

Исследование радиационно-конвективной сушки плодов апельсинов при комбинированном теплоподводе

Екатерина Ю. Желтоухова ¹	katsturova@gmail.com	 0000-0002-7463-9013
Мария С. Колесник ¹	mkolesnik0310@mail.ru	 0009-0001-6757-5939
Анастасия В. Терёхина ¹	gorbatova.nastia@ya.ru	 0000-0003-4433-9615

¹ Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия

Аннотация. В результате экспериментальных исследований, основанных на изучении кривых радиационно-конвективной сушки пластин апельсина в стационарных условиях и результатов дериватографического анализа, разработан комбинированный рациональный режим его сушки. Нарезанные пластины апельсина подвергают комбинированной радиационно-конвективной сушке. Нагрев апельсина проводят с помощью инфракрасных лучей с длиной волны в диапазоне 1,16-1,65 мкм и плотностью теплового потока 2,69-5,44 кВт/м² при одновременном конвективном обдуве воздухом для удаления испаряемой из продукта влаги с начальной температурой окружающей среды 293 К. Сущность ступенчатого режима сушки заключается в следующем: общее время процесса сушки разделяется на четыре временных этапа. Продолжительности всех этапов определялись экспериментально в результате анализа полученных кривых сушки и скорости сушки при стационарных режимах сушки плодов апельсина. На каждом из этапов выбирается определенное значение температуры продукта, скорости воздуха за определенный промежуток времени. При анализе графических зависимостей можно выделить три периода сушки: прогрев, постоянной и убывающей скоростей сушки. На первом этапе порезанные пластины апельсина толщиной 1,5-2 мм нагревают инфракрасными лучами до температуры 318 К при одновременном обдуве воздушным потоком со скоростью 1,6 м/с в течение 10 мин; на втором этапе - до температуры 323 К и скорости воздушного потока 1,2 м/с в течение 11 мин; на третьем этапе - до температуры 328 К и скорости воздушного потока 0,9 м/с в течение 21 мин; на четвертом этапе - до температуры 333 К и скорости воздушного потока 0,7 м/с в течение 9 мин; затем на высушенные до конечной влажности 6-7 % пластины апельсина наносят вкусовые добавки.

Ключевые слова: радиационно-конвективная сушка, кинетика, комбинированный режим, апельсин, пластины.

Investigation of radiation-convective drying of orange under combined heat supply

Ekaterina Y. Zheltoukhova ¹	katsturova@gmail.com	 0000-0002-7463-9013
Maria S. Kolesnik ¹	mkolesnik0310@mail.ru	 0009-0001-6757-5939
Anastasia V. Terekhina ¹	gorbatova.nastia@ya.ru	 0000-0003-4433-9615

¹ Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia

Abstract. As a result of experimental studies based on the study of radiation-convective drying curves of orange plates under stationary conditions and the results of derivatographic analysis, a combined rational drying regime has been developed. Sliced orange plates are subjected to combined radiation-convective drying. The orange is heated using infrared rays with a wavelength in the range of 1.16-1.65 microns and a heat flux density of 2.69-5.44 kW/m² with simultaneous convective air blowing to remove moisture evaporated from the product with an initial ambient temperature of 293 K. The essence of the stepwise drying mode is as follows: the total time of the drying process is divided into four time stages. The durations of all stages were determined experimentally as a result of the analysis of the obtained drying curves and drying rates under stationary drying modes of orange fruits. At each stage, a certain value of the product temperature and air velocity is selected for a certain period of time. When analyzing graphical dependencies, three drying periods can be distinguished: warming up, constant and decreasing drying speeds. At the first stage, sliced orange plates 1.5-2 mm thick are heated by infrared rays to a temperature of 318 K while being blown by an air stream at a speed of 1.6 m/s for 10 minutes; at the second stage, to a temperature of 323 K and an air flow velocity of 1.2 m/s for 11 minutes; at the third stage, up to a temperature of 328 K and an air flow velocity of 0.9 m/s for 21 minutes; at the fourth stage, up to a temperature of 333 K and an air flow velocity of 0.7 m/s for 9 minutes; then flavoring additives are applied to the orange plates dried to a final humidity of 6-7%.

Keywords: radiation-convective drying, kinetics, combined mode, orange, slices.

