

НАУЧНЫЙ ОБЗОР

УДК 664.8.036.522

**НЕТЕРМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ КОНСЕРВИРОВАНИЯ
ФРУКТОВЫХ СОКОВ**

Бурак Л.Ч.

ООО «Белросаква», Минск, e-mail: leonidburak@gmail.com

Ежегодное увеличение потребительского спроса на свежие, минимально обработанные пищевые продукты способствует поиску новых методов и технологий, обеспечивающих максимальное сохранение пищевой ценности продуктов и их безопасность. Традиционные методы обработки, такие как нагревание, сушка и замораживание, связаны с потерей питательных веществ и высокой энергоемкостью процесса. Фруктовые соки – это продукты, способствующие укреплению иммунитета за счет содержания в своем составе биологически активных веществ, обладающие функциональной и физиологической пользой для здоровья. Организация процесса переработки сырья и получение фруктовых соков с минимальной потерей пищевой ценности является одной из важнейших задач предприятий пищевой промышленности. В связи с этим используемые методы и технологии обработки должны соответствовать глобальным целям получения продукции высокого качества. Решение данных задач способствует созданию и применению инновационных методов минимальной технологической обработки сырья в процессе производства и хранения. Эти технологии направлены на максимальное сохранение биологически активных веществ и пищевой ценности, при одновременном уничтожении патогенных микроорганизмов и дезактивации ферментативной активности, тем самым увеличивая срок годности фруктовых соков. Цель данного обзора – анализ избранных инновационных технологий нетермической обработки по результатам опубликованных исследований, характеристика их эффективности в обеспечении качества фруктовых соков и срока годности, аспекты устойчивости технологий, новые тенденции, существующие возможности и ограничения в применении.

Ключевые слова: фруктовые соки, обработка, качество, термические методы, нетермические технологии, ультразвук, высокое давление, импульсный свет, озон, микробиологическая обсемененность

NON-THERMAL METHODS FOR FRUIT JUICE PRESERVATION

Burak L.Ch.

LLC Belrosakva, Minsk, e-mail: leonidburak@gmail.com

The annual increase in consumer demand for fresh, minimally processed food products contributes to the search for new methods and technologies that ensure the maximum preservation of the nutritional value of products and their safety. Traditional processing methods such as heating, drying and freezing are associated with nutrient loss and high energy intensity of the process. Fruit juices are products that help strengthen the immune system, due to the content of biologically active substances in their composition, which have functional and physiological health benefits. Organization of the processing of raw materials and obtaining fruit juices with minimal loss of nutritional value is one of the most important tasks of food industry enterprises. In this regard, the processing methods and technologies used must comply with the global goals of obtaining high quality products. The solution of these problems contributes to the creation and application of innovative methods of minimal technological processing of raw materials during production and storage. These technologies are aimed at maximizing the preservation of biologically active substances and nutritional value, while simultaneously destroying pathogenic microorganisms and deactivating enzymatic activity, thereby increasing the shelf life of fruit juices. The purpose of this review is to analyze selected innovative non-thermal processing technologies based on the results of published studies, characterize their effectiveness in ensuring fruit juice quality and shelf life, aspects of technology sustainability, new trends, existing opportunities and limitations in application.

Keywords: fruit juices, processing, quality, thermal methods, non-thermal technologies, ultrasound, high pressure, pulsed light, ozone, microbiological contamination

Благодаря широкой осведомленности потребителей о влиянии продуктов питания и образа жизни на здоровье спрос на здоровую и питательную пищу значительно возрос. Фруктовые соки обладают высокой пищевой ценностью, так как богаты биологически активными соединениями, антиоксидантами, фенольными соединениями, антоцианами, каротиноидами и многими другими веществами. Следует отметить, что пандемия COVID-19 способствовала увеличению спроса потребителей на продукты, повышающие иммунитет, в том числе и на такие, как фруктовые соки. Объем

мирового рынка фруктовых соков составляет 48,6 млрд л, и прогнозируется, что в течение 2021–2026 гг. рынок будет увеличиваться в среднем на 2,1% [1]. Более того, фруктовые соки подходят потребителям всех возрастных групп, не содержат аллергенов, лактозы, холестерина и могут употребляться потребителями-вегетарианцами. Однако фруктовые соки по своей природе являются скоропортящимися, так как содержат большое количество влаги и питательных веществ [2, 3]. Таким образом, обработка фруктовых соков является важным аспектом производства соков, так

как от этого зависит качество и стабильность готового продукта при хранении. Методы обработки направлены на сохранение фруктового сока путем воздействия на объекты порчи, в число которых входят не только микробы, но и ферменты. Наиболее часто используемым методом обработки является обычная термическая обработка. Хотя консервирование и обработка термическими методами, такими как пастеризация, стерилизация и асептическая упаковка, эффективны для инактивации микроорганизмов и ферментов, вызывающих порчу, в то же время они влияют на внешний вид и органолептические показатели продукта. Несмотря на эффективность снижения микробной нагрузки и ферментативной активности, термическая обработка приводит к ухудшению качества фруктового сока с точки зрения питательных, функциональных, физико-химических и органолептических свойств [4]. Кроме того, потребители отдают свое предпочтение минимально обработанным пищевым продуктам, качество которых остается стабильным в процессе хранения. Поэтому для удовлетворения текущих потребностей покупателя появилось множество новых нетермических технологий обработки фруктовых соков. Данные нетрадиционные технологии обработки являются модификациями термической обработки, первые из которых также известны как методы минимальной обработки, которые сохраняют общее качество пищи, то есть сохраняют питательные и органолептические характеристики, снижают микробную нагрузку и ферментативную активность, тем самым улучшая сохранность фруктовых соков, что приводит к увеличению срока их хранения. За последнее десятилетие количество исследований, касающихся новых нетермических методов обработки фруктовых соков заметно увеличилось [5, 6]. Новые методы обработки в сравнении с традиционными технологиями имеют ряд преимуществ, таких как более короткое время воздействия, лучшая скорость массопереноса, лучшая функциональность продукта, более длительный срок хранения продукта и т.д., что в целом приводит к улучшению сохранности фруктовых соков [7, 8]. Наряду с обеспечением высокого качества продукции, имеющим первостепенное значение, немаловажным аспектом, который следует учитывать, является устойчивость используемой технологии обработки. Общеизвестно, что традиционные методы обработки, широко применяемые в пищевой промышленности, энергоемки,

так как требуют немалого количества ресурсов, что вызывает острую потребность в альтернативах, которые являются сравнительно более устойчивыми и безопасными для окружающей среды. Новые нетермические методы включают в себя технологические методы и механизмы, которые снижают время обработки фруктовых соков; в свою очередь, они могут иметь меньшее воздействие на окружающую среду, например снижение потребления энергии и других ресурсов, таких как вода, сокращение отходов производства и т.д. Таким образом, инновационные технологии обработки играют значимую роль в обеспечении экологической устойчивости, а также в повышении качества и безопасности пищевых продуктов, благодаря их эффективности для сохранения обработанных фруктовых соков. Цель данного обзора – анализ избранных инновационных технологий нетермической обработки по результатам опубликованных исследований, характеристика их эффективности в обеспечении качества фруктовых соков и срока годности, аспекты устойчивости технологий, новые тенденции, существующие возможности и ограничения в применении.

