

НАУЧНЫЕ ОБЗОРЫ

УДК 664.8.022

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ КАТАЛИТИЧЕСКОГО
ИНФРАКРАСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ПЕРЕРАБОТКЕ
ПЛОДООВОЩНОГО СЫРЬЯ. ОБЗОР ПРЕДМЕТНОГО ПОЛЯ****Бурак Л.Ч., Востриков А.В.***ООО «БЕЛПРОСАКВА», Минск, e-mail: leonidburak@gmail.com, info@belrosakva.by*

Инфракрасная технология широко используется на многих предприятиях по переработке фруктов и овощей из-за ее универсальности, обеспечивающей равномерный нагрев, высокую эффективность теплопередачи и минимальное повреждение тканей фруктов и овощей. Цель исследования – критический анализ и обобщение результатов научных исследований по применению каталитического инфракрасного излучения при переработке фруктов и овощей. В качестве материалов исследования послужили научные статьи, опубликованные в период с 2005 по 2024 гг. Научный поиск релевантной литературы осуществлялся через научные базы данных, такие как Scopus, Web of Science и РИНЦ, а также с использованием системы Google Scholar. Исследование включало работы, опубликованные на английском и русском языках. Систематический обзор результатов исследований был проведен согласно критериям PRISMA 2020. Отбор источников для анализа реализовался по следующим ключевым словам: «каталитическое инфракрасное излучение», «качество», «пищевая ценность», «бланширование», «очистка овощей и фруктов», «сушка плодоовощного сырья», «инактивация ферментов», «микробиологическое загрязнение». Среди статей, соответствующих критериям включения, для составления данного обзора было выбрано 50 исследований. В результате анализа результатов научных исследований установлено, что в настоящее время метод каталитического инфракрасного нагрева разработан и эффективно внедрен на различных технологических процессах переработки плодоовощного сырья. Изучены физико-химические свойства и основные механизмы каталитического инфракрасного излучения, а также его использования в технологических процессах обработки фруктов и овощей, такими как бланширование, очистка, обеззараживание и сушка. Метод каталитического инфракрасного излучения, по сравнению с традиционным электрическим инфракрасным нагревом, работает на природном или сжиженном газе, что позволяет повысить термический коэффициент полезного действия и при этом значительно снизить энергоемкость процесса. Следует отметить, что метод каталитического инфракрасного излучения более энергоэффективен и экологичен, чем традиционный метод инфракрасного нагрева, он может значительно повысить эффективность обработки, улучшить фитохимическое содержание и качество продукции, а также снизить загрязнение окружающей среды и потери сырья. Несмотря на то, что было проведено значительное количество научных исследований по использованию технологии каталитического инфракрасного излучения при переработке фруктов и овощей, остается ряд ограничений для его широкого промышленного внедрения. Поэтому необходимы дальнейшие исследования для углубленного анализа технологии каталитического инфракрасного излучения и ее применения в промышленном производстве.

Ключевые слова: фрукты, овощи, инфракрасное излучение, качество, пищевая ценность бланширование, очистка, сушка, инактивация ферментов, микробиологическая обсемененность

**USING CATALYTIC INFRARED RADIATION TECHNOLOGY
IN PROCESSING FRUIT AND VEGETABLE RAW MATERIALS.
A SUBJECT FIELD REVIEW****Burak L.Ch., Vostrikov A.V.***BELROSAKVA LLC, Minsk, e-mail: leonidburak@gmail.com, info@belrosakva.by*

Infrared technology is widely used in many fruit and vegetable processing plants due to its versatility in providing uniform heating, high heat transfer efficiency and minimal damage to fruit and vegetable tissue. The purpose of the study is to critically analyze and summarize the results of scientific research on the use of catalytic infrared radiation in the processing of fruits and vegetables. The research materials were scientific articles published between 2005 and 2024. The scientific search for relevant literature was carried out through scientific databases such as Scopus, Web of Science and RSCI, as well as using the Google Scholar system. The study included works published in English and Russian. A systematic review of research results was carried out according to the PRISMA 2020 criteria. The selection of sources for analysis was carried out using the following keywords: "catalytic infrared radiation", "quality", "nutritional value", "blanching", "cleaning of vegetables and fruits", "drying of fruits and vegetables" raw materials", "enzyme inactivation", "microbiological contamination". Among the articles that met the inclusion criteria, 50 studies were selected for this review. As a result of the analysis of the results of scientific research, it was established that at present the method of catalytic infrared heating has been developed and effectively implemented in various technological processes for processing fruit and vegetable raw materials. The physicochemical properties and basic mechanisms of catalytic infrared radiation, as well as its use in technological processes for processing fruits and vegetables, such as blanching, cleaning, disinfection and drying, have been studied. The catalytic infrared radiation method, compared to traditional electric infrared heating, operates on natural or liquefied gas, which allows to increase the thermal efficiency and at the same time significantly reduce the energy intensity of the process. It should be noted that the catalytic infrared heating method is more energy efficient and environmentally friendly than the traditional infrared heating method, it can greatly improve the processing efficiency, improve the phytochemical content and product quality, and reduce environmental pollution and raw material loss. Although a significant amount of scientific research has been conducted on the use of catalytic infrared technology in fruit and vegetable processing, several limitations remain for its widespread industrial implementation. Therefore, further research is needed to in-depth analyze catalytic infrared technology and its application in industrial production.

Keywords: fruits, vegetables, infrared radiation, quality, nutritional value blanching, drying, enzyme inactivation, cleaning, microbiological contamination

Введение

Инфракрасное (ИК) излучение – это электромагнитные волны, которые находятся между видимым светом и микроволнами и охватывают диапазон от 0,78 до 1000 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 (3,0–1000 мкм) [1]. Ближний ИК-диапазон обычно используется в пищевой промышленности для неразрушающего контроля сырья и готовой продукции, тогда как средний и дальний ИК-диапазон используются в пищевой промышленности для нагрева и сушки фруктов и овощей. 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. 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 [2]. Поглощение ИК-энергии варьируется в зависимости от сырья или пищевых продуктов из-за различий в составе, структуре и форме. Диапазон поглощения каждого материала по существу представляет собой комбинацию ИК-спектров поглощения его компонентов. Примечательно, что вода демонстрирует три отчетливых пика поглощения в среднем и дальнем ИК-диапазоне (3,0, 4,7 и 6,0 мкм), что делает ИК-излучение приемлемым методом для обработки свежих фруктов и овощей с высоким содержанием влаги по сравнению с другими методами обработки, такими как сушка горячим воздухом (СГВ) [2]. Большинство исследований, связанных с ИК-обработкой фруктов и овощей, были сосредоточены на дальнем ИК-излучении из-за совпадения длин волн поглощения воды и органических соединений, которые преобладают в плодоовощном сырье. Однако в последнее десятилетие начали изучать применение короткого и среднего ИК-диапазона, которые обеспечивают более глубокое проникновение и более высокую частоту излучения [3, 4]. Большинство ИК-технологий используют электричество в качестве источника энергии для нагрева, предлагая преимущества высокой эффективности нагрева, про-

стой конструкции оборудования и простоты эксплуатации, что широко применяется в пищевой промышленности [2]. Однако его энергопотребление относительно выше, чем у каталитического ИК (КИК), где источником энергии является газ. Кроме того, керамическое ИК – это еще один тип ИК-метода, в котором керамические материалы используются в качестве резистивного проводника для нагрева, что может эффективно предотвратить перегрев проводника и продлить срок его службы [5]. В целом керамические ИК-излучатели обладают высокой излучающей способностью и могут работать в широком диапазоне температур, однако глазурь керамики склонна к плавлению при высоких температурах во время работы, а керамика подвержена разрушению при ударе, что ограничивает ее использование [2]. В отличие от них все большее внимание привлекает КИК-нагрев, новая технология, использующая природный газ или пропан для выработки тепловой энергии посредством окислительных реакций в присутствии кислорода под действием катализаторов [2]. Учитывая, что энергия преобразуется напрямую из природного газа, устройства КИК значительно эффективнее используют энергию по сравнению с электрическим оборудованием (ЭИК) [6]. Диапазон длин волн, генерируемых КИК, составляет 3–8 мкм, охватывая три пика поглощения воды, что позволяет быстро удалить влагу из пищевых продуктов и сократить время обработки. До внедрения в пищевой промышленности метод КИК широко использовался в таких отраслях, как текстильная, автомобильная, деревообрабатывающая и электронная [7]. Многие из ранее опубликованных научных обзоров в основном сосредоточены на общих аспектах ИК-нагрева. Поэтому, **цель данного исследования** – критический анализ результатов научных исследований за последние десятилетия использования метода каталитического инфракрасного излучения (КИК) при переработке фруктов и овощей. В данной статье представлен анализ и основные механизмы метода КИК, как отдельно, так и в сочетании с другими методами обработки различных видов плодоовощного сырья, такими как бланширование, сушка, жарка, очистка и инактивация микрофлоры.