Для цитирования

Желтоухова Е.Ю., Колесник М.С., Терёхина А.В. Исследование радиационно-конвективной сушки плодов апельсинов при комбинированном теплоподводе // Вестник ВГУИТ. 2025. Т. 87. № 1. С. 204–210. doi:10.20914/2310-1202-2025-1-204-210

For citation

Zheltoukhova E.Yu., Kolesnik M.S., Terekhina A.V. Investigation of radiation-convective drying of orange under combined heat supply. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2025. vol. 87. no. 1. pp. 204–210. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2025-1-204-210

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

Введение

Для увеличения срока годности и сохранности продуктов богатых витаминами, таких как апельсины и другие цитрусовые, предлагается подвергать плоды процессу щадящей сушки с получением фруктовых снеков. Применение переменной подачи тепла при обезвоживании апельсинов значительно ускоряет процесс сушки. Сокращение времени обработки пластин апельсинов и использование мягких температурных режимов, оптимизированных согласно кинетике процесса, позволяют уменьшить отрицательное воздействие на чувствительные к нагреву компоненты в апельсинах и улучшить их качество [1–3].

Материалы и методы

Данное исследование направлено на оптимизацию характеристик сушеных плодов апельсинов и интенсификацию термодинамической интенсивности процесса сушки. Достижение поставленной цели обеспечивается применением многоступенчатой схемы радиационно-конвективной сушки.

Экспериментальное изучение процесса сушки плодов апельсинов проводилось при следующих значениях технологических параметров: температура сушильного агента от 318 до 333 К; скорость воздушного потока в диапазоне от 0,7 до 1,6 м/с, толщина образцов в виде пластин – от 1,5 до 2×10^{-3} м, расстояние от продукта до ИК-ламп 0,3–0,4 м. Для сушки использовались апельсины, выращенные в Краснодарском крае и Крыму. Процессу сушки подвергались плоды апельсинов сорта Первенец, Пионер, отличающиеся более высокими морозостойкостью, урожайностью и качеством плодов по сравнению с обычными районированными сортами. Они характеризуются толстой кожурой, так как после высыхания они сохраняют более яркий оттенок кожуры и больше белой мякоти, что создает контраст с коркой. Проводился отбор, инспекция и сортировка плодов апельсинов, далее мойка и резание тонкими пластинами толщиной $1,5\text{--}2 \times 10^{-3}$ м. Выбор такой толщины обусловлен необходимостью предотвратить перегрев продукта и высушить его до конечной влажности.

Порезанные пластины апельсинов выкладывались на лотки и подвергались радиационно-конвективной сушке инфракрасными лучами, имеющими длину волны в интервале 1,16–1,65 мкм и плотность теплового потока 2,69–5,44 кВт/м²,

и конвективным обдувом воздушным потоком со скоростью в интервале от 0,7 до 1,6 м/с и начальной температурой 318 К.

Исследование стационарных режимов радиационно-конвективной сушки пластин апельсинов показало, что в фазе постоянной сушки основная масса удаляемой жидкости, представляет собой осмотическую и капиллярную влагу. В этот период весь подводимый к пластинам тепловой поток расходуется исключительно на удаление влаги с поверхности продукта. Температура апельсиновых пластин при этом остается постоянной и контролируется с помощью термодатчиков, поскольку интенсивность теплового потока полностью компенсируется эндотермическим процессом испарения. Переход к фазе убывающей скорости сушки происходит при достижении критического уровня влажности на поверхности долек апельсина. На этой стадии, помимо капиллярной и осмотической влаги, начинает удаляться и адсорбционная влага (прочная связанная с поверхностью клеточных стенок и внутриклеточными структурами). Вследствие этого скорость испарения падает, и тепловой поток, не расходуясь полностью на испарение, начинает накапливаться в продукте, вызывая повышение его температуры. В этой фазе испарение происходит не только с поверхности, но и внутри самих пластин. Этот процесс представляет собой сложное взаимодействие капиллярного движения, диффузии паров воды и теплообмена внутри неоднородной пористой структуры апельсиновой ткани [4–7].

Результаты и обсуждение

На основе данных дифференциально-термического анализа (ДТА), позволяющего регистрировать тепловые эффекты, связанные с изменением фазового состояния воды, и кинетического исследования, описывающего скорость процесса сушки во времени, был разработан подход к обоснованию ступенчатых режимов сушки. Вместо поддержания постоянных параметров сушки, предлагается разделить весь процесс на несколько последовательных этапов с различной продолжительностью и параметрами радиационно-конвективной сушки.

В ходе экспериментальных исследований, основанных на изучении кривых сушки пластин апельсинов в стационарных условиях и результатов дериватографического анализа, были установлены временные параметры для каждого из четырех этапов процесса.

