

Современные методы бланширования и их влияние на процесс сушки фруктов и овощей

Л. Ч. Бурак

Общество с ограниченной ответственностью "БЕЛПРОСАКВА", г. Минск, Республика Беларусь;
e-mail: leonidburak@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6613-439X>

Информация о статье Реферат

Поступила
в редакцию
11.03.2025;

принята
к публикации
17.03.2025

Ключевые слова:

фрукты, овощи,
микробиологическая
обсемененность,
сушка,
бланширование,
инфракрасное излучение,
пищевая ценность,
качество

Традиционные методы сушки фруктов и овощей являются эффективным способом сохранения и увеличения срока годности плодоовощного сырья. Вместе с тем процесс сушки часто приводит к нежелательным изменениям физико-химических, органолептических свойств и пищевой ценности высушенных продуктов. Бланширование как метод предварительной подготовки плодоовощного сырья перед сушкой оказывает значительное влияние как на процесс сушки, так и на качество готового продукта. Цель данного исследования – анализ современных способов бланширования, эффективность их влияния на процесс сушки фруктов и овощей и качество готового продукта. В ходе анализа научных публикаций основное внимание уделялось инфракрасному бланшированию. В качестве материалов и методов исследования послужили 104 научные публикации. В обзор включены статьи, опубликованные на английском и русском языках в 2015–2025 гг. Поиск научной литературы по данной теме проводили по ключевым словам в библиографических базах Scopus, Web of science, PubMed и Google Scholar. Анализ данных выполнен с их систематизацией, обобщением, промежуточными выводами и общим заключением с использованием элементов искусственного интеллекта. В ходе анализа научных исследований установлены достоинства и недостатки различных методов бланшировки, таких как бланширование водой, паром, также микроволновое, инфракрасное, которые используются в качестве предварительной обработки фруктов и овощей перед проведением технологического процесса сушки. Инфракрасное бланширование является современной инновационной технологией, оказывающей эффективное влияние на улучшение качества сушеных продуктов за счет значительного сокращения времени сушки и, соответственно, энергоемкости процесса. Данные исследований свидетельствуют о том, что инфракрасное бланширование может сократить время сушки до 50 %, увеличить скорость сушки и снизить потребление энергии примерно на 17 %, достигая уровня энергоэффективности 80–90 %. Однако максимальная эффективность инфракрасного метода бланшировки достигается при соблюдении таких параметров, как толщина продукта (2–5 см), длительность обработки (от 30 секунд до нескольких минут) и расстояние от инфракрасного излучателя (10–30 см). Результаты научных исследований показали, что использование инфракрасного способа бланширования оказывает положительное влияние на консистенцию, сохранение цвета и питательных веществ в сушеных фруктах и овощах. При этом существующие ограничения использования данного метода бланширования требуют проведения дальнейших научных исследований, которые должны быть направлены на анализ эффективности применения комбинированных методов бланшировки, установление и оптимизацию параметров обработки, которые позволят повысить эффективность процесса сушки овощей и фруктов и будут способствовать максимальному сохранению пищевой ценности и качества сушеных продуктов.

Для цитирования

Бурак Л. Ч. Современные методы бланширования и их влияние на процесс сушки фруктов и овощей. Вестник МГТУ. 2025. Т. 28, № 2. С. 273–295. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2025-28-2-273-295>.

Modern methods of blanching and their influence on the process of drying fruits and vegetables

Leonid Ch. Burak

Limited Liability Company "BELROSAKVA", Minsk, Republic of Belarus;
e-mail: leonidburak@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6613-439X>

Article info

Received
11.03.2025;

accepted
17.03.2025

Key words:

fruits,
vegetables,
microbiological
contamination,
drying,
blanching,
infrared radiation,
nutritional value,
quality

Abstract

Traditional methods of drying fruits and vegetables are effective ways to preserve and increase the shelf life of fruit and vegetable raw materials. However, the drying process often leads to undesirable changes in the physicochemical, organoleptic properties and nutritional value of dried products. Blanching as a method of preliminary preparation of fruit and vegetable raw materials before drying has a significant impact on both the drying process and the quality of the finished product. The purpose of this study is to analyze modern blanching methods, the effectiveness of their impact on the drying process of fruits and vegetables and the quality of the finished product. During the analysis of scientific publications, the main attention has been paid to infrared blanching. 104 scientific publications have served as materials and methods of the study. The review includes articles published in English and Russian in 2015–2025. The search for scientific literature on this topic has been carried out by keywords in the bibliographic databases Scopus, Web of science, PubMed and Google Scholar. The data analysis has been performed with their systematization, generalization, intermediate conclusions and a general conclusion using elements of artificial intelligence. During the analysis of scientific research, the advantages and disadvantages of various blanching methods have been established, such as blanching with water, steam, as well as microwave, infrared, which are used as a preliminary treatment of fruits and vegetables before the drying process. Infrared blanching is a modern innovative technology that has an effective impact on improving the quality of dried products by significantly reducing the drying time and, accordingly, the energy intensity of the process. Research data indicate that infrared blanching can reduce drying time by up to 50 %, increase the drying speed and reduce energy consumption by about 17 %, reaching energy efficiency levels of 80–90 %. However, the maximum efficiency of the infrared blanching method is achieved when observing such parameters as product thickness (2–5 cm), processing time (from 30 seconds to several minutes) and distance from the infrared emitter (10–30 cm). The results of scientific research have shown that the use of the infrared blanching method has a positive effect on the consistency, color and nutrient retention in dried fruits and vegetables. At the same time, the existing limitations of using this blanching method require further scientific research, which should be aimed at analyzing the effectiveness of using combined blanching methods, establishing and optimizing processing parameters that will increase the efficiency of the drying process of vegetables and fruits and will contribute to the maximum preservation of the nutritional value and quality of dried products.

For citation

Burak, L. Ch. 2025. Modern methods of blanching and their influence on the process of drying fruits and vegetables. *Vestnik of MSTU*, 28(2), pp. 273–295. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2025-28-2-273-295>.

Введение

Фрукты и овощи имеют высокое содержание воды (80–90 %), что приводит к порче продуктов и последующей потере качества и пищевой ценности плодоовощного сырья. Поиск и применение современных способов и методов сушки плодоовощного сырья направлены на обеспечение качества и микробиологической стабильности сушеных продуктов в процессе хранения и увеличения срока годности без применения синтетических консервантов. Вместе с тем процесс сушки может привести к деградации и разрушению биологически активных веществ из-за их термической чувствительности. С этой целью особо важно найти подходящие методы сушки, которые обеспечивают получение новых продуктов с высокопористой высушенной текстурой, высоким уровнем удержания активных ингредиентов, оптимальным выходом при сушке и максимальным сохранением фитокомпонентов, а также более высокой энергоэффективностью, низкой стоимостью, безопасностью и экологичностью (Бурак, 2025; Adeyeye et al., 2022). Для решения этих проблем научное сообщество находится в постоянном поиске эффективных методов и способов предварительной подготовки сырья перед сушкой, которые позволят повысить эффективность процесса и качество готовой продукции.

Бланширование является наиболее значимым методом предварительной обработки фруктов, овощей и других пищевых продуктов (Бурак, 2024a; Richter Reis, 2023). Бланшировка – одна из основных операций предварительной обработки перед сушкой, консервированием или замораживанием фруктов и овощей. Бланширование горячей водой (БГВ) и бланширование острым паром (БОП) обычно используются в пищевой промышленности для предварительной обработки фруктов и овощей (Бурак и др., 2024a; Wu et al., 2024). Основная цель процесса бланширования – инактивировать в пищевом сырье эндоферменты, такие как полифенолоксидаза (ПФО), пероксидаза (ПОД) и каталаза, которые отвечают за потемнение пищевых продуктов и выделение неприятных запахов во время обработки и хранения (Бурак и др., 2024a; Xiao et al., 2017). Несмотря на вызванную нагреванием инактивацию ферментов, бланширование позволяет сохранить органолептические свойства плодоовощного сырья, смягчает консистенцию пищевых продуктов, облегчая последующие операции, такие как очистка, нарезка или сушка (Wu et al., 2024). Этот процесс также способствует снижению микробиологической обсемененности на поверхности пищевых продуктов, тем самым продлевая срок годности конечных продуктов (Бурак, 2024a). Для достижения максимальной эффективности процесса необходимо тщательно оптимизировать временные и температурные параметры бланширования. Неправильные условия бланширования могут привести к значительным потерям питательных веществ и нежелательным изменениям органолептических показателей. Потому на протяжении последних десятилетий были проведены обширные исследования для определения оптимальных условий бланширования для различных пищевых продуктов с учетом типа, размера и тепловых свойств продуктов.

Результаты последних научных достижений по оценке методов бланширования показали перспективу и необходимость использования, эффективность, универсальность и энергоемкость таких методов, как инфракрасное (ИК), микроволновое (МВ) и ультразвуковое (УЗ) бланширование (Бурак, 2024b; Llavata et al., 2020). Инфракрасное бланширование (ИКБ) является эффективным и универсальным методом обработки пищевых продуктов, обеспечивающим значительные преимущества в энергоэффективности, времени обработки и теплопередаче по сравнению с традиционными термическими методами (ТМ) (Бурак и др., 2024b; Okonkwo et al., 2022; Tyagi et al., 2020). Высокая энергоэффективность в процессе применения инфракрасного излучения обусловлена тем, что во время ИК-нагрева энергия может быстро передаваться от излучателя к продуктам питания в виде волн без нагрева окружающей среды, что снижает потери тепла и сводит к минимуму ухудшение качества продукта, что еще больше сокращает время обработки и затраты на электроэнергию (Бурак и др., 2024b; Huang et al., 2021). Например, в своем исследовании Anuj Sonal et al. (2020) продемонстрировали потребление энергии 5,3; 3,4 и 3,2 кВтч/кг при работе ИК-сушилки при температурах 50, 60 и 70 °С соответственно, что указывает на оптимальную энергоэффективность при 70 °С. Эффективность ИК-нагрева в основном зависит от того, насколько материал поглощает ИК-излучение; чем больше поглощение ИК-излучения, тем эффективнее нагрев. Когда длины волн излучателя совпадают с длинами волн нагретого материала, генерируемая ИК-энергия может быть максимально поглощена, вызывая резонанс и трение между молекулами материала, что приводит к повышению его температуры (Бурак и др., 2024b).

В процессе научного обзора установлено, что многие научные публикации сосредоточены на общих аспектах процесса бланширования и нет углубленных анализов конкретного использования современных методов бланширования, их достоинств и недостатков, включая инфракрасный метод бланширования в качестве предварительной обработки в процессе сушки фруктов и овощей.

Цель данного исследования – анализ современных способов бланширования, инфракрасного нагрева, эффективность их влияния на процесс сушки фруктов и овощей и качество готового продукта. Наряду

с традиционными и инновационными методами бланширования значительное внимание уделялось анализу и оценке последних достижений в применении инфракрасного метода бланширования.

Материалы и методы

В качестве материалов и методов исследования послужили 104 научные публикации. В обзор включены статьи, опубликованные на английском и русском языках в 2015–2025 гг. Поиск научной литературы по данной теме проводили по ключевым словам в библиографических базах Scopus, Web of science, PubMed и Google Scholar. Отбор источников для анализа реализовался по следующим ключевым словам: infrared radiation, quality, nutritional value, blanching, cleaning of vegetables and fruits, drying of fruit and vegetable raw materials, enzyme inactivation, microbiological contamination, инфракрасное излучение, качество, пищевая ценность, бланширование, очистка овощей и фруктов, сушка плодоовощного сырья, инактивация ферментов, микробиологическое загрязнение.

Применялись следующие критерии включения для статей, подлежащих анализу:

- 1) статья написана в период 2015–2025 гг.;
- 2) статья соответствует теме исследования;
- 3) типы анализируемых статей – оригинальные исследовательские статьи, обзорные статьи, краткие отчеты.

Критерии исключения для статей, подлежащих анализу:

- 1) статья не соответствует теме данного обзора: не касается тематики бланширования как метода предварительной обработки фруктов и овощей перед сушкой, современных инновационных технологий бланшировки, каталитического инфракрасного нагрева при обработке плодов и овощей;
- 2) статья написана не на английском языке, статья на русском языке не входит в РИНЦ;
- 3) содержание статьи дублируется. Если из разных баз данных или разных электронных библиотечных систем были извлечены повторяющиеся источники, их классифицировали только один раз.

Анализ данных выполнен с их систематизацией, обобщением, промежуточными выводами и общим заключением с использованием элементов искусственного интеллекта.