Материалы и методы исследования

Для анализа применения каталитического инфракрасного нагрева при переработке плодоовощного сырья был проведен обзор научных публикаций и электронных ресурсов за период с 2005 по 2024 годы. Поиск релевантной литературы осуществ-

влялся через научные базы данных, такие как Scopus, Web of Science и РИНЦ, а также с использованием системы Google Scholar. Исследование включало работы, опубликованные на английском и русском языках. Систематический обзор результатов исследований был проведен согласно критериям PRISMA 2020 [8, 9]. Отбор источников для анализа реализовался по следующим ключевым словам: “catalytic infrared radiation”, “quality”, “nutritional value”, “blanching”, “cleaning of vegetables and fruits”, “drying of fruit and vegetable raw materials”, “enzyme inactivation”, “microbiological contamination”, «каталитическое инфракрасное излучение», «качество», «пищевая ценность», «бланширование», «очистка овощей и фруктов», «сушка плодоовощного сырья», «инактивация ферментов», «микробиологическое загрязнение». Критерии включения для статей, подлежащих анализу:

1. Статья написана в период 2005–2024 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 использования технологии 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

Результаты исследования и их обсуждение

В результате проведенного научного поиска и анализа результатов научных исследований установлено, что в настоящее время метод каталитического инфракрасного нагрева разработан и эффективно внедрен на различных технологических процессах переработки плодоовощного сырья. Краткий обзор использования КИК при переработке фруктов и овощей представлены в таблице.

1. ОБРАБОТКА КАТАЛИТИЧЕСКИМ ИНФРАКРАСНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ ПЛОДООВОЩНОГО СЫРЬЯ

1.1. Каталитическое инфракрасное бланширование

Бланширование – 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 для предварительной обработки фруктов и овощей в пищевой промышленности. Хотя эти методы экономически эффективны и просты в эксплуатации, они все же имеют и некоторые недостатки. Например, они могут привести к потере водорастворимых питательных веществ, длительному времени обработки и низкой энергоэффективности [31, 32]. Являясь энергосберегающим и эффективным методом нагрева, КИК может в значительной степени снизить негативное влияние температуры процесса бланшировки на пищевую ценность и качество плодовоовощного сырья.

1.1.1 Инактивация ферментов

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. Среди этих эндоферментов ПОД был идентифицирован как один из наиболее термостойких ферментов во фруктах и овощах и, следовательно, может использоваться в качестве индикатора для оценки эффективности обработки бланшированием [33-35]. Основным преимуществом КИК-бланширования (КИКБЛ) является его способность за короткий период времени инактивировать ферменты во фруктах и овощах благодаря быстрому и равномерному процессу нагревания. Результаты исследований показали, что КИК значительно снижает активность эндоферментов фруктов и овощей. Так в ходе исследования было изучено влияние КИКС и сушки горячим воздухом (СГВ) на ферментативную активность ломтиков банана при различных температурах [13]. Результаты показали, что процесс КИКС инактивировал большую часть ПФО в течение первых 20 минут, тогда как обработка горячим воздухом (ГВ) активировала фермент на начальном периоде, где все время инактивации превышало 180 минут. Предполагается, что это может быть связано с тем, что длина волны КИК соответствует пикам поглощения воды и белка, тем самым способствуя передаче тепла от поверхности к внутренней части ломтиков банана, что способствует денатурации ПФО. Chen J. с соавторами исследовали предварительную обработку ломтиков моркови вакуумным КИК, установив, что активность ПОД в ломтиках моркови снижалась примерно до 25% в течение 150 с. [11].

Краткий обзор использования КИК при переработке фруктов и овощей

Обрабатываемое сырье	Метод обработки	Цель процесса обработки	Параметры обработки	Полученные результаты	Источник
Сладкий картофель	КИК бланширование на конвейерной ленте	Инактивация ферментов Удаление влаги Сохранение цвета и питательных веществ	Толщина: 3 мм расстояние КИК: 12 см скорость: 0,16 м/мин.	При достижении 90% инактивации ПОД образцы были более твердыми, чем образцы после БВ (1812,0 > 433,9 г), с меньшим разрушением клеток и лучшими показателями качества (сохранение витамина С: 54,30–75,16% > 40,72–45,36%). Сохранение β-каротина и общее содержание фенола составило: 78,34%, 7,41, 1690,4 г, 75,16%, 133,49% и 1,03 мг/г соответственно.	[10]
Морковь	КИК бланширование на конвейерной ленте	Инактивация ферментов, удаление влаги. Сохранение цвета и питательных веществ	Расстояние: 70 мм, мощность: 552 Вт, время: 110 с, температура 80°C, продолжительность 45 мин.	По сравнению только с БОП, время высушивания сократилось на 45,0%, а цвет стал более ярким, хрустящая консистенция, а остаток ПОД меньше. Содержание витамина С было на 19,03% выше, чем в образцах, обработанных БПП.	[11]
Зеленый чай	КИК сушка	Инактивация ферментов, удаление влаги. Сохранение цвета и питательных веществ	Расстояние 20см, время 150 с	ПФО инаktivирована на 90%, удалено 45% воды, необходимое время сушки меньше по сравнению с СГВ, сохранение витамина С (0,3214 > 26,79 мг/мл) и содержание полифенолов (93,1% > 26,79%) а также выше чем контрольных образцах	[12]
Бананы	КИКС сушка	Инактивация ферментов, удаление влаги. Сохранение цвета и питательных веществ	Толщина 5 мм, температура 60° С	Обработка КИКС имеет более высокую скорость высушивания (время достижения необходимой температуры: 2 < 108 мин)	[13]
Картофель (картофельные чипсы)	КИК-бланширование и сушка	Влияние КИК бланширования и сушки на содержание масла, улучшение вкусовых качеств	Расстояние КИКБЛ бланширования 9,5 см, время: 180 с. Расстояние КИКС: 21,5 см, время 120 с Толщина: 9 мм, температура КИКБЛ: 146, 160 и 174°C. Время КИКБЛ: 7 мин	Общее содержание масла в образцах, обработанных КИК снизилось более чем на 13,79%, а результаты органолептической оценки были лучше, чем при БВ	[14].
			Толщина: 9,43 мм, время КИКБЛ: 200 с Толщина: 0,8 мм, время КИКБЛ: 150 с. Расстояние КИКБЛ: 9,5 см время: 330 с. Расстояние: 21,5 см	В образцах, обработанных КИК, общее содержание масла снизилось на 30–37,5%, сократилось необходимое время жарки (11,42–14,13 < 18,16–20,27 мин), снизилось содержание воды (57,76–60,96% < 59,13–63,89%) и образцы были вкуснее. Образцы КИКБЛ имеют более низкое содержание масла (5% < 20%), чем образцы БГВ при аналогичном энергопотреблении. После обработки КИК-образец толщиной 0,8 мм имеет более высокую хрусткость (98,79 ± 23,13 Н), меньшее содержание воды (3,85% ± 0,36%) и лучший вкус (сенсорная оценка: 15) по сравнению с образцами другой толщины.	[15].
					[16]
					[17]

Продолжение табл.

