave (MW) treatment on the drying of 'Kishmish' grapes. The relevance of the study is determined by the need to reduce drying time and energy consumption while preserving product quality. The aim was to quantitatively assess the synergistic effect of simultaneous and sequential application of US and MW compared with each factor applied separately. Experiments were carried out using a versatile laboratory setup combining a convective chamber, ultrasonic and microwave generators, a vacuum system, and instruments for measuring mass, temperature, and pressure; six regimes were compared — control, isolated US and MW treatment, simultaneous US+MW, and sequential MW→US and US→MW combinations. A synergy index based on the Bliss independence principle was used to quantify the interaction between the factors, while the statistical significance of the differences was assessed by analysis of variance and post-hoc comparisons. Simultaneous US+MW treatment was found to significantly outperform both the separate and sequential regimes in drying rate, yielding a synergy index reliably above unity (SI≈1.07), confirming a positive interaction between the factors. The synergistic effect is shown to result from the disruption of the waxy cuticle layer by ultrasonic cavitation, which facilitates moisture release during volumetric microwave heating. The combined regime not only shortens the

drying process but also improves the sensory quality of the finished product, with only a marginal increase in energy consumption compared with microwave drying alone. The results can be used in developing industrial technologies for energy-efficient drying of grapes and other fruit crops.

Ключевые слова: комбинированная сушка, ультразвук, СВЧ-поле, виноград, синергетический эффект, кинетика сушки, энергосбережение.

Keywords: combined drying, ultrasound, microwave field, grapes, synergistic effect, drying kinetics, energy saving.

Введение

Согласно литературным данным, ультразвуковое (УЗ) и СВЧ-воздействие способны интенсифицировать сушку растительного сырья, однако механизмы их действия принципиально различны. УЗ (22 кГц, 60 Вт) создаёт кавитационные микротоки и звукокапиллярный эффект, снижающие поверхностное сопротивление массопереносу, что наиболее эффективно проявляется при 40–50 °C [3, 5]. СВЧ-поле (2450 МГц, 350–450 Вт), напротив, обеспечивает объёмный диэлектрический нагрев с внутренним парообразованием, интенсифицирующим массоперенос независимо от состояния поверхности продукта [11]. Принципиальное различие механизмов создаёт предпосылку для их взаимного усиления при совместном применении [6, 9]. На предыдущем этапе настоящего исследования нами было экспериментально установлено, что при 50 °C изолированное УЗ-воздействие сокращает продолжительность сушки винограда на 23,2 %, а изолированное СВЧ-воздействие — на 84,4 %, что и послужило основанием для перехода к изучению их совместного применения.

Синергия УЗ+СВЧ подтверждена для ряда других культур: Szadzińska с соавт. [1] показали для клубники существенное ускорение тепло- и массопереноса при незначительном росте энергопотребления; Kroehnke с соавт. [7], а также Mierzwa и Musielak [8] для моркови получили сокращение продолжительности сушки на 9–81 % при одновременном действии конвекции, УЗ и СВЧ; аналогичный положительный эффект отмечен и для яблок [10, 2]. Для винограда — объекта с плотной восковой кутикулой — количественная оценка синергии УЗ+СВЧ ранее не проводилась; исходя из установленных на предыдущем этапе значений (23,2 и 84,4 % для изолированных УЗ- и СВЧ-воздействий соответственно), аддитивное ожидание при их совместном применении составляет 86,2 %. Цель настоящей работы — экспериментально исследовать комбинированное УЗ+СВЧ-воздействие на кинетику сушки винограда с количественной оценкой синергетического эффекта (индекс SI) и определением рационального режима.

Материалы и методы

Объект — виноград сорта «Кишмиш» (Бухарская область), начальная влажность 78,5 ± 1,2 % (n=10); подготовка образцов — как на предыдущем этапе работы. Использовалась универсальная лабораторная установка, объединяющая конвективную сушильную камеру (40–70 °C, 1,0–2,5 м/с) лабораторной конструкции, ультразвуковой генератор УЗГ-1,5 (22 кГц, 60 Вт) с пьезоэлектрическим излучателем (ООО «Сонокс», Россия), СВЧ-генератор (2450

МГц, 0–800 Вт) с резонаторной камерой (ARTEL, Ўзбекистон), вакуумную систему (0,03 МПа) лабораторной конструкции, а также системы измерения массы (весы HR-200, A&D, Япония), температуры и давления лабораторной конструкции.