Дериватографические исследования, сочетающие дифференциально-термический анализ и термогравиметрию, проводили в алюминиевых контейнерах с общей массой навески – 10 мг проводились на синхронном анализаторе STA-449 F3 Jupiter со скоростью нагрева и охлаждения: 0,001 К/мин... 50 К/мин. Используемые для количественной обработки способом неизотермической кинетики термоаналитические графики одновременно отмечают изменения массы продукта, скорости изменения температуры или энтальпии и изменения массы (кривые *TGA*, *DTA* и *DTG*).

В процессе теплового воздействия происходит влияния на плоды апельсинов, и они претерпевают значительные физико-химические изменения. В результате которых испаряется влага, содержащаяся в исследуемом продукте и обуславливающая характер происходящих внутри него преобразований материала. За счет испарения влаги и разложения сахаров, клетчатки и других органических соединений масса продукта снижается. В результате этого происходит снижение прочности структуры благодаря незначительному гидролизу клетчатки,

целлюлозы и других сложных углеводов, из которых формируются стенки клеток и межклеточные перегородки. Численная оценка формы связи влаги в материале основывается на определении по экспериментальным зависимостям изменения массы образца *TGA*, скорости изменения температуры *DTA* и скорости изменения массы *DTG* (рисунок 1), полученных способом термогравиметрии.

Разберем более подробно формы связи влаги в исследуемых материалах. Для плодов апельсина при температуре 373–423 К (зона 1 рисунок 2) происходит прогрев и удаление физико-механически связанной влаги, имеющей незначительную энергию связи с продуктом. При температурах 423–473 К (зона 2 на рисунке 2) осуществляется десорбция осмотической влаги апельсинов. Интервал температур 473–543 К (зона 3 на рисунке 2) характеризует удаление адсорбционной влаги, а по мере приближения показателей температуры к верхней границе периода происходит удалением внутренней осмотической и адсорбционной влаги апельсинов. В результате возможно частичное разложение вещества.

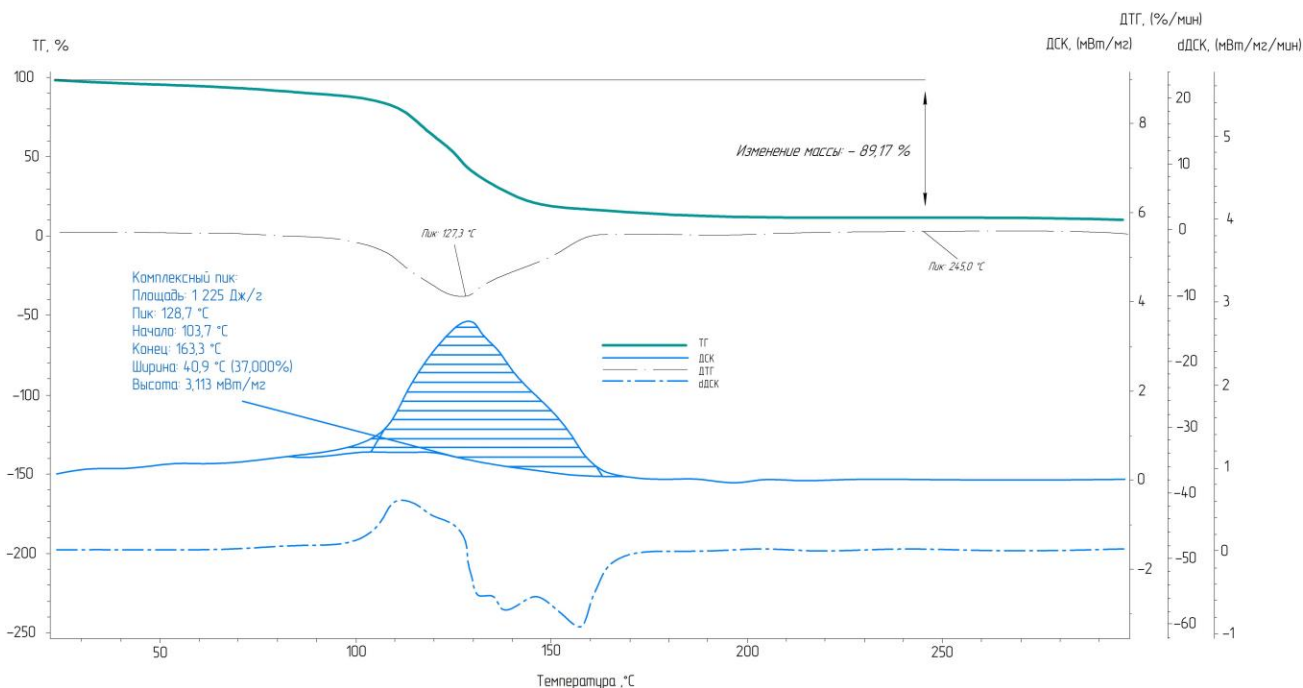


Рисунок 1. Экспериментальные зависимости изменения массы образца *TGA*, скорости изменения температуры *DTA* и скорости изменения массы *DTG* образцов апельсинов