Обрабатываемое сырье	Метод обработки	Цель процесса обработки	Параметры обработки	Полученные результаты	Источник
Ядра миндаля	КИК-обеззараживание	Снижение микробиологической обсемененности Сохранение пищевой ценности	Интенсивность КИК: 5458 Вт/м ² , время: 30–45 с. Продолжительность обработки: 60 мин.	КИК-нагрев с последующей выдержкой при высокой температуре позволил добиться более чем 7,5-логарифмического снижения количества <i>Salmonella enteritidis</i> по сравнению с образцами, обработанными только КИК (0,63, 1,03 и 1,51 log).	[18]
Виноградные косточки	КИК-обеззараживание	Снижение микробиологической обсемененности Сохранение пищевой ценности	Время КИК: 98 с, температура КИК: 75°C. Время выдержки: 60 мин.	Общее количество бактерий в виноградных косточках, обработанных КИК, снизилось до 1,66 log КОЕ/г, что на 43,14% и 65,99% ниже, чем в невыдержанных и необработанных косточках, а выход масла 10,39% (дб), что на 46,96% выше, чем у необработанных образцах	[19]
Грибы шиитаке	КИК-обеззараживание	Снижение микробиологической обсемененности Сохранение пищевой ценности	Температура 70°C, время: 10,8–15,2 мин. Скорость подачи: 38–50 кг/ч. Температура выдержки: 70°C. Время выдержки: 30–60 мин.	Общее количество плесени составляло менее 2 log КОЕ/г образцов, обработанных КИК, и за это время влажность снижена на 2,2–6,0%	[20]
Шпинат	КИК-обеззараживание	Снижение микробиологической обсемененности	Время КИК: 180 с, температура выдержки 70°C, время выдержки: 45 мин.	Общее количество бактерий после обработки КИК составило $1,98 \pm 0,05 \log$, ΔE составило $5,17 \pm 0,83$, а содержание содержания хлорофилла составила 84,62%.	[21]
Томаты	КИК-очистка от кожуры	Очистка от кожуры, снижение потерь мякоти	Время нагрева пламени: 10 с. Температура нагрева пламени: 350°C. Время КИК: 4 мин Время КИК: 30–75 с	Обработка Flame-CIR (КИК) обеспечила более высокое удержание содержания целлюлозы, гемицеллюлозы, пектина и ликопина (53,73 мг/кг), чем образцы, обработанные БГВ (91,67%, 94,08%, 98,66% > 67,75%, 74,52%, 84,89%). По сравнению с ЦО, КИК-очистка способствует лучшему отслаиванию и имеет меньшие потери (8,3–13,2% < 13,2–15,8%), меньшую толщину кожуры (0,39–0,91 < 0,85–1,06 мм) и более плотную текстуру продукта (10,30–19,72 > 10,59–12,65 Н), чем образцы, обработанные ЦО	[22]
Томаты черри	КИК-очистка от кожуры	Очистка от кожуры, снижение потерь мякоти	Расстояние КИК 30 см, время 3 мин.	По сравнению с БОП и ЦО очистка КИК оказывает лучший эффект очистки томатов черри, а также снижается потеря мякоти (соотношение качества кожицы и мякоти: 7,68%)	[24]

Окончание табл.

Обрабатываемое сырье	Метод обработки	Цель процесса обработки	Параметры обработки	Полученные результаты	Источник
Грецкие орехи	КИК в сочетании с другими технологиями сушки	Сокращение времени сушки. Инактивация ферментов Сохранение цвета и питательных веществ Уничтожение микробов	Расстояние 30 см. Температура КИК: 300, 400°C. Скорость движения ролика: 1,5, 2,0 об/мин., время: 22,5 мин. Температура СГВ: 43°C, скорость воздуха: 3 м/с, время сушки воздухом 14 часов	По сравнению с СГВ, масло грецкого ореха, обработанное КИК, имело на 28,85% более низкое кислотное число и на 20% более низкое перекисное число, а также содержания полифенолов на 10,92% было выше.	[25]
Миндаль	КИК в сочетании с другими технологиями сушки		Время КИК: 1 час, температура 70°C. Время выдержки 2 ч, Время СГВ 2 ч	По сравнению с СГВ время сушки КИК меньше на 2 часа, перекисное число масла увеличилось ($1,34 > 0,57$ Мэкв/кг), а количество <i>Enterococcus faecium</i> снизилось на $1,52 \pm 0,31 \log$ КОЕ/продукт.	[26]
Фисташки	КИК в сочетании с другими технологиями сушки	Сокращение времени сушки, инактивация ферментов, уничтожение микробов. Сохранение цвета и питательных веществ	Время КИК: 2 ч., температура выдержки 70°C. Время – 2 ч.	Снижение содержания <i>E. faecium</i> в ядре и скорлупе составило 6,1 и 5,41 log КОЕ/г соответственно. Время сушки было сокращено на 40 минут по сравнению с СГВ, при конечном содержании влаги 9%.	[27]
Бананы	КИК в сочетании с другими технологиями сушки	Сокращение времени сушки	Мощность: 4000 Вт/м ² , толщина: 5 мм, время КИК 10 мин.	Обработка КИК сократила время сушки на 2 часа по сравнению с обычной сублимационной сушкой.	[28]
Клубника	КИК в сочетании с другими технологиями сушки	Сокращение времени сушки	Толщина: 4 мм, мощность КИК 3000, 4000 и 5000 Вт/м ² . КИК сушка до снижения веса на 30%, 40% и 50%. Субли. сушка до влажности 5%.	Обработка КИК сокращает время сушки на 42% (предварительное обезвоживание до 40%) по сравнению с обычной сублимационной сушкой, обеспечивая при этом лучший цвет, хрупкость и усадку.	[29]
Морковь	КИК в сочетании с другими технологиями сушки	Сокращение времени сушки	Температура в Уз ванне: 60, 70 и 80°C., время 5 мин. Температура КИК: 70 ± 2°C Расстояние 15,5 см	Предварительная обработка Уз-бланшированием перед КИКС снизила активность ферментов на 65,21%, 73,33% и 81,43% по сравнению с БГВ, а время КИКС сократилось на 2,5%, 1,5% и 21%	[30]

Условные обозначения: КИКС – каталитическая инфракрасная сушка; КИКБЛ – каталитическое инфракрасное бланширование; БГВ – бланширование горячей водой; БОП – бланширование острым паром; СГВ – сушка горячим воздухом; ЩО – сушка горячим воздухом; ЩО – щелочная очистка; ПФО – полифенолоксидаза; ПОД – пероксидаза; Уз – ультразвуковая обработка

Song и соавторы исследовали влияние КИК на процесс инактивации эндоферментов ломтиков сладкого картофеля разной толщины в различных условиях обработки (расстояния между эмиттером КИК и лотком для образцов и скоростью конвейера) и установили, что чем ближе эмиттер КИК к образцу, тем быстрее и эффективнее происходит инаktivация, а влияние расстояния нагрева на эффективность инаktivации фермента было намного больше, чем толщина образца [10]. Аналогичный результат был показан в исследовании Wu и соавторов, которые обнаружили, что остаточная активность ПФО чайных листьев колебалась от 4,1% до 16,0% после обработки КИК в течение 120–210 с на разных расстояниях облучения, причем чем ближе расстояние облучения, тем выше скорость инаktivации ПФО [17]. Это может быть связано с тем, что интенсивность излучения увеличивается с уменьшением расстояния и, следовательно, температура поверхности образца повышается быстрее. Стоит отметить, что при расстоянии излучения 15 см чайные листья частично обуглились, что отразилось на качестве чая. Аналогичный результат наблюдался в исследовании Chen J. и других авторов [11]. Поэтому необходимо контролировать расстояние между излучателем КИК и лотком для проб при обработке КИКБЛ.