1. Нетермические технологии переработки фруктовых соков

В последнее десятилетие разработаны и получили применение различные инновационные нетепловые технологии, которые доказали свою эффективность по обеспечению качества и сохранению фруктовых соков, не снижая пищевой ценности готового продукта, не оказывая существенного влияния на органолептические и физико-химические показатели. Данные технологии вызывают микроструктурные изменения как в растительных тканях, так и в готовом соке, повышая экстракционную способность каротиноидов, фенольных соединений, витаминов и минералов, извлекаемость и/или биодоступность, что необходимо для их воздействия. Кроме того, эти технологии отвечают требованиям покупателя употреблять минимально обработанные или свежие фруктовые соки. Такие инновационные технологии обработки включают, среди прочего, обработку ультразвуком (US), обработку высоким давлением (HP), обработку импульсным светом (PL), обработку импульсным электрическим полем (PEF) и обработку озоном. Эффективность применения данных методов изучалась многими авторами в процессе обработки различных фруктовых соков, некоторые результаты обобщены в таблице.

Применение технологий нетермической обработки для фруктовых соков

Применяемая технология	Продукт	Условия обработки	Результат обработки, источник
Ультразвук (US)	Клубничный сок	40 кГц, 180 Вт, 15 и 30 мин. Срок хранения (14 дней, 5 °С)	Повышение пищевой ценности, снижение микробиологической обсеменённости (уменьшение нативной микрофлоры на 1 log КОЕ мл ⁻¹) и сохранение органолептических и физико-химических свойств [9]
Ультразвук (US)	Айвовый сок	20 кГц, 400 Вт, 20 мин	Активность РРО снижена до 35 % [10]
Ультразвук (US)	Сок из дыни	376 Вт см ⁻² , 10 мин. Срок хранения (42 дня, 4 °С)	Снижена активность ферментов (POD 23,29%, РРО 70,48%) и улучшена устойчивость к помутнению; восстановленные фенольные соединения (30%) [11]
Обработка ультразвуком	Сливовый сок	400 Вт, 40 кГц, 40–60 °С в течение 5–30 мин	Повышенная функциональность (аскорбиновая кислота увеличилась на 11,40–18,55%, общее содержание фенолов увеличилось на 17,98–18,35%, каротиноидов увеличилось на 2,19–4,30%, флавоноидов увеличилось на 10–16%, антиоксидантная активность увеличилась на 32,52–48,5%). Микробиологическая стабильность при термозвуковой обработке 60 °С [12]
Обработка высоким давлением (НР)	Морковно-апельсиновый сок	200–400 МПа, 5 мин	Снижение <i>L. innocua</i> более чем на 5 log [13]
Обработка высоким давлением (НР)	Виноградный сок	319–531 МПа, 35–205 с, 5 °С	Снижение микробного количества (<i>S. enterica</i> , <i>L. monocytogenes</i> , <i>E. coli</i> 0157:H7) более 5 15-логарифмических значений достигается при умеренном давлении (~ 400 МПа) и коротком времени выдержки (~ 2 мин) [14]
Обработка высоким давлением (НРР)	Неосветленный яблочный сок	200–600 МПа, 5–45 °С, 1–15 мин. Срок хранения (84 дня, 4 °С)	Снижение активности ферментов (РРО < 1% и POD 33%) Повышенная стабильность цвета, но сниженное общее содержание фенолов [15]
НРР	Сок асаи	400–600 МПа, 20 °С, 5 мин	Сохранение антоцианов (40%) и других биоактивных соединений [16]
НРР	Сок манго	200–600 МПа, 15 мин	Органолептические качества сока, обработанного НРР, были ниже, чем у свежего сока, но выше, чем у сока, прошедшего термическую обработку; спирты (68,39%) и альдегиды (29,21%) сохраняем [17]
PLP	Ананасовый сок	1,8–2,4 кВ, 47–187 импульсов	5-логарифмическое уменьшение количества микробов (аэробных мезофилов, дрожжей, плесени) при 94 импульсах; инактивация ферментами POD (42%) и РРО (50%) наблюдалась при 187 импульсах [18]
PLP	Яблочные соки (два вида), апельсиновый сок, виноградный сок, минеральная вода, изотоническая вода, сливовый сок, молоко, кофе и газированные напитки	30 кВ, 3000 импульсов, 200 мс, 0,97–29,21 Дж см ⁻² плотность потока	Снижение содержания микробов (<i>P. aeruginosa</i>) в минеральной воде, изотонической воде, яблочном соке, сливовом соке и газированных напитках на 7 log [19]
PLP	Апельсиновый сок, кокосовый сок, ананасовый сок	3 импульса/с, 0–15 с, 0,18–5,6 Вт см ⁻² плотность потока	4–5 логарифмических микробных (<i>E. coli</i> MTCC 433) уменьшение при максимальной плотности потока [20]

Окончание табл.