Figure 1. Experimental *TGA* mass change rates, *DTA* temperature change rates and *DTG* mass change rates of orange samples

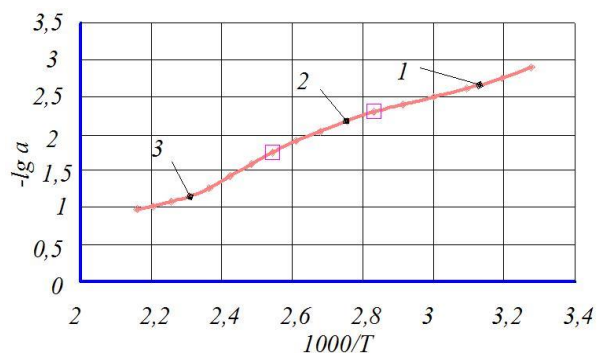


Рисунок 2. Зависимость $-\lg \alpha$ от величины $10^3/T$ исследуемых апельсинов при нагревании со скоростью подъема температуры 3 К/мин

Figure 2. Dependence of $-\lg \alpha$ on the large $10^3/T$ of oranges under investigation at a temperature rise rate of 3 K/min

Выполненные исследования и полученные данные позволили выявить зоны дегидратации влаги в продукте и преобразовать сухие вещества при воздействии температурой на плоды апельсинов, а также обнаружить температурные зоны, которые соответствуют удалению влаги с различной формой и энергией связи [8–10]. Для каждого этапа, в зависимости от преобладающего типа связи испаряемой влаги, устанавливаются оптимальные значения температуры и скорости воздушного потока. Такой подход позволяет максимально эффективно удалить влагу на каждом этапе, минимизируя потери качества продукта и обеспечивая равномерную сушку.

Ступенчатый режим радиационно-конвективной сушки пластин апельсинов, разработанный на основе анализа кинетики стационарных режимов процесса, сочетает инфракрасный нагрев и обдув воздушным потоком. При этом на каждом этапе параметры сушки изменяются. Вначале пластины апельсина толщиной $1,5\text{--}2 \times 10^{-3}$ м подвергают воздействию инфракрасного излучения и одновременно обдувают воздухом, подаваемым со скоростью 1,6 м/с, в течение 10 минут, доводя температуру до 318 К. Далее, температуру повышают до 323 К при снижении скорости воздуха до 1,2 м/с, в течении 11 минут. Третий этап предполагает нагрев до 328 К и уменьшение скорости воздушного потока до 0,9 м/с на протяжении 21 минуты. На заключительном этапе температуру увеличивают до 333 К, а скорость обдува снижают до 0,7 м/с в течение 9 минут.

В завершение, пластины апельсинов, имеющие конечную влажность 6–7%, могут быть приправлены различными вкусовыми добавками (ванилин, корица и другие).

Анализ кривых сушки и скорости сушки (рисунок 3) и температурных графиков (рисунок 4) подтверждает эффективность ступенчатого режима сушки и демонстрирует четкое разделение процесса на три характерных периода: прогрев, постоянная и убывающая скорости сушки.

Начальная стадия характеризуется интенсивным нагревом наружных слоев апельсиновых долек и испарением влаги с поверхности, при этом резко возрастает температура на поверхности. Создается температурный градиент, направленный к центру продукта. Одновременно формируется градиент концентрации влаги: поверхностные слои обезвоживаются быстрее, чем внутренние, что приводит к перемещению влаги из центра к поверхности. Движение влаги, однако, встречает сопротивление со стороны структуры клеток апельсина, замедляя процесс и способствуя повышению температуры внутри долек (рисунок 4). Этот период критически важен, так как закладывает основу для дальнейшего эффективного удаления влаги. Скорость теплоносителя играет здесь ключевую роль, обеспечивая интенсивный нагрев.