1.1.2 Снижение содержания влаги

Помимо значительного эффекта инаktivации ферментов, каталитическое инфракрасное бланширование (КИКБЛ) также положительно влияет на удаление влаги. В традиционных методах БГВ включает погружение материалов в горячую воду при температуре от 70 до 100°C на несколько минут, тогда как бланшировка острым паром (БОП) предполагает воздействие на пищевое сырье острого пара при температуре выше 100°C, в зависимости от характеристик материала и требований к инаktivации ферментов [36]. По сравнению с БГВ, бланширование паром может уменьшить потерю минералов и водорастворимых веществ. Однако малая скорость пара и низкая эффективность теплопередачи делают БОП трудоемким, что приводит к неравномерному нагреву образцов. Кроме того, конденсация пара на поверхности образца также может вызывать размягчение тканей. В ходе этих процессов адсорбция воды материалами увеличивает энергоёмкость последующих операций (например, сушки), потому как для удаления этой части воды требуется больше энергии. По сравнению с традиционными методами предва-

рительной обработки БГВ и БОП, КИКБЛ представляет собой метод сухого бланширования без использования воды в качестве среды, при этом содержание воды в обрабатываемом материале после бланширования значительно ниже. Wu, Wang и соавторы установили, что содержание воды в картофельных чипсах, обработанных БГВ, составляло 97,4%, тогда как в образцах обработанных КИКБЛ только 32,0%. [17]. Кроме того, КИКБЛ может удалять часть воды и снижать энергоёмкость процесса [32]. Более того, Wu и соавторы изучали результат воздействия КИК на листьях зеленого чая и обнаружили, что при одном и том же источнике излучения, чем ближе образец к источнику, тем быстрее теряется вода чайных листьев, а скорость обезвоживания имеет тенденцию сначала увеличиваться, а затем уменьшаться [12]. Это может быть связано с быстрым ростом температуры в начальный период сушки и увеличением скорости обезвоживания. Аналогично, в случае фиксированного расстояния КИК-излучения, чем больше время облучения, тем влажность таро постепенно снижалась. Содержание влаги образцов таро после КИКБЛ снижалась быстрее, чем у контрольных образцов, обработанных БГВ. Таро, обработанное КИКБЛ, требовало более короткого времени сушки, чем образец без бланширования в тех же условиях БОП [37]. В исследовании бланшировки КИК банановых чипсов было установлено, что при КИКБЛ необходимые температуры (60, 70 и 80°C) достигались за 9 минут по сравнению с более чем 90 минутами для БОП, что в основном объяснялось более высокой скоростью нагрева. КИК также более эффективно переносит тепло, значительно сокращая время достижения необходимой температуры [13]. Кроме того, Chen J. и соавторы установили, что бланширование КИК способствовало 14,5% влаги из ломтиков моркови и сокращало соответствующее время сушки на 32,3%, 41,1% и 45,0% при 60, 70 и 80°C соответственно [11]. Это может быть связано с тем, что быстрое повышение температуры, вызванное КИК вызвало миграцию внутренней влаги ломтиков моркови наружу и испарение, а это привело к более высоким начальным температурам поверхности после бланширования, что является основной причиной сокращения времени сушки. В своем исследовании Song et al получили аналогичные результаты для чипсов из сладкого картофеля, обработанных КИКБЛ, которые показали, что предварительная обработка бланшированием КИКБЛ может способствовать снижению влажности на 45,77–79,15%, одновременно обеспечивая инаktivацию

ферментов в ломтиках сладкого картофеля [10]. Авторы также установили, что скорость сушки увеличивается с уменьшением расстояния КИК-излучения и толщины срезов образца, поскольку чем короче расстояние, тем сильнее облучение, а чем тоньше толщина, тем быстрее тепло может передаваться к внутренней поверхности образца, тем самым способствуя испарению влаги. Помимо ускорения диффузии воды за счет повышения температуры, высокая температура, вызванная КИК-излучением, также приводит к тому, что клеточная мембрана становится более проницаемой или более разрываемой и может удалить с поверхности материала некоторые воски, которые препятствуют диффузии воды, что в итоге способствует диффузии воды из образцов наружу и ее испарению [10,36]. Таким образом, КИКБЛ эффективно увеличивает скорость сушки, способствуя диффузии воды за счет быстрого повышения температуры, проницаемости или разрыва клеточных мембран, а также удаления поверхностного воскового слоя, тем самым уменьшая количество влаги и время сушки.

1.1.3 Влияние каталитического инфракрасного бланширования на биологически активные вещества и витамины фруктов и овощей

Фрукты и овощи содержат витамин С, β -каротин и фенольные вещества, которые полезны для здоровья человека, но могут разрушаться и снижать свое количество под действием различных физико-химических факторов в процессе переработки. Результаты многих научных исследований показывают, что обработка КИКБЛ может эффективнее сохранять эти вещества. В исследовании Chen J. и соавторов содержание витамина С в ломтиках моркови, обработанных КИКБЛ и сушкой горячим воздухом (СГВ), было на 14,39–19,03% выше, чем в ломтиках моркови, обработанных только СГВ [11]. Song et al получили аналогичные результаты: содержание витамина С в сладком картофеле, обработанном КИК, составляло 54,3–75,16% по сравнению с 40,72–45,36% в образцах, обработанных БГВ. Более высокое содержание в образцах, обработанных КИК, вероятно, связано с тем, что витамин С является водорастворимым и термочувствительным соединением и, следовательно, легче разрушается при обработке БГВ. Более того, в этом исследовании влияние расстояния на сохранность витамина С было больше, чем влияние толщины материала [10]. Что касается каротиноидов, Song и соавторы показали, что удержание β -каротина в моркови, обработанной КИК,

достигало 110,05–133,49% по сравнению с 107,04–109,70% в моркови, обработанной БГВ. Это может быть связано со снижением активации ферментов и структурой разрыва клеток, вызванной высокой температурой за короткое время обработки, что облегчает экстракцию β -каротина [10].

Фенольные вещества подобны витамину С и нестабильны по своей природе, поэтому могут разрушаться при высоких температурах. Во всех исследованиях [10,13] были получены результаты более высокого содержания фенолов после обработки КИКБЛ, чем при других обработках бланшированием, вероятно, потому, что КИКБЛ может достичь необходимых целей бланширования за более короткое время и, следовательно, оказывает меньшее влияние на содержание активных соединений во фруктах и овощах.

1.1.4 Улучшение органолептических показателей

Цвет, аромат и свежесть являются основными показателями, которые современный потребитель оценивает при выборе продуктов питания. Изменение цвета в основном вызвано реакцией Майяра, потерей термочувствительных пигментов, а также ферментативными и неферментативными реакциями потемнения. В исследовании Song et al., значения ΔE составляли 7,41–20,59, тогда как образцы, обработанные БГВ, находились в диапазоне 16,02–18,42, и чем толще образец и больше расстояние, тем больше разница в цвете [10]. Это может быть связано с тем, что чем дальше расстояние и толще образец, тем больше времени нагревания требуется для достижения желаемой инактивации фермента, что приводит к более сильному ферментативному потемнению и растворению сахаров и белков в воде. Другими возможными причинами обесцвечивания являются распад термочувствительных пигментов, легкое осаждение крахмала в сахара из-за набухания во время склеивания и обесцвечивание, вызванное реакцией Майяра [32, 38]. Более того, авторы исследований Pekke, Wu и Xia с соавторами пришли к выводу, что обработка CIRB полезна для сохранения цвета. Основная причина заключается в том, что время нагревания было сокращено при обработке CIRB, а скорость инактивации фермента стала выше, что уменьшило ферментативную реакцию потемнения [13, 12, 39]. Помимо цвета, еще одним важным фактором, стимулирующим выбор потребителей, является аромат. В исследовании Wu и соавторов зеленый чай, обработанный КИКБЛ, был светлым и мягким, и имел

нежный аромат по сравнению с образцом, бланшированным паром, который был пожелтевшим, засохшим [12]. Zhang и соавторы изучали влияние КИКБЛ на таро и установили, что аромат таро был более интенсивным, чем у образцов, обработанных БГВ, а удельная липкость поверхности таро также снижалась после бланширования методом КИКБЛ, что облегчало последующую обработку [37]. Кроме того, Xia и соавторы обнаружили, что содержание летучих ароматобразующих веществ в зеленом перце после КИКБЛ достигло $61,3 \pm 1,38$ мкг/мл, что было значительно ($p < 0,05$) выше, чем самое высокое международное стандартное значение 30 мкг/мл [39]. Во время бланширования целостность и проницаемость клеточной стенки и клеточной мембраны фруктов и овощей подвергаются обработке, которая может снизить тургорное давление клеток и снизить значение твердости [10, 40]. В исследовании Chen J. и соавторов хрусткость образцов, обработанных КИКБЛ, была выше, чем у не бланшированных образцов при той же температуре, вероятно, потому, что во время КИКБЛ температура быстро повышалась и вода испарялась [11]. Вышеупомянутые исследования доказали, что КИКБЛ является эффективным методом предварительной обработки, позволяющим смягчить или полностью исключить негативное влияние, вызванное традиционными БГВ и БОП с точки зрения инактивации эндоферментов, уменьшения количества воды, сохранения питательных веществ и органолептических показателей качества, что является перспективным для дальнейшего продвижения и применению. Тем не менее, необходимы дальнейшие исследования для определения оптимальных условий обработки с целью получения наиболее эффективных результатов для различных видов плодоовощного сырья в условиях промышленного производства и потребности рынка.