Применяемая технология	Продукт	Условия обработки	Результат обработки, источник
PLP (NILP)+PEF	Яблочный сок	NILP: 360 μ s, 3 Гц PEF: 24 и 34 кВ см ⁻¹ , 89 импульсов, 89 μ s	PEF с последующим NILP привел к уменьшению количества микробов (<i>E. coli</i> K12) на $\geq 6,42$ логарифмических цикла [21]
PEF	Апельсиновый сок	Биполярные импульсы, 25 мкс, 30 л ч ⁻¹ , 20 кВ см ⁻¹	<i>E. coli</i> была уменьшена на 5,6 десятичного знака, а <i>S. cerevisiae</i> была полностью инактивирована [22]
	Яблочный сок	Импульсы прямоугольной формы, 3–8 мкс, 15–35 кВ/см	Предварительный нагрев сока и PEF (60 °C) приводит к полной дезактивации ферментов (POD PPO) [23]
MPEF	Черничный сок	7 мл мин ⁻¹ , прямоугольные импульсы, 0,15 мс, 350 В	Полная микробная инактивация, сохранение биоактивных соединений [24]
PEF	Виноградный сок	80 мл мин ⁻¹ , 1 кГц, 600 мкс, 0–25 кВ см ⁻¹	Уменьшение количества микробов и сохранение функциональных, питательных и физико-химических качеств при максимальной напряженности электрического поля [25]
PEF	Апельсиновый сок	60 мл мин ⁻¹ , прямоугольные импульсы, 4 мкс, 35 кВ см ⁻¹ , 200 Гц	Сохранение биологически активных соединений (90,8% витамина С, 37,6% антиоксидантной способности) [25]
Озон (OZ)	Сок из дыни	7,7 \pm 2,4 г л ⁻¹ , 10 мин	Микробное (<i>L. innocua</i>) снижение ($> 5 \log_{10}$) и сохранение биологически активных соединений (витамин С 68%, фенольные соединения) и физико-химических свойств [26]
OZ	Сок из дыни	7,0 \pm 2,4 г л ⁻¹ , 60 мин	Микробное (<i>A. acidoterrestis</i>) восстановление (2,22 \pm 0,04 логарифмических цикла); повышено содержание фенолов (69%), но снижено содержание каротиноидов (83%), витамина С (76%) и антиоксидантной активности (52%) [26]
OZ	Яблочный сок	12 мг л ⁻¹ , 30 мин	Снижение содержания патулина (75,36%), а также фенольных соединений и органических кислот [27]
OZ	Персиковый сок	0,06–2,48 г л ⁻¹ , 20 \pm 1 °C, 0,3–12 мин	Пониженная вязкость и незначительные или незначительные физико-химические изменения (рН, °Brix, титруемая кислотность, цвет, индекс потемнения) [28]
OZ	Клубничный сок	7,8% мас./мас., 10 мин	Разложение цвета, антоцианы (98,2%) и аскорбиновая кислота (85,8%) [29]
US	Клубничный сок	0,29 Вт/мл · 55°C, 3 мин	Увеличенный срок хранения сока до 42 дней [30]
HPP		300 МПа, 1 мин	Увеличенный срок хранения сока до 42 дней; лучшее удержание фитохимических веществ; повышенное содержание антоцианов (15%) [31]
PEF		35 кВ см ⁻¹ , 27 мкс	Увеличенный срок хранения сока до 28 дней; повышенное содержание антоцианов (17%) [32]

Обозначения: NILP – световые импульсы высокой интенсивности; HPP – обработка высоким давлением; MPEF – микроцип-импульсное электрическое поле; OZ – озонирование; PEF – импульсное электрическое поле; PLP – импульсный свет; US – ультразвук.

1.1. Обработка ультразвуком

Ультразвук – это звуковые волны, которые превышают слышимый звуковой диапазон в 20 кГц. Возникновение сжатия и разрежения происходит, когда ультразвук движется или распространяется через среду, что, в свою очередь, генерирует большое количество электричества и вызывает увеличение скорости массопереноса. Ультразвуковые волны высокой интенсивности и низкой частоты оказывают разрушительное действие на микроорганизмы и вызывают различные положительные изменения в составе пищевых продуктов. Частоты такого ультразвука колеблются от 20 до 100 кГц с диапазоном мощностей 110–1000 Вт/см². Уникальная характеристика ультразвука высокой интенсивности заключается в том, что он вызывает акустическую кавитацию, вызывающую подъем и опускание пузырьков, что приводит к образованию высокой энергии. Ультразвук производится электрическими импульсами, которые преобразуются в звуковую энергию необходимой частоты и интенсивности [33].

Свежие фрукты подвержены ускоренной порче, и сохранение их качества для предприятий пищевой промышленности является очень сложной задачей. Ферменты и патогенные микроорганизмы, присутствующие во фруктовых соках, должны быть дезактивированы во время обработки, чтобы предотвратить порчу. Ультразвук применяется для обработки сока, поскольку его эффекты сдвига и сжатия приводят к денатурации белка с последующим снижением активности ферментов, тем самым предотвращая ферментативную порчу. Кроме того, силы сдвига и быстро меняющиеся давления, создаваемые ультразвуковыми волнами, приводят к кавитации, которая в значительной степени снижает микробиологическую обсемененность фруктовых соков. Ультразвук оказывает действие на клеточную мембрану микробов, вызывая истончение мембраны, а также термическую инактивацию из-за локального нагрева за счет кавитации. Установлено, что ультразвук при 376 Вт см⁻² в течение 10 мин значительно снижает активность ферментов РОД (23,29%) и РРО (70,48%) в соке дыни [11], в то время как ультразвук при 400 Вт в течение 20 мин предотвратил ферментативное потемнение сока айвы на 35%, которое вызывает из-за ПФО [10]. В связи с растущим спросом на функциональные продукты, такие как напитки с пробиотиками и пребиотиками, ультразвук является многообещающей технологией, которую можно использовать для повышения качества фруктовых соков. Ультразвуковая

обработка богатого пребиотиками клубничного сока мощностью 180 Вт в течение 30 мин увеличивает срок годности еще на 4 дня при 10-дневном хранении за счет снижения нативной микрофлоры до 1 log КОЕ мл⁻¹ на 14-й день, в то время как содержание фенолов увеличилось на 25% в течение периода хранения [9]. Однако из-за низкой летальности ультразвука различные микроорганизмы, особенно микробные споры, могут выдерживать ультразвуковое воздействие. Поэтому для достижения более высокой микробной летальности ультразвук регулярно сочетают с давлением, теплом или тем и другим одновременно. Например, термообработка ультразвуком, сочетание обработки ультразвуком с теплом может синергетически улучшить сохранность фруктовых соков, сократив время обработки и сохранив общее качество обработанного сока. Действие термозвука при 400 Вт и 60 °С на сок сливы привело к повышенному снижению количества микробов, так как не было обнаружено бактерий, плесени и дрожжей [12], хотя при более высокой температуре обработки могут происходить потери фитохимических веществ. Обработка фруктовых соков ультразвуком предполагает повышение их качества, а также увеличение срока годности за счет уменьшения количества микроорганизмов, вызывающих порчу. Например, воздействие ультразвука приводит к увеличению общей антиоксидантной способности грейпфрутового сока, аскорбиновой кислоты, флавоноидов и флавонолов, а также общего количества фенолов. Кроме того, в результате действия ультразвука на яблочный сок происходит повышение общего содержания каротиноидов, вязкости, минералов, таких как Na, K и Ca, а также концентрации сахара и полифенольных соединений после обработки в течение 60 мин при 20 °С [34]. Точно так же для соков апельсина, лимона и лайма, моркови и шпината стерилизация ультразвуком позволила сохранить большую часть питательных веществ по сравнению с классической термической пастеризацией [35]. Исследователи установили значительное снижение цветности, а также пожелтение всех образцов сока, обработанных ультразвуком.