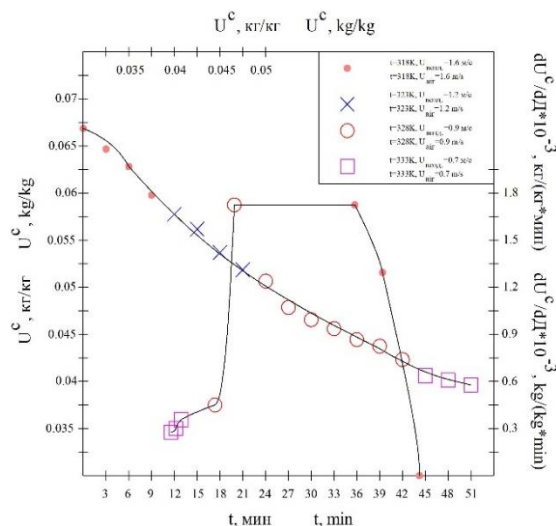


Рисунок 3. Кривая сушки и скорости сушки пластин апельсинов при ступенчатом режиме радиационно-конвективной сушки

Figure 3. The curve of drying and the speed of drying the orange slices in a step mode radiation-convective drying

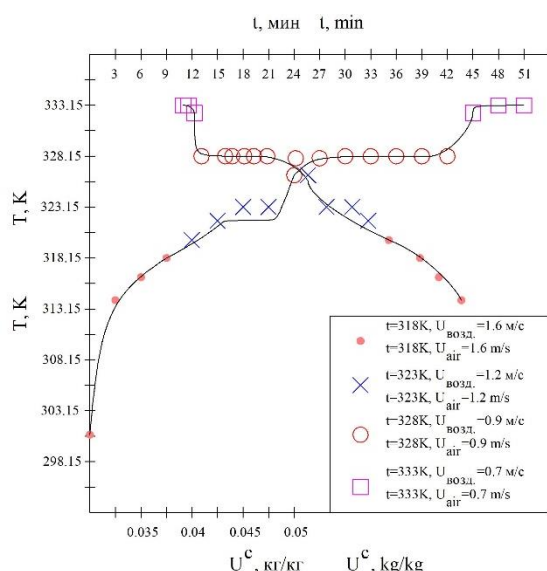


Рисунок 4. Температурная кривая и термограмма сушки пластин апельсинов при ступенчатом режиме радиационно-конвективной сушки апельсина

Figure 4. The curve of temperature and drying thermogram orange slices in a step mode radiation-convective drying

После достижения определенного уровня обезвоживания начинается период постоянной скорости сушки. На данной стадии слегка подсушенные пластины апельсинов подвергаются воздействию ИК-лучей, нагреваясь до температуры 323 К (рисунок 3). Одновременно осуществляется обдув воздушным потоком, способствующим удалению образующегося пара. В этот период ключевое значение для скорости процесса имеет удаление осмотической влаги, связанной с клеточной структурой апельсина.

В отличие от первого этапа, скорость теплоносителя здесь уже не так важна, как его температура, ускоряющая испарение влаги.

Финальная стадия процесса характеризуется снижением скорости сушки (период убывающей скорости). Это связано с тем, что значительная часть влаги уже удалена, и оставшаяся влага прочно связана с клеточной структурой. Для эффективного удаления остаточной влаги необходимо уменьшить скорость потока воздуха, предотвращая переусушивание продукта и сохраняя его качество. Температура теплоносителя при этом может оставаться высокой (328 К) или даже увеличиваться (333 К), но главным остается предотвращение чрезмерного нагрева и разрушения продукта. На этом этапе важно точное регулирование параметров процесса для достижения конечной влажности апельсиновых пластин без ухудшения их органолептических свойств.

Заключение

Радиационно-конвективная сушка апельсина – сложный многостадийный процесс, требующий тщательного контроля параметров на каждом этапе. Результаты, полученные опытным путем, и анализ характеристик качества готовых сушеных пластин апельсинов выявили их значительную питательную ценность, что объясняется применением мягких температурных воздействий при сушке, способствующих сохранению витаминов и антиоксидантов, интенсивным влагоудалением, предотвращающим нежелательные ферментативные реакции.