1.2 Жарка методом каталитического инфракрасного излучения

КИК часто использовался для обработки фруктов и овощей, обжаренных во фритюре. При традиционной промышленной технологии обжаривания получают жареные продукты с высоким содержанием масла, что не благоприятно влияет на здоровье потребителей. Поэтому многие зарубежные ученые пытались найти новые современные методы снижения поглощения жиров в жареных продуктах. Например, для снижения содержания масла в картофельных чипсах использовались погружение в растворы сахара или соли, покрытие производными

целлюлозы или обжаривание в вакуумном устройстве. Однако эти методы имеют ограничения, такие как использование синтетических химикатов, высокая энергоёмкость и низкое качество конечной продукции [15]. КИК может удалять часть воды из сырья благодаря частоте своей вибрации, которая соответствует пику водопоглощения [14]. По сравнению с БГВ, КИК можно использовать в качестве предварительной обработки перед жаркой, при которой в качестве среды не используется вода, что может эффективно уменьшить заполнение пустот, образующихся в результате испарения воды в следующем процессе жарки, и помогает снизить содержание масла в жареных продуктах. Исследования по применению КИК при жарке во фритюре ограничены, а предыдущие исследования были сосредоточены на использовании этой технологии при производстве продуктов из жареного картофеля. Было показано, что КИК способ, используемый для жарки картофеля фри и чипсов, снижает содержание масла в конечных продуктах, что приводит к значительному снижению калорийности. Кроме того, в некоторых исследованиях жарки, в которых сначала применялась обжарка КИК с последующим обезвоживанием, было обнаружено, что технология предварительной обработки КИК значительно сокращает последующее время сушки и улучшает сенсорную оценку продукта.

1.2.1 Снижение содержания масла

Было доказано, что использование технологии КИК при жарке во фритюре позволяет эффективно контролировать содержание масла в жареных продуктах. Такие параметры, как время и температура жарки, форма продукта, предварительная обработка, влажность материала и содержание твердых веществ, могут влиять на поглощение масла жареными продуктами [14]. Во время жарки, при диффузии воды наружу, внутреннее и поверхностное давление воды материала становится выше, тогда как твердое вещество на поверхности материала становится все более компактным. Такое изменение приводит к тому, что внутренняя диффузия воды испытывает большое сопротивление, время жарки увеличивается, что приводит к дальнейшему увеличению содержания масла [41].

Изучая влияние КИК на содержание масла в жареном картофеле, Wu, Wang, и соавторы обнаружили, что в конце жарки образцы, обработанные КИКБЛ, содержали примерно половину содержания масла по сравнению с образцами, обработанными БГВ, общее содержание масла снизилось

более чем на 13,79%, и при том же содержании масла вода испарялась быстрее, чем в образцах, обработанных БГВ [17].

Bingol и соавторы исследовали влияние различных методов предварительной обработки на конечное качество жареных во фритюре картофельных чипсов и обнаружили, что содержание воды в образцах после КИКБЛ составляло $76,85\% \pm 0,13\%$ по сравнению с $82,07\% \pm 2,02\%$ после БГВ. Кроме того, конечное содержание масла в образцах, обработанных КИКБЛ, после жарки было снижено более чем на 30% во всех образцах по сравнению с БГВ. По мере увеличения времени жарки увеличивалась и скорость впитывания масла, вероятно, из-за сухой поверхности продукта и образования пустот при испарении воды, что снижало давление проникновения масла. Однако с дальнейшим обжариванием скорость роста содержания масла в продуктах существенно замедлялась, вероятно, за счет внутреннего склеивания крахмала и перемещения внутренних растворенных веществ наружу и образования корки на поверхности [15-16].

1.2.2 Улучшение органолептических показателей качества

Преимущества КИК технологии при жарке пищевых продуктов проявляются также в цвете и твердости продуктов, обжаренных во фритюре. Изменение цвета жареных продуктов обусловлено в основном реакциями Майяра, которые зависят главным образом от температуры и времени нагревания. Более того, неравномерное накопление редуцирующих сахаров по биологическим или абиотическим причинам также может привести к неравномерному распределению цвета пищевых продуктов [15]. Как правило жареные картофельные чипсы и картофель фри золотистого цвета более приемлемы для потребителей, и во многих исследованиях цвет образцов, обработанных КИКБЛ, становился золотистым быстрее, чем образцов, обработанных БГВ [14-16]. Например, Wu, Wang, с соавторами установили, что значения b^* (желтизна/голубизна) картофельных чипсов, обработанных КИК, были значительно ($p < 0,05$) выше, чем у образцов, обработанных БГВ. Вероятно, это связано с потерей сахаров картофеля при обработке БГВ, что в дальнейшем привело к изменениям в реакции Майяра. Кроме того, горячая вода также повреждает пигменты в образцах картофеля, в результате чего конечные чипсы стали более белыми по сравнению с образцами, обработанными способом КИК [5].

Хрустящая корочка является важным показателем, используемым для оценки

вкуса жареных продуктов, и, согласно соответствующим исследованиям, твердость жареных продуктов может использоваться для отражения хрусткости в зависимости от более низкого значения твердости, соответствующего лучшей хрусткости [41-42]. Что касается жареных продуктов, то хрустящая корочка связана с изменениями в исходном содержании воды и содержании таких компонентов, как крахмал и белок. Wu, Wang с соавторами обнаружили, что значение твердости жареных картофельных чипсов уменьшалось с увеличением времени обработки КИК, и соответственно увеличивалась хрустящая корочка. Была выдвинута гипотеза о том, что высокое начальное содержание воды в образцах при коротком времени обработки КИК приводит к клейстеризации крахмала и денатурации белка, что снижает хрустящую корочку жареных картофельных чипсов. По мере продолжения обработки КИК наблюдалась тенденция к увеличению значения твердости, вероятно, из-за длительного времени излучения КИК, которое вызывало образование корки на поверхности ломтиков картофеля, увеличивая значение твердости [5]. Эти исследования, приведенные выше, показали значительные преимущества применения технологии КИК при жарке, включая снижение содержания масла и улучшение хрусткости, цвета и других свойств жареных продуктов. Результаты показали, что метод КИКБЛ можно рассматривать как альтернативу традиционной предварительной обработке БГВ для жареных продуктов и необходимо в дальнейшем ее промышленное использование для производства хрустящих фруктовых и овощных чипсов, предоставляя потребителям более здоровую и низкокалорийную пищу.

1.3 Инактивация микроорганизмов методом каталитического инфракрасного излучения

По причине ограниченного срока хранения фруктов и овощей происходят их значительные потери. С этой целью разработаны и широко применяются многие технологии, направленные на обеспечение качества и микробиологической стабильности плодоовощного сырья. Исследования, проведенные в течение более двух десятилетий, направлены на разработку эффективных технологий, гарантирующих не только безопасность пищевых продуктов, но и повышение их качества (улучшение внешнего вида, сохранение пищевой ценности и т. д.), увеличение срока хранения и снижение производственных затрат [43-44]. Способы обработки и консервирования подразделяют

