Химия растительного сырья. 2026. №4. С. 25–51.
Khimiya rastitel'nogo syr'ya, 2026, no. 4, pp. 25–51.
DOI: 10.14258/jcprm.20260418259

УДК 664.8.03

СОХРАНЕНИЕ ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ МЕТОДОМ КОМБИНИРОВАННОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭФИРНЫХ МАСЕЛ И ИННОВАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ. ОБЗОР

© ***Л.Ч. Бурак*, А.Н. Сапач***

ООО «БЕЛРОСАКВА», ул. Пономаренко, 35А, Минск, 220015, Республика Беларусь, leonidburak@gmail.com

Растущий мировой спрос на свежие продукты питания подчеркивает необходимость поиска эффективных методов консервирования. Широко используемые традиционные методы обработки обеспечивают микробиологическую стабильность продуктов, но при этом зачастую снижают их пищевую ценность. Цель исследования – обзор результатов комбинированного применения растительных эфирных масел с инновационными технологиями, включая наноинкапсуляцию, съедобные покрытия, упаковку в модифицированной атмосфере и современные нетермические методы обработки.

Материалами данного исследования послужили научные публикации за период 2015–2025 годы. Научный поиск и обзор литературы проводили в библиографических базах PubMed, Web of Science и Google Scholar. Анализ данных 103 научных публикаций выполнен методами систематизации, обобщения, промежуточных выводов и общего заключения.

Эфирные масла растительного происхождения, известные своими антимикробными и антиоксидантными свойствами, являются эффективной натуральной альтернативой различным химическим консервантам. Однако летучесть, нестабильность и проблемы совместимости ограничивают их практическое использование. Комбинированное использование эфирных масел с инновационными технологиями обработки значительно повышают стабильность и биоактивность эфирных масел, одновременно улучшая их эффективность для различных видов пищевых продуктов. Основные механизмы такой синергии увеличивают их потенциал для обеспечения безопасности пищевых продуктов, продления срока годности и снижения зависимости от синтетических консервантов.

Современные инновационные технологии представляют собой значительный шаг к более устойчивым методам консервирования пищевых продуктов, отвечающим запросам потребителей. Вместе с тем наряду со значительными преимуществами комбинированных технологий сохраняются проблемы, связанные с их широким промышленным внедрением. Дальнейшие научные исследования должны быть направлены на разработку экологичных, масштабируемых методов инкапсуляции эфирных масел, основанных на биоразлагаемых полимерах растительного происхождения или липидных носителях.

Ключевые слова: эфирные масла, синергия, качество, безопасность, нанотехнологии, активная упаковка, ультразвук, холодная плазма, импульсное электрическое поле.

Для цитирования: Бурак Л.Ч., Сапач А.Н. Сохранение пищевых продуктов методом комбинированного использования эфирных масел и инновационных технологий. Обзор // Химия растительного сырья. 2026. №4. Online First. https://doi.org/10.14258/jcprm.20260418259.

Введение

В последние десятилетия глобальный спрос на свежие продукты питания резко возрос из-за растущей осведомленности потребителей о питательных преимуществах и устойчивом развитии. Однако сохранение качества и безопасности скоропортящихся продуктов, таких как фрукты, овощи, мясо и морепродукты, остается критической проблемой для цепочки поставок продовольствия. Во всем мире потери после сбора урожая, оцениваемые в 28–55% от общего объема производства [1], возникают в основном из-за микробной порчи, ферментативного распада и окислительных реакций. Традиционные методы консервирования, такие как использование химических синтетических консервантов и охлаждение, становятся все более обсуждаемыми. Это связано с растущими потребительскими предпочтениями в пользу минимально обработанных продуктов и опасениями по поводу возможных рисков для здоровья [2, 3]. Следовательно, существует настоятельная необходимость в изучении экологически чистых альтернатив, которые соответствуют

* Автор, с которым следует вести переписку.

тенденции «чистой этикетки» и обеспечивают продовольственную безопасность. Эфирные масла растительного происхождения (ЭМ), как естественные вторичные метаболиты, продемонстрировали эффективность в области сохранения пищевых продуктов и были общепризнаны Управлением по контролю за продуктами и лекарствами США (FDA) в качестве безопасных (GRAS) веществ. Извлеченные из трав, специй и цитрусовой кожуры ЭМ содержат биоактивные соединения, такие как терпены, фенолы и альдегиды, которые разрушают мембраны микробных клеток и удаляют свободные радикалы [4]. Hanková и др. сравнили антимикробную эффективность ЭМ лемонграсса с обычными химическими консервантами – бензоатом натрия и сорбиновой кислотой – против кишечной палочки (*E. coli*) в овощных соусах. ЭМ полностью уничтожило *E. coli* в течение 15 дней, в то время как химические консерванты не обеспечивали полную инактивацию, что подчеркивает эффективную антибактериальную активность ЭМ [5]. Однако из-за присущей ЭМ гидрофобности и летучести непосредственное внесение в пищевые системы с низким содержанием жира и высоким содержанием влаги остается серьезной проблемой. Это может привести к несовместимости с пищевыми компонентами, ограничивая их равномерное распределение в пищевой матрице. Минимальная ингибирующая концентрация (МИК) ЭМ имеет узкое пороговое значение (обычно 0.5–2%), превышение которого может вызвать нежелательные изменения органолептических показателей [6]. Например, в то время как 1.2% масла орегано эффективно ингибирует сальмонеллу, концентрации, превышающие 1.5%, приводят к выраженной горечи в мясных продуктах [7]. Кроме того, после удаления из естественной растительной матрицы компоненты ЭМ становятся очень восприимчивыми к окислительной деградации, химической трансформации или реакциям полимеризации. Их биоактивность существенно зависит от таких факторов, как температура, pH и состав пищи, что затрудняет обеспечение их стабильности. Многие компоненты эфирных масел (например, лимонен, линалоол) быстро улетучиваются при температуре выше 50 °C, а после термообработки при 80 °C степень сохранения их активности падает до менее 30%, что значительно снижает их консервирующую эффективность [8]. Эти недостатки требуют инновационных стратегий для оптимизации их эффективности в системах хранения свежих продуктов. Исследования показали, что сочетание ЭМ с передовыми технологиями может давать значительные синергетические эффекты. Наноинкапсуляция повышает стабильность ЭМ и контролируемое высвобождение. Системы доставки на основе съедобной пленки снижают потери ЭМ от улетучивания более чем на 60% за счет межмолекулярных взаимодействий [9]. Между тем холодная плазма (ХП) модифицирует поверхности пищевых продуктов для повышения эффективности адгезии ЭМ [10]. Более того, интеллектуальные системы упаковки, встроенные в датчики на основе ЭМ, позволяют в режиме реального времени контролировать свежесть продуктов, обеспечивая дополнительный уровень контроля качества [11]. Такая интеграция не только расширяет биоактивный порог эфирных масел, но и может служить эффективной альтернативой использованию традиционных химических консервантов. В предыдущих обзорах в основном рассматривались антимикробные свойства эфирных масел (ЭМ) отдельно, без использования комбинированных технологий консервирования. Комплексного обзора механизмов их синергетического взаимодействия с современными методами консервирования на момент написания данного обзора нами не установлено. Поэтому цель исследования – обзор результатов комбинированного применения растительных эфирных масел с новыми технологиями, включая наноинкапсуляцию, съедобные покрытия, упаковку в модифицированной атмосфере, холодную плазму, обработку под высоким давлением. Чтобы заполнить этот пробел, в настоящем обзоре используется междисциплинарный подход к систематической оценке того, как передовые методы обработки повышают физико-химическую стабильность, контролируемое высвобождение и функциональные характеристики ЭМ в различных матрицах свежих пищевых продуктов, тем самым преодолевая сенсорные ограничения и повышая практическую применимость. В частности, мы критически оцениваем взаимодействие ЭМ и передовых технологий консервации в системах производства свежих пищевых продуктов. Для достижения данной цели было изучено: (1) способы применения в различных пищевых матрицах, (2) преимущества по сравнению с традиционными методами, (3) механизмы, лежащие в основе их синергетического действия, (4) существующие проблемы, препятствующие широкому промышленному использованию и соответствия нормативным требованиям.