Результаты и обсуждение

1. Принцип действия инфракрасного излучения (ИК-излучения)

Инфракрасное (ИК) излучение – это электромагнитные волны, которые находятся между видимым светом и микроволнами и охватывают диапазон от 0,78 до 1 000 мкм. В зависимости от длины волны ИК-диапазон делится на три области: ближнюю ИК (0,78–1,4 мкм), среднюю ИК (1,4–3,0 мкм) и дальнюю ИК (3,0–1 000 мкм) (Бурак и др., 2024а; 2024б; Adeyeye et al., 2022; Oduola et al., 2022). ИК-нагрев работает на основе селективного поглощения, при котором молекулы воды и полярные соединения в тканях растений поглощают ИК-излучение, что приводит к быстрому нагреву и испарению влаги (Aboud et al., 2019; Adeyeye et al., 2022). Этот механизм обеспечивает эффективную и целенаправленную передачу энергии от источника ИК-тепла к продукту. В пищевой промышленности ближний ИК-нагрев обычно используется для неразрушающего контроля и оценки качества сырья и готовой продукции, тогда как дальний и средний ИК-нагрев применяются для нагрева, бланширования и сушки фруктов и овощей (Бурак и др., 2024а; Fayaz et al., 2023). Лучевая энергия передается материалу во время ИК-нагрева, вызывая вращение и вибрацию молекул. Когда молекулы возвращаются в свое естественное состояние, поглощенная энергия преобразуется в тепло, что способствует термической обработке (Xiao et al., 2017; Oduola et al., 2022).

Для применения в пищевой промышленности при обработке фруктов и овощей были изучены два основных типа систем ИК-нагрева: электрический инфракрасный нагрев (ЭИК-нагрев) и каталитический инфракрасный нагрев (КИК-нагрев) (Wu et al., 2024). При бланшировании с помощью ЭИК используются электрически нагреваемые излучатели, такие как вольфрамовая нить или нихромовая проволока, для генерации необходимого ИК-излучения. Эти излучатели обычно располагаются над или под продуктом, что обеспечивает прямой нагрев поверхности (Fayaz et al., 2023). Напротив, бланширование с помощью КИК основано на сжигании топлива, обычно природного газа или пропана, для генерации ИК-энергии. Системы КИК обеспечивают высокую энергоэффективность по сравнению с ЭИК, достигая эффективности 80–90 % при потреблении на 60–70 % меньше энергии, чем электрические системы инфракрасного нагрева (Бурак и др., 2024б; Tyagi et al., 2020; Wang et al., 2024). Такое значительное снижение потребления энергии в первую очередь объясняется особым механизмом нагрева, который включает каталитическую реакцию, преобразующую топливо в тепло. В электрических нагревателях ЭИК катализатор, обычно состоящий из металлов, таких как платина или палладий, необходимо сначала предварительно нагреть

примерно до 150 °С, чтобы активировать его (Gu et al., 2022; Wang et al., 2024). После активации источник питания автоматически отключается, что позволяет экономить энергию и поддерживать оптимальные условия для каталитической реакции. На этом этапе катализатор вводится в источник топлива (например, природный газ или пропан) вместе с воздухом, вызывая каталитическую реакцию, которая способствует горению без открытого пламени (Wu et al., 2024). Полученное тепло передается на материал подложки, обычно керамический или металлический, который эффективно излучает ИК-энергию (Huang et al., 2021). В результате нагреватели КИК испускают ИК-излучение, которое напрямую нагревает целевой продукт, а не просто нагревает окружающий воздух, что повышает эффективность нагрева и снижает потребление энергии (Бурак и др., 2024б; Wu et al., 2024).

Вместе с тем необходимо отметить, что системы ЭИК, как правило, обеспечивают лучший контроль температуры и легче интегрируются в существующие технологические линии (Joardder et al., 2023). ЭИК системы бланширования можно дополнительно классифицировать в соответствии с конкретными диапазонами длин волн, которые они излучают и которые определяются типом используемого нагревательного элемента.

Три основные категории ЭИК-нагревателей – это керамические, кварцевые и галогенные нагреватели (Tyagi et al., 2020). Керамические ИК-нагреватели используют резистивный керамический элемент, который нагревается до высоких температур – обычно от 300 до 700 °С – для генерации длинноволнового ИК-излучения в диапазоне длин волн 2–10 мкм. Эта длинноволновая ИК-энергия особенно эффективна для быстрого поверхностного нагрева пищевых продуктов, что делает керамические ИК-нагреватели популярным выбором при использовании ИК-бланширования (Joardder et al., 2023; Zhao et al., 2023). С другой стороны, кварцевые ИК-нагреватели используют кварцево-галогеновую лампу в качестве нагревательного элемента, которая может достигать температуры до 2 000 °С. Эти нагреватели излучают средневолновое и коротковолновое ИК-излучение, как правило, в диапазоне длин волн 0,9–3,5 мкм. Более короткие длины волн, создаваемые кварцевыми ИК-нагревателями, обеспечивают более глубокое проникновение в продукт, что делает их пригодными для применений, требующих более объемного нагрева (Jenkins et al., 2019; Joardder et al., 2023). Галогенные ИК-нагреватели похожи на кварцевые ИК-нагреватели, но используют вольфрамовую нить, заключенную в кварцевую оболочку, заполненную галогеном. Такая конфигурация позволяет галогенным ИК-нагревателям работать при еще более высоких температурах, до 2 500 °С, создавая коротковолновое ИК-излучение в диапазоне 0,7–1,4 мкм. Высокоинтенсивная коротковолновая энергия галогенных ИК-нагревателей способствует быстрому нагреву поверхности и обеспечивает повышенную энергоэффективность по сравнению с другими технологиями ЭИК (Joardder et al., 2023).

Выбор подходящего типа нагревателя ЭИК (керамический, кварцевый или галогенный) для ИК-бланширования зависит от конкретных характеристик продукта, желаемых профилей нагрева и общих требований к конструкции системы. Однако галогенные нагреватели для ИК-бланширования (ИКБ) могут представлять некоторые проблемы из-за высоких рабочих температур (до 2 500 °С). Интенсивное высокоэнергетическое излучение потенциально может повредить поверхность пищевого продукта во время бланширования, поэтому требует более щадящего и контролируемого нагрева. Как правило, диапазон температур, обычно используемый для бланширования пищевых продуктов, составляет от 650 до 1 200 °С (Tyagi et al., 2020). Глубина проникновения ИК-излучения в пищевые продукты сильно зависит от длины волны ИК-излучения. Более коротковолновое ближнее ИК-излучение (0,7–1,4 мкм) может проникать глубже в пищевую матрицу по сравнению с более длинноволновым ближним ИК-излучением (2–4 мкм) или дальним ИК-излучением (4–14 мкм) (Joardder et al., 2023; Tyagi et al., 2020).

Состав и структура пищевого продукта также играют значительную роль в определении глубины проникновения ИК-излучения (Delfiya et al., 2022; Phyo et al., 2019). Продукты с более высоким содержанием воды и более плотной структурой обычно демонстрируют меньшую глубину проникновения из-за повышенного поглощения и рассеивания ИК-излучения. И наоборот, продукты с более низким содержанием воды и менее плотной структурой допускают более глубокое проникновение ИК-излучения (Tyagi et al., 2020; Phyo et al., 2019). В работе Tyagi et al. (2020) авторы изучали глубину проникновения ИК-излучения при нагревании различных пищевых материалов. Результаты показали, что глубина проникновения для печени составила 4 мм при длине волны 1 мкм и 12 мм при 0,88 мкм. Более того, глубина проникновения при длине волны 1 мкм менялась в зависимости от различных пищевых материалов: 2 мм для зерна, 1,5 мм для моркови, 1 мм для томатной пасты (содержание влаги 75–85 %), 12 мм для хлеба и 6 мм для сырого картофеля (Tyagi et al., 2020).

Поэтому выбор длины волны ИК-излучения и системы нагрева следует тщательно анализировать, чтобы оптимизировать баланс между поверхностным нагревом, внутренним проникновением и общими качественными характеристиками пищевого продукта. Следует отметить, что глубина проникновения ИК-энергии не оказала существенного влияния на распределение температуры внутри пищевого материала

(Huang et al., 2021). Механизм повышения внутренней температуры пищевых материалов во время ИКБ включает избирательное поглощение и нагревание различных компонентов пищи, в частности молекул воды (Tyagi et al., 2020). Когда ИК-излучение взаимодействует с поверхностью пищи, высокоэнергетические фотоны преимущественно поглощаются молекулами воды во внешних слоях. Это избирательное поглощение заставляет молекулы воды вибрировать и увеличивает кинетическую энергию, что приводит к быстрому повышению температуры на поверхности (Joardder et al., 2023). Затем нагретые молекулы воды передают свою тепловую энергию окружающей пищевой матрице посредством процессов кондуктивного и конвективного теплопереноса (Bouhile et al., 2025). Этот локализованный нагрев поверхности создает температурный градиент, который направляет тепло внутрь, даже когда ИК-излучение не достигает более глубоких областей продукта (Tyagi et al., 2020). Кроме того, другие компоненты пищи, такие как белки и углеводы, могут поглощать ИК-излучение, способствуя общему нагреву пищи (Joardder et al., 2023). Относительное распределение воды, белков и других молекул в структуре пищи влияет на эффективность этого механизма нагрева (Бурак и др., 2024а).

Понимание этих сложных взаимодействий между ИК-энергией и компонентами обрабатываемого продукта имеет решающее значение для оптимизации процесса ИКБ для различных видов овощей и фруктов.

2. Современные технологии бланширования фруктов и овощей

2.1. Традиционные технологии бланширования

Бланширование горячей водой (БГВ) является наиболее широко используемым и применяемым в промышленности методом бланширования пищевых продуктов благодаря своей простоте и удобству эксплуатации (Бурак, 2024б; Bouhile et al., 2025; Abu-Ghannam et al., 2015). При БГВ пищевые продукты погружаются в горячую воду обычно в диапазоне от 70 до 100 °С на несколько минут. Данная обработка способствует инактивации ферментов, изменению консистенции и удалению кожуры (Richter Reis, 2023). Однако обычное БГВ также может приводить к нежелательным побочным эффектам, таким как повреждение клеток тканей, денатурация белка и потеря питательных веществ (Бурак, 2025; Бурак, 2024б; Xiao et al., 2017). Горячая вода вызывает выщелачивание или диффузию водорастворимых питательных веществ, таких как витамины, минералы, углеводы, сахара и белки, в воду для бланширования (Бурак, 2025; Renard et al., 2023). Кроме того, это приводит к деградации термочувствительных биологически активных соединений, снижению аромата, изменению вкуса (Richter Reis, 2023). Так, например, Avila et al. (2023) сообщили, что БГВ в течение 1 мин привел к потере приблизительно 26, 20, 14, 13 и 12 % фенольных соединений в водном шпинате, белокочанной капусте, шпинате, луке-шалоте и брюссельской капусте соответственно. В исследовании Abu-Ghannam et al. (2015) установили, что обработка кипящей водой значительно снизила антиоксидантную способность капусты. Аналогичное снижение общего содержания фенолов и антиоксидантных веществ было отмечено после БГВ в различных овощах, таких как красный болгарский перец (Wang et al., 2017), ямс (Quayson et al., 2021), самнамул (Kim et al., 2020) и картофель (Makavana, 2018). При этом сточные воды от операций с горячей водой часто содержат высокие уровни органических веществ и питательных веществ, таких как азот и фосфор, из-за выщелачивания и растворения водорастворимых соединений, а при несоблюдении экологических требований они могут способствовать загрязнению окружающей среды (Бурак, 2025; Akinnowo, 2023).

ИКБ является современной и более эффективной альтернативой термическим методам бланширования. Процесс ИК-нагрева, как правило, требует меньше времени обработки, чем традиционные методы, поскольку энергия напрямую передается пищевому материалу без необходимости использования внешнего источника нагрева (Бурак и др., 2024б; Tyagi et al., 2020). Прямое воздействие обеспечивает такие преимущества, как высокая тепловая эффективность, минимальные изменения качества продукта, а также сокращение времени обработки и затрат на электроэнергию (Wu et al., 2024). Кроме того, контролируемое применение ИК-излучения помогает сохранить цвет, текстуру и общее сенсорное качество сушеных фруктов и овощей, что приводит к получению превосходного конечного продукта (Bouhile et al., 2025; Tyagi et al., 2020). Например, Wu et al. (2018b) обнаружили, что морковь, бланшированная ИК-излучением и высушенная горячим воздухом, показала более высокую скорость сушки, потребовала меньше времени на сушку, сохранила больше витамина С, показала лучшую способность к регидратации, незначительно изменила цвет и имела меньшую толщину и радиальную усадку по сравнению с образцами, бланшированными ГВ и высушенными горячим воздухом. Аналогичным образом, Okonkwo et al. (2022) наблюдали, что картофель, бланшированный ИК-излучением, имел наименьшее изменение цвета, самую медленную потерю влаги, более низкую микробную активность и более высокий уровень витамина С, чем образцы, бланшированные ГВ. Касаемо инактивации ферментов установлено, что ИК-нагрев потребовал 10–15 мин для бланширования

ломтиков моркови, что значительно дольше, чем 5–10 мин, необходимых для методов кипячения паром и ГВ. Разницу можно объяснить постепенным повышением температуры и движением воздуха на поверхности образца во время ИКБ (*Bouhile et al., 2025*). Эти факторы способствуют более контролируемому и стабильному повышению температуры, что приводит к улучшению качества продукта, о чем свидетельствует более высокое сохранение витамина С по сравнению с бланшированием паром и горячей водой.