Таким образом, ультразвук представляет собой новую нетермическую технологию, которая имеет большой потенциал использования с минимальной обработкой в производстве фруктовых соков.

1.2. Обработка под высоким давлением

Обработка под высоким давлением (НРР) (также называемая высоким давлением (НР), высоким гидростатическим

давлением (ННР) или сверхвысоким давлением (УНР)) представляет собой новую и перспективную технологию нетермической пастеризации, использование которой неуклонно возрастает в пищевой промышленности с начала XXI в. Обработка под высоким давлением (ННР), или паскализация, – это один из быстро развивающихся методов обработки, используемых в технологическом процессе производства фруктовых соков, который основан на действии высокого давления в диапазоне от 100 до 1000 МПа на образец пищевого продукта [36]. Во время ННР водородные связи во фруктовых соках разрушаются, а ковалентные связи не затрагиваются, поскольку ННР – это нетермическая технология. Это указывает на то, что витамины не подвержены влиянию высокого давления и, таким образом, остаются нетронутыми, сохраняя питательные качества фруктовых соков. ННР вызывает чрезмерное давление на клеточные стенки микробов и таким образом приводит к необратимому повреждению микробной клетки, что приводит к снижению микробиологической обсемененности во фруктовых соках. Высокое давление также предотвращает ферментативную порчу, поскольку вызывает денатурацию ферментов. Одним из основных преимуществ ННР является его способность равномерно обрабатывать пищевую матрицу, что часто может быть проблематичным при проведении термической обработки. Несмотря на то, что существует различная чувствительность микробов к действию ННР, результаты показали, что в любом случае происходит снижение жизнеспособности микроорганизмов. Прокариоты более устойчивы к действию высокого давления по сравнению с эукариотами, в то время как эндоспоры более устойчивы и могут выдерживать чрезвычайно высокое давление до 1000 МПа [37].

ННР – это новая технология с огромным потенциалом в обеспечении стабильности фруктовых соков и напитков. Промышленные условия обработки технологией высокого давления – 600 МПа в течение 3 мин. Данная технология высокоэффективна для уничтожения патогенных микроорганизмов во фруктовых соках. Установлено, что ННР в значительной степени приводит к уменьшению количества патогенных микроорганизмов более чем на 5 логарифмических единиц, а именно *E. coli* 0157:H7, *S. enterica* и *L. monocytogenes*, в виноградном соке при умеренном давлении 400 МПа [13]. Кроме того, действие ННР 600 МПа при 20 °С в течение 5 мин показало повышенную способность дезактивировать ферменты 1,8 % РРО и 58 % РОД в неосветленных яблочных

соках, сохраняя при этом фитохимические вещества, присутствующие в соке [16]. Кроме того, ННР при 500 МПа в течение 5 мин не оказывала влияния на биоактивные соединения в соке асаи, поскольку сохранялось 40 % антоцианов по сравнению с термической пастеризацией при 85 °С в течение 1 мин [15], тогда как действие ННР в течение 15 мин способствовало сохранению ароматоактивных соединений, в основном спиртов (68,39 %) и альдегидов (29,21 %), в соке манго [17]. Кроме того, недавнее проведенное исследование, по оценке применения технологии ННР для купажированного морковно-апельсинового сока, проведенное учеными Pokhrel *et al.* показало результат снижения микробной нагрузки примерно на 5 логарифмических единиц *L. inptosia* при более мягких условиях обработки, то есть 300 МПа в течение 2 мин и 400 МПа в течение 1 мин, по сравнению с промышленными условиями обработки ННР [14]. Таким образом, технология высокого давления считается лучшей альтернативой термической обработке фруктовых соков. Следует отметить, что нами не установлены исследования, так как, скорее, они отсутствуют в области анализа действия ННР на инактивацию вирусов. Кроме того, следует отметить и недостаточную изученность действия технологии еще ННР на споры. Это области, которые требуют дальнейшего изучения. Обработка фруктовых соков методом ННР дает отличную возможность максимально сохранить пищевую ценность соковой продукции, а также снизить микробную нагрузку во фруктовых соках. С целью повышения эффективности ННР можно сочетать с традиционной термической обработкой путем обработки фруктовых соков при умеренных температурах [38].

1.3. Обработка импульсным светом

Импульсная световая обработка (PLP) – это технология нетермической обработки, в которой используются световые импульсы высокой интенсивности в течение короткого времени. Процесс обработки импульсным светом характеризует длины волн широкого диапазона, от ближнего инфракрасного (700–1100 нм), видимого (400–700 нм) и УФ (200–400 нм). PLP имеет большое преимущество, поскольку необходимая энергия получается за очень короткий промежуток времени и имеет низкие эксплуатационные расходы. Однако в большинстве опубликованных исследований используется дозировка энергии, превышающая рекомендованную FDA энергию, равную 12 Дж/см² [39]. Хотя импульсный свет не является термической обработкой, более длительное воздействие и время обработки

могут привести к повышению температуры, что приведет к термической инактивации микробов. В то время как технология PLP использует ультрафиолетовое, видимое и ближнее инфракрасное излучение, фактический антимикробный эффект обусловлен только первым из трех. Однако как видимый, так и инфракрасный диапазоны в своих пиках синергетически с УФ способствуют уничтожению микробов. Воздействие ультрафиолетового света на бактерии связано с его поглощением сопряженными двойными углерод-углеродными связями, присутствующими в нуклеиновых кислотах и белках, что вызывает изменения в ДНК. Наряду с этим клетки, обработанные импульсным светом, также демонстрируют разрыв клеточной стенки и сморщивание цитоплазмы наряду с разрывом внутренних органов из-за электропорации, что приводит к утечке содержимого клетки. Однако импульсный свет не так эффективен, как УФ-излучение, для индукции фотохимического воздействия на клетки. Компонент УФ-С импульсного света помогает изменить структуру ДНК за счет уменьшения сверхспирализации ДНК с последующей фрагментацией ДНК на отдельные нити, вызывающей гибель клеток. Существуют различные факторы, определяющие воздействие импульсного света на образцы обработанного пищевого продукта. К этим факторам относятся расстояние продукта от источника света, время обработки, объем взятой пробы, ориентация и конструкция камеры обработки, и эти факторы необходимо оптимизировать для улучшения сохранности продукта. Наряду с внешними факторами существуют некоторые внутренние факторы пищевого образца, влияющие на эффективность PLP. Эти факторы включают TSS, TA, мутность образца, pH и светопоглощение пищевого продукта.