на методы, основанные на высоких температурах, таких как, омический нагрев, радиочастотный нагрев, микроволновый нагрев и инфракрасный нагрев, а также методы, которые не являются термическими и основаны на собственных химико-физических принципах (ультрафиолетовое излучение, озонирование, высокое гидростатическое давление, ультразвук и мембранные технологии). Современные технологии стерилизации являются эффективными процессами обработки пищевых продуктов и обладают значительными преимуществами по сравнению с термической обработкой. Традиционными методами снижения микробной популяции являются высокотемпературный пар, облучение ^{60}Co , конвекционная сушка и т. д. Однако все эти методы имеют недостатки, заключающиеся в высоком энергопотреблении, низкой скорости нагрева и использования энергии, а также низком качестве конечной продукции. Кроме того, остатки влаги от пара могут повлиять на последующую сушку, а безопасность облучения ^{60}Co в настоящее время является спорным вопросом, связанным со здоровьем потребителей [19-21,45]. Обеззараживание методом КИК не получило широкого распространения из-за отсутствия всесторонних и более глубоких исследований. Существующие исследования показали, что обработка КИК способно за короткий период времени снижать микробные популяции на поверхности фруктов и овощей [46]. Это связано с тем, что испускаемое КИК излучение может повреждать ДНК, РНК, рибосомы, клеточные мембраны, белки и другие вещества микробных клеток, тем самым уменьшая их популяцию. Кроме того, технология КИК обеспечивает высокую эффективность обработки при минимальном воздействии на внутреннюю структуру фруктов и овощей, обеспечивая высокое качество продукции. Эта технология, применяемая для уничтожения микробов, не только снижает энергопотребления, но также сокращает время обработки и количество отходов [19, 20, 46]. КИК-излучение может эффективно и за короткое время эффективно уменьшить количество бактерий на поверхности фруктов и овощей. Zhang и соавторы провели исследование снижения микробиологической обсемененности методом КИК на обезвоженном шпинате с влажностью 10–30% [21]. Авторы установили, что логарифмическое количество остаточных бактерий снизилось на 0,42–1,00 log КОЕ/г после воздействия КИК. Они также показали, что исходные образцы шпината имели количество *E. coli* около 240 КОЕ/г, что достигало безопасного значения менее 100 КОЕ/г

после обработки КИК, когда расстояние от лотка для образцов до излучателя КИК составляло 21 дюйм. см, а средняя температура поверхности КИК-излучателя достигала $397,5 \pm 17,6^\circ\text{C}$. Контрольные образцы, подвергнутые выдерживанием при высокой температуре, не достигли безопасного диапазона. Кроме того, по мере увеличения влажности и времени облучения была достигнута полная инактивация микробов обработкой КИК на шпинате. Другие результаты снижения микробной нагрузки с помощью технологии КИК представлены в таблице.

Wang и соавторы установили, что уничтожение микробов путем нагревания КИК до определенной температуры и последующего выдерживания в течение некоторого времени было эффективным для сохранения питательных веществ, таких как цвет, общие сахара и фенолы, а также для сглаживания микроструктуры грибов, одновременно обеспечивая сокращение популяции *A. niger* [47]. Вероятно, потому, что температура КИК была низкой, что обеспечивало сохранение качества, в то время как высокая температура и высокая влажность в период выдержки денатурировали белки в спорах плесени, чтобы обеспечить уничтожение микробов. Дезинфицирующее действие КИК было сильнее для *A. niger* в сушеных грибах шиитакэ с более высоким исходным содержанием влаги, что может быть связано со снижением термоустойчивости микроорганизмов с увеличением активности влаги. Это согласуется с результатами, полученными Zhang и соавторов [21].

1.3.1 Влияние каталитического инфракрасного излучения на другие показатели

Помимо снижения микробной популяции, действие КИК в определенной степени способствует сохранению качественных показателей обрабатываемого сырья. Например, в исследовании зеленого сычуаньского перца уровень микробиологической обсемененности после 4 минут обработки КИК составил $2,60 \pm 0,29 \log$, что значительно ($p < 0,01$) ниже, чем при термической обработке $1,18 \pm 0,26 \log$. Кроме того, обработка КИК не вызвала значительного снижения содержания и аромата летучих масел, а цвет также не изменился [39]. Также Zhang с соавторами установили, что обработка КИК позволила инактивировать микроорганизмы и при этом сохранить содержание хлорофилла. Сохранение содержания хлорофилла варьировалось от 77,4% до 98,40% после обработки КИК в сочетании с выдержкой при 70°C в течение 60 мин, тогда как удержание хлорофилла в обезвоженном

шпинате составляло только 64,98% после 180 с БОП в сочетании с термообработкой при 70°C в течение 30 мин [21]. Обобщая результаты многочисленных исследований по инактивации микроорганизмов методом КИК, можно сделать вывод, что эта технология может стать перспективным направлением исследований, если ее комбинировать с температурной выдержкой для более эффективной инактивации микрофлоры. Следует отметить, что хотя дезинфицирующее действие метода КИК увеличивается с увеличением времени нагрева, он требует подбора оптимального времени нагрева, потому как длительное воздействие оказывает отрицательное влияние на качество сырья.

1.4 Очистка плодоовощного сырья методом каталитического инфракрасного излучения(КИК)

Очистка является важным и распространенным процессом при приготовлении продуктов на основе фруктов и овощей. При переработке томатов наиболее распространенными методами очистки являются паровая очистка (ПРВ) и щелочная очистка ЦО. Тем не менее, эти методы могут потреблять большое количество воды и энергии и оказывать негативное воздействие на окружающую среду. Например, действие высокой температуры очисткой острым паром может значительно смягчить текстуру фруктов и овощей. Щелочь вызывает коррозию и химические вещества могут оставаться на поверхности фруктов и овощей, что неблагоприятно для здоровья [22,48]. ИК, как метод очистки, способен быстро проникать в эпидермальную часть фруктов и овощей, чтобы отделить кожуру от мякоти, при этом меньше влияя на свойства мякоти фруктов за короткую продолжительность обработки, что подходит для очистки фруктов и овощей. В настоящее время ИК-излучатели в приложениях имеют разные излучатели, наиболее часто используемые эмиттеры – ЭИР и керамические ИК-излучатели. Хотя эти два излучателя используются более широко, они по-прежнему имеют ограничения в процессе очистки, связанные с высоким энергопотреблением, хрупкостью и низким уровнем безопасности [49]. По сравнению с этим, КИК можно считать альтернативой для устранения этих проблем благодаря тому, что действие КИК представляет собой процесс снятия кожи путем нагревания, при котором материал подвергается непосредственному воздействию КИК-излучения. Этот метод без использования химикатов или воды, который в последние годы вызвал большой интерес ученых способен эффективно сохранять

целостность мякоти фруктов и овощей за счет простого нагрева поверхностного слоя и практически не влияет на внешний вид и физико-химические свойства мякоти. Этот метод позволяет производителям добиться эффективной очистки от кожуры при сохранении высокого качества продукции и снижении производственных затрат [22,24]. Что касается эффективности очистки, как традиционные методы, так и метод КИК были эффективны, но в ходе исследования очистки томатов черри было установлено, что очистка КИК на расстоянии 30 см была более эффективна, чем традиционные методы очистки острым паром и щелочная очистка. Также авторы исследования установили, что эффективность очистки снижается при уменьшении расстояния до 20 см, вероятно, потому что высокая интенсивность ИК-излучения вызывала в определенной степени ожог кожуры помидоров черри. Массовое соотношение мякоти и кожицы томатов черри, очищенных ИК-облучением на расстоянии обработки 30 см в течение 3 мин, составило 7,68%, тогда как соотношение образцов, очищенных ультразвуком (УЗ), увеличилось до 26,87%. Чем ниже соотношение мякоти и кожицы фруктов, тем меньше мякоти прилипает к кожуре; иными словами, тем меньше потери качества при очистке и тем лучше целостность очищенных фруктов [24]. Текстура мякоти плода после очистки является ключевым показателем оценки качества метода очистки. Однако исследования показали, что различные методы очистки снижают текстурные свойства фруктов и овощей [24,50]. Кроме того, мякоть томатов черри, очищенная с помощью КИК, была более твердой, чем другими методами, что в основном связано с уменьшением разложения полисахаридов и давления расширения клеток из-за высокой температуры при короткой продолжительности обработки.

Заключение

Обзор научных исследований показал, что применение каталитического инфракрасного излучения (КИК) при переработке фруктов и овощей было тщательно изучено. Данный метод представляет собой энергосберегающую и экологически чистую технологию переработки, позволяющую обеспечить потребителей высококачественной плодоовощной продукцией. Помимо того, что метод КИК более энергоэффективен и экологичен, чем традиционный метод ИК, он может значительно повысить эффективность обработки, улучшить фитохимическое содержание и качество продукции, а также снизить загрязнение

окружающей среды и потери сырья. Несмотря на то, что было проведено много исследований по технологии каталитического инфракрасного излучения при переработке фруктов и овощей, остается ряд ограничений для его широкого промышленного внедрения. На сегодняшний день использование метода каталитического инфракрасного нагрева в основном в непищевых отраслях, а в промышленном производстве по переработке овощей и фруктов его использование незначительно. Применение ограничивается свойствами фруктов и овощей (такими как сорт, размер и геометрия), используемым оборудованием и условиями обработки. Также должно быть запроектировано и разработано соответствующее целевое промышленное оборудование, которое должно учитывать возможность оптимизации параметров обработки фруктов и овощей. Поэтому необходимы дальнейшие исследования для углубленного анализа технологии каталитического инфракрасного излучения и ее применения в промышленном производстве.