Проведены опыты по 6 режимам при 50 °C, 1,5 м/с, конечная влажность 15–16 %, n=6 (всего 36 опытов): контроль (C); УЗ (US, 60 Вт); СВЧ-вакуум (MW, 350 Вт, 0,03 МПа); одновременно УЗ+СВЧ (US+MW); последовательно СВЧ → УЗ (MW → US, СВЧ до влажности 40 %, затем УЗ) и УЗ → СВЧ (US → MW, УЗ до 40 %, затем СВЧ).

D_{eff} (м²/с) — эффективный коэффициент диффузии влаги, характеризующий интенсивность внутреннего массопереноса; его рассчитывали путём аппроксимации экспериментальных кривых сушки уравнением нестационарной диффузии влаги (второй закон Фика) в приближении одного члена ряда — по методике, применённой нами на предыдущем этапе настоящего исследования при изучении раздельного действия УЗ и СВЧ на кинетику сушки винограда того же сорта. Индекс синергии $SI = E_{obs}/E_{add}$, где E_{obs} - наблюдаемое сокращение времени сушки при УЗ+СВЧ (относительно контроля), $E_{add} = 1-(1-E_{US})(1-E_{MW})$ – аддитивное ожидание по раздельным эффектам УЗ (E_{US}) и СВЧ (E_{MW}). Индекс синергии рассчитывали согласно принципу независимости Bliss, широко применяемому для оценки аддитивного и синергетического взаимодействия независимых факторов воздействия. Значения SI>1 свидетельствуют о положительном взаимодействии, а SI>1,05 рассматривались как признак выраженного синергетического эффекта. SI > 1,05 — синергия; 0,95 ≤ SI ≤ 1,05 — аддитивность; SI < 0,95 — антагонизм. Качество продукта оценивали по 10-балльной шкале (цвет, текстура, форма, вкус). Оценку проводили пять независимых экспертов, итоговый балл рассчитывали как среднее арифметическое экспертных оценок. Статистика — SPSS Statistics 26: Перед выполнением однофакторного дисперсионного анализа проверяли нормальность распределения данных (критерий Шапиро–Уилка) и однородность дисперсий (критерий Левена). Во всех случаях предпосылки применения ANOVA выполнялись (p>0,05). однофакторный ANOVA, post-hoc Тьюки, t-тест, 95 % ДИ для SI методом бутстрепа (1000 итераций); α=0,05.

Результаты и обсуждение

Кинетика сушки

Кривые сушки, приведённые на рисунке 1, наглядно демонстрируют различие механизмов действия исследуемых факторов. В контрольном режиме продолжительность сушки составляет 31,5 ч, при этом на кривой отчётливо выражен длительный период постоянной скорости (рис. 1а), характерный для удаления преимущественно поверхностной влаги. Под действием ультразвука кривая сушки смещается влево, а продолжительность процесса сокращается до 24,2 ч (на 23,2 % относительно контроля) за счёт улучшения поверхностного массопереноса. СВЧ-воздействие приводит к принципиально иной кинетике: период постоянной скорости практически отсутствует, а продолжительность сушки сокращается до 4,9 ч (на 84,4 %), что свидетельствует о преобладании объёмного механизма тепло- и массопереноса. Наилучший результат обеспечивает одновременное УЗ+СВЧ-воздействие: время сушки сокращается до 4,1 ч (на 87,0 %), а соответствующая кривая

располагается ниже кривой изолированного СВЧ-режима на всём протяжении процесса (рис. 1б). Последовательные режимы занимают промежуточное положение между одновременным и изолированным СВЧ-воздействием: при варианте СВЧ→УЗ продолжительность сушки составляет 4,5 ч (сокращение на 85,7 %), при варианте УЗ→СВЧ — 4,3 ч (86,3 %). Как показано на рисунке 2, фактическое сокращение продолжительности сушки при одновременном УЗ+СВЧ-воздействии (87,0 %) статистически значимо превышает аддитивное ожидание, рассчитанное по раздельным эффектам факторов (86,2 %).