Бланширование горячим воздухом (БГВо) – еще один традиционный метод предварительной обработки фруктов и овощей, при котором нагретый воздух используется для инактивации ферментов и сохранения качества продукта перед сушкой (*Bouhile et al., 2025; Guo et al., 2023*). Сравнительные исследования показывают, что хотя БГВо и ИКБ направлены на сохранение цвета и текстуры, ИК-бланширование, как правило, более эффективно сохраняет консистенцию и структуру фруктов и овощей за счет быстрого нагрева (*Ju et al., 2023*). Так, например, *Jiang et al. (2024)* сравнили воздействие ИКБ и БГВо на клубнику и установили, что ИКБ вызвал незначительные структурные повреждения, что позволило образцам сохранить пористую текстуру, которая усилила их хрусткость. Напротив, БГВо привело к большей деградации цвета и разрушению клеточных стенок, что вызвало потерю структурной целостности из-за длительного времени сушки и постепенного повышения температуры.

2.2. Инновационные технологии бланширования

Микроволновое бланширование (МВБ) – это инновационный метод термической обработки, который использует электромагнитные волны для быстрого нагрева и инактивации ферментов во фруктах и овощах и представляет эффективную альтернативу традиционным методам бланширования (*Guruprasad et al., 2024; Бурак и др., 2023*). Исследование, проведенное *Okonkwo et al. (2022)*, показало, что МВБ картофеля значительно эффективнее дезактивирует ферменты пероксидазы (ПОД), требуя всего 5–7 мин по сравнению с 18–21 мин, которые необходимы для ИКБ. Кроме того, МВБ ассоциируется с уменьшенной утечкой электролита и улучшенной микроструктурной целостностью, что указывает на минимальное повреждение клеточных мембран. Вместе с тем ИКБ во многих случаях более эффективно для сохранения качества продукта, о чем свидетельствует меньшее изменение цвета и потеря влаги. При сравнении ИКБ и МКБ относительно глубины проникновения возникают значительные различия из-за их соответствующих механизмов теплопередачи (*Zahoor et al., 2023*). ИКБ использует лучевую энергию для нагрева поверхности пищи, а затем тепло передается внутрь посредством теплопроводности. Это приводит к ограниченной глубине проникновения, что делает его эффективнее для более мелких или тонких пищевых продуктов, поскольку внешним слоям нужно время, чтобы провести тепло к центру (*Bouhile et al., 2025; Xiao et al., 2017*). Напротив, МКБ использует электромагнитные волны, которые перемешивают молекулы воды внутри пищи, равномерно генерируя тепло по всему материалу и обеспечивая более глубокое проникновение, часто простирающееся на несколько сантиметров в зависимости от частоты и характеристик пищи (*Nguyen et al., 2022; Zahoor et al., 2023*). Этот объемный нагрев обеспечивает равномерное распределение тепла и более короткое время обработки, что особенно полезно для более толстых или плотных продуктов (*Zeng et al., 2022*).

Радиочастотное бланширование (РЧБ), как и микроволновый нагрев, представляет собой метод диэлектрического нагрева, который использует электромагнитные поля на радиочастотах для достижения объемного нагрева пищи (*Zhang et al., 2020a*). РЧ-нагрев имеет несколько преимуществ по сравнению с ИК- и микроволновым нагревом, включая более равномерное распределение и более глубокое проникновение тепла, причем глубина проникновения достигает нескольких дециметров (*Zeng et al., 2022; Zhang et al., 2020b*). Этот метод, как правило, способствует более быстрому тепловому равновесию, потенциально сокращая общее время обработки по сравнению с ИКБ (*Zeng et al., 2022*). Кроме того, процесс РЧБ приводит к меньшей потере влаги и лучшему сохранению клеточной целостности, вероятно, из-за его способности быстро генерировать пар внутри пищевых матриц (*Guo et al., 2019*). Вместе с тем большие габаритные размеры и высокая стоимость оборудования РЧБ являются значительной проблемой для промышленного использования, тогда как оборудование ИКБ, как правило, более простое и экономически эффективное (*Бурак и др., 2024a; Guo et al., 2019; Zeng et al., 2022*).

Омическое бланширование (ОБ) – один из инновационных методов обработки пищевых продуктов, в процессе которого для повышения эффективности нагрева используют электрический ток (*Бурак и др., 2024a; Guida et al., 2013*). Омический нагрев можно использовать для пищевых продуктов с проводимостью от 0,1 до 10 см/м. Напряженность электрического поля, конфигурация электродов и проводимость нагреваемого материала генерируют потоки тока, которые обуславливают высокую плотность мощности и быстрое выделение тепловой энергии. Параметры, применяемые при ОН: напряжение от 400 до 4000 В; мощность поля от 20 до 400 В/см, зазор между электродами – от 10 до 50 см. Скорость нагрева

определяется эффективностью источника энергии, конструкцией оборудования и характером тепловой среды, например проводимостью, вязкостью и теплоемкостью (Бурак и др., 2024a). Этот процесс может включать добавление веществ с ионной связью, таких как соли или кислоты, для улучшения проводимости, что обеспечивает быстрый и равномерный нагрев, который необходим для бланширования (Misra et al., 2022). Вместе с тем внесение таких веществ может создавать проблемы, особенно в кислых средах (около pH 3,5), что может привести к коррозии и эрозии электродов, оказывая влияние на срок службы оборудования, и потенциально изменить вкус и качество пищевых продуктов (Bouhile et al., 2025).

Несмотря на явные преимущества многих инновационных методов бланширования, исследования синергетических подходов, объединяющих ИКБ с другими методами, такими как МВ, радиочастотный и омический нагрев, остаются ограниченными. Исследование этих комбинированных методов имеет значительный потенциал для повышения эффективности и качества конечной обработки продукта. Отсутствие научных знаний по результатам комбинированного применения различных методов бланширования требует проведения дальнейших исследований, потенциально стимулируя разработку более эффективных, энергосберегающих и устойчивых методов бланширования.

3. Основные цели бланширования фруктов и овощей

3.1. Инактивация ферментов

Основная цель бланширования – дезактивация ферментов, оказывающих влияние на физико-химические и микробиологические процессы, которые имеют решающее значение для сохранения качества и стабильности пищевых продуктов в процессе сушки (Llavata et al., 2020). Ферменты – это природные катализаторы, присутствующие в различных пищевых системах, которые оказывают негативное влияние на изменения цвета, вкуса, текстуры и пищевой ценности растительного сырья (Бурак, 2024a).

Полифенолоксидазы (ПФО) – одни из таких ферментов, присутствующих во фруктах и овощах, которые вызывают ферментативное потемнение. Этот процесс приводит к характерным изменениям цвета, таким как коричневое обесцвечивание яблок или бананов из-за окисления фенольных соединений до хинонов (de Souza et al., 2024; El-Mesery et al., 2023; Iqbal et al., 2019; Sui et al., 2023). Другим ферментом, участвующим в потемнении, является полиоксидаза (ПОД), которая реагирует с перекисью водорода с образованием феноксидрадикалов. Эти радикалы могут дополнительно окислять другие соединения, такие как хлорофилл, что приводит к распаду пигментов хлорофилла и образованию бесцветных соединений с низкой молекулярной массой, в результате чего овощи теряют свой яркий зеленый цвет (Arnold et al., 2022). Из-за их обилия во фруктах и овощах и их термостабильности ПОД и ПФО обычно используются в качестве ферментативных маркеров для бланширования в пищевой промышленности (Wu et al., 2023). ПОД, в частности, является одним из самых термостабильных ферментов, ответственных за ухудшение качества во время обработки и хранения фруктов и овощей (Бурак и др., 2024a; Arnold et al., 2022). Его стабильность при высоких температурах и доступность простых, быстрых методов анализа делают его эффективным показателем для оценки эффективности бланширования. Результаты исследований показали значительную корреляцию между инактивацией ПОД и других ферментов, которые способствуют ухудшению качества пищевых продуктов (Wang et al., 2023b).

В процессе ИК-нагрева на инактивацию ПФО и ПОД влияют термическая инактивация и уникальное взаимодействие ИК-излучения с пищевой матрицей, которое увеличивает молекулярную вибрацию, в итоге приводя к денатурации ферментов (Бурак и др., 2024a; Iqbal et al., 2019). Высокоэнергетическое ИК-излучение, поглощаемое пищевым продуктом, быстро нагревает поверхностные и подповерхностные слои, значительно увеличивая кинетическую энергию молекул ферментов. Эта повышенная тепловая энергия нарушает нековалентные взаимодействия, такие как водородные связи, ионные связи и гидрофобные взаимодействия, которые стабилизируют трехмерные структуры ПФО и ПОД (Huang et al., 2021; Chourio et al., 2018; Wu et al., 2019). В результате эти ферменты претерпевают структурные изменения, что приводит к разворачиванию и денатурации их белков. Денатурация ПФО необратимо изменяет его активный центр, делая фермент неактивным и неспособным катализировать окисление фенольных соединений, что является основной функцией этого фермента. Аналогично, денатурация ПОД необратимо изменяет его активный центр, делая его неактивным и не давая ему катализировать окисление фенольных соединений, что является его основной функцией.

Степень и скорость инактивации ПФО и ПОД зависят от таких факторов, как интенсивность и продолжительность воздействия ИК-излучения, состав сырья, глубина проникновения и начальная активность фермента (Бурак, 2025; Chourio et al., 2018). Выбор оптимальных параметров ИКБ имеет решающее значение для обеспечения эффективной инактивации фермента при сохранении качественных характеристик пищевых продуктов. Оптимизацию ИКБ можно регулировать на основе конкретных требований

различных пищевых продуктов, что позволяет модулировать скорость денатурации ферментов для достижения желаемого уровня инактивации, сводя к минимуму любое негативное влияние на качество продукта (Бурак и др., 2024а; Boateng et al., 2021; Wu et al., 2024).

3.2. Снижение микробного загрязнения

Процесс бланширования и ИКБ, в частности, играют ключевую роль в сокращении микробных популяций за счет денатурации белков и разрушения клеточных структур микроорганизмов (Aaliya et al., 2021). Когда ИК-излучение воздействует на поверхность фруктов или овощей, энергия поглощается молекулами воды, присутствующими в микроорганизмах, таким образом происходит быстрое повышение температуры (Aboud et al., 2019). Этот тепловой шок вызывает денатурацию белков и необратимое повреждение ферментов микроорганизмов, что приводит к их инактивации (Sirohi et al., 2021).

Споры проявляют бóльшую устойчивость к ИК-излучению по сравнению с вегетативными клетками (Sharma et al., 2024). Однако конкретные механизмы, лежащие в основе инактивации спор, остаются неясными. Предыдущие исследования изучали механизмы инактивации спор, особенно в *Bacillus subtilis*, под воздействием ИК-излучения при определенных уровнях потока (Dikec et al., 2022). Были изучены четыре потенциальных пути, способствующих инактивации спор: образование плазмы, повышение температуры, термоупругое напряжение и многофотонное поглощение энергии (Dikec et al., 2022). Установлено, что прямое применение ИК-нагрева эффективно инактивирует высокотермостойкие микробные споры, такие как *B. subtilis* и *Aspergillus niger* (Бурак и др., 2024б; Rifna et al., 2019). Параметры ИКБ можно оптимизировать на основе конкретных требований микробной безопасности различных пищевых продуктов. Его эффективность в устранении микробной активности зависит от различных факторов, включая температуру образца, интенсивность ИК-излучения и поток, пиковую длину волны и ширину полосы пропускания ИК-излучателя, толщину образца, концентрацию микроорганизмов, содержание влаги, тип и фазу роста микроорганизмов (экспоненциальная или стационарная) и конкретные характеристики пищевых материалов (Бурак и др., 2024б).