Материалы и методы

Материалами данного исследования послужили научные публикации за период 2015–2025 годы. Научный поиск и обзор литературы по исследованию использования эфирных растительных масел в

комбинации с инновационными технологиями проводили в библиографических базах PubMed, Web of Science и Google Scholar. Изначально было проведена полнотекстовая проверка 258 научных публикаций, по результатам которой было отобрано 103 исследования, максимально отвечающие критериям включения, которые и вошли в данный обзор. При выполнении данного обзора использованы научные методы поиск и скрининг научной литературы, извлечение данных, их анализ, систематизации и обобщения. При отборе публикаций для обзора приоритет отдавали высоко цитируемым источникам. Для обзора предметного поля проведенного исследования использовали алгоритм в соответствии с протоколом PRIZMA и составляли схему проведения исследования.

Антимикробные и антиоксидантные свойства эфирных масел

Антимикробные и антиоксидантные свойства эфирных масел (ЭМ) коренятся в их сложном химическом составе и динамических взаимодействиях с биологическими системами. ЭМ оказывают антимикробное действие посредством синергетической сети активных молекул, используя механизмы от физического разрушения и молекулярной регуляции до вмешательства в метаболические пути [12, 13]. Одновременно с этим они противодействуют окислительному повреждению посредством многоуровневых каскадных механизмов [14, 15]. Антимикробная эффективность эфирных масел варьируется в зависимости от молекулярной структуры, полярности, растворимости и взаимодействия их соединений с мембранами микробных клеток. Как правило, порядок антимикробной эффективности в следующей тенденции: фенолы > альдегиды > кетоны > терпены > сложные эфиры. Антибактериальный механизм действия эфирных масел в основном заключается в повреждении структуры мембраны и нарушении ее функций [13]. Монотерпеноидные фенолы, такие как тимол и карвакрол, быстро проникают в микробные липидные бислои благодаря своей высокой липофильности. Интеркалируясь в микробные мембраны, эфирные масла разрушают фосфолипидный бислой, снижают текучесть мембраны, нарушают функцию мембранных белков, разрушают мембранный потенциал и нарушают ионные градиенты [13, 16]. Экспериментальные данные показали, что 1% масла чайного дерева может снизить трансмембранную протондвижущую силу золотистого стафилококка (*S. aureus*) на 60%. Эта дестабилизация напрямую нарушает синтез и метаболизм АТФ [17]. Помимо физического повреждения, активные соединения также воздействуют на метаболические пути: циннамальдегид ингибирует активность бактериальной ДНК-гиразы посредством связывания тиолов, в то время как эвгенол препятствует распознаванию кворума, снижая экспрессию факторов вирулентности, например снижение на 82% выработки пиоцианина у *Pseudomonas aeruginosa,* что демонстрирует возможности точного метаболического вмешательства [18]. С точки зрения антиоксидантной активности эфирные масла устанавливают многомерную защитную систему посредством гашения свободных радикалов, хелатирования металлов и регуляции клеточных сигналов. Фенольные гидроксильные группы, как идеальные доноры водорода (энергия диссоциации связи ~80 ккал/моль), эффективно нейтрализуют активные формы кислорода (АФК) через механизм переноса атома водорода (HAT). Например, розмариновая кислота продемонстрировала в 3.2 раза более высокую эффективность в удалении радикалов DPPH, чем витамин Е [18]. Между тем α, β-ненасыщенные карбонильные структуры захватывают супероксид-анионы через механизм переноса одного электрона (ПОЭ), при этом эвгенол демонстрирует скорость удаления гидроксильных радикалов до 96% [19, 20]. Молекулярная топология компонентов ЭМ оптимизирована для создания синергических эффектов – объединение α-токоферола с карвоном удваивает значение ORAC, в то время как группа β-дикетонов в куркумине хелатирует ионы железа с константой ассоциации 10^{14} M^{-1}, ингибируя более 90% образования гидроксильных радикалов в реакции Фентона [21]. На более глубоком уровне клеточная защита включает активацию пути Nrf2/ARE. Исследования подтвердили, что обработка лавандовым маслом в концентрации 0.1 мг/мл увеличивает экспрессию супероксиддисмутазы (СОД) и глутатионпероксидазы (ГОД) в два-три раза [22], при одновременном снижении активности НАДФН-оксидазы для смягчения окислительного стресса в его источнике [23]. Синергия между антибактериальными и антиоксидантными эффектами подчеркивает системную биологическую активность эфирных масел. Благодаря оптимальному балансу коэффициентов распределения липид-вода (log *P* 2–4), эфирные масла с малыми молекулами могут проникать в гидрофобные мембранные структуры, разрушая патогены, в то время как их гидрофильные компоненты остаются активными в цитоплазме, блокируя свободные радикалы [13]. Примечательно, что снижение патогенной нагрузки посредством антибактериального действия косвенно ослабляет окислительный стресс хозяина, в