Технология PLP обладает огромным потенциалом в улучшении сохранности фруктовых соков. Действие PLP при 30 кВ и 3000 импульсов было эффективно в снижении количества микроорганизмов, таких как *P. auruginosa*, за счет 7-логарифмического сокращения [19], в то время как PLP при 3 импульсах в секунду приводил к 4–5-кратному снижению *E. coli* в составе нескольких фруктовых соков, таких как яблочный сок, апельсиновый сок и ананасовый сок [20], а действие PLP при 2,4 кВ также привело к усилению 5-логарифмического сокращения микробов при применении 94 импульсов, ферментативной дезактивации PPO (50%) и POD (42%) при 187 импульсах, а также сохранению фитохимических веществ по сравне-

нию с термической обработкой ананасового сока. [18]. PLP обладает фототермическим эффектом, когда небольшие импульсы световой энергии воздействуют на фруктовые соки, микробы поглощают падающий свет и уничтожаются из-за повышения тепловой энергии. Кроме того, PLP эффективно дезактивирует ферменты, такие как PME и PPO, которые ответственны за помутнение и ферментативное потемнение фруктовых соков соответственно. Следовательно, технология PLP эффективна и имеет большой потенциал по применению в технологических процессах сокового производства [40].

1.4. Обработка импульсным электрическим полем

Обработка импульсным электрическим полем (PEF) является одной из новых нетермических технологий, используемых для пастеризации жидких пищевых продуктов, таких как фруктовые соки. PEF представляет собой комбинацию электрического поля и импульсов высокого напряжения (обычно 20–80 кВ см⁻¹), что значительно повышает летальность микробной нагрузки, присутствующей во фруктовых соках. В PEF факторы, влияющие на эффективность обработки, включают время обработки и силу электрического поля. Электромеханическая нестабильность возникает в клеточной мембране, когда микроб подвергается воздействию PEF. Из-за приложенного электрического поля высокого напряжения клеточная мембрана микроба разрушается с последующим высвобождением компонентов клетки, что приводит к гибели микроба. Хотя летальность PEF пока недостаточно изучена, существует несколько научных предположений, указывающих на способность PEF уничтожать микроорганизмы [41].

Инактивация микробов происходит за счет трансмембранного градиента, называемого трансмембранным потенциалом (ТМП); эта теория была дана Сейлом и Гамильтоном. Другая теория Цимермана, называемая теорией разрыва диэлектрика, рассматривает клеточную мембрану как диэлектрический материал. Пищевые продукты обычно имеют диэлектрическую проницаемость около 60–80, и эта разница в диэлектрических постоянных вызывает накопление зарядов, в то время как ТМП увеличивается, создавая небольшие поры в клеточной мембране. По мере увеличения напряжения образуются более крупные поры и происходят необратимые изменения, приводящие к инактивации микробных клеток, присутствующих во фруктовых соках. Кроме того, максимальная эффективность PEF может быть достигнута с помощью импульсов прямоугольной формы. Также

доказано, что PEF эффективен против ферментов. Было исследовано, что ферменты, такие как PPO и липоксигеназа, значительно зависят от обработки PEF. Влияние PEF на биологически активные соединения незначительно, и незначительные изменения наблюдались в образцах обработанных и необработанных пищевых продуктов. Активность PPO и пероксидаз была снижена более 70%. Тем не менее PEF не оказывает большого влияния на содержание витаминов и pH продуктов, обработанных PEF [42].

Авторы исследования R.M. Aadil, X.A. Zeng, A. Ali и другие получили результаты, которые свидетельствуют об эффективности PEF с частотой импульсов 1 кГц в течение 600 μ s в повышении общего качества продукта, включая уменьшение микробов, функциональных и физико-химических свойств грейпфрутового сока. Кроме того, высокая интенсивность PEF с напряженностью поля 35 кВ см⁻¹ и шириной импульса 4 μ s была лучше, чем термическая пастеризация при 90 °C в течение примерно одной минуты.

В исследовании ученых Elez-Martínez & Martín-Belloso получены результаты более высокого сохранения витамина С (90,8%) при использовании данной технологии обработки при переработке виноградного сока. Тем не менее PEF при высоком напряжении около 350 В также может привести к небольшим изменениям органолептических качеств обработанного сока, как установила группа авторов Zhu *et al*, в котором обработка сока черники привела к незначительным изменениям летучих соединений, вкуса и аромата [24]. Кроме того, PEF является превосходной технологией обработки с точки зрения сохранения фруктового сока благодаря его способности снижать ферментативную активность. Ученые Schilling *et al* сообщили о полной дезактивации ферментов PPO и POD, когда применение технологии PEF сочетается с предварительной термической обработкой яблочного сока при 60 °C [23]. Таким образом, PEF служит потенциальной технологией минимальной обработки со значительным потенциалом для увеличения срока годности фруктовых соков.

1.5. Обработка озоном

Озон представляет собой газ голубоватого цвета, который нестабилен при нормальной атмосферной температуре и давлении. Это один из сильнейших окислителей, который подходит для использования в качестве дезинфицирующего средства. Окислительный потенциал озона приводит к его способности диффундировать через биологические мембраны, поэтому озон обладает

бактерицидными и вирулицидными свойствами. При контакте с аминокислотами озон денатурирует ДНК и белки микроорганизмов, что приводит к их гибели. Механизм летального действия озона включает его воздействие на гликопротеины и гликолипиды клеточной мембраны, вызывая лизис клеток и утечку внутренних компонентов клеток. Озон также оказывает некоторое влияние на органические вещества пищевого продукта, при обработке уровни олигосахаридов снижались. Это может быть связано с разложением олигосахаридов с более высокой степенью полимеризации на более мелкие простые сахара. Озон также оказывает влияние на фенолы, было установлено, что он снижает содержание фенолов уже после 60 с обработки. Высокий окислительный потенциал озона также увеличивает его эффективность против ферментов, таких как PPO и POD. Было установлено, что обработка яблочного сока концентрацией озона 12 мг л⁻¹ в течение 30 мин показала снижение содержания патулинового микотоксина на 75,36%. Озон также эффективен против других микотоксинов, включая афлатоксин и циклопиазоновую кислоту, поскольку деградация этих микотоксинов приводит к химическим модификациям, вызванным озонированием. Благоприятное влияние озонирования на свойства пищевых продуктов, поскольку удаляет нежелательный запах, цвет и вкус. Однако это свойство озона также может приводить к интенсивному окислению некоторых образцов, что приводит к окислительной порче, а также нежелательному обесцвечиванию [29, 43].