Dikec et al. (2022) установили, что полная инактивация и непрорастание спор *B. subtilis* происходят после ИК-облучения с диапазоном мощности 14–15 ГВт/м². Кроме того, необратимые повреждения были вызваны в спорах, облученных потоком 12,6 и 15,4 ГВт/м². ИК-излучение оказалось эффективным в стерилизации распространенных микроорганизмов на поверхности пшеницы и соевых бобов за короткий период (Sirohi et al., 2021). Когда каждое зерно облучалось ИК-излучением, температура поверхности пшеницы и соевых бобов различалась более чем на 50 °С после 7 с облучения, однако выживаемость микроорганизмов оставалась практически неизменной. Это указывает на то, что стерилизующее действие ИК-излучения на микроорганизмы в основном обусловлено прямым нагревом микробных клеток излучением, а не кондуктивным нагревом от поверхности образца (Sirohi et al., 2021).

В другом исследовании изучали влияние длины волны ИК-излучения на инактивацию спор *B. subtilis* с использованием трех различных ИК-нагревателей с пиковыми длинами волн 950, 1 100 и 1 150 нм. Результаты показали, что более короткая длина волны (950 нм) была более эффективна при инактивации спор, чем другие нагреватели. На время десятичного уменьшения (время D) влияли как начальная активность воды (АВ), так и спектры ИК-лучей. По мере уменьшения длины волны значения АВ, которые приводили к максимальному времени D для инактивации спор, увеличивались. Кроме того, на устойчивость спор к ИК-излучению влияли спектральные характеристики поглощения ИК-излучения, которые варьировались в зависимости от *a_w* спор (Aboud et al., 2019). Эти результаты показали, что ИК-нагрев имеет потенциал для поверхностной дезактивации фруктов, овощей и зерновых. ИК-нагрев применялся к различным сельскохозяйственным товарам, включая пшеницу, сою, коричневый рис, ростки, специи и цитрусовые, при этом количество микроорганизмов в этих образцах эффективно снижалось (Bouhile et al., 2025).

3.3. Сохранение пищевой ценности

Термическое бланширование может оказывать негативное влияние на содержание термочувствительных питательных веществ в пищевых продуктах (Бурак, 2025; Xiao et al., 2017; Faas et al., 2020). Поэтому важно установить корреляцию между инактивацией ферментов, достигаемой посредством термического бланширования, и связанной с этим потерей питательных веществ. Такие вещества, как витамин С, каротиноиды и фенольные соединения, обычно встречающиеся во фруктах и овощах, являются ключевыми показателями для оценки эффективности бланширования. Витамины С и А являются важными питательными веществами в различных фруктах и овощах. Однако они подвержены деградации, особенно во время обработки пищевых продуктов, такой как сушка (Adeyeye et al., 2022; Afzal et al., 1998). Деградация витамина С во время сушки в первую очередь объясняется длительным воздействием высоких температур,

что приводит к окислению (*El Gamal et al., 2023*). *Chen et al. (2018)* установили, что сохранение витамина С было значительно выше в сушеной моркови, предварительно обработанной ИКБ, чем в небланшированной. Более того, ИК-сухое бланширование с последующей ИК-сушкой сохранило 73,60 % витамина С и ингибировало активность ПОД, тем самым сохраняя естественный цвет сушеных продуктов.

Аналогичным образом, *Guiamba et al. (2015)* наблюдали, что сохранение витамина С было выше в манго, подвергнутых ИК-сухому бланшированию, чем БГВ, с диапазоном сохранения 69,2–88,3 %. Это объясняется инактивацией ферментов, таких как аскорбатоксидаза (АсО), которая отвечает за деградацию витамина С во время ИКБ. АсО – это содержащий медь фермент, обнаруженный в вакуоли, клеточной стенке и цитоплазме. Неповрежденные клеточные структуры обеспечивают защиту от термической инактивации и выщелачивания АсО. *Guiamba et al. (2015)* показали, что АсО проявляет термостойкость, сохраняя незначительную активность даже после обработки, особенно в целых кусочках манго. Рекомендуется применять термическую обработку выше 70 °С к измельченным овощным продуктам, чтобы предотвратить окисление АсО в дегидроаскорбиновую кислоту (ДГАК) (*Okonkwo et al., 2022; Gu et al., 2022; Faas et al., 2020*).

Так же, как и витамин С, фенольные вещества по своей природе нестабильны и подвержены деградации при высоких температурах (*Wu et al., 2024*). Несколько исследований показали, что ИКБ способствует высокому сохранению фенольных соединений по сравнению с БГВ в пекане и красном болгарском перце (*Bouhile et al., 2025; Wu et al., 2024*).

Каротиноиды – это класс природных пигментов, содержащихся в различных фруктах и овощах. Эти соединения играют решающую роль в физиологии растений, способствуя их яркой окраске и выступая в качестве антиоксидантов против окислительного стресса. К распространенным каротиноидам относятся β-каротин, ликопин и лютеин, каждый из которых имеет различную химическую структуру и биологические функции (*Lu et al., 2021; Qu et al., 2021*). Воздействие воздуха и высокой температуры может вызвать как окисление ненасыщенных каротиноидов, так и изомеризацию *транс*-каротиноидов в *цис*-формы, что приводит к потере каротиноидов (*Wang et al., 2023a*). *Song et al. (2021)* обнаружили, что ИКБ увеличивает содержание β-каротина в ломтиках батата, вероятно, из-за снижения активности ферментов и нарушения структуры клеток, что повышает эффективность экстракции и изменяет внутреннюю матрицу клеток во время бланширования. Ферменты в растениях могут разрушать каротиноиды, поэтому ингибирование активности ферментов является ключом к сохранению этих соединений. Вместе с тем не было установлено существенной разницы в общем содержании каротиноидов между образцами ИК бланшированной и небланшированной сушеной моркови (*Chen et al., 2018*).

4. Влияние параметров ИК-бланширования на качество овощей и фруктов

Краткий обзор исследований влияния технологических параметров инфракрасного бланширования на качество фруктов и овощей представлен в табл. 1. На кинетику сушки и качество сырья существенное влияние оказывают различные параметры ИКБ, такие как продолжительность воздействия, температура, расстояние ИК-облучения (расстояние бланширования) и толщина продукта (*Бурак и др., 2024б; Xiao et al., 2017*).

Таблица 1. Влияние технологических параметров процесса инфракрасного бланширования на качество фруктов и овощей

Table 1. The influence of technological parameters of the infrared blanching process on the quality of fruits and vegetables

| Наименование сырья | Параметры процесса | Основные результаты | Источник |
|--------------------|---|---|--------------------------|
| Сладкий картофель | Толщина ломтиков: 3, 5 и 7 мм. Расстояние бланширования: 6, 12 и 18 см. Скорость конвейера: 0,7, 0,35 и 0,1 м/мин | Уменьшение толщины ломтика и расстояния ускоряет инактивацию ПОД. Увеличение расстояния обработки привело к большему изменению цвета поверхности и утечке электролита. Расстояние значительно повлияло на сохранение витамина С по сравнению с толщиной ломтика | <i>Song et al., 2021</i> |
| Морковь | Толщина ломтиков: 3, 5 и 7 мм. Расстояние бланширования: 10, 15 и 20 см | Увеличение расстояния привело к сокращению времени бланширования и повышению содержания каротиноидов. Увеличение толщины ломтика увеличивает время бланширования и твердость поверхности | <i>Wu et al., 2023</i> |

| | | | |
|--------------------------|--|--|-----------------------------|
| Чеснок | Толщина ломтиков: 3, 5 и 7 мм | Увеличение толщины среза способствовало большему изменению цвета поверхности. Повышение температуры привело к снижению содержания аллицина. Увеличение температуры обработки и толщины среза привело к снижению общей численности популяции бактерий. Уменьшение толщины ломтика ускоряет повышение внутренней температуры, снижение влажности и инактивацию ферментов (ПОД) | <i>Feng et al., 2018</i> |
| Морковь | Расстояние бланширования: 70, 75 и 80 мм. Время воздействия: 110, 130 и 150 с | Интенсивность инфракрасного излучения не оказала существенного влияния на снижение влажности и остаточную активность ПОД в ломтиках моркови. Более высокая интенсивность ИК-излучения привела к более быстрому повышению температуры поверхности. Более высокая температура бланширования и наиболее длительное время бланширования привели к более быстрому разрушению витамина С | <i>Chen et al., 2018</i> |
| Красный болгарский перец | Температура в камере: 130, 150 и 170 °С. Время обработки: 3–8 мин | Температура ИК-камеры 150 °С в течение 6 мин не оказала существенного влияния на содержание жирорастворимых витаминов, жиров, белков, углеводов, золы, клетчатки и влаги | <i>Wang et al., 2017</i> |
| Картофель | Расстояние бланширования: 9,5, 12,5 и 15,5 см. Толщина ломтиков: 0,8, 1 и 1,3 мм, диаметр 6 см | Толщина среза обратно пропорциональна энергии активации и прямо пропорциональна эффективному коэффициенту диффузии влаги. Уменьшение расстояния привело к соответствующему увеличению эффективной диффузии влаги в образцах. Уменьшение толщины ломтиков и расстояния привело к большему снижению влажности, быстрой инактивации ферментов и лучшему сохранению цвета | <i>Ma et al., 2023</i> |
| Манго | Высокотемпературное кратковременное излучение (ВТКИ) при 90 °С в течение 2 мин и низкотемпературное длительное излучение (НТДИ) при 65 °С в течение 10 мин | Образцы, обработанные ВКТИ, показали более высокую сохранность витамина С. Условия бланширования не оказали существенного влияния на сохранение <i>транс</i> -β-каротина | <i>Guiamba et al., 2015</i> |

Эффективность обработки ИКБ зависит от толщины обрабатываемого сырья и расстояния от источника воздействия, поскольку эти факторы существенно влияют на равномерность теплопередачи и общую эффективность бланширования (*Wu et al., 2023*). Толщина продукта играет решающую роль в определении глубины проникновения ИК-излучения. По мере увеличения толщины продукта внешние слои могут достигать желаемой температуры бланширования, тогда как внутренние слои могут оставаться недостаточно обработанными, что подчеркивает важность точного контроля толщины для обеспечения равномерного теплового отклика по всему продукту (*Huang et al., 2021; Wu et al., 2023*). Кроме того, расстояние напрямую влияет на интенсивность и распределение лучевой энергии. Более короткое расстояние бланширования увеличивает энергию, поглощаемую продуктом, ускоряя поглощение тепла и сокращая время воздействия, необходимое для эффективного бланширования (*Zeng et al., 2022; Barrón-García et al., 2022*). Однако чрезмерное сокращение расстояния бланширования может привести к подгоранию поверхности без адекватной обработки внутренних слоев (*Guo et al., 2023*). В исследовании *Song et al. (2021)* результаты показали,

что уменьшение толщины ломтика и сокращение расстояния ИК-нагрева увеличивают скорость инактивации ПОД. Аналогичное снижение остаточной активности ПФО с увеличением толщины ломтика наблюдалось во время бланширования ломтиков картофеля (*Ma et al., 2023*). Время, необходимое для 90 % инактивации ПОД, уменьшалось по мере уменьшения расстояния ИКБ, что можно объяснить более высокой интенсивностью ИК-излучения на более коротких расстояниях, что приводит к быстрой инактивации во время бланширования. Аналогичным образом более тонкие ломтики требуют более короткого времени для 90 % инактивации ПОД за счет лучшего проникновения ИКИ (*Ghaboos et al., 2016*). Большее расстояние бланширования также приводило к более выраженному изменению цвета поверхности ломтиков батата из-за длительного времени нагрева, необходимого для достижения 90 % инактивации ПОД. Сопоставимая тенденция наблюдалась в ломтиках бланшированного картофеля, где более толстые ломтики демонстрировали более высокие значения a^* и b^* , что указывает на повышенное потемнение и желтизну (*Ma et al., 2023*).

По мере повышения температуры ИК-излучения глубина проникновения и скорость нагрева увеличиваются, что приводит к более эффективной инактивации термочувствительных ферментов, таких как ПФО, которые влияют на изменение цвета (*Luo et al., 2023; Barrón-García et al., 2022*). Однако чрезмерно высокие температуры могут отрицательно влиять на текстуру и вкус пищи, что делает крайне важной оптимизацию этого параметра в диапазоне 60–80 °C для большинства овощей (*Bei et al., 2023*). Аналогичным образом время воздействия должно быть точно определено; длительное воздействие, хотя и эффективно для снижения активности ферментов, может привести к нежелательным изменениям в продукте, таким как потеря питательных качеств и изменение органолептических характеристик (*Gu et al., 2022; Ghaboos et al., 2016*).