Литература

- 1 Смагулова А.С., Смольникова Ф.Х., Асенова Б.К. и др. Разработка технологии производства натуральных фруктовых чипсов с витаминно-минеральными добавками // Качество продукции, технологий и образования: материалы XIV Междунар. науч.-практ. конф. Магнитогорск: МГТУ им. Г.И. Носова, 2019. С. 58-60.
- 2 Желтоухова Е.Ю., Колесник М.С. Современные тенденции развития рынка цитрусовых культур // Продовольственная безопасность: научное, кадровое и информационное обеспечение: сб. науч. ст. XI Междунар. науч.-практ. конф. Воронеж: ВГУИТ, 2024. С. 63-65.
- 3 Рахматов У.Р., Зиёев Д.Я. Усовершенствование солнечных сушилок для производства фруктовых пастилок // Вестник науки и образования. 2022. № 3(123). С. 22-24.
- 4 Желтоухова Е.Ю., Колесник М.С., Кутейникова П.А. Исследование процесса радиационно-конвективной сушки пластин яблок // Новое в технологии и технике функциональных продуктов питания на основе медико-биологических воззрений: материалы XI Междунар. науч.-практ. конф. Воронеж: ВГУИТ, 2024. С. 284-288.
- 5 Phuon V., Ramos I.N., Brandão T.R.S. et al. Assessment of the impact of drying processes on orange peel quality characteristics // J. Food Process Eng. 2022. Vol. 45. № 7. e13794. doi: 10.1111/jfpe.13794.
- 6 Блохнин М.А., Шелкунов А.В., Очиров В.Д. Анализ современных методов и способов производства чипсов // Научные исследования студентов в решении актуальных проблем АПК. 2020. С. 3-10.
- 7 Салмонов С.Р., Богданов В.А., Очиров В.Д. Экспериментальное исследование процесса радиационно-конвективной сушки яблочных чипсов // Научные исследования и разработки к внедрению в АПК. 2022. С. 302-306.
- 8 Devi N., Kumar S., Sharma K. et al. A review on differential thermal analysis // Chem. Res. J. 2021. Vol. 6. № 4. P. 71-80.
- 9 Скобельская З.Г., Балыхин М.Г., Хасанова С.Д. Исследование форм связывания влаги в помадных массах различного химического состава // Материалы докладов XII Междунар. конф. "Торты. Вафли. Печенье. Пряники-2020". М.: Междунар. пром. акад., 2020. С. 46.

- 10 Ferreira G., Costa A., Lima R. et al. Thermal and compositional analysis of orange essential oil obtained from citrus industry waste // *J. Adv. Therm. Sci. Res.* 2020. Vol. 7. P. 48-55.
- 11 Гавриленков А.М., Емельянов А.Б., Шаров А.В. Экологические аспекты интенсификации конвективной сушки // *Вестн. Воронеж. гос. ун-та инженер. технологий.* 2012. № 3. С. 137-139. doi: 10.20914/2310-1202-2012-3-137-139.
- 12 Mello R.E., Fontana A., Mulet A. et al. PEF as pretreatment to ultrasound-assisted convective drying: Influence on quality parameters of orange peel // *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.* 2021. Vol. 72. 102753. doi: 10.1016/j.ifset.2021.102753.
- 13 Elik A., Armağan H.S., Göğüş F. Impact of radio frequency-assisted hot air drying on drying kinetics behaviors and quality features of orange peel // *Biomass Conversion and Biorefinery.* 2023. Vol. 13. P. 15173-15183. doi: 10.1007/s13399-023-04336-0.
- 14 César M., Melo P.A.T., Carvalho R.F. Physicochemical characterization, convective drying and evaluation of the energy potential of citrus waste for bioenergy production and solid biofuel combustion // *Fuel.* 2025. Vol. 393. 134777. doi: 10.1016/j.fuel.2025.134777.
- 15 Benestante A., Baümler E., Carrín M.E. Drying kinetics of lemon (Citrus lemon) seeds on forced-air convective processing // *Bioresource Technology Reports.* 2024. Vol. 26. 101843. doi: 10.1016/j.biteb.2024.101843.
- 16 Razola-Díaz M.C., Verardo V., Gómez-Caravaca A.M. Mathematical Modelling of Convective Drying of Orange By-Product and Its Influence on Phenolic Compounds and Ascorbic Acid Content, and Its Antioxidant Activity // *Foods.* 2023. Vol. 12. № 3. 500. doi: 10.3390/foods12030500.
- 17 Afrin S.M., Acharjee A., Sit N. Convective drying of orange pomace at different temperatures and characterization of the obtained powders // *Journal of Food Science and Technology.* 2022. Vol. 59. P. 1040-1052. doi: 10.1007/s13197-021-05108-2.
- 18 Alibas I., Yilmaz A. Microwave and convective drying kinetics and thermal properties of orange slices and effect of drying on some phytochemical parameters // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry.* 2022. Vol. 147. P. 8301-8321. doi: 10.1007/s10973-021-11108-3.
- 19 Hosseinalipour S.M., Zaghari P. Design and fabrication of catalytic infrared fruit dryer to evaluate its performance in the bananas drying process // *Journal of Food Processing and Preservation.* 2022. Vol. 46. e16627. doi: 10.1111/jfpp.16627.
- 20 Özkan-Karabacak A., Acoğlu-Çelik B., Özdal T. Microwave-Assisted Hot Air Drying of Orange Snacks: Drying Kinetics, Thin Layer Modeling, Quality Attributes, and Phenolic Profiles // *Journal of Food Biochemistry.* 2023. 6531838. doi: 10.1155/2023/6531838.
- 21 Phuon V., Ramos I.N., Brandão T.R.S., Silva C.L.M. Assessment of the impact of drying processes on orange peel quality characteristics // *Journal of Food Process Engineering.* 2022. Vol. 45. № 7. e13794. doi: 10.1111/jfpe.13794.
- 22 Abderrahim K.A., Remini H., Dahmoune F. Influence of convective and microwave drying on Algerian blood orange slices: Drying kinetics and characteristics, modeling, and drying energetics // *Journal of Food Process Engineering.* 2022. Vol. 45. № 12. e14176. doi: 10.1111/jfpe.14176.