то время как клеточный гомеостаз, опосредованный антиоксидантами, дополнительно усиливает антимикробную защиту. Эта положительная обратная связь позволяет составу эфирного масла *Ziziphora clinopodioides* не только подавлять *Listeria* при консервировании мяса, но и поддерживать реагирующие с тиобарбитуровой кислотой вещества (TBARS) на уровне ниже 0.3 мг малондиальдегида (МДА)/кг [24]. Вместе с тем, практическое применение ЭМ сталкивается с трудностями: гидрофобность и летучая нестабильность ЭМ затрудняют контролируемое высвобождение; их сильный аромат может изменять сенсорные свойства, ограничивая потребительский спрос; а зависимость «доза-эффект» нелинейна – например, некоторые ЭМ могут проявлять прооксидантное действие и цитотоксичность при концентрациях, превышающих 500 мкг/мл [25]. Эти проблемы стимулируют разработку систем точной доставки, таких как наноэмульсии, которые повышают биодоступность в пять раз, и технологии микрокапсулирования, продлевающие срок действия до 12 ч. В последние годы значительное внимание уделяется комбинированному применению ЭМ с новыми технологиями консервирования. Эти подходы направлены на снижение требуемой концентрации ЭМ, повышение их эффективности и расширение области их применения в различных пищевых системах.

Синергетическое применение эфирных масел с новыми технологиями консервирования

Включение эфирных масел в системы упаковки пищевых продуктов. Упаковка пищевых продуктов способствует продлению срока годности пищевых продуктов, обеспечения безопасности пищевых продуктов и минимизации воздействия на окружающую среду. Растущее предпочтение потребителей минимально обработанным продуктам в сочетании с все более строгими нормами охраны здоровья и безопасности стимулировало развитие активной упаковки [26]. Биоразлагаемые полимерные композиты, часто армированные наноматериалами, широко исследовались в качестве универсальных платформ для включения ЭМ в системы упаковки пищевых продуктов. Эти материалы обеспечивают контролируемое высвобождение биоактивных соединений и повышают стабильность ЭМ, тем самым способствуя сохранению свежести продуктов [9, 27]. Результаты исследования показали, что включение гранул полиэтилена низкой плотности, загруженных 10% ЭМ тимьяна, в коммерческие лотки значительно снизило антракноз авокадо и улучшило качество сохраненных фруктов по сравнению с химическим фунгицидом прохлоразом [28]. Более того, внедрение ЭМ в упаковочную матрицу может обеспечить значительные преимущества для конечной композитной пленки, включая улучшенные механические свойства, повышенную антимикробную и антиоксидантную активность, а также превосходные барьерные характеристики [29]. ЭМ может быть включен в активную упаковку в виде пленок или покрытий [30]. В таблице 1 представлены краткий обзор результатов исследований по применению эфирных масел в сочетании с новыми технологиями для сохранения свежих продуктов.

Таблица 1. Обзор репрезентативных исследований по применению эфирных масел в сочетании с новыми технологиями для сохранения свежих продуктов

Эфирные масла/активные компоненты и применяемая концентрация	Комбинированная технология	Вид продукта	Целевые микроорганизмы	Эффективность	Источник
1	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*
Zataria multiflora ЭМ (1500 частей на миллион)	Хитозановое покрытие (ХП)	Клубника	*Botrytis cinerea* (полное подавление роста)	Сочетание ХП и ЭМ эффективно подавляло рост *B. cinerea* и уменьшало грибковое поражение клубники во время хранения	[31]
Origanum vulgare L. ЭМ (1.5% по весу)	Пленка полимолочной кислоты	Радужная форель	*Staphylococcus aureus* (площадь ингибирования 722.5 мм^2), *Listeria monocytogenes* (239.2 мм^2), *Escherichia coli* (230.5 мм^2) и *Salmonella enteritidis* (710.2 мм^2)	Композитные пленки повышают гибкость, антимикробные свойства и снижают рост микроорганизмов при хранении охлажденной радужной форели	[32]

Продолжение таблицы 1

1	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*
Эфирное масло корицы (0.5% масс./масс.)	Пленка из целлюлозного нановолокна/полибутиленадипат котерефталата	Клубника	*Salmonella*, *Listeria monocytogenes*, *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli*	Пленки и ЭМ корицы улучшают сохранность клубники, демонстрируя антимикробные свойства и потенциал для биоразлагаемой упаковки пищевых продуктов	[33]
Эфирное масло лимонника (5% масс./масс.)	Пленки из нанокристаллов целлюлозы/хитозана–ПВС	помидоры черри	*Staphylococcus aureus* (зона задержки роста 8.88 мм), *Escherichia coli* (7.55 мм)	Изготовленные пленки ЦХ/ПВС с ЭМ лимонника и ЦНК показали превосходные антимикробные и консервирующие свойства	[34]
Cymbopogon citratus ЭМ (1.5% об./об.)	Пленка наночастиц хитозана/TiO_2	Мясной фарш	*Enterobacteriaceae*, психротрофные бактерии, золотистый стафилококк, молочнокислые бактерии	Пленка ХТ с 1.5% эфирного масла *Cymbopogon citratus* и 1% наночастиц TiO_2 увеличивает срок годности мяса, повышает его прочность и обеспечивает микробную безопасность	[35]
Эфирное масло лемонграсса (7% масс./масс.)	Инкапсулированный β-циклодекстрином в хитозан-желатиновой оболочке	Помидоры черри	*Penicillium aurantiogriseum* (7.5 log КОЕ/мл)	Покрытие ХТ-желатин с инкапсулированным в β-циклодекстрин эфирным маслом лемонграсса продемонстрировало сильный антимикробный эффект и пролонгированное действие, эффективно предотвращая рост грибков на томатах черри в течение 20 дней	[36]
Коричный альдегид (1.6 мг/мл)	Инкапсулированный гидроксипропил-β-циклодекстрином в упаковку из электропряденых фосфолипидных нановолокон	Свежесрезанные огурцы	*Listeria monocytogenes* (2.5 log КОЕ/г)	Циннамальдегид был инкапсулирован в HP-β-CD и внедрен в нановолокна, что повысило термостабильность и антибактериальную активность упаковки свеженарезанных огурцов	[37]
ЭМ тимьяна (4% об./мас.)	Инкапсулированный электропряденым зеиновым волокном	Клубника	*Bacillus cereus* (зона ингибирования 15.54 мм), *Escherichia coli* (8.12 мм), *Aspergillus fumigatus*	Зеиновые волокна с добавлением эфирного масла тимьяна улучшают сохранность клубники, уменьшая потерю веса и сохраняя твердость, цвет и органолептические качества в течение 15-дневного хранения	[38]
Пары эфирного масла тимьяна (66.7 мкл/л)	Упаковка в модифицированной газовой среде (5% CO2 : 10% O2)	Манго	*Colletotrichum glosporioides*	Сочетание МАР и эфирного масла тимьяна значительно продлило срок хранения манго и сократило послеуборочную порчу, сохранив при этом качество плодов	[39]
ЭМ лемонграсса, растворенное в 70% этаноле (0.2% об./масс.)	Упаковка в модифицированной атмосфере (5–10% O2 : 10–15% CO2)	Клубника	*Общее количество жизнеспособных микроорганизмов (низкий показатель порчи)*	Масло лемонграсса и МАР продлевают срок хранения клубники до 18 дней, сохраняя качество	[40]