Guiamba et al. (2015) исследовали влияние времени воздействия и температуры на сохранение витамина С и β -каротина во время бланшировки манго. Сравнивались две обработки бланшировкой: высокотемпературная кратковременная при 90 °C в течение 2 мин и низкотемпературная длительная при 65 °C в течение 10 мин. Результаты показали, что условия бланшировки оказали минимальное влияние на сохранение полностью *транс*- β -каротина. Однако ломтики, обработанные длительное время, показали значительно более высокую потерю витамина С, что было связано с высокой активностью АсО в этих образцах. В другом исследовании – чеснока – было обнаружено, что температура обработки значительно влияет на цвет бланшированного продукта. *Feng et al. (2018)* установили, что общее изменение цвета чеснока уменьшалось по мере повышения температуры бланширования. Тем не менее при 135 °C образец перегревался и даже сгорал, что приводило к быстрому увеличению изменения цвета. На сохранение аллицина значительно влияла температура обработки, при этом температуры 95, 115 и 135 °C демонстрировали разные показатели сохранения. Исследователи отметили, что быстрая инактивация ПОД при 135 °C может привести к повышенной инактивации аллииназы, фермента, ответственного за преобразование аллиина в аллицин, тем самым снижая сохранение аллицина. *Wang et al. (2017)* предложили оптимальные параметры бланшировки для красного болгарского перца, в частности 150 °C в течение 6 мин, что эффективно сохраняет качество продукта, при этом значительно снижая потери жирорастворимых витаминов, жиров, белков, углеводов, золы и клетчатки.

Повышенные температуры также могут вызывать неферментативную деградацию пигмента через реакцию Майяра, что приводит к потере цвета (*Luo et al., 2023*).

5. Влияние метода бланширования на технологический процесс сушки

Качество готового сушеного сырья во многом зависит от выбранного процесса сушки. Низкотемпературные процессы требуют длительного времени сушки, способы сушки с использованием высоких температур более эффективны, но могут оказать негативное влияние на качество продукта (*Adeyeye et al., 2022*). Пищевая промышленность сталкивается с проблемой достижения более короткого времени сушки в умеренных условиях при сохранении максимального качества продукта (*Aboud et al., 2019; Salehi et al., 2019*). Несмотря на многочисленные инновации для улучшения традиционных процессов сушки, такие как технология рекуперации собственного тепла, сложность и высокие затраты на внедрение ограничили ее широкое промышленное использование. Традиционно для оптимизации технологии сушки использовались различные подготовительные процессы. Среди них ИК-излучение в качестве подготовительного процесса перед традиционной сушкой имеет некоторые преимущества (табл. 2).

В последние годы интегрирование процесса инфракрасного бланширования в системы сушки привлекло значительное внимание научного сообщества. При использовании в качестве метода предварительной обработки перед сушкой ИКБ значительно повышает эффективность процесса за счет сокращения времени обработки и способствует большему сохранению биологически активных соединений и других питательных веществ, что значительно повышает качество продуктов (*Gu et al., 2022; Salehi et al., 2017; 2019*).

Разработка комбинированных методов сушки – это инновационная стратегия оптимизации качества продукта и повышения энергоэффективности процесса (*Nalawade et al., 2018; Zeng et al., 2019*).

Таблица 2. Влияние инфракрасного бланширования на качество фруктов и овощей по сравнению с другими методами бланширования
 Table 2. Effect of infrared blanching on the quality of fruits and vegetables compared to other blanching methods

| Вид сушки | Наименование сырья | Предварительная обработка | Условия обработки | Основные результаты | Источник |
|--|--------------------|-----------------------------|--|--|-----------------------------|
| Инфракрасная | Морковь | Бланширование горячей водой | Инфракрасное бланширование при температуре 90 °С в течение 15 мин. Сушка с использованием инфракрасного излучения при температуре 70 °С | Увеличение скорости сушки, меньшее время, максимальное сохранение витамина С, а также более мелкие и однородные пористые структуры | <i>Wu et al., 2023</i> |
| Сушка горячим воздухом | Морковь | Бланширование горячей водой | Инфракрасное бланширование при температуре 90 °С в течение 15 мин. Сушка горячим воздухом при температуре 70 °С и скорости воздуха 0,5 м/с | Уменьшение времени сушки, большее сохранение витамина С и меньшая усадка | <i>Wu et al., 2018a</i> |
| | Зеленый лук | Без бланширования | Каталитическое инфракрасное бланширование при 70 °С. Сушка горячим воздухом при 70 °С | Уменьшение времени сушки без существенной разницы в цвете, витамине С, летучих компонентах и сохранении аллицина | <i>Gu et al., 2022</i> |
| | Манго | Бланширование горячей водой | Бланширование в ближнем инфракрасном диапазоне при 90 °С в течение 2 мин и при 65 °С в течение 10 мин. Сушка горячим воздухом при температуре 70 °С и скорости воздуха 1 м/с | Более высокое содержание витамина С и более низкое содержание <i>транс</i> -β-каротина | <i>Guiamba et al., 2015</i> |
| | Морковь | Без бланширования | Бланширование с использованием инфракрасного излучения мощностью 552 Вт, расстоянием 70, 75 и 80 мм и различной продолжительностью 110, 130 и 150 с | Более высокое сохранение витамина С (14,39–19,03 %), меньшее время сушки, более низкая активность остаточной пероксидазы (ПОД), более высокое общее сохранение каротиноидов и более высокая хрусткость | <i>Chen et al., 2018</i> |
| ИК-сушка с последующей сушкой горячим воздухом | Морковь | Бланширование горячей водой | Инфракрасное бланширование при температуре 90 °С в течение 15 мин. Инфракрасная сушка при 70 °С, затем сушка горячим воздухом при 70 °С | Улучшенное качество моркови с максимальным содержанием витамина С, лучшей регидратацией, меньшим изменением цвета и меньшей усадкой | <i>Bouhile et al., 2025</i> |
| Сублимационная сушка | Зеленый лук | Без бланширования | Каталитическое инфракрасное бланширование при 70 °С. Сублимационная сушка при температуре –80 °С | Максимальное содержание витамина С, летучих компонентов и аллицина | <i>Gu et al., 2022</i> |

| | | | | | |
|--|----------|--|--|---|-----------------------------|
| | Бананы | Без бланширования | Погружение ломтиков банана в раствор (10 г/л аскорбиновой кислоты и 10 г/л лимонной кислоты) перед каталитической инфракрасной бланшировкой. Интенсивность инфракрасного излучения: 4 000 Вт/м ² | Увеличенное время сушки и большая усадка. Обработка погружением перед бланшированием обеспечивает лучшую сохранность цвета, большую хрупкость и меньшую усадку | <i>Gu et al., 2022</i> |
| | Клубника | Предварительная обработка горячим воздухом | Каталитическое инфракрасное бланширование с различной интенсивностью 3 000, 4 000 и 5 000 Вт/м ² . Сублимационная сушка продолжительностью 0,0167, 1, 2, 4, 6, 8, 16, 22 и 29 ч | Образцы, предварительно обработанные инфракрасным излучением, показали лучшую сохранность цвета, более высокую хрупкость, более низкий коэффициент регидратации, меньшее необходимое время сушки (на 42 %) и большую усадку | <i>Bouhile et al., 2025</i> |
| Гибридная сушка: сушка горячим воздухом с использованием инфракрасного излучения | Морковь | Бланширование горячей водой | Бланширование в ближнем инфракрасном диапазоне в течение 8–15 мин со скоростью воздуха 0,5 м/с. Гибридная сушка при температуре 80 ± 2 °С со скоростью воздуха 1,4 м/с | Сокращение времени сушки на 45 %. Лучшее сохранение структуры клеток, максимальное содержание витамина С | <i>Bouhile et al., 2025</i> |

5.1. Инфракрасное бланширование перед сушкой горячим воздухом

Сушка горячим способом (СГВ) обычно используется в пищевой промышленности по причине простоты и экономической эффективности процесса (Бурак, 2025; Bi et al., 2022; Chen et al., 2015). Однако использование горячего воздуха в качестве сушильной среды имеет несколько недостатков, таких как длительное время обработки и существенное ухудшение как физических свойств, так и пищевой ценности конечного продукта (Adeyeye et al., 2022; Xiao et al., 2017). В ходе исследований установлено, что применение ИКБ значительно сокращает время сушки горячим воздухом. Это может быть связано с более низким начальным содержанием влаги и более высокой температурой поверхности бланшированных образцов перед сушкой (Aboud et al., 2019). Например, Chen et al. (2018) установили, что использование ИКБ позволило сократить время СГВ на 32,3–45 %, однако сокращение времени сушки во многом зависит от конкретных параметров ИКБ, включая продолжительность и интенсивность воздействия ИК-излучения. Оптимизация этих параметров имеет значение для достижения желаемого сокращения времени сушки при сохранении качества продукта. Чрезмерное воздействие ИК-излучения или чрезмерно высоких температур во время бланширования может привести к нежелательным изменениям качества готового продукта (Feng et al., 2018; Zeng et al., 2019).

Комбинирование ИКБ и СГВ способствует сохранению витамина С. Исследования, проведенные Chen et al. (2018), показали, что содержание витамина С в ломтиках моркови, обработанных ИКБ перед СГВ, было значительно выше – от 14,39 до 19,03 %, чем в моркови, высушенной без предварительной обработки ИКБ. Общеизвестно, что процесс сушки вызывает значительную усадку и ухудшает качество продукта из-за быстрого испарения поверхностной влаги, что создает разницу давления между внешней и внутренней частью образца (Adeyeye et al., 2022; Thamkaew et al., 2021). Установлено, что применение ИКБ способствует уменьшению объемной усадки и деформации, так как улучшает равномерность распределения температуры внутри материала, вызывая последовательную миграцию влаги и сводя к минимуму риск локального высыхания, что может привести к неравномерной усадке (Xiao et al., 2017). При этом ИКБ вызывает изменения в клеточной структуре фруктов и овощей, такие как повышение проницаемости клеточных мембран, что способствует более эффективному высвобождению влаги во время последующей сушки горячим воздухом (СГВ) (Sakare et al., 2020; Chen et al., 2015; Qu et al., 2021). Gu et al. (2022) сравнили органолептические свойства бланшированного ИК-излучением и небланшированного высушенного горячим воздухом зеленого лука. Бланшированные образцы показали лучшую сохранность цвета с более высокими значениями a^* (краснота), что можно отнести к реакции Майяра, которая привела к образованию коричневого вещества. Wu et al. (2018b) установили, что применение ИК-излучения в качестве подготовительного этапа перед СГВ значительно увеличило значения L^* , a^* и b^* моркови, обработанной ИКБ, по сравнению со свежими образцами. Сочетание ИКБ – СГВ также влияет на клейстеризацию крахмала в пищевых матрицах, что в конечном итоге может повлиять на реакцию Майяра (Neutzling et al., 2023; Yan et al., 2024). Во время ИКБ быстрое проникновение интенсивного ИК-излучения вызвало обширную клейстеризацию гранул крахмала. Этот процесс нарушил нативную кристаллическую структуру крахмала, растворив молекулы крахмала и обнажив восстанавливающие сахара, которые являются важнейшими предшественниками реакций Майяра (Neutzling et al., 2023). Повышенная доступность восстанавливающих сахаров усилила потемнение и развитие вкуса во время последующей СГВ. Более того, клейстеризованный крахмал может взаимодействовать с аминокислотами, дополнительно способствуя реакции Майяра (Wang et al., 2018). Однако чрезмерная желатинизация крахмала, вызванная ИКБ, способна вызвать нарушение целостности структуры и изменение текстурных свойств растительного сырья во время сушки, что может привести к нежелательным качественным изменениям (Sethi et al., 2022). Поэтому применение ИКБ в качестве подготовительного процесса к СГВ может быть неприемлемым для продуктов с высоким содержанием крахмала.

5.2. Инфракрасное бланширование перед сублимационной сушкой

Сублимационная сушка (СБС) – это многоступенчатый процесс, включающий замораживание, сублимацию, десорбцию, вакуумное удаление влаги и конденсацию (Abla et al., 2022; Bhambere et al., 2015). Следовательно, СБС является энергоемким процессом, и его затраты, как правило, оцениваются в 4–8 раз выше, чем у СГВ (Yao et al., 2023). Для снижения потребления энергии, предотвращения реакций потемнения и сокращения общего времени обработки в качестве эффективной стратегии рассматривают предварительную обработку плодовоовощного сырья перед СБС. Результаты многих исследований показали, что продукты после СБС демонстрируют однородную мелкопористую структуру с минимальным повреждением или разрушением клеточных стенок на поверхности образца (Bhambere et al., 2015). Это объясняется образованием кристаллов льда во время СБС, которые сжимают поверхность и создают пористую

структуру внутри клеток (Feng et al., 2024). В результате усадка и внутреннее разрушение образцов сводятся к минимуму, в первую очередь из-за небольшого удлинения клеточной стенки (Nguyen et al., 2018). Напротив, когда в качестве предварительной обработки перед СБС применяют ИКБ, на поверхности обработанного продукта образуется плотный слой (Mehanna et al., 2022). Это явление, вероятно, связано с быстрым повышением температуры поверхности во время ИК-нагрева, что приводит к разрушению поверхностных клеток со скоростью, сопоставимой или превышающей скорость перемещения влаги изнутри к поверхности (Wu et al., 2024). Результаты исследования Jiang et al. (2024) показали, что ИКБ сублимированных ломтиков клубники привело к образованию крупных пор в центральной области. Это микроструктурное изменение потенциально было связано с паром, образующимся во время процесса ИКБ, который расширял клеточные стенки и создавал более крупные поры, последние могли усилить хрусткость конечного продукта (Wu et al., 2019; Jiang et al., 2024).