Список литературы

- Liu J., Zhao Y., Shi Q. Research progress and future prospects of novel pretreatment technologies for the drying of fruits and vegetables and aquatic products // *Science and Technology of Food Industry*. 2022. Vol. 43. No. 3. P. 32–42. DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2021110103.
- Rastogi N.K. Recent trends and developments in infrared heating in food processing // *Critical reviews in food science and nutrition*. 2012. Vol. 52. No. 9. P. 737–760. DOI: 10.1080/10408398.2010.508138.
- Li X., Xie X., Zhang C.-H., Zhen S., Jia, W. Role of mid-and far-infrared for improving dehydration efficiency in beef jerky drying // *Drying Technology*. 2018. Vol. 36. No. 3. P. 283–293. DOI: 10.1080/07373937.2017.1326129.
- Бурак Л.Ч. Существующие способы обработки пищевых продуктов и их влияние на пищевую ценность и химический состав // *Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК – продукты здорового питания*. 2021. № 3. С. 59–73. DOI: 10.24412/2311-6447-2021-3-59-73.
- Chang A., Zheng X., Xiao H., Yao X., Liu D., Li X., Li Y. Short- and medium-wave infrared drying of cantaloupe (*Cucumis melon L.*) slices: Drying kinetics and process parameter optimization // *Processes*. 2022. Vol. 10. No. 1. P. 114. DOI: 10.3390/pr10010114.
- Sotome I., Takenaka M., Koseki S., Ogasawara Y., Nardachi Y., Okadome H., Isobe S. Blanching of potato with superheated steam and hot water spray // *LWT – Food Science and Technology*. 2009. Vol. 42. No. 4. P. 1035–1040. DOI: 10.1016/j.lwt.2009.02.001.
- Ma H., Chen W. Research status and prospect of emerging physical sterilization technology of solid food based on electromagnetic wave and plasma // *Journal of Food Science and Technology*. 2023. Vol. 41. No. 2. P. 1–15. DOI: 10.12301/spxb202300403.
- Page M.J., Moher D., Bossuyt P.M., Boutron I., Hoffmann T.C., Mulrow C.D., Shamseer L., Tetzlaff J.M., Akl E.A., Brennan S.E., Chou R., Glanville J., Grimshaw J.M., Hróbjartsson A., Lalu M.M., Li T., Loder E.W., Mayo-Wilson E., McDonald S., McGuinness L.A., Stewart L.A., Thomas J., Tricco A.C., Welch V.A., Whiting P., McKenzie J.E. PRISMA 2020 explanation and elaboration: updated guidance and exemplars for reporting systematic reviews // *BMJ*. 2021. Vol. 372. No. 160. DOI: 10.1136/bmj.n160.
- Page M.J., McKenzie J.E., Bossuyt P.M., Boutron I., Hoffmann T.C., Mulrow C.D., Shamseer L., Tetzlaff J.M., Akl E.A., Brennan S.E., Chou R., Glanville J., Grimshaw J.M., Hróbjartsson A., Lalu M.M., Li T., Loder E.W., Mayo-Wilson E., McDonald S., McGuinness L.A., Stewart L.A., Thomas J., Tricco A.C., Welch V.A., Whiting P., Moher D. The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. // *BMJ*. 2021. Vol. 372. No. 71. DOI: 10.1136/bmj.n71.
- Song X., Yu X., Zhou C., Xu B., Chen L., Elgasim A., Yagoub A., Emeka O. C., Wahia H. Conveyor belt catalytic infrared as a novel apparatus for blanching processing applied to sweet potatoes in the industrial scale // *Food Science and Technology*. 2021. Vol. 149. No. 8. P. 111827. DOI: 10.1016/j.lwt.2021.111827.
- Chen J., Venkatasamy C., Shen Q., Mchugh T.H., Zhang R., Pan Z. Development of healthy crispy carrot snacks using sequential infrared blanching and hot air drying method // *LWT – Food Science and Technology*. 2018. Vol. 97. No. 6. P. 469–475. DOI: 10.1016/j.lwt.2018.07.026.
- Wu B., Xiao M., Liu M., Pan Z., Ma H. Fixation and drying of green tea using sequential catalytic infrared heating and hot air drying // *Food Science*. 2017. Vol. 38. No. 9. P. 126–132. DOI: 10.7506/spkx1002-6630-201709020.
- Pekke M.A., Pan Z., Atungulu G.G., Smith G., Thompson J.F. Drying characteristics and quality of bananas under infrared radiation heating. // *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2013. Vol. 6. No. 3. P. 58–70. DOI: 10.3965/j.ijabe.20130603.008.
- Wu B., Guo Y., Wang J., Pan Z., Ma H. Effect of thickness on non-fried potato chips subjected to infrared radiation blanching and drying // *Journal of Food Engineering*. 2018. Vol. 237. No. 11. P. 249–255. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2018.05.030.
- Bingol G., Zhang A., Pan Z., Mchugh T.H. Producing lower-calorie deep fat fried French fries using infrared dry-blanching as pretreatment // *Food Chemistry*. 2012. Vol. 132. No. 2. P. 686–692. DOI: 10.1016/j.foodchem.2011.10.055.
- Bingol G., Wang B., Zhang A., Pan Z., Mchugh T.H. Comparison of water and infrared blanching methods for processing performance and final product quality of French fries // *Journal of Food Engineering*. 2014. Vol. 121. No. 5. P. 135–142. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2013.08.001.
- Wu B., Wang J., Guo Y., Pan Z., Ma H. Effects of infrared blanching and dehydrating pretreatment on oil content of fried potato chips // *Journal of Food Processing and Preservation*. 2018. Vol. 42. No. 3. P. e13531. DOI: 10.1111/jfpp.13531.
- Brandl M.T., Pan Z., Huynh S., Zhu Y., Mchugh T.H. Reduction of *Salmonella enteritidis* population sizes on almond kernels with infrared heat // *Journal of Food Protection*. 2020. Vol. 71. No. 5. P. 897–902. DOI: 10.4315/0362-028X-71.5.897.
- Fu R., Wang H., Zhang A. Effect of catalytic infrared radiation on pasteurization of grape seeds // *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*. 2019. Vol. 19. No. 10. P. 150–156. DOI: 10.16429/j.1009-7848.2019.10.018.
- Li T., Qu W., Wu B., Wang B., Ma H., Pan Z., Jiang, Q. Effect of combined drum catalytic infrared with holding treatment for disinfection and quality of rewetted-dried shiitake mushrooms // *Food and Machinery*. 2021. Vol. 37. No. 7. P. 120–128. DOI: 10.13652/j.issn.1003-5788.2021.07.020.
- Zhang X., Qu W., Ma H., Pan Z., Wu B. Effectiveness of catalytic infrared radiation in the sterilization of dehydrated spinach // *Food Science*. 2018. Vol. 34. No. 23. P. 133–137. DOI: 10.7506/spkx1002-6630-201323028.
- Qu W., Liu Y., Feng Y., Ma H. Research on tomato peeling using flame-catalytic infrared radiation // *Food Science and Technology*. 2022. Vol. 163. No. 3. P.113542. DOI: 10.1016/j.lwt.2022.113542.
- Li X., Pan Z., Atungulu G.G., Zheng X., Wood D., Delwiche M., Mchugh T.H. Peeling of tomatoes using novel infrared radiation heating technology // *Innovative Food Science and*