Продолжение таблицы 1

1	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*
Эфирные масла корицы, лимонника и орегано (7.5 мг/мл)	Эмульгировано с использованием кукурузного масла + лецитина + Твин 20	Цельное молоко	*S. aureus* (5.5 log КОЕ/мл)	Самоэмульгирующиеся наноэмульсии ЭМ показали долгосрочную стабильность и антибактериальную активность против *S. aureus*	[41]
ЭМ розмарина (0.5 мг/г)	Инкапсулированный в наногель хитозан-бензойная кислота	Говяжья котлета	*Salmonella Typhimurium* (2.5 log КОЕ/г)	Наногели хитозана и бензойной кислоты повышают стабильность эфирного масла *Rosmarinus officinalis* и его антибактериальную эффективность в говяжьих котлетах	[42]
Эфирное масло чабера (1% масс./об.)	Инкапсулированный в наноструктурированные липидные носители (НЛН)	Говядина	*Staphylococcus aureus* (зона подавления роста 17 мм), *Pseudomonas aeruginosa* (0 мм) и *Escherichia coli* (0 мм)	Инкапсулированные пикантные эфирные масла в НЛН улучшают сохранность говядины за счет снижения количества микробов, окисления и показателей порчи	[43]
Наноэмульсии ЭМ тимьяна (10 мг/мл)	Ультразвук (УЗ) (20 кГц при 25 °C в течение 3 мин)	Томаты черри	*Escherichia coli* O157: H7 (1.2 log КОЕ/мл)	Наноэмульсия ЭМ тимьяна и УЗ синергетически дезактивирует томаты черри без ущерба для качества	[44]
Наноэмульсии *Litsea cubeba* ЭМ (0.08 мкл/мл)	Ультразвук (20 кГц при 25 °C в течение 9 мин)	Томаты черри	*Salmonella* (6.50±0.20 log КОЕ/мл)	Обработка наноэмульсией ЭМ *Litsea cubeba* + ультразвуком значительно инактивировала сальмонеллу за счет повышения проницаемости мембраны, вызывая окислительное повреждение и изменяя морфологию клеток, что повысило безопасность пищевых продуктов	[45]
Наноэмульсии Орегано ЭМ (0.06 мкл/мл)	Ультразвук (255 Вт/см^2 в течение 15 мин)	Черника	*Listeria monocytogenes* (8.67±0.17 log КОЕ/мл)	Обработка наноэмульсией УЗ + ЭМ орегано эффективно уничтожила *L. monocytogenes*, разрушила клеточные мембраны и сохранила качество черники	[46]
Цитраль (1% масс./масс.)	Обработка высоким давлением (ВГД) (380 МПа в течение 15 мин)	Говяжий фарш	*Escherichia coli* O157:H7 и уропатогенная *E. coli* (5 log КОЕ/г)	Цитраль повысил эффективность HPP, что позволило снизить давление для инактивации *E. coli* O157:H7 и UPEC в говяжьем фарше	[47]
ЭМ корицы в полилактидной пленке (17%)	Обработка высоким давлением (300 МПа в течение 16 мин)	Куриное мясо	*Listeria monocytogenes* (3.8 log КОЕ/г), *Salmonella* Typhimurium (3.7 log КОЕ/г)	HPP с упаковкой, содержащей ЭМ корицы, эффективно инактивировала патогены в организме цыплят, снижала требуемое давление и уровни ЭМ	[48]
Аллилизотиоцианат (АИЗТ) 0.075% масс./масс.	Обработка высоким давлением (350 МПа в течение 12 мин)	Сырой куриный фарш	*Salmonella* Typhimurium (7 log КОЕ/г)	HPP в сочетании с АИЗТ эффективно инактивировал *Salmonella* Typhimurium, снижал потребность в давлении и поддерживал активность во время хранения	[49]