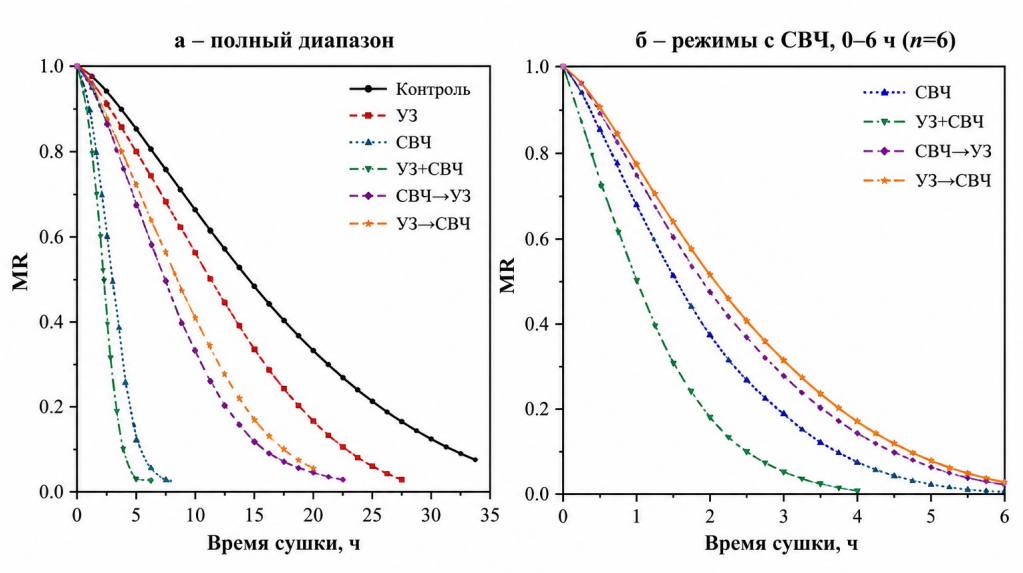

Рисунок 1. Кинетика сушки: а – все режимы; б – режимы с СВЧ, 0–6 ч (n=6)

Количественные показатели

Таблица 1. Сравнительные показатели режимов сушки ($\bar{x}$ ± SD, n=6)

Режим	τ, ч	Сокращ., %	D_{eff}, ×10⁻⁹ м²/с	E, МДж/кг	Качество, балл
Контроль	31,5 ± 1,8	–	0,243 ± 0,018	29,4 ± 1,6	7,8 ± 0,5
УЗ	24,2 ± 1,4	23,2 ± 2,8	0,382 ± 0,026	26,3 ± 1,3	8,3 ± 0,4
СВЧ	4,9 ± 0,3	84,4 ± 1,2	1,56 ± 0,14	32,5 ± 2,1	8,5 ± 0,5
УЗ+СВЧ	4,1 ± 0,3	87,0 ± 1,0	1,94 ± 0,18	32,8 ± 2,0	8,9 ± 0,3
СВЧ→УЗ	4,5 ± 0,4	85,7 ± 1,2	1,68 ± 0,13	33,8 ± 2,2	8,1 ± 0,5
УЗ→СВЧ	4,3 ± 0,3	86,3 ± 1,1	1,82 ± 0,14	33,2 ± 2,0	8,3 ± 0,4

D_{eff} максимален при УЗ+СВЧ ($1{,}94\times10^{-9}$ м²/с, что на 24,4 % выше, чем при изолированном СВЧ, и свидетельствует об улучшении массопереноса. Аналогичным образом, качество продукта также максимально при УЗ+СВЧ (8,9 балла), причём его отличие от изолированного СВЧ (8,5 балла) статистически значимо (p=0,038). Что касается энергозатрат, наименьшими они оказались при УЗ-воздействии (26,3 МДж/кг), а наибольшими — при последовательном режиме СВЧ→УЗ (33,8 МДж/кг).