References

- 1 Smagulova A.S., Slnikova F.F., Asenova B.K., Naurzbaeva G.K., Kulushtaeva B.M. Development of technology for production of natural fruit chips with vitamin and mineral additives. Quality of products, technologies and education: Materials of the XIV International Scientific-Practical Conference. Magnitogorsk: Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov, 2019. pp. 58–60. (in Russian).
- 2 Zheltoukhova E.Y., Kolesnik M.S. Modern trends in the development of the market of citrus crops. Food security: scientific, HR and information assurance: Collection of scientific articles and reports of the XI International Scientific and Practical Conference. Voronezh: Voronezh State University of Engineering Technologies, 2024. pp. 63–65. (in Russian).
- 3 Rakhmatov U.R., Ziyoev D.Y. Improvement of solar dryers for the production of fruit pastilles. *Bulletin of Science and Education.* 2022. no. 3(123). pp. 22–24. (in Russian).
- 4 Zheltoukhova E.Yu., Kolesnik M.S., Kuteinikova P.A. Study of the process of radiation-convective drying of apple plates. New in technology and engineering of functional foods on the basis of medical and biological views: Proceedings of the XI International Scientific and Practical Conference. Voronezh: Voronezh State University of Engineering Technologies, 2024. pp. 284–288. (in Russian).
- 5 Phuon V., Ramos I.N., Brandão T.R., Silva C.L. Assessment of the impact of drying processes on orange peel quality characteristics. *Journal of Food Process Engineering.* 2022. vol. 45. no. 7. e13794. doi: 10.1111/jfpe.13794.
- 6 Blokhnin M.A., Shelkunov A.V., Ochirov V.D. Analysis of modern methods and ways of chip production. Scientific research of students in solving urgent problems of a agroindustrial complex. 2020. pp. 3–10. (in Russian).
- 7 Salmonov S.R., Bogdanov V.A., Ochirov V.D. Experimental study of the process of radiation-convective drying of apple chips. Scientific research and developments to implementation in agriculture. 2022. pp. 302–306. (in Russian).
- 8 Devi N., Srivastava S., Yogi B., Gupta S.K. A review on differential thermal analysis. *Chemistry Research Journal.* 2021. vol. 6. no. 4. pp. 71–80.
- 9 Skobel'skaya Z.G., Balikhin M.G., Khasanova S.D. Research of the forms of moisture binding in fondant masses of different chemical composition. Proceedings of the XII International Conference 'Cakes. Wafers. Biscuits. Gingerbread 2020. Production-Market-Consumer'. Moscow: International Industrial Academy, 2020. vol. 26. pp. 46. (in Russian).
- 10 Ferreira G., Sobral L., Barreto D.W., Calado V. Thermal and compositional analysis of orange essential oil obtained from citrus industry waste. *Journal of Advanced Thermal Science Research.* 2020. vol. 7. pp. 48–55.
- 11 Gavril'nikov A.M., Emelyanov A.B., Sharov A.V. Ecological aspects of intensification of convective drying. *Bulletin of the Voronezh State University of Engineering Technologies.* 2012. no. 3. pp. 137–139. doi: 10.20914/2310-1202-2012-3-137-139. (in Russian).