Продолжение таблицы 1

1	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*
ЭМ лемонграсса (5 мг/мл в течение 30 мин)	Холодная азотная плазма (500 Вт в течение 120 с)	Свиная корейка	*Listeria monocytogenes* (2.8 log КОЕ/г)	ХП и эфирное масло лемонграсса синергетически снижали количество *L. monocytogenes* в свинине, минимизируя сенсорные изменения и обеспечивая более низкую концентрацию эфирного масла для эффективного антибактериального действия	[50]
ЭМ гвоздики (1 мг/мл в течение 30 мин)	Холодная азотная плазма (400 Вт в течение 3 мин)	Поверхность салата	Биопленки *Escherichia coli* O157:H7 (5.48 log КОЕ/см^2)	ХП и эфирное масло гвоздики синергетически уничтожили биопленки *E. coli* O157:H7 на салате с минимальным сенсорным воздействием за счет разрушения клеточных стенок и вызывая внутриклеточную утечку	[51]
ЭМ корицы (0.06 мкл/мл)	Импульсное электрическое поле (30 кВ, 604 мкс)	яблочный сок	*Listeria monocytogenes* (3.87 log КОЕ/мл), *Escherichia coli* O157:H7 (5.13 log КОЕ/мл)	ИЭП с ЭМ корицы оптимально инактивировал микробы, увеличил содержание фенолов, снизил pH и содержание растворимых твердых веществ в яблочном соке	[52]
Цитраль (0.1 мкл/мл)	Импульсное электрическое поле (30 кВ, 150 мкс)	яблочный сок	*Escherichia coli* O157:H7 (5 log КОЕ/мл)	Синергия цитраля и ИЭП усилила инактивацию кишечной палочки; наноэмульсии, более высокие концентрации и низкий уровень pH значительно повысили антимикробную эффективность яблочного сока	[53]
Эфирное масло корицы (0.125% масс./масс.)	Бактериофаг vB_LmoS-PLM9 (MOI 100)	Молоко	*Listeria monocytogenes* (3 Log)	Фаг vB_LmoS-PLM9 и эфирное масло корицы синергетически инактивировали *L. monocytogenes*, предотвращая повторный рост и повышая безопасность в молоке при температуре 4 °C	[54]
Карвакрол (2.9 мг/мл, 3.0) или эвгенол (0.8 мг/мл)	Фаговый эндолизин LysPB32	Говяжий фарш	*Salmonella* Typhimurium (2.5 log КОЕ/г)	LysPB32 с карвакролом/эвгенолом синергетически снижал количество *S.* Typhimurium, повышая эффективность и стабильность говяжьего фарша при охлаждении	[55]
Тимол и гераниол (1 × МИК)	Фаг CAU-SEP-3 (MOI 100)	Перепелиные яйца	Биопленки *Salmonella ser. Enteritidis* (1.33 log КОЕ/яйцо при 4 °C и 2.92 КОЕ/яйцо при 25 °C)	Фаг CAU-SEP-3 с тимолом/гераниолом синергетически уменьшал биопленки *сальмонелл* на яйцах и поверхностях, не влияя на качество яиц	[56]
Карвакрол, растворенный в 100% этаноле (0.5 мг/мл)	Фаг PN05 (MOI 1)	Киви	Планктонная форма *Pseudomonas syringae* pv. *actinidiae* и биопленки *(*подавляет рост *Psa* и предотвращает повторный рост более 40 ч)	Фаги в сочетании с карвакролом синергетически подавляли рост *Psa* и образование биопленок, эффективно задерживая повторный рост и предлагая экологически безопасный метод борьбы с болезнями киви	[57]

Окончание таблицы 1

1	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*
Наноэмульсии ЭМ корицы (1.5–2.0% мас./об.)	*Lactiplantibacillus plantarum*	Сырое молоко и йогурт	*Bacillus cereus* и *Yersinia enterocolitica*	Наноэмульсия *L. plantarum* и ЭМ корицы синергетически подавляет рост *B. cereus* и *Y. enterocolitica*, повышая безопасность молочных продуктов	[58]
Эмульсии периллы ЭМ-глицеринмонолаурата в композитных хитозановых пленках (6 мкл/мл)	Низин (11.0 мкг/мл)	Рыбные шарики	Золотистый стафилококк	Композитная пленка перилла ЭМ-низин-хитозан эффективно подавляла рост бактерий и сохраняла качество рыбных шариков в течение 12 дней хранения	[59]

Эфирные масла в упаковке на основе биополимеров. В последнее десятилетие растущий интерес к устойчивой упаковке привел к использованию биополимеров, которые не только улучшают термомеханические, барьерные и реологические свойства, но и служат эффективными носителями для активных соединений с антимикробной функциональностью. Полимерная технология также позволяет интегрировать миниатюрные датчики для мониторинга качества пищевых продуктов в режиме реального времени во время хранения и распределения, способствуя развитию интеллектуальных систем упаковки [60]. В последние годы хитозан (ХТ) широко изучался как натуральный упаковочный материал благодаря его антимикробным, антиоксидантным, пленкообразующим и гелеобразующим свойствам [9, 27]. ЭМ и ХТ могут проявлять аддитивные или синергические антимикробные эффекты: ЭМ нарушают структурную целостность поверхностей патогенных клеток, в то время как ХТ повышает их эффективность, ингибируя синтез клеточной стенки и снижая микробную резистентность, что в конечном итоге приводит к апоптозу клеток [61]. Положительный заряд и вязкость растворов ХТ повышают стабильность ЭМ. Помимо их собственной антимикробной активности, взаимодействие между ХТ и ЭМ улучшает смачиваемость и межфазные свойства пленок ХТ, потенциально усиливая их общую антимикробную эффективность. Покрытия ХТ, обогащенные ЭМ корицы, значительно снизили общее количество жизнеспособных бактерий (TVC) и психротрофных бактерий в охлажденной радужной форели по сравнению с чистыми покрытиями ХТ [32]. При консервировании фруктов и овощей пленки из КС/крахмала, содержащие эфирное масло корицы, эффективно снижали потерю упругости и веса томатов черри, одновременно подавляя рост кишечной палочки (*E. coli)* и золотистого стафилококка *(S. aureus)* на 36 и 30% соответственно. Эти пленки превзошли полиэтиленовые пленки по антимикробным свойствам и достигли 70% естественного разложения за 28 дней, что подтверждает их потенциал в качестве экологичного упаковочного решения [62]. По сравнению с обычными пленками на основе нефти пленки полимолочной кислоты (PLA) демонстрируют благоприятную проницаемость для водяного пара и газа, в то время как включение ЭМ улучшает механическую прочность и гибкость пленок. Включение 0.5% (масс./масс.) *Origanum vulgare* ЭМ в PLA увеличило удлинение при разрыве в шесть раз и значительно подавило рост *S. aureus* и *E. coli*, снизив микробную нагрузку на охлажденную радужную форель [32]. Кроме того, Akhteri соавторы разработали пленку ХТ–пектин/крахмал, улучшенную ЭМ розмарина, которая улучшила барьерные, механические и термические свойства, одновременно демонстрируя более сильную антиоксидантную и антимикробную активность против *B. subtilis*, *E. coli* и *L. monocytogenes* [63]. Недавние исследования также подчеркивают потенциал объединения натуральных красителей и ЭМ в биоматрицы для двойной функции интеллектуальной упаковки. Пленка из PLA/термопластичного крахмала с красителем кошенили и ЭМ гвоздики продемонстрировала как указывающие на порчу изменения цвета, так и антимикробные эффекты, продлевая срок годности креветок на 10 дней [64]. Аналогичным образом, пленки из батата, богатые антоцианами, с включением ЭМ мандарина показали изменение цвета в зависимости от pH и улучшенную антиоксидантную и антибактериальную активность, эффективно указывая на свежесть креветок и свинины [65]. Эти примеры подтверждают растущую тенденцию к «активно-интеллектуальной» упаковке – системам, которые объединяют антимикробную функциональность с обнаружением порчи в режиме реального времени, что обеспечивает повышенную безопасность пищевых продуктов, срок годности и осведомленность потребителей.