Группа ученых, S. Sroy, J.F. Fundo, F.A. Miller, T.R.S. Brandão & C.L.M. Silva, установили, что обработка озоном с дозировкой 7,7 г/л⁻¹ в течение 10 мин способствует сохранению качественных параметров сока дыни в течение периода хранения, а также сохранению на 68% витамина С [27]. Кроме того, озонирование оказалось эффективным методом с точки зрения снижения концентрации *Listeria innocua*, присутствующей в соке, за счет уменьшения количества микробов более чем на 5 логарифмов. В низких дозах от 0,06 до 2,48 г/л озонирование сохраняет физико-химические свойства персикового сока в течение короткого времени обработки от 1 до 5 мин [30]. Однако установлено, что озонирование в высокой дозе 7,8% мас./мас. в течение 10 минут ухудшает цвет и снижает биодоступность антоцианов (98,2%) и аскорбиновой кислоты (85,8%) в клубничном соке [31]. Следовательно, дозировка озона и время обработки являются важными параметрами, которые необходи-

мо учитывать при обработке фруктовых соков озоном. Тем не менее озонирование является важной нетермической технологией, которую следует учитывать при обработке фруктовых соков для повышения их стабильности при хранении. Подробный обзор использования технологии озонирования в пищевой промышленности нами опубликован в 2022 г. [44].

2. Аспекты устойчивости технологий нетермической обработки

Общеизвестно, что в процессе традиционной термической технологии обработки в производстве фруктовых соков используется огромное количество энергии и ресурсов, включая воду, при этом образуются технологические отходы, которые требуют обработки и дополнительных затрат и потребления энергии. В свете современных тенденций на устойчивые технологии преимущества нетермических методов заключаются в снижении воздействия результатов обработки на окружающую среду, а также в значительном снижении энергоёмкости процесса. Однако для более конкретного обоснования преимуществ необходимы дополнительные исследования, чтобы проиллюстрировать все аспекты устойчивости каждой технологии нетермической обработки [45, 46]. Нетепловые технологии являются экологически чистыми и устойчивыми по своей природе, поскольку они потребляют меньше ресурсов и энергии, образуют меньше отходов, тем самым сокращая свой углеродный след в окружающей среде. Общеизвестно, что остаточный после обработки озон легко разлагается до кислорода и не оказывает негативного воздействия на окружающую среду. Кроме того, в результате научных исследований установлено, что технология PEF является энергоэффективной, поскольку при обработке PEF потребляется примерно на 10% меньше электроэнергии, также использование технологии PLP требует меньше энергии за очень короткий промежуток времени, что снижает эксплуатационные расходы [47]. Использование метода НРР является эффективной технологией обработки с меньшим негативным воздействием на окружающую среду, благодаря сравнительно низкому потреблению энергии и возможности повторного использования рабочей жидкости, а также отсутствию необходимости внесения в пищевые продукты консервантов [48]. Проведены исследования по сравнению действия НРР с термической обработкой с целью оценки устойчивости процесса переработки апельсинового сока путем объединения стоимости полного цикла (первоначальные инвестиции, экс-

плуатационные расходы, затраты на техническое обслуживание и стоимость в конце срока службы) и оценки жизненного цикла (воздействие на окружающую среду). Результаты показали, что НРР более безопасен для окружающей среды, но является более дорогостоящим, чем термическая обработка. Ультразвук – еще одна новая «зеленая» технология, экономичная и безопасная в использовании, поскольку она не требует токсичных химических веществ и не образует их в процессе производства [49]. В целом можно сделать вывод, что методы нетермической обработки оказывают менее агрессивное действие на состав продукта, чем термическая обработка, поэтому фруктовые соки сохраняют свои органолептические, питательные и функциональные свойства после обработки.

3. Возможности и ограничения в использовании

Проведенные научные исследования подтверждают, что технологии нетермической обработки улучшают сохранность фруктовых соков, тем самым обеспечивая потребителей безопасными продуктами. Обработка НРР является одной из инновационных технологий, которая используется в некоторых странах в условиях промышленного производства и переработки фруктовых соков. Однако обзор научных исследований, касающихся нетермической обработки, показывает, что изучаемые методы и их испытания проводятся все еще либо в лабораторных условиях, либо на пилотных установках. Следовательно, необходимо внедрять данные методы и технологии нетермической обработки в промышленное производство, проводить дальнейший подбор и стандартизацию условий обработки, поскольку эти методы более эффективны и экологичны по сравнению с традиционными методами термической обработки. Кроме того, при переработке фруктовых соков образуются отходы, такие как кожура, кожица, жмых, сточные воды и другие вещества. В настоящее время более актуальной задачей является переработка отходов и эффективное использование продуктов переработки, чем их обычная утилизация. Фруктовые отходы являются богатым источником ценных биологически активных веществ и, следовательно, могут быть использованы в процессе дальнейшего использования по созданию продуктов функционального и пробиотического назначения. Однако нетепловые технологии более дорогостоящие в использовании по сравнению с тепловыми технологиями, что ограничивает их внедрение в промышленное производство. Конечный

потребитель на сегодняшний день также недостаточно осведомлен о преимуществах пищевых продуктов, не подвергающихся термической обработке, что также является препятствием. Тем не менее преимущество в сохранности пищевой ценности фруктовых соков за счет нетермической обработки превышает высокую стоимость необходимых затрат на внедрение и использование. Следует изучить модификации конструкции и управление технологическим процессом, чтобы снизить стоимость и достичь экономической целесообразности за счет совершенствования и оптимизации технологического процесса. Таким образом, новые нетермические технологии обработки обладают огромным потенциалом для обеспечения устойчивости, повышения качества и безопасности пищевых продуктов.

Рынок фруктовых соков постоянно растет, так как соки являются важным продуктом питания, обладающим за счет содержания биологически активных соединений высокой пищевой ценностью и способствующим профилактике и лечению различных заболеваний. Потребители делают выбор в пользу здорового образа жизни и диеты, поскольку продукты питания играют важную роль как в улучшении, так и в ухудшении общего состояния здоровья потребителей. Консервирование фруктовых соков всегда осуществлялось с помощью тепловых методов. Хотя термический процесс эффективен для инактивации микробов, а также помогает воздействовать на ферменты, которые могут ухудшить качество сока, это приводит к потере многих питательных и функциональных веществ. Для обеспечения безопасности пищевых продуктов и удовлетворения спроса потребителей на качественные пищевые продукты, органические и незначительно обработанные с максимальной пищевой ценностью применение технологии нетермической обработки становится очень важным. Инновационные нетермические технологии способствуют снижению микробиологической обсемененности в соках при переработке, сохраняя при этом многие биологически активные вещества, чего не удается достичь традиционными методами обработки. Эти технологии по отдельности и в сочетании с другими нетермическими технологиями помогают увеличить срок годности фруктовых соков с минимальной обработкой. Большинство этих нетермических обработок не связаны с высокими температурами, что позволяет сохранить термолабильные компоненты, поэтому они являются эффективной альтернативой с точки зрения производства полезных и микробиологически безопас-

ных фруктовых соков. В этом направлении было проведено большое количество научных исследований, но есть возможности для гораздо большего. Кроме того, действие нетермических технологий обработки нуждается в дальнейшем изучении с точки зрения влияния на окружающую среду, а также для снижения себестоимости необходимо проводить исследования и испытания по модификации конструкций и оборудования.