12 Mello R.E., Fontana A., Mulet A. et al. PEF as pretreatment to ultrasound-assisted convective drying: Influence on quality parameters of orange peel. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*. 2021. vol. 72. 102753. doi: 10.1016/j.ifset.2021.102753.

13 Elik A., Armağan H.S., Göğüş F. Impact of radio frequency-assisted hot air drying on drying kinetics behaviors and quality features of orange peel. *Biomass Conversion and Biorefinery*. 2023. vol. 13. pp. 15173–15183. doi: 10.1007/s13399-023-04336-0.

14 César M., Melo P.A.T., Carvalho R.F. Physicochemical characterization, convective drying and evaluation of the energy potential of citrus waste for bioenergy production and solid biofuel combustion. *Fuel*. 2025. vol. 393. 134777. doi: 10.1016/j.fuel.2025.134777.

15 Benestante A., Baümler E., Carrín M.E. Drying kinetics of lemon (Citrus lemon) seeds on forced-air convective processing. *Bioresource Technology Reports*. 2024. vol. 26. 101843. doi: 10.1016/j.biteb.2024.101843.

16 Razola-Díaz M.C., Verardo V., Gómez-Caravaca A.M. Mathematical Modelling of Convective Drying of Orange By-Product and Its Influence on Phenolic Compounds and Ascorbic Acid Content, and Its Antioxidant Activity. *Foods*. 2023. vol. 12. no. 3. 500. doi: 10.3390/foods12030500.

17 Afrin S.M., Acharjee A., Sit N. Convective drying of orange pomace at different temperatures and characterization of the obtained powders. *Journal of Food Science and Technology*. 2022. vol. 59. pp. 1040–1052. doi: 10.1007/s13197-021-05108-2.

18 Alibas I., Yilmaz A. Microwave and convective drying kinetics and thermal properties of orange slices and effect of drying on some phytochemical parameters. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2022. vol. 147. pp. 8301–8321. doi: 10.1007/s10973-021-11108-3.

19 Hosseinalipour S.M., Zaghari P. Design and fabrication of catalytic infrared fruit dryer to evaluate its performance in the bananas drying process. *Journal of Food Processing and Preservation*. 2022. vol. 46. e16627. doi: 10.1111/jfpp.16627.

20 Özkan-Karabacak A., Acoğlu-Çelik B., Özdal T. Microwave-Assisted Hot Air Drying of Orange Snacks: Drying Kinetics, Thin Layer Modeling, Quality Attributes, and Phenolic Profiles. *Journal of Food Biochemistry*. 2023. 6531838. doi: 10.1155/2023/6531838.

21 Phuon V., Ramos I.N., Brandão T.R.S., Silva C.L.M. Assessment of the impact of drying processes on orange peel quality characteristics. *Journal of Food Process Engineering*. 2022. vol. 45. no. 7. e13794. doi: 10.1111/jfpe.13794.

22 Abderrahim K.A., Remini H., Dahmoune F. Influence of convective and microwave drying on Algerian blood orange slices: Drying kinetics and characteristics, modeling, and drying energetics. *Journal of Food Process Engineering*. 2022. vol. 45. no. 12. e14176. doi: 10.1111/jfpe.14176.

Сведения об авторах

Екатерина Ю. Желтоухова к.т.н., доцент, кафедра машин и аппаратов пищевых производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, katsturova@gmail.com
 <https://orcid.org/0000-0002-7463-9013>

Мария С. Колесник студент, инженер, кафедра машин и аппаратов пищевых производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, mkolesnik0310@mail.ru
 <https://orcid.org/0009-0001-6757-5939>

Анастасия В. Терёхина к.т.н., доцент, кафедра технологии жиров, процессов и аппаратов химических и пищевых производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, gorbatova.nastia@ya.ru
 <https://orcid.org/0000-0003-4433-9615>

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

Ekaterina Y. Zheltoukhova Cand. Sci. (Engin.), assistant professor, machines and apparatuses for food production department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, katsturova@gmail.com
 <https://orcid.org/0000-0002-7463-9013>

Maria S. Kolesnik student, engineer, machines and apparatuses for food production department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, mkolesnik0310@mail.ru
 <https://orcid.org/0009-0001-6757-5939>

Anastasia V. Terekhina Cand. Sci. (Engin.), assistant professor, technologies of fats, processes and devices of chemical and food production department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, gorbatova.nastia@ya.ru
 <https://orcid.org/0000-0003-4433-9615>

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 03/02/2025	После редакции 03/03/2025	Принята в печать 17/03/2025
Received 03/02/2025	Accepted in revised 03/03/2025	Accepted 17/03/2025