Эфирные масла в упаковке на основе нанокомпозитов. Наноразмерные материалы, такие как наноцеллюлоза (НЦ), нановолокна крахмала, наночастицы зеина, наночастицы ХТ и наноглины, использовались для упаковки пищевых продуктов с подходящими свойствами для улучшения производительности упаковки и продления срока годности. НЦ нетоксична, биоразлагаема и отличается большой площадью поверхности, кристалличностью и настраиваемой поверхностной химией [66]. Эти характеристики влияют на высвобождение антимикробных веществ, при этом агенты на основе ЭМ демонстрируют высокий потенциал для антимикробной упаковки на основе НЦ. Soufiani и др. разработали биоразлагаемые пленки на основе ХТ, включающие мезопористые наночастицы кремнезема (МРНК), нанокристаллы целлюлозы (ККЦ) и экстракт свеклы, достигая улучшенной механической прочности, антиоксидантной способности и антибактериальной активности против *S. aureus* и *L. monocytogenes*, предлагая многофункциональное решение для устойчивой упаковки пищевых продуктов [67]. Daeialiakbar и соавторы изготовили биокомпозитные плёнки на основе КС/ПВС, армированные ЭМ лемонграсса и ЦНК. Оптимизированные плёнки продемонстрировали повышенную антимикробную активность, сниженную паропроницаемость и улучшенную стабильность томатов черри при хранении, превзойдя целлофан по сохранению качества и предотвращению микробной порчи в течение срока годности [34]. Металлические наночастицы (МНЧ), известные своим высоким отношением поверхности к объему, проявляют сильную антимикробную активность. Однако проблемы безопасности привели к разработке металлических нанокомпозитов, сочетающих МНЧ с природными биополимерами, что предлагает устойчивую технологичную альтернативу с улучшенными барьерными и механическими свойствами для современной упаковки пищевых продуктов [68]. В сочетании с ЭМ МНЧ используют свой размер, форму и стабильность для увеличения проницаемости мембраны, что позволяет микробным клеткам проникать в нее и оказывать синергетическое антимикробное действие. Waisani и соавторы инкапсулировали эфирные масла пажитника и кориандра в CuO-NP, получив экологически чистые противогрибковые нанокомпозиты, которые подавляли рост *Colletotrichum nymphaeae* (*C. nymphaeae*) до 100%, при этом эфирные масла пажитника-CuO-NP демонстрировали стабильно более высокую эффективность [69].

Эфирные масла в сочетании с упаковкой в модифицированной атмосфере. Благодаря простоте применения МАР широко используется для сохранения качества и продления срока хранения скоропортящихся свежих продуктов. Эта технология заменяет воздух, окружающий продукт внутри упаковки, определенной газовой смесью, обычно содержащей O_2, CO_2 и N_2. Снижение уровня O_2 при одновременном повышении концентрации CO_2 может снизить нормальную частоту дыхания и контролировать рост аэробных микроорганизмов, тем самым замедляя старение и сохраняя свежесть. Однако применение МАР имеет определенные ограничения. Крайне низкий уровень O_2 и/или чрезмерно высокая концентрация CO_2 могут стимулировать распространение анаэробных микроорганизмов. Кроме того, высокая влажность в герметичной среде может способствовать росту микробов, значительно сокращая жизнеспособность продукта [9, 25]. Следовательно, преимущество МАР в минимизации потерь после сбора урожая часто ограничено, особенно для свежих продуктов. Сочетание МАР с парами ЭМ предлагает эффективный естественный подход к повышению безопасности пищевых продуктов и срока годности за счет задержки созревания и подавления патогенных микроорганизмов [9, 25]. A.B. Perumal и др. показали, что МАР в сочетании с ЭМ тимьяна контролируют антракноз и сохраняют качество манго, продлевая срок годности сортов Банганапалли и Тотапури до 26±2 и 23±2 дней соответственно [39]. I. Kahramanoğlu и соавторы установили, что одновременное использование ЭМ лемонграсса и МАР значительно улучшает качество клубники, уменьшает порчу и неприятные запахи, а также увеличивает срок хранения при температуре 4 °C до 15 дней [40]. Результаты многих исследований представлены в таблице 1, а также в недавних научных обзорах [9, 25]. Несмотря на их важнейшую роль ЭМ в упаковке пищевых продуктов, необходимы дальнейшие исследования для оптимизации характеристик биополимеров, содержащих ЭМ. Биополимерные материалы на основе полисахаридов или белков по-прежнему сталкиваются с ограничениями по механической прочности и барьерным свойствам по отношению к газам и водяному пару, что ограничивает их практическое применение. Исследования все больше фокусируются на создании нанокомпозитных пленок с использованием наноматериалов (например, наночастиц и нановолокон) для значительного повышения механических характеристик и эффективности барьерных свойств. Параллельно с этим некоторые исследования направлены на тонкую настройку функциональных свойств этих материалов путем включения вспомогательных биокомпонентов для улучшения общих характеристик и стабильности. Высокая концентрация ЭМ может отрицательно влиять на вкус пищевых продуктов, снижая потребительский спрос. Поэтому использование прозрачных покрытий с минимальным

влиянием на вкус считается эффективной стратегией для достижения баланса функциональности и сенсорных качеств [9, 70]. Поддержание долгосрочной стабильности упаковочных материалов при хранении является еще одной важной задачей. В недавних исследованиях особое внимание уделяется оптимизации структуры упаковки и включению барьерных слоев для повышения влаго- и кислородостойкости, что замедляет деградацию материала и повышает коммерческую привлекательность и долговечность. Кроме того, вопросы совместимости эфирных масел и биополимеров, а также механизмы синергетического эффекта между различными компонентами требуют дальнейшего изучения. Ключевые направления исследований включают изучение гигроскопичности растительных биополимеров, понимание особенностей контролируемого высвобождения активных соединений и повышение экономической эффективности и стабильности пленкообразующих материалов. В целях содействия экологическому и устойчивому развитию все больше внимания уделяется извлечению возобновляемого биополимерного сырья из побочных продуктов и отходов пищевой промышленности для разработки съедобных упаковочных материалов [71].