Статистический анализ

Однофакторный ANOVA показал высокозначимое влияние режима на время сушки: $F(5,30)=486,3$; $p<0,001$. Размер эффекта был очень высоким ($\eta^2=0,988$), что свидетельствует о практически полном влиянии режима сушки на продолжительность процесса. Post-hoc Тьюки: СВЧ vs УЗ+СВЧ – $p=0,018$ (значимое отличие, синергия подтверждена); УЗ+СВЧ vs СВЧ→УЗ — $p=0,022$ и vs УЗ→СВЧ — $p=0,018$ (одновременное воздействие значимо лучше последовательного); СВЧ vs СВЧ→УЗ — $p<0,001$; СВЧ→УЗ vs УЗ→СВЧ — $p=0,324$ (не значимо). Итог: УЗ+СВЧ статистически значимо лучше СВЧ по скорости ($p=0,018$).

Индекс синергии

При EUS=0,232 и EMW=0,844 аддитивное ожидание Eadd= 0,862 (86,2 %). Наблюдаемое Eobs=0,870, откуда SI=Eobs/Eadd= 0,870/0,862=1,065; 95 % ДИ (бутстреп): 1,028–1,102«; (рис. 2). Поскольку нижняя граница ДИ (1,028) превышает 1,00, синергетический эффект статистически подтверждён (SI>1,05). Полученное значение значительно превышает порог аддитивности (SI=1), что свидетельствует о наличии положительного взаимодействия между ультразвуковым и микроволновым воздействиями. Нижняя граница доверительного интервала также превышает единицу, что подтверждает статистическую устойчивость выявленного синергетического эффекта.

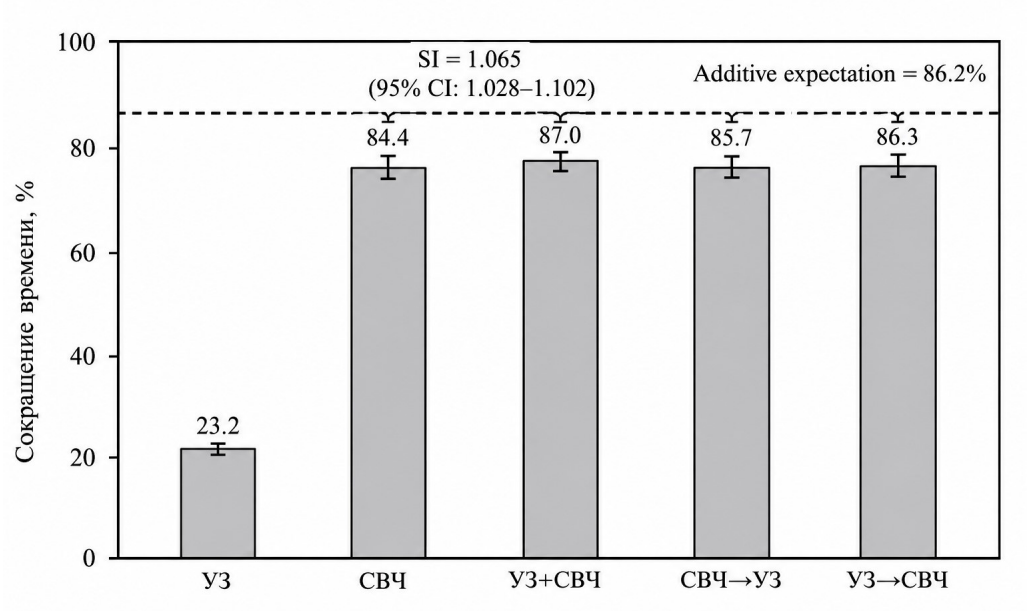

Рисунок 2. Сокращение τ по режимам, аддитивное ожидание и индекс синергии (n=6)