Список литературы

1. Global fruit juice market report and forecast 2021–2026. Retrieved May.3.2022. URL: <https://www.google.com/amp/s/www.expertmarketresearch.com/reports/fruit-juice-market> (date of access: 28.09.2022).
2. Gomes I.A., Venâncio A., Lima J.P. & Freitas-Silva O. Fruit-based non-dairy beverage: A new approach for probiotics. *Advances in Biological Chemistry*. 2021. Vol. 11. P. 302–330.
3. Mushtaq M. Extraction of fruit juice: An overview. In: (edited by G. Rajauria & B.K. Tiwari) *Fruit Juices: Extraction, Composition, Quality and Analysis*. 2018. P. 131–159. USA: Elsevier Inc. DOI: 10.1016/B978-0-12-802230-6.00008-4.
4. Бурак Л.С. Современные методы консервирования, применяемые в пищевой промышленности // *The Scientific Heritage*. 2022. № 89 (89). С. 106–124. DOI: 10.5281/zenodo.6575888.
5. Hameed F., Ayoub A. & Gupta N. Novel food processing technologies: An overview. *IJCS*. 2018. Vol. 6 (6). P. 770–776.
6. Putnik P., Pavlič B., Šojić B. et al. Innovative hurdle technologies for the preservation of functional fruit juices. *Food*. 2020. Vol. 9. P. 699.
7. Dhalaria R., Verma R., Kumar D. Bioactive compounds of edible fruits with their anti-aging properties: A comprehensive review to prolong human life. *Antioxidants*. 2020. Vol. 9. P. 1–38.
8. Chacha J.S., Zhang L., Ofoedu C.E. Revisiting non-thermal food processing and preservation methods – action mechanisms, pros and cons: A technological update (2016–2021). *Foods*. 2021. Vol. 10. P. 1430.
9. Cassani L., Tomadoni B., del Rosario Moreira M. Green ultrasound-assisted processing for extending the shelf-life of prebiotic-rich strawberry juices. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2020. Vol. 100. P. 5518–5526.
10. Iqbal A., Murtaza A., Marszałek K. Inactivation and structural changes of polyphenol oxidase in quince (*Cydonia oblonga* Miller) juice subjected to ultrasonic treatment. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2020. Vol. 100. P. 2065–2073.
11. Fonteles T.V., Costa M.G.M., de Jesus A.L.T., de Miranda M.R.A., Fernandes F.A.N., Rodrigues S. Power ultrasound processing of cantaloupe melon juice: Effects on quality parameters. *Food Research International*. 2012. Vol. 48. P. 41–48.
12. Oladunjoye A.O., Adeboyejo F.O., Okekunbi T.A., Aderibigbe O.R. Effect of thermosonication on quality attributes of hog plum (*Spondias mombin* L.) juice. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2021. Vol. 70. P. 105316.
13. Petrus R., Churey J., Worobo R. Searching for high pressure processing parameters for *Escherichia coli* O157:H7, *Salmonella enterica* and *Listeria monocytogenes* reduction in concord grape juice. *British Food Journal*. 2020. Vol. 122. P. 170–180.
14. Pokhrel P.R., Boulet C., Yildiz S. Effect of high hydrostatic pressure on microbial inactivation and quality changes in carrot-orange juice blends at varying pH. *LWT*. 2022. Vol. 159. P. 113219.
15. da Silveira T.F.F., Cristianini M., Kuhnle G.G., Ribeiro A.B., Filho J.T., Godoy H.T. Anthocyanins, non-anthocyanin phenolics, tocopherols and antioxidant capacity of açai juice (*Euterpe oleracea*) as affected by high pressure processing and thermal pasteurization. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*. 2019. Vol. 55. P. 88–96.