Эфирные масла и нанотехнологии

Наноносители для инкапсуляции эфирных масел. ЭМ обладают превосходными антимикробными и антиоксидантными свойствами, однако их прямое применение в упаковке пищевых продуктов остается сложным из-за их высокой летучести и подверженности деградации под воздействием света, тепла, кислорода и механического воздействия. Инкапсуляция на основе наноносителей стала перспективной стратегией для повышения стабильности и функциональности ЭМ в активных упаковочных системах. Основные типы наноносителей в настоящее время включают нано/микроэмульсии, нанолипосомы, наночастицы ЭМ, твердые липидные наночастицы (ТЛН), наноструктурированные липидные носители (НЛН) и полимерные наночастицы. Каждый тип обеспечивает определенные преимущества для сохранения свежести продуктов питания благодаря своим различным структурным характеристикам. Наноэмульсии, обычно получаемые путем гомогенизации под высоким давлением или ультразвукового эмульгирования, инкапсулируют ЭМ внутри липидного ядра, образуя стабильную дисперсионную систему с размерами частиц менее 200 нм. Это значительно усиливает антиоксидантную и антимикробную активность ЭМ [72]. Нанолипосомы, в первую очередь синтезируемые методами гидратации пленок или тонкопленочной дисперсии, облегчают транспортировку ЭМ и активных соединений через биологические мембраны, тем самым улучшая их биодоступность [73]. Наночастицы ХТ, благодаря своим положительно заряженным свойствам, могут взаимодействовать с отрицательно заряженными молекулами ЭМ посредством методов ионного гелеобразования или распылительной сушки. Это усиливает их адгезию к поверхностям пищевых продуктов и обеспечивает высвобождение в зависимости от pH, эффективно подавляя рост микроорганизмов, вызывающих порчу [9]. ТЛН и НЛН представляют собой две системы наночастиц на основе липидов, обычно синтезируемые с использованием методов высокоэнергетической эмульсификации, эмульгации-испарения и микрофлюидизации. Точно контролируя скорость охлаждения во время затвердевания липидной матрицы, эти носители достигают эффективной инкапсуляции ЭМ [74]. Полимерные наночастицы, существующие в виде нанокапсул, наносфер или нановолокон, представляют собой твердые липидные частицы субмикронного размера, получаемые с помощью нанопреципитации, диализа или сверхкритических флюидных технологий [75]. Среди них наиболее широко используются наноэмульсии и липосомы благодаря их биосовместимости и простоте приготовления. Наноэмульсии обеспечивают высокую эффективность инкапсуляции (>80%) и превосходную стабильность, обусловленную малым размером капель и межфазной активностью. Липосомы, хотя и биосовместимы и подходят для различных соединений, часто страдают от агрегации, нестабильности и плохого удержания летучих эфирных масел. Эти системы повышают стабильность эфирных масел, маскируют их сильные запахи и обеспечивают контролируемое высвобождение посредством таких механизмов, как диффузия, усадка, фрагментация и эрозия, тем самым поддерживая антимикробную активность в течение длительного периода [74]. Практическое применение этих систем было продемонстрировано в различных исследованиях (табл. 1.). Хотя системы наноносителей значительно повышают эффективность ЭМ в активной упаковке, необходима дальнейшая оптимизация для повышения эффективности инкапсуляции, обеспечения стабильности при длительном хранении и поддержания безопасности пищевых продуктов. Также необходима валидация посредством исследований кинетики высвобождения in vitro и сохранения пищевых продуктов *in vivo*. Например, Lastra-Vargas и др. обнаружили, что свободное ЭМ орегано превзошло сорбат калия в ингибировании *L. monocytogenes*, в то время как инкапсуляция с использованием альгината или эмульгированных биополимеров не привела к значительному улучшению его антимикробной

эффективности или сенсорных свойств, что указывает на то, что современные системы доставки ЭМ по-прежнему сталкиваются с практическими ограничениями и требуют дальнейшего совершенствования [76]. В таблице 2 представлены основные системы наноносителей для инкапсуляции ЭМ, выделены материалы, методы изготовления, преимущества, ограничения и области применения в пищевой промышленности, что закладывает основу для разработки современных интеллектуальных и активных упаковочных решений.