Синергия объясняется тем, что УЗ-кавитация разрушает восковой слой кутикулы, создавая микротрещины, через которые пар выходит быстрее [1, 7]. При СВЧ-нагреве температура продукта достигает 48–55 °C, что снижает кавитационную активность УЗ [5]. Кроме того, УЗ успевает проявить эффект, создавая микротрещины в кутикуле на начальном этапе сушки. Таким образом, совместное воздействие реализует двухступенчатый механизм интенсификации: ультразвук уменьшает сопротивление поверхностному массопереносу за

счёт образования микроканалов в кутикуле, тогда как СВЧ обеспечивает интенсивный объёмный нагрев и внутреннее испарение влаги. Одновременная реализация этих механизмов приводит к синергетическому ускорению процесса сушки.

Энергетическая эффективность

УЗ даёт наименьшие энергозатраты (26,3 МДж/кг, −10,5 % к контролю) ценой умеренного ускорения. СВЧ требует на 10,5 % больше энергии, чем контроль, но за счёт сокращения времени в 6,4 раза суммарное потребление за цикл ниже. УЗ+СВЧ (32,8 МДж/кг) лишь на 0,9 % выше СВЧ при значительном выигрыше в скорости (4,1 ч против 4,9 ч) и качестве (8,9 против 8,5 балла) (рис.3). Несмотря на незначительное увеличение удельных энергозатрат относительно СВЧ-сушки (около 0,9 %), статистически значимых различий между этими режимами не выявлено ($p>0,05$), тогда как прирост производительности и качества продукции оказался достоверным.

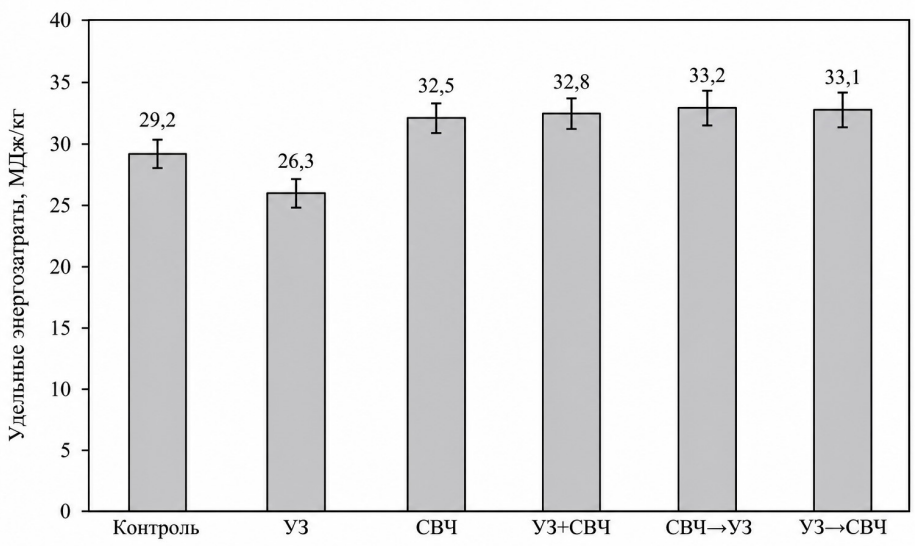

Рисунок 3. Удельные энергозатраты по режимам сушки (n=6)

Синергия УЗ+СВЧ, отмеченная для клубники [1] и моркови [7], получена при существенно меньшей мощности СВЧ и/или большей мощности УЗ; по данным обзоров [9, 11], синергия наиболее выражена при СВЧ до 200 Вт и УЗ свыше 100 Вт. При параметрах настоящей работы (СВЧ 350 Вт, УЗ 60 Вт) УЗ-кавитация усиливает паровой транспорт, создавая каналы для выхода пара с его плотной кутикулой.