Определение соотношения регидратации включает погружение высушенных образцов в воду при определенных температурах и продолжительности (Lopez-Quiroga et al., 2020). Регидратация – это многогранный процесс восстановления высушенных материалов при контакте с водой. Во время процессов дегидратации, таких как ИК-нагрев, происходят необратимые разрывы, нарушающие клеточную целостность и образующие плотную структуру со сжатыми капиллярами, которые демонстрируют сниженные гидрофильные свойства (Abu-Ghannam et al., 2015; Alaei et al., 2015; Salehi et al., 2017). Несколько исследований показали, что ИКБ перед СБС может снизить способность к регидратации в конечном продукте, что желательно для продуктов, потребляемых в качестве закусок или включаемых в состав сухих завтраков (Xiao et al., 2017). Это снижение регидратации объясняется изменениями в содержании и структуре пектина, что приводит к образованию плотной корки на поверхности образцов, бланшированных и высушенных методом ИК-обработки (Chen et al., 2018; Salehi et al., 2017; Wu et al., 2019). Наличие этой корки препятствует проникновению воды или других регидратирующих сред в высушенный образец, что способствует более медленной и менее полной регидратации по сравнению с образцами только после СБС. Сочетание потери воды и воздействия тепла во время ИКБ также вызывает напряжение в клеточной структуре, что приводит к изменениям формы, размеров и общей структурной целостности (Owusu-Apenten et al., 2023; Antal et al., 2017). В результате исследования выяснилось, что сублимированная клубника с ИК-бланшировкой показала немного большую усадку толщины и хрусткости, чем контрольные образцы (Feng et al., 2024).

Влияние ИКБ как подготовительного процесса к СБС на цвет конечного продукта различается в зависимости от разных пищевых продуктов. Вместе с тем ИКБ в целом положительно влияет на сохранение цвета сублимированных продуктов. Для лука-резанца цвет продуктов, бланшированных каталитическим ИК-излучением и сублимированных, оказался схожим с цветом образцов после СБС (Gu et al., 2022). Это можно объяснить нетермической природой СБС, которая помогает сохранить исходный цвет и форму лука-резанца. Напротив, образцы после ИКБ и затем СБС показали более низкие значения угла оттенка для клубники, чем свежие образцы, но более высокие, чем сублимированные образцы. Следует отметить, что комбинированный процесс ИКБ – СБС усилил красноту клубники, придав сушеным продуктам более темный красный цвет, что может быть связано с неферментативным потемнением и увеличением концентрации антоцианов. Для ломтиков банана наблюдалось увеличение желтизны в ИК-бланшированных и лиофилизированных образцах по сравнению со свежими образцами (Braga et al., 2021). Это говорит о том, что сочетание ИКБ – СБС может оказывать различное влияние на цветовые характеристики различных пищевых материалов в зависимости от их внутреннего состава и чувствительности к термической и нетермической обработке.

6. Проблемы и ограничения использования метода ИК-бланширования

Хотя процесс ИКБ имеет некоторые преимущества по сравнению с обычным бланшированием, включая улучшенную энергоэффективность и значительное сохранение питательных веществ и качественных характеристик, он также имеет присущие ему ограничения и недостатки (Бурак и др., 2024б). Одним из основных недостатков является ограниченная глубина проникновения ИК-излучения. ИК-энергия в первую очередь взаимодействует с поверхностью фруктов и овощей, тогда как внутренние области получают меньше энергии, когда толщина материала достигает определенного значения (Joardder et al., 2023; Tyagi et al., 2020). Неравномерный нагрев способен вызвать значительные изменения в микроструктуре бланшированных образцов, что может отрицательно повлиять на качество сушеных продуктов. На микроструктурном уровне интенсивный нагрев поверхности в результате ограниченного проникновения ИК-излучения может привести к быстрой деградации полисахаридов клеточной стенки, таких как пектин и гемицеллюлоза, что ставит под угрозу механическую целостность и текстуру бланшированных материалов

(Wu et al., 2023). Кроме того, неравномерный нагрев может привести к неравномерной инактивации ферментов, когда поверхностные области перегреваются, а внутренняя часть остается недобланшированной. Такая неоднородность в дезактивации ферментов отрицательно влияет на последующий процесс сушки и ухудшает качество конечного продукта. С целью устранения данных недостатков и ограничений необходимы дальнейшие научные исследования по изучению проникновения ИК-излучения в различные виды плодоовощного сырья и пищевые материалы.

Целесообразно проводить научные исследования по комбинированному использованию ИК-нагрева с другими способами бланширования. Интеграция ИК-нагрева с дополнительными методами может улучшить массоперенос и теплопередачу внутри пищевого продукта, обеспечивая равномерное распределение температуры по всему материалу. Например, сочетание ультразвука и ИКБ может увеличить скорость массопереноса за счет механических и кавитационных эффектов, усиливая теплопередачу и приводя к более равномерной потере влаги. Другим потенциальным решением является применение химической предварительной обработки перед ИКБ. Использование кислых растворов, таких как аскорбиновая или лимонная кислота, может улучшить теплопередачу, способствовать равномерному нагреву и более глубокому проникновению ИК-излучения. Это возможно за счет способности кислых растворов изменять физические и химические свойства растительного сырья (Бурак, 2025).

Заключение

Бланширование как метод предварительной подготовки плодоовощного сырья перед сушкой оказывает значительное влияние как на процесс сушки, так и на качество готового продукта. По сравнению с традиционными методами, такими как бланширование водой или паром, применение инфракрасного метода бланшировки перед процессом сушки имеет несколько преимуществ, включая более полное сохранение пищевой ценности фруктов и овощей, сокращенное время сушки и минимальное изменение естественного цвета плодоовощного сырья. Быстрый нагрев поверхности пищевых продуктов с помощью ИК-излучения эффективно дезактивирует ферменты и микроорганизмы, тем самым сохраняя качество пищевых продуктов. Отсутствие использования воды в процессе инфракрасного бланширования способствует сохранению водорастворимых питательных веществ, таких как витамин С. На эффективность процесса инфракрасного бланширования значительное влияние оказывает время обработки, толщина продукта и расстояние обрабатываемого сырья от источника ИК-излучения. В ходе обзора результатов научных исследований установлено, что оптимальные условия бланширования для различных фруктов и овощей, как правило, достигаются при толщине 2–5 см и расстоянии 10–20 см от ИК-излучателя.

Вместе с тем необходимо продолжить исследования с целью оптимизации рабочих параметров бланширования, энергоэффективности и масштабируемости систем ИКБ. Необходимы дальнейшие научные исследования для более полной и комплексной оценки результатов сочетания ИК-нагрева с другими методами бланширования. Детальная оценка и понимание механизмов, с помощью которых эти комбинированные способы обработки улучшают тепло- и массоперенос и их влияние на микроструктурные и биохимические изменения в бланшированных продуктах, позволят получить информацию для разработки более эффективных и действенных методов ИКБ. Требуется тщательно изучить влияние комбинированного бланширования и химической предварительной обработки на последующий процесс сушки с целью обеспечения качества сушеных продуктов и их пищевой ценности. Для дальнейшего промышленного внедрения комбинированных методов бланшировки необходимо учитывать стоимость оборудования, потребление энергии и эксплуатационные расходы.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

References

- Aaliya, B., Sunooj, K. V., Navaf, M., Akhila, P. P. et al. 2021. Recent trends in bacterial decontamination of food products by hurdle technology: A synergistic approach using thermal and non-thermal processing techniques. *Food Research International*, 147. Article number: 110514. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2021.110514>.
- Abla, K. K., Mehanna, M. M. 2022. Freeze-drying: A flourishing strategy to fabricate stable pharmaceutical and biological products. *International Journal of Pharmaceutics*, 628. Article number: 122233. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2022.122233>.
- Aboud, S. A., Altemimi, A. B., Al-Hilphy, A. R. S., Yi-Chen, L. et al. 2019. A comprehensive review on infrared heating applications in food processing. *Molecules*, 24(22). Article number: 4125. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules24224125>.
- Abu-Ghannam, N., Jaiswal, A. K. 2015. Blanching as a treatment process: Effect on polyphenol and antioxidant capacity of cabbage. In V. Preedy (Ed.) *Processing and Impact on Active Components in Food*, Academic Press, pp. 35–43. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-404699-3.00005-6>.

- Adeyeye, S. A. O., Ashaolu, T. J., Babu, A. S. 2022. Food drying: A review. *Agricultural Reviews*, 46(1), pp. 86–93. DOI: <https://doi.org/10.18805/ag.R-2537>.
- Afzal, T. M., Abe, T. 1998. Diffusion in potato during far infrared radiation drying. *Journal of Food Engineering*, 37(4), pp. 353–365. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(98\)00111-3](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(98)00111-3).
- Akinnawo, S. O. 2023. Eutrophication: Causes, consequences, physical, chemical and biological techniques for mitigation strategies. *Environmental Challenges*, 12. Article number: 100733. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envc.2023.100733>.
- Alaei, B., Chayjan, R. A. 2015. Drying characteristics of pomegranate arils under near infrared-vacuum conditions. *Journal of Food Processing and Preservation*, 39(5), pp. 469–479. DOI: <https://doi.org/10.1111/jfpp.12252>.
- Aniesrani, Delfiya D. S., Prashob, K., Murali, S., Alfiya, P. V. et al. 2022. Drying kinetics of food materials in infrared radiation drying: A review. *Journal of Food Process Engineering*, 45(6). Article number: e13810. DOI: <https://doi.org/10.1111/jfpe.13810>. (Special Issue: Design and Development of Food Processing Equipment).
- Antal, T., Tarek-Tilistyák, J., Cziáky, Z., Sinka, L. 2017. Comparison of drying and quality characteristics of pear (*Pyrus communis* L.) using mid-infrared-freeze drying and single stage of freeze drying. *International Journal of Food Engineering*, 13(4). DOI: <https://doi.org/10.1515/ijfe-2016-0294>.
- Anuj, Sonal P., Jayaraj, A., Shahana, A., Khalai, S. et al. 2020. Development and performance evaluation of infrared dryer. Department of Post Harvest-Technology and Agricultural Processing, Kerala, India.
- Arnold, M., Gramza-Michałowska, A. 2022. Enzymatic browning in apple products and its inhibition treatments: A comprehensive review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 21(6), pp. 5038–5076. DOI: <https://doi.org/10.1111/1541-4337.13059>.
- Ávila, S., Zalamanski, S., Tanikawa, L. M., Kruger, C. C. H. et al. 2023. Influence of cooking methods on *in vitro* bioaccessibility of phenolics, flavonoids, and antioxidant activity of red cabbage. *Plant Foods for Human Nutrition*, 78, pp. 124–131. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11130-022-01027-5>.
- Barrón-García, O. Y., Nava-Álvarez, B., Gaytán-Martínez, M., Gonzalez-Jasso, E. et al. 2022. Ohmic heating blanching of *Agaricus bisporus* mushroom: Effects on polyphenoloxidase inactivation kinetics, color, and texture. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 80. Article number: 103105. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2022.103105>.
- Bei, X., Yu, X., Li, D., Sun, Q. et al. 2023. Heat source replacement strategy using catalytic infrared: A future for energy saving drying of fruits and vegetables. *Journal of Food Science*, 88(12), pp. 4827–4839. DOI: <https://doi.org/10.1111/1750-3841.16834>.
- Bi, Y.-X., Zielinska, S., Ni, J.-B., Li, X.-X. et al. 2022. Effects of hot-air drying temperature on drying characteristics and color deterioration of rape bee pollen. *Food Chemistry: X*, 16. Article number: 100464. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2022.100464>.
- Boateng, I. D., Yang, X.-M. 2021. Effect of different drying methods on product quality, bioactive and toxic components of *Ginkgo biloba* L. seed. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 101(8), pp. 3290–3297. DOI: <https://doi.org/10.1002/jsfa.10958>.
- Bouhile, Y., Guo, Y., Wu, B., Dai, J. et al. 2025. Research progress in the application of infrared blanching in fruit and vegetable drying process. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 24(1). Article number: e70112. DOI: <https://doi.org/10.1111/1541-4337.70112>.
- Braga, R. C. P., Ruiz, S. P., De Aquino, D. S. 2021. Drying kinetics and the effect of blanching pretreatment on banana. *Revista Brasileira de Tecnologia Agroindustrial*, 15(2), pp. 3626–3647. DOI: <https://doi.org/10.3895/rbta.v15n2.13607>.
- Burak, L. Ch. 2024a. Using modern processing technologies to increase the shelf life of fruits and vegetables. Review of the subject field. *Polzunovsky Vestnik*, 1, pp. 99–119. DOI: <https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2024.01.013>. EDN: AQZOQO. (In Russ.) = Бурак Л. Ч. Использование современных технологий обработки для увеличения срока хранения фруктов и овощей. Обзор предметного поля. Ползуновский вестник. 2024а. Т. 1. С. 99–119. DOI: <https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2024.01.013>. EDN: AQZOQO.
- Burak, L. Ch. 2024б. Limitations and possibilities of modern technologies for ensuring microbiological safety of food products. *Izvestiya Vuzov. Food Technology*, 2–3(396), pp. 6–13. DOI: <https://doi.org/10.26297/0579-3009.2024.2-3.1>. EDN: JSFXRG. (In Russ.) = Бурак Л. Ч. Ограничения и возможности современных технологий по обеспечению микробиологической безопасности пищевых продуктов. Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. 2024б. Т. 2–3(396). С. 6–13. DOI: <https://doi.org/10.26297/0579-3009.2024.2-3.1>. EDN: JSFXRG.
- Burak, L. Ch. 2025. The influence of modern methods of processing and sterilization on the quality of fruit and vegetable raw materials and juice products. Monograph. Moscow. 236 p. DOI: <https://doi.org/10.12737/0.12737/2154991>. EDN: EQDBKL. (In Russ.) = Бурак Л. Ч. Влияние современных способов обработки и стерилизации на качество плодовоовощного сырья и соковой продукции. Москва : ИНФРА-М, 2025. 236 с. DOI: <https://doi.org/10.12737/0.12737/2154991>. EDN: EQDBKL.