16. Marszałek K., Szczepańska J., Starzonek S. Enzyme inactivation and evaluation of physicochemical properties, sugar and phenolic profile changes in cloudy apple juices after high pressure processing, and subsequent refrigerated storage. *Journal of Food Process Engineering*. 2019. Vol. 42. e13034.
17. Zhang W., Dong P., Lao F., Liu J., Liao X., Wu J. Characterization of the major aroma-active compounds in Keitt mango juice: Comparison among fresh, pasteurization and high hydrostatic pressure processing juices. *Food Chemistry*. 2019. Vol. 289. P. 215–222.
18. Vollmer K., Chakraborty S., Bhalerao P.P., Carle R., Frank J., Steingass C.B. Effect of pulsed light treatment on natural microbiota, enzyme activity, and phytochemical composition of pineapple (*Ananas comosus* [L.] Merr.) juice. *Food and Bioprocess Technology*. 2020. Vol. 13. P. 1095–1109.
19. Hwang H.J., Cheigh C.I., Chung M.S. Relationship between optical properties of beverages and microbial inactivation by intense pulsed light. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*. 2015. Vol. 31. P. 91–96.
20. Preetha P., Pandiselvam R., Varadharaju N., Kennedy Z.J., Balakrishnan M., Kothakota A. Effect of pulsed light treatment on inactivation kinetics of *Escherichia coli* (MTCC 433) in fruit juices. *Food Control*. 2021. Vol. 121. P. 107547.
21. Caminiti I.M., Palgan I., Noci F. et al. The effect of pulsed electric fields (PEF) in combination with high intensity light pulses (HILP) on *Escherichia coli* inactivation and quality attributes in apple juice. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*. 2011. Vol. 12. P. 118–123.
22. Lee H., Choi S., Kim E., Kim Y.N., Lee J., Lee D.U. Effects of pulsed electric field and thermal treatments on microbial reduction, volatile composition, and sensory properties of orange juice, and their characterization by a principal component analysis. *Applied Sciences (Switzerland)*. 2021. Vol. 11. P. 1–11.
23. Schilling S., Schmid S., Jäger H. Comparative study of pulsed electric field and thermal processing of apple juice with particular consideration of juice quality and enzyme deactivation. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2008. Vol. 56. P. 4545–4554.
24. Zhu N., Zhu Y. Evaluation of microbial, physicochemical parameters and flavor of blueberry juice after microchip-pulsed electric field. *Food Chemistry*. 2019. Vol. 274. P. 146–155.
25. Aadil R.M., Zeng X.A., Ali A. Influence of different pulsed electric field strengths on the quality of the grapefruit juice. *International Journal of Food Science and Technology*. 2015. Vol. 50. P. 2290–2296.
26. Elez-Martínez P., Martín-Belloso O. Effects of high intensity pulsed electric field processing conditions on vitamin C and antioxidant capacity of orange juice and gazpacho, a cold vegetable soup. *Food Chemistry*. 2007. Vol. 102. P. 201–209.
27. Sroy S., Fundo J.F., Miller F.A., Brandão T.R.S., Silva C.L.M. Impact of ozone processing on microbiological, physicochemical, and bioactive characteristics of refrigerated stored Cantaloupe melon juice. *Journal of Food Processing and Preservation*. 2019. Vol. 43. e14276.
28. Fundo J.F., Miller F.A., Tremarin A., Garcia E., Brandão T.R.S., Silva, C.L.M. Quality assessment of Cantaloupe melon juice under ozone processing. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*. 2018. Vol. 47. P. 461–466.
29. Diao E., Wang J., Li X., Wang X., Song H., Gao D. Effects of ozone processing on patulin, phenolic compounds and organic acids in apple juice. *Journal of Food Science and Technology*. 2019. Vol. 56. P. 957–965.
30. Jaramillo-Sánchez G.M., Garcia Loreda A.B., Gómez P.L., Alzamora S.M. Ozone processing of peach juice: Impact on physicochemical parameters, color, and viscosity. *Ozone: Science and Engineering*. 2018. Vol. 40. P. 305–312.
31. Tiwari B.K., O'Donnell C.P., Patras A., Brunton N., Cullen P.J. Effect of ozone processing on anthocyanins and ascorbic acid degradation of strawberry juice. *Food Chemistry*. 2009. Vol. 113. P. 1119–1126.
32. Yildiz S., Pokhrel P.R., Unluturk S., Barbosa-Cánovas G.V. Shelf life extension of strawberry juice by equivalent ultrasound, high pressure, and pulsed electric fields processes. *Food Research International*. 2021. Vol. 140. P. 110040.
33. Başlar M., Biranger Yildirim H., Tekin Z.H., Ertugay M.F. Ultrasonic applications for juice making. In: *Handbook of Ultrasonics and Sonochemistry*. 2015. P. 1–22. Singapore: Springer.
34. Paniwnyk L. Applications of ultrasound in processing of liquid foods: A review. *Ultrason. Sonochem.* 2017. Vol. 38. P. 794–806.
35. Khandpur P., Gogate P.R. Effect of novel ultrasound based processing on the nutrition quality of different fruit and vegetable juices. *Ultrason. Sonochem.* 2015. Vol. 27. P. 125–136.
36. Jayawardena E., Vanniarachchi M., Wansapala J. Review on non-thermal technologies for the preservation of fruit juices. *Journal of Agricultural Science and Technology B*. 2019. Vol. 9. P. 365–372. DOI: 10.17265/2161-6264/2019.06.001.
37. Considine K.M., Kelly A.L., Fitzgerald G.F., Hill C., Sleator R.D. High-pressure processing Effects on microbial food safety and food quality. *FEMS Microbiology Letters*. 2008. Vol. 281. P. 1–9.
38. Bermúdez-Aguirre D., Corradini M.G., Candoğan K., Barbosa-Cánovas G.V. High pressure processing in combination with high temperature and other preservation factors. In: (edited by vol. M. Balasubramaniam, G.V. Barbosa-Cánovas, H.L.M. Lelieveld). *Food Engineering Series*. 2018. P. 193–215. NY: Springer Nature. DOI: 10.1007/978-1-4939-3234-4_11.
39. Rowan N.J. Pulsed light as an emerging technology to cause disruption for food and adjacent industries – Quo vadis? *Trends in Food Science and Technology*. 2019. Vol. 88. P. 316–332.
40. Mandal R., Mohammadi X., Wiktor A., Singh A., Singh A.P. Applications of pulsed light decontamination technology in food processing: An overview. *Applied Sciences (Switzerland)*. 2020. Vol. 10. P. 3606.
41. Fellows P. (Peter). *Food Processing Technology: Principles and Practice*. UK: Woodhead Pub. 2002.
42. Koubaa M., Barba F.J., Bursać Kovačević D. Pulsed electric field processing of fruit juices. *Fruit Juices: Extraction, Composition, Quality and Analysis*. 2018. Vol. 43. P. 437–449. DOI: 10.1016/B978-0-12-802230-6.00022-9.
43. Brodowska A.J., Nowak A., Śmigielski K. Ozone in the food industry: Principles of ozone treatment, mechanisms of action, and applications: An overview. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2018. Vol. 58. P. 2176–2201.
44. Бурак Л.Ч. Использование технологии озонирования в пищевой промышленности // *Sciences of Europe*. 2022. No. 98 (98). P. 85–100. DOI: 10.5281/zenodo.6973824. EDN IORPDE.
45. Clairand J.M., Briceno-Leon M., Escriva-Escriva G., Pantaleo A.M. Review of energy efficiency technologies in the food industry: Trends, barriers, and opportunities. In: (edited by M. Mourshed) *IEEE Access*. 2020. P. 48015–48029. Vol. 8. USA: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.
46. Chakka A.K., Sriraksha M.S., Ravishankar C.N. Sustainability of emerging green non-thermal technologies in the food industry with food safety perspective: A review. *LWT*. 2021. Vol. 151. P. 112140.
47. Bhavya M.L., Umesh Hebbar H. Pulsed light processing of foods for microbial safety. *Food Quality and Safety*. 2017. Vol. 1. P. 187–201.
48. Picart-Palmade L., Cunault C., Chevalier-Lucia D., Belleville M.P., Marchesseau S. Potentialities and limits of some non-thermal technologies to improve sustainability of food processing. *Frontiers in Nutrition*. 2019. Vol. 5. P. 130.
49. Pallarés N., Berrada H., Ferrer E. Ultrasound processing: A sustainable alternative. In: (edited by J.M. Lorenzo, P.E.S. Munekata, F.J. Barba) *Sustainable Production Technology in Food*. 2021. P. 155–164. USA: Academic Press. DOI: 10.1016/b978-0-12-821233-2.00006-x.