- Emerging Technologies. 2014. Vol. 21. No. 8. P. 123–130. DOI: 10.1016/j.ifset.2013.10.011.
24. Xu B., Zhou T., Wei B., Ren X., Wu B., Zhou C., Ma H. Catalytic infrared radiation improving peeling effect and quality of cherry tomatoes // *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*. 2018. Vol. 34. No. 22. P. 299–305. DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.2018.24.036.
25. Qu W., Fan W., Zhu Y., Ma H., Shi J., Pan Z. Nutritive quality of walnut dried by variable temperature drum catalytic infrared-hot air // *Science and Technology of Food Industry*. 2021. Vol. 42. No. 1. P. 205–215. DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2021040298.
26. Venkatasamy C., Zhu C., Brandl M.T., Niederholzer J.A., Zhang R., Mchugh T.H., Pan Z. Feasibility of using sequential infrared and hot air for almond drying and inactivation of *Enterococcus faecium* NRRL B-2354 // *Food Science and Technology*. 2018. Vol. 95. No. 8. P. 123–128. DOI: 10.1016/j.lwt.2018.04.095.
27. Venkatasamy C., Brandl M.T., Wang B., Mchugh T.H., Zhang R., Pan Z. Drying and decontamination of raw pistachios with sequential infrared drying, tempering and hot air drying // *International Journal of Food Microbiology*. 2017. Vol. 246. No. 4. P. 85–91. DOI: 10.1016/j.ijfoodmicro.2017.02.005.
28. Pan Z., Shih C., Mchugh T.H., Hirschberg E. Study of banana dehydration using sequential infrared radiation heating and freeze-drying // *LWT—Food Science and Technology*. 2008. Vol. 41. No. 10. P. 1944–1951. DOI: 10.1016/j.lwt.2008.01.019.
29. Shih C., Pan Z., Mchugh T., Wood D., Hirschberg E. Sequential infrared radiation and freeze-drying method for producing crispy strawberries // *Transactions of the ASABE*. 2008. Vol. 51. No. 1. P. 205–216. DOI: 10.13031/2013.24205.
30. Guo Y., Wu B., Lu D., Pan Z., Ma H. Tri-frequency ultrasound as pretreatment to infrared drying of carrots: Impact on enzyme inactivation, color changes, nutrition quality parameters and microstructures // *International Journal of Food Engineering*. 2021. Vol. 17. No. 4. P. 275–284. DOI: 10.1515/ijfe-2020-0223.
31. Pan Z., Atungulu G.G. The potential of novel infrared food processing technologies: case studies of those developed at the USDA-ARS Western Region Research Center and the University of California-Davis // *Case Studies in Novel Food Processing Technologies*. 2010. Vol. 14. P. 139–208. DOI: 10.1016/B978-1-84569-551-4.50007-1.
32. Zhu Y. Processing and quality characteristics of apple slices under simultaneous infrared dry-blanching and dehydration with continuous heating // *Journal of Food Engineering*. 2009. Vol. 90. No. 6. P. 441–452. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2008.07.015.
33. Ahmad T., Butt M.Z., Aadil R.M., Inam-Ur-Raheem M., Abdullah Bekhit A.E.-D., Guimarães J.T., Balthazar C.F., Rocha R.S., Esmerino E.A., Freitas M.Q., Silva M.C., Sameen A., Cruz A.G. Impact of nonthermal processing on different milk enzymes // *International Journal of Dairy Technology*. 2019. Vol. 72. No. 4. P. 481–495. DOI: 10.1111/1471-0307.12622.
34. Manzoor M.F., Zeng X.A., Ahmad N., Ahmed Z., Rehman A., Aadil R.M., Roobab U., Siddique R., Rahaman A. Effect of pulsed electric field and thermal treatments on the bioactive compounds, enzymes, microbial, and physical stability of almond milk during storage // *Journal of Food Processing and Preservation*. 2020. Vol. 44. No. 7. P. e14541. DOI: 10.1111/jfpp.14541.
35. Roobab U., Abida A., Afzal R., Madni G.M., Zeng X.A., Rahaman A., Aadil R.M. Impact of high-pressure treatments on enzyme activity of fruit-based beverages: An overview // *International Journal of Food Science and Technology*. 2022. Vol. 57. No. 2. P. 801–815. DOI: 10.1111/ijfs.15492.
36. Deng L.Z., Mujumdar A.S., Zhang Q., Yang X.H., Wang J., Zheng Z.A., Gao Z.J., Xiao H.W. Chemical and physical pretreatments of fruits and vegetables: Effects on drying characteristics and quality attributes—A comprehensive review // *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2019. Vol. 59. No. 9. P. 1408–1432. DOI: 10.1080/10408398.2017.1409192.
37. Zhang D., Ma X., Wu B., Wang M., Han F. Effect of hot air drying of taros based on infrared fixation technology // *Journal of University of Arts and Science (Natural Sciences)*. 2022. Vol. 36. No. 9. DOI: 10.13804/j.cnki.2095-6991.2022.02.020.
38. Wu B., Guo X., Guo Y., Ma H., Zhou C. Enhancing jackfruit infrared drying by combining ultrasound treatments: Effect on drying characteristics, quality properties and microstructure // *Food Chemistry*. 2021. Vol. 358. No. 2. P. 129845. DOI: 10.1016/j.foodchem.2021.129845.
39. Xia G., Li Y., Tao H., Zhang L., Zhang J. Inactivation mechanism of catalytic infrared against *Pseudomonas aeruginosa* and its decontamination application on dry green Sichuan pepper (*Zanthoxylum schinifolium*) // *Food Control*. 2021. Vol. 132. No. 3. P. 108483. DOI: 10.1016/j.foodcont.2021.108483.
40. Guo Y., Wu B., Guo X., Liu D., Qiu C., Ma H. Effect of thermosonication on texture degradation of carrot tissue in relation to alterations in cell membrane and cell wall structure // *Food Chemistry*. 2022. Vol. 393. No. 6. P. 133335. DOI: 10.1016/j.foodchem.2022.133335.
41. Su Y., Zhang M., Zhang W., Adhikari B., Yang Z. Application of novel microwave-assisted vacuum frying to reduce the oil uptake and improve the quality of potato chips // *LWT—Food Science and Technology*. 2016. Vol. 73. No. 5. P. 490–497. DOI: 10.1016/j.lwt.2016.06.047.
42. Pedreschi F., Moyano P. Oil uptake and texture development in fried potato slices // *Journal of Food Engineering*. 2005. Vol. 70. No. 7. P. 557–563. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2004.10.010.
43. Бурак Л.Ч. Использование современных технологий обработки для увеличения срока хранения фруктов и овощей. Обзор предметного поля // *Ползуновский вестник*. 2024. № 1. С. 99–119. DOI: 10.25712/ASTU.2072-8921.2024.01.013.
44. 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: 10.21323/2618-9771-2024-7-1-59-70.
45. Бурак Л.Ч. Современные методы обработки пищевых продуктов. Критический обзор // *The Scientific Heritage*. 2024. № 130. С. 45–59. DOI: 10.5281/zenodo.10632041.
46. Aboud S.A., Altemimi A.B., Al-Hilphy A., Yi-Chen L., Cacciola F. A Comprehensive Review on Infrared Heating Applications in Food Processing // *Molecules*. 2019. Vol. 24. No. 8. P. 4125. DOI: 10.3390/molecules24224125.
47. Wang Y., Li T., Pan Z., Ye X., Ma H. Effectiveness of combined catalytic infrared radiation and holding time for decontamination *Aspergillus niger* on dried shiitake mushrooms (*Lentinus edodes*) with different moisture contents // *LWT—Food Science and Technology*. 2023. Vol. 176. No. 11. P. 114503. DOI: 10.1016/j.lwt.2023.114503.
48. Wang B., Venkatasamy C., Zhang F., Zhao L., Khir R., Pan Z. Feasibility of jujube peeling using novel infrared radiation heating technology // *LWT—Food Science and Technology*. 2016. Vol. 69. No. 4. P. 458–467. DOI: 10.1016/j.lwt.2016.01.077.
49. Vidyarthi S.K., El Mashad H.M., Khir R., Zhang R., Tiwari R., Pan Z. Evaluation of selected electric infrared emitters for tomato peeling // *Biosystems Engineering*. 2019. Vol. 184. No. 11. P. 90–100. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2019.06.006.
50. Xu P., Zhang Z., Peng X., Yang J., Li X., Yuan T., Jia X., Liu Y., Abdullaev O., Jenis J. Study on vacuum drying kinetics and processing of the *Lonicera japonica* Thunb. aqueous extracts // *LWT—Food Science and Technology*. 2022. Vol. 167. No. 8. P. 113868. DOI: 10.1016/j.lwt.2022.113868.