Заключение

Сравнение шести режимов сушки винограда сорта «Кишмиш» при 50 °C показало, что СВЧ-вакуумная сушка (350 Вт) даёт максимальное сокращение времени (84,4 %, до 4,9 ч), тогда как УЗ (60 Вт) — умеренный эффект (23,2 %). Одновременное УЗ+СВЧ (87,0 %, 4,1 ч) статистически значимо лучше СВЧ ($p=0,018$); индекс синергии $SI=1,065$ подтверждает положительный синергетический эффект. Последовательные режимы СВЧ→УЗ и УЗ→СВЧ статистически хуже одновременного воздействия.

Причина синергии — УЗ-кавитация разрушает восковой слой кутикулы, усиливая выход пара, генерируемого СВЧ. Комбинированный режим энергозатратен (32,8 МДж/кг), незначительно выше СВЧ (32,5 МДж/кг), при значительном улучшении скорости и качества. Для промышленной сушки винограда рекомендуется одновременное УЗ+СВЧ-воздействие (350 Вт СВЧ, 60 Вт УЗ, 50 °С, вакуум 0,03 МПа) как наиболее эффективный режим. Перспективным направлением дальнейших исследований является оптимизация мощности ультразвукового и микроволнового воздействия, а также разработка промышленной установки непрерывного действия для энергоэффективной сушки винограда и других плодово-ягодных культур.

Список литературы

1. Szadzińska J., Kowalski S.J., Stasiak M. Microwave and ultrasound enhancement of convective drying of strawberries: Experimental and modeling efficiency // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2016. – T. 103. – P. 1065–1074. – DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer. 2016.08.001.
2. Szadzińska J., Waszkowiak K., Mierzwa D. Hybrid drying of apples: a comparison of continuous and intermittent process modes // Applied Sciences. – 2025. – T. 15, № 22. – Art. 12031. – DOI: 10.3390/app152212031.
3. Azzouz S., Guizani A., Jomaa W., Belghith A. Moisture diffusivity and drying kinetic equation of convective drying of grapes // Journal of Food Engineering. – 2002. – T. 55. – P. 323–330. – DOI: 10.1016/S0260-8774(02.
4. Burak L.Ch., Zavaley A.P. Combined ultrasound and microwave food processing: Efficiency review // Food Processing: Techniques and Technology. – 2024. – T. 54. – P. 342–357. – DOI: 10.21603/2074-9414-2024-2-2510.
5. García-Pérez J.V., Cárcel J.A., Mulet A., Riera E., Andrés R.R., Gallego-Juárez J.A. Ultrasonic drying for food preservation // Power Ultrasonics: Applications of High-Intensity Ultrasound. 2nd ed. – Cambridge: Woodhead Publishing, 2023. – P. 851–882.
6. Kowalski S.J., Mierzwa D. Ultrasound-assisted convective drying of biological materials // Drying Technology. – 2015. – T. 33. – P. 1851–1860.
7. Kroehnke J. Szadzińska J., Stasiak M., Radziejewska-Kubzdela E., Biegańska-Marecik R., Musielak G. Ultrasound- and microwave-assisted convective drying of carrots – process kinetics and product's quality analysis // Ultrasonics Sonochemistry. – 2018. – T. 48. – P. 249–258.
8. Mierzwa D., Musielak G. Microwave and ultrasound assisted rotary drying of carrot: Analysis of process kinetics and energy intensity // Applied Sciences. – 2024. – T. 14. – Art. 10676. – DOI: 10.3390/app142210676.
9. Muñoz-Almagro N., Prieto-Santiago V., Rico D., Martín-Diana A.B. Combined effect of ultrasound and microwave on food drying: A review // Innovative Food Science & Emerging Technologies. – 2023. – T. 84. – Art. 103283.
10. Musielak G. Mieszczakowska-Frąc M., Mierzwa D. Convective drying of apple enhanced with microwaves and ultrasound – process kinetics, energy consumption, and product quality approach // Applied Sciences. – 2024. – T. 14. – Art. 994. – DOI: 10.3390/app14030994.

11. Zhou S., Chen W., Fan K. Recent advances in combined ultrasound and microwave treatment for improving food processing efficiency and quality: A review // Food Bioscience. – 2024. – T. 58. – Art. 103683. – DOI: 10.1016/j.fbio.2024.103683.