- Burak, L. Ch., Sapach, A. N. 2023. Biologically active substances of elderberry: Properties, methods of extraction and preservation. *Food Systems*, 6(1), pp. 80–94. DOI: <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2023-6-1-80-94>. EDN: BDOJAW. (In Russ.) = Бурак Л. Ч., Сапач А. Н. Биологически активные вещества бузины: свойства, методы извлечения и сохранения. Пищевые системы. 2023. Т. 6(1). С. 80–94. DOI: <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2023-6-1-80-94>. EDN: BDOJAW.
- Burak, L. Ch., Sapach, A. N. 2024a. Use of omic heating technology in the process of processing fruits and vegetables. Overview of the subject field. *Food systems*, 7(1), pp. 59–70. DOI: <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2024-7-1-59-70>. EDN: BKQTXQ. (In Russ.) = Бурак Л. Ч., Сапач А. Н. Использование технологии омического нагрева в процессе переработки плодов и овощей. Обзор предметного поля. Пищевые системы. 2024. Т. 7(1). С. 59–70. DOI: <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2024-7-1-59-70>. EDN: BKQTXQ.
- Burak, L. Ch., Vostrikov, A. V. 2024b. Use of catalytic infrared radiation technology in the processing of fruit and vegetable raw materials. Review of the subject field. *Scientific Review. Engineering Sciences*, 4, pp. 2–34. DOI: <https://doi.org/10.17513/srts.1479>. EDN: BBQKMV. (In Russ.) = Бурак Л. Ч., Востриков А. В. Использование технологии каталитического инфракрасного излучения при переработке плодовоовощного сырья. Обзор предметного поля. Научное обозрение. Технические науки. 2024. Т. 4. С. 2–34. DOI: <https://doi.org/10.17513/srts.1479>. EDN: BBQKMV.
- Chen, J., Venkitasamy, C., Shen, Q., McHugh, T. H. et al. 2018. Development of healthy crispy carrot snacks using sequential infrared blanching and hot air drying method. *LWT*, 97, pp. 469–475. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.07.026>.
- Chen, Q., Bi, J., Wu, X., Yi, J. et al. 2015. Drying kinetics and quality attributes of jujube (*Zizyphus jujuba* Miller) slices dried by hot-air and short- and medium-wave infrared radiation. *LWT – Food Science and Technology*, 64(2), pp. 759–766. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2015.06.071>.
- Chourio, A. M., Salais-Fierro, F., Mehmood, Z., Martinez-Montegudo, S. I. et al. 2018. Inactivation of peroxidase and polyphenoloxidase in coconut water using pressure-assisted thermal processing. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 49, pp. 41–50. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2018.07.014>.
- de Souza, J. V. B., Perazzini, H., Lima-Corrêa, R. A. B., Borel, L. D. M. S. 2024. Combined infrared-convective drying of banana: Energy and quality considerations. *Thermal Science and Engineering Progress*, 48. Article number: 102393. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2024.102393>.
- Dikec, J., Bechoua, N., Winckler, P., Perrier-Cornet, J. M. 2022. Effects of pulsed near infrared light (NIR) on *Bacillus subtilis* spores. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 234. Article number: 112530. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2022.112530>.
- ElGamal, R., Song, C., Rayan, A. M., Liu, C. et al. 2023. Thermal degradation of bioactive compounds during drying process of horticultural and agronomic products: A comprehensive overview. *Agronomy*, 13. Article number: 1580. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy13061580>.
- El-Mesery, H. S., Ashiagbor, K., Hu, Z., Alshaer, W. G. 2023. A novel infrared drying technique for processing of apple slices: Drying characteristics and quality attributes. *Case Studies in Thermal Engineering*, 52. Article number: 103676. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.103676>.
- Faas, N., Röcker, B., Smrke, S., Yerezian, C. et al. 2020. Prevention of lipid oxidation in linseed oil using a palladium-based oxygen scavenging film. *Food Packaging and Shelf Life*, 24. Article number: 100488. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2020.100488>.
- Fayaz, U., Aga, M. B., Bashir, I., Bashir, O. et al. 2023. Applications of infrared processing in the food industry. In *Emerging Thermal Processes in the Food Industry. Unit Operations and Processing Equipment in the Food Industry*. Monograph. Ed.: S. M. Jafari. Woodhead Publishing, pp. 63–92. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822107-5.00003-9>.
- Feng, S., Bi, J., Laaksonen, T., Laurén, P. et al. 2024. Texture of freeze-dried intact and restructured fruits: Formation mechanisms and control technologies. *Trends in Food Science & Technology*, 143. Article number: 104267. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2023.104267>.
- Feng, Y., Wu, B., Yu, X., Yagoub, A. E. A. et al. 2018. Effect of catalytic infrared dry-blanching on the processing and quality characteristics of garlic slices. *Food Chemistry*, 266, pp. 309–316. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.06.012>.
- Gaidhani, K. A., Harwalkar, M., Bhambere, D., Nirgude, P. S. 2015. Lyophilization/freeze drying – A review. *World Journal of Pharmaceutical Research*, 4(8), pp. 516–543.
- Ghaboos, S. H. H., Ardabili, S. M. S., Kashaninejad, M., Asadi, G. et al. 2016. Combined infrared-vacuum drying of pumpkin slices. *Journal of Food Science and Technology*, 53, pp. 2380–2388. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13197-016-2212-1>.
- Gu, C., Ma, H., Tuly, J. A., Guo, L. et al. 2022. Effects of catalytic infrared drying in combination with hot air drying and freeze drying on the drying characteristics and product quality of chives. *LWT*, 161. Article number: 113363. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.113363>.

- Guiamba, I. R.F., Svanberg, U., Ahrné, L. 2015. Effect of infrared blanching on enzyme activity and retention of β -carotene and vitamin C in dried mango. *Journal of Food Science*, 80(6), pp. E1235-E1242. DOI: <https://doi.org/10.1111/1750-3841.12866>.
- Guida, V., Ferrari, G., Pataro, G., Chambery, A. et al. 2013. The effects of ohmic and conventional blanching on the nutritional, bioactive compounds and quality parameters of artichoke heads. *LWT – Food Science and Technology*, 53(2), pp. 569–579. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2013.04.006>.
- Guo, C., Mujumdar, A. S., Zhang, M. 2019. New development in radio frequency heating for fresh food processing: A review. *Food Engineering Reviews*, 11, pp. 29–43. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12393-018-9184-z>.
- Guo, X., Hao, Q., Qiao, X., Li, M. et al. 2023. An evaluation of different pretreatment methods of hot-air drying of garlic: Drying characteristics, energy consumption and quality properties. *LWT*, 180. Article number: 114685. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2023.114685>.
- Guruprasad, M., Chengaiyan, J. G., Ahmad, F., Haque, S. et al. 2024. Effect of microwave-based dry blanching on drying of potato slices: A comparative study. *ACS Omega*, 9(13), pp. 15143–15150. DOI: <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c09465>.
- Huang, D., Yang, P., Tang, X., Luo, L. et al. 2021. Application of infrared radiation in the drying of food products. *Trends in Food Science & Technology*, 110, pp. 765–777. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.02.039>.
- Iqbal, A., Murtaza, A., Hu, W., Ahmad, I. et al. 2019. Activation and inactivation mechanisms of polyphenol oxidase during thermal and non-thermal methods of food processing. *Food and Bioproducts Processing*, 117, pp. 170–182. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2019.07.006>.
- Jenkins, R., Aldwell, B., Yin, S., Meyer, M. et al. 2019. Energy efficiency of a quartz tungsten halogen lamp: Experimental and numerical approach. *Thermal Science and Engineering Progress*, 13. Article number: 100385. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2019.100385>.
- Jiang, D.-L., Wang, Q.-H., Huang, C., Sutar, P. P. et al. 2024. Effect of various different pretreatment methods on infrared combined hot air impingement drying behavior and physicochemical properties of strawberry slices. *Food Chemistry: X*, 22. Article number: 101299. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2024.101299>.
- Joardder, M. U. H., Shahriar, Md. F. 2023. Principles of infrared heating in food processing and preservation. In *Emerging Thermal Processes in the Food Industry. Unit Operations and Processing Equipment in the Food Industry*. Monograph. Ed.: S. M. Jafari, Woodhead Publishing, pp. 33–46. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822107-5.00010-6>.
- Ju, H.-Y., Vidyarthi, S. K., Karim, M. A., Yu, X.-L. et al. 2023. Drying quality and energy consumption efficient improvements in hot air drying of papaya slices by step-down relative humidity based on heat and mass transfer characteristics and 3D simulation. *Drying Technology*, 41(3), pp. 460–476. DOI: <https://doi.org/10.1080/07373937.2022.2099416>.
- Kapadiya, D. C., Makavana, J. M., Kathiria, M. K. 2018. Effect of hot water blanching treatment on quality of dried potato slices. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 7(7), pp. 2754–2764. DOI: <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2018.707.322>.
- Kim, A.-N., Lee, K.-Y., Rahman, M. S., Kim, H.-J. et al. 2020. Effect of water blanching on phenolic compounds, antioxidant activities, enzyme inactivation, microbial reduction, and surface structure of samnamul (*Aruncus dioicus* var *kamtschaticus*). *International Journal of Food Science & Technology*, 55(4), pp. 1754–1762. DOI: <https://doi.org/10.1111/ijfs.14424>.
- Llavata, B., García-Pérez, J. V., Simal, S., Cárcel, J. A. 2020. Innovative pre-treatments to enhance food drying: A current review. *Current Opinion in Food Science*, 35, pp. 20–26. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2019.12.001>.
- Lopez-Quiroga, E., Prosapio, V., Fryer, P. J., Norton, I. T. et al. 2020. Model discrimination for drying and rehydration kinetics of freeze-dried tomatoes. *Journal of Food Process Engineering*, 43(5). Article number: e13192. DOI: <https://doi.org/10.1111/jfpe.13192>. (Special Issue: Conference of Food Engineering 2018).
- Lu, W., Shi, Y., Wang, R., Su, D. et al. 2021. Antioxidant activity and healthy benefits of natural pigments in fruits: A review. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(9). Article number: 4945. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms22094945>.
- Luo, S.-Z., Sun, Y., Yuan, X., Pan, L.-H. et al. 2023. Infrared radiation blanching – inhibited browning and extended shelf life of pecan kernels. *Journal of Food Science*, 88(4), pp. 1566–1579. DOI: <https://doi.org/10.1111/1750-3841.16505>.
- Ma, Y., Yi, J., Jin, X., Li, X. et al. 2023. Freeze-drying of fruits and vegetables in food industry: Effects on phytochemicals and bioactive properties attributes – A comprehensive review. *Food Reviews International*, 39(9), pp. 6611–6629. DOI: <https://doi.org/10.1080/87559129.2022.2122992>.

- Mehanna, M. M., Abla, K. K. 2022. Recent advances in freeze-drying: Variables, cycle optimization, and innovative techniques. *Pharmaceutical Development and Technology*, 27(8), pp. 904–923. DOI: <https://doi.org/10.1080/10837450.2022.2129385>.
- Misra, S., Mandliya, S., Panigrahi, C. 2022. Ohmic heating: Principles and applications. 2022. In *Thermal Food Engineering Operations*. Monograph. Eds.: N. Kumar, A. Panghal, M. K. Garg. Wiley, pp. 261–299. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781119776437.ch10>.
- Nalawade, S. A., Sinha, A., Hebbar, H. U. 2018. Infrared based dry blanching and hybrid drying of bitter gourd slices: Process efficiency evaluation. *Journal of Food Process Engineering*, 41(4). Article number: e12672. DOI: <https://doi.org/10.1111/jfpe.12672>.
- Neutzling, H. P., da Silva, Timm N., da Costa, Corrêa Cañizares L., Schwab, M. P. et al. 2023. Effects of infrared radiation heating temperature and time on starch gelatinization and technological, thermal, and pasting properties of parboiled rice. *Cereal Chemistry*, 100(3), pp. 734–744. DOI: <https://doi.org/10.1002/cche.10650>.
- Nguyen, H., Le, Q. H., Pham, V. K. 2022. A review of drying methods assisted by infrared radiation, microwave and radio frequency. In *Comprehensive review of the versatile dehydration processes*. Monograph. Ed.: D. J. Jelena. DOI: <https://doi.org/10.5772/intechopen.108650>.
- Nguyen, T. K., Mondor, M., Ratti, C. 2018. Shrinkage of cellular food during air drying. *Journal of Food Engineering*, 230, pp. 8–17. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.02.017>.
- Oduola, A. A., Callewaert, P., Devlieghere, F., Bluhm, B. H. et al. 2022. Growth and aflatoxin B1 biosynthesis rate of model *Aspergillus flavus* NRRL 3357 exposed to selected infrared wavelengths. *Food Control*, 141. Article number: 109204. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2022.109204>.
- Okonkwo, C. E., Moses, O. I., Nwonuma, C., Abiola, T. et al. 2022. Infrared and microwave as a dry blanching tool for Irish potato: Product quality, cell integrity, and artificial neural networks (ANNs) modeling of enzyme inactivation kinetic. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 78. Article number: 103010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2022.103010>.
- Owusu-Apenten, R., Vieira, E. 2023. Quality of dried foods. In *Elementary Food Science. Food Science Text Series*. Monograph. Springer, Cham., pp. 335–351. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-65433-7_15.
- Phyo, P., Gu, Y., Hong, M. 2019. Impact of acidic pH on plant cell wall polysaccharide structure and dynamics: Insights into the mechanism of acid growth in plants from solid-state NMR. *Cellulose*, 26, pp. 291–304. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10570-018-2094-7>.
- Qu, W., Fan, W., Zhu, Y., Ma, H. et al. 2021. Nutritive quality of walnuts dried by variable temperature drum catalytic infrared-hot air. *Science and Technology of Food Industry*, 42(24), pp. 205–215. DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2021040298.
- Quayson, E. T., Ayernor, G. S., Johnson, P.-N. T., Ocloo, F. C. K. 2021. Effects of two pre-treatments, blanching and soaking, as processing modulation on non-enzymatic browning developments in three yam cultivars from Ghana. *Heliyon*, 7(6). Article number: e07224. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e07224>.
- Renard, C. M. G. C., Brick, H., Maingonnat, J.-F., Kadelka, C. et al. 2023. Relative role of leaching and chemical degradation in the loss of water-soluble vitamins C and B9 from frozen vegetables cooked in water. *LWT*, 180. Article number: 114694. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2023.114694>.
- Richter, Reis F. 2023. Blanching in the food industry. In *Thermal Processing of Food Products by Steam and Hot Water*. Monograph. Ed.: S. M. Jafari. Woodhead Publishing, pp. 211–246. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818616-9.00007-9>. (Unit Operations and Processing Equipment in the Food Industry).
- Rifna, E. J., Singh, S. K., Chakraborty, S., Dwivedi, M. 2019. Effect of thermal and non-thermal techniques for microbial safety in food powder: Recent advances. *Food Research International*, 126. Article number: 108654. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2019.108654>.
- Sakare, P., Prasad, N., Thombare, N., Singh, R. et al. 2020. Infrared drying of food materials: Recent advances. *Food Engineering Reviews*, 12, pp. 381–398. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12393-020-09237-w>.
- Salehi, F., Kashaninejad, M. 2018. Modeling of moisture loss kinetics and color changes in the surface of lemon slice during the combined infrared-vacuum drying. *Information Processing in Agriculture*, 5(4), pp. 516–523. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.inpa.2018.05.006>.
- Salehi, F., Kashaninejad, M., Jafarianlari, A. 2017. Drying kinetics and characteristics of combined infrared-vacuum drying of button mushroom slices. *Heat Mass Transfer*, 53, pp. 1751–1759. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00231-016-1931-1>.
- Sethi, S., Choudhary, P., Nath, P., Chauhan, O. P. 2022. Starch gelatinization and modification. In *Advances in Food Chemistry*. Ed.: O. P. Chauhan. Springer, Singapore, pp. 65–116. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-19-4796-4_3.
- Sharma, P., Venugopal, A. P., Sutar, P. P., Xiao, H. et al. 2024. Mechanism of microbial spore inactivation through electromagnetic radiations: A review. *Journal of Future Foods*, 4(4), pp. 324–334. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfutfo.2023.11.004>.

- Sirohi, R., Tarafdar, A., Gaur, V. K., Singh, S. et al. 2021. Technologies for disinfection of food grains: Advances and way forward. *Food Research International*, 145. Article number: 110396. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2021.110396>.
- Song, X., Yu, X., Zhou, C., Xu, B. et al. 2021. Conveyor belt catalytic infrared as a novel apparatus for blanching processing applied to sweet potatoes in the industrial scale. *LWT*, 149. Article number: 111827. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111827>.
- Sui, X., Meng, Z., Dong, T., Fan, X. et al. 2023. Enzymatic browning and polyphenol oxidase control strategies. *Current Opinion in Biotechnology*, 81. Article number: 102921. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2023.102921>.
- Thamkaew, G., Sjöholm, I., Galindo, F. G. 2021. A review of drying methods for improving the quality of dried herbs. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 61(11), pp. 1763–1786. DOI: <https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1765309>.
- Tyagi, L., Sharma, G. P., Verma, R. C., Jain, S. K. et al. 2020. Infrared heating in food processing: An overview. *International Journal of Chemical Studies*, 8, pp. 327–336. DOI: <https://doi.org/10.22271/chemi.2020.v8.i3e.9248>.
- Wang, D., Xiao, H., Lyu, X., Chen, H. et al. 2023a. Lipid oxidation in food science and nutritional health: A comprehensive review. *Oil Crop Science*, 8(1), pp. 35–44. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ocsci.2023.02.002>.
- Wang, J., Yang, X.-H., Mujumdar, A. S., Wang, D. et al. 2017. Effects of various blanching methods on weight loss, enzymes inactivation, phytochemical contents, antioxidant capacity, ultrastructure and drying kinetics of red bell pepper (*Capsicum annuum* L.). *LWT*, 77, pp. 337–347. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2016.11.070>.
- Wang, R., Liu, J., Zhang, J., Li, G. et al. 2023b. Effect of thermal blanching on the inactivation kinetics of polyphenol oxidase and peroxidase in lily bulb, and the functional properties of its flours. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 17, pp. 615–626. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11694-022-01658-x>.
- Wang, S., Chao, C., Xiang, F., Zhang, X. et al. 2018. New insights into gelatinization mechanisms of cereal endosperm starches. *Scientific Reports*, 8. Article number: 3011. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-018-21451-5>.
- Wang, Y., Zhang, L., Yu, X., Zhou, C. et al. 2023. A catalytic infrared system as a hot water replacement strategy: A future approach for blanching fruits and vegetables to save energy and water. *Food Reviews International*, 40(2), pp. 641–657. DOI: <https://doi.org/10.1080/87559129.2023.2187060>.
- Wu, B., Guo, Y., Wang, J., Pan, Z. et al. 2018a. Effect of thickness on non-fried potato chips subjected to infrared radiation blanching and drying. *Journal of Food Engineering*, 237, pp. 249–255. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.05.030>.
- Wu, B., Ma, Y., Guo, X., Guo, Y. et al. 2023. Catalytic infrared blanching and drying of carrot slices with different thicknesses: Effects on surface dynamic crusting and quality characterization. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 88. Article number: 103444. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2023.103444>.
- Wu, B., Ma, Y., Guo, Y., Zielinska, M. et al. 2024. Research progress in the application of catalytic infrared technology in fruit and vegetable processing. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 23(1). Article number: e13291. DOI: <https://doi.org/10.1111/1541-4337.13291>.
- Wu, B., Pan, Z., Xu, B., Bai, J. et al. 2018b. Drying performance and product quality of sliced carrots by infrared blanching followed by different drying methods. *International Journal of Food Engineering*, 14(5–6). Article number: 20170384. DOI: <https://doi.org/10.1515/ijfe-2017-0384>.
- Wu, X.-f., Zhang, M., Li, Z. 2019. Influence of infrared drying on the drying kinetics, bioactive compounds and flavor of *Cordyceps militaris*. *LWT*, 111, pp. 790–798. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.05.108>.
- Xiao, H.-W., Pan, Z., Deng, L.-Z., El-Mashad, H. M. et al. 2017. Recent developments and trends in thermal blanching – A comprehensive review. *Information Processing in Agriculture*, 4(2), pp. 101–127. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.inpa.2017.02.001>.
- Yan, X., McClements, D. J., Luo, S., Liu, C. et al. 2024. Recent advances in the impact of gelatinization degree on starch: Structure, properties and applications. *Carbohydrate Polymers*, 340. Article number: 122273. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2024.122273>.
- Yao, J., Chen, W., Fan, K. 2023. Novel efficient physical technologies for enhancing freeze drying of fruits and vegetables: A review. *Foods*, 12(23). Article number: 4321. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods12234321>.
- Zahoor, I., Mir, T. A., Ayoub, W. S., Farooq, S. et al. 2023. Recent applications of microwave technology as novel drying of food – Review. *Food and Humanity*, 1, pp. 92–103. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foohum.2023.05.001>.
- Zeng, S., Li, M., Li, G., Lv, W. et al. 2022. Innovative applications, limitations and prospects of energy-carrying infrared radiation, microwave and radio frequency in agricultural products processing. *Trends in Food Science & Technology*, 121, pp. 76–92. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2022.01.032>.
- Zeng, Y., Liu, Y., Zhang, J., Xi, H. et al. 2019. Effects of far-infrared radiation temperature on drying characteristics, water status, microstructure and quality of kiwifruit slices. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 13, pp. 3086–3096. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11694-019-00231-3>.

- Zhang, X., Shi, Q., Gao, T., Zhang, Z. et al. 2020a. Developing radio frequency blanching process of apple slice. *Journal of Food Engineering*, 273. Article number: 109832. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.109832>.
- Zhang, Z., Yao, Y., Shi, Q., Zhao, J. et al. 2020b. Effects of radio-frequency-assisted blanching on the polyphenol oxidase, microstructure, physical characteristics, and starch content of potato. *LWT*, 125. Article number: 109357. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109357>.
- Zhao, K., Ye, F., Cheng, L., Yang, J. et al. 2023. An overview of ultra-high temperature ceramic for thermal insulation: Structure and composition design with thermal conductivity regulation. *Journal of the European Ceramic Society*, 43(16), pp. 7241–7262. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2023.07.046>.

Сведения об авторе

Бурак Леонид Чеславович – ул. Пономаренко, 35А, г. Минск, Республика Беларусь, 220015;
Общество с ограниченной ответственностью "БЕЛПРОСАКВА", доктор философии в области пищевых наук (PhD), канд. техн. наук;
e-mail: leonidburak@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6613-439X>

Leonid Ch. Burak – 35A Ponomarenko Str., Minsk, Republic of Belarus, 220015;
Limited Liability Company "BELROSAKVA", PhD, Cand. Sci. (Engineering);
e-mail: leonidburak@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6613-439X>