Механизм нанокапсуляции в повышении консервирующего потенциала эфирного масла в пищевой системе. Нанокапсуляция предлагает многофункциональную стратегию, позволяющую преодолеть физико-химические и биологические ограничения эфирных масел, расширяя возможности их применения для консервирования пищевых продуктов. Включение эфирных масел в наноразмерные носители значительно повышает их стабильность, биоактивность и совместимость с пищевыми матрицами. Эфирные масла по своей природе нестабильны, склонны к окислению, улетучиванию и деградации под воздействием окружающей среды, такой как свет, кислород и тепло. Нанокапсуляция обеспечивает защитный физический и химический барьер, повышая устойчивость эфирных масел к этим условиям. Например, эфирное масло эвкалипта, инкапсулированное в наночастицы КС, сохраняло стабильность более года по сравнению с быстрой деградацией неинкапсулированного масла [77]. Биополимеры, такие как КС, альгинат и циклодекстрины, повышают стабильность эфирных масел за счет образования водородных связей и гидрофобных взаимодействий, снижая окислительный стресс [78]. В условиях пищевой промышленности колебания температуры и pH представляют собой распространенные проблемы. Инкапсулированное эфирное масло орегано сохранило более 80% своей антибактериальной активности после воздействия 150 °C, что свидетельствует о его повышенной термостойкости [79]. Носители, чувствительные к pH, такие как комплексы альгинат-ХТ, обеспечивают целенаправленное высвобождение эфирного масла в кислой или нейтральной среде, повышая эффективность консервации в желудочно-кишечном тракте или при хранении пищевых продуктов. Эти улучшенные защитные функции в совокупности продлевают срок годности и эффективность эфирного масла как при хранении, так и при переработке [27, 80]. Одним из основных преимуществ наноинкапсуляции является ее способность регулировать высвобождение эфирных масел с течением времени, продлевая антимикробную эффективность. Контролируемое высвобождение достигается посредством диффузии через пористые матрицы, набухания гидрогеля или ферментативного расщепления биополимерных оболочек. Например, инкапсулированное в липосомы эфирное масло корицы продемонстрировало замедленное высвобождение и пролонгированную антибактериальную активность против метициллин-резистентного золотистого стафилококка (*Staphylococcus aureus*). Такие системы позволяют эффективно консервировать эфирные масла при более низких концентрациях, минимизируя сенсорные изменения и токсичность [27]. Резкий аромат и насыщенный вкус эфирных масел часто ограничивают их прямое использование в пищевых системах. Инкапсуляция снижает летучесть и регулирует высвобождение, тем самым маскируя эти нежелательные сенсорные характеристики. Апельсиновое масло, инкапсулированное в β-циклодекстрин, придало выпечке более мягкий аромат [81]. Такая маскировка повышает потребительскую приемлемость без ущерба для антимикробной функции. Наноэмульсии и носители на основе липидов улучшают растворимость и облегчают взаимодействие с микробными мембранами, тем самым повышая антибактериальную эффективность. Сочетание ЭМ корицы, лемонграсса и орегано в форме наноэмульсии усиливало ингибирование *S. aureus* в молоке благодаря лучшему диспергированию и усилению взаимодействия с микробными мембранами [82]. Наночастицы размером менее 200 нм демонстрируют повышенное поглощение клетками, что повышает антибактериальную эффективность [27]. Наномасштабный размер инкапсулированных систем способствует более глубокому проникновению в микробные мембраны, нарушая ключевые клеточные функции. Наноэмульсии ЭМ чеснока (<100 нм) нарушали мембраны *Penicillium italicum*, в то время как инкапсулированное в липосомы ЭМ корицы разрушало биопленки *S. aureus* [27, 83]. Инкапсулирующие материалы, такие как ХТ или ТЛН (например, серебро, медь), проявляют собственные антимикробные свойства, которые усиливают действие ЭМ, повышая эффективность при более низких дозах [84]. Кроме того, инкапсулированные ЭМ ингибируют жизненно важные микробные пути, такие как биосинтез эргостерола или выработка токсинов, а их пролонгированное высвобождение предотвращает адаптацию микробов. Например, инкапсулированный в ХТ эвгенол подавлял синтез афлатоксина у *A. flavus* посредством снижения активности гена [78]. Инкапсуляция также предотвращает дезактивацию эфирного масла, изолируя активные соединения от компонентов пищи. Например, эфирное масло *Zataria multiflora*, инкапсулированное в нанокристаллы крахмала, сохраняло эффективность в жирных колбасах, избегая связывания с липидами, в отличие от свободного эфирного масла, которое теряло активность из-за адсорбции [85].

Таблица 2. Основные наноносители для инкапсуляции эфирных масел и их эффективность при консервировании пищевых продуктов

Вид наноносителя	Материал	Метод инкапсуляции	Преимущества	Недостатки
Наноэмульсии	Поверхностно-активные вещества (ПАВ) и водная фаза	Гомогенизация под высоким давлением; ультразвуковое эмульгирование	Высокая биодоступность, малый размер, улучшенная растворимость	Термодинамически нестабильные остатки ПАВ
Нанолипосомы	Фосфолипиды (например, лецитин)	Гидратация тонкой пленки; обработка ультразвуком; экструзия	Биосовместимость, слияние мембран, контролируемое высвобождение	Низкая физическая устойчивость, окисление липидов
Наночастицы хитозана	Хитозан и триполифосфат натрия	Ионное гелеобразование; распылительная сушка	Антимикробная синергия, мукоадгезия, высвобождение, зависящее от pH	Ограниченная механическая прочность, возможная аллергенность
Твердые липидные наночастицы (ТЛН)	Твердые липиды (например, стеариновая кислота, глицерилмоностеарат)	Высокоэнергетическая эмульсификация	Высокая эффективность инкапсуляции, стабильность	Низкаое содержание гидрофильных ЭМ
Наноструктурированные липидные носители (НЛН)	Твердые липиды + жидкие липиды (например, стеариновая кислота + олеиновая кислота)	Гомогенизация под высоким давлением; эмульгирование расплава	Улучшенная загрузка ЭМ, физическая стабильность	Сложная формула, высокая стоимость
Полимерные наночастицы	Биополимеры (например, полимолочная кислота, зеин, крахмал, желатин, альгинат)	Нанопреципитация; диализ	Настраиваемый профиль высвобождения, биоразлагаемость, настраиваемое таргетирование	Проблемы масштабируемости, отсутствие НД

Примечание: составлена авторами по результатам анализа научных исследований.

Эфирные масла и нетермические методы

Традиционные методы термической обработки, включая высокотемпературную стерилизацию, пастеризацию, сушку и выпаривание, широко применяются в пищевой промышленности для достижения стерилизации и консервации. Однако высокие температуры снижают свежесть пищевых продуктов, разрушают сенсорные характеристики и пищевую ценность, а также производят вредные химические производные, тем самым влияя на качество пищевых продуктов. Кроме того, термическая обработка является энергоемкой, причем энергия в основном получается от сжигания ископаемого топлива, что приводит к значительным экологическим и экономическим негативным воздействиям на общество и окружающую среду [13]. В последние годы обширные исследования были сосредоточены на нетермических технологиях, включая ультразвук (УЗ), ВГД, импульсные электрические поля (ИПЭ), облучение (ИК), ультрафиолетовый (УФ) свет и озоновую технологию. Эти новые технологии могут применяться при температуре окружающей среды, используя электрические поля, кавитацию, высокое давление и излучение для разрушения и повреждения клеток, тем самым достигая микробной инактивации, минимизируя неблагоприятное воздействие на питательную ценность, цвет, вкус и органолептические свойства пищевых продуктов [13, 71]. Однако их эффективность против некоторых микроорганизмов ограничена и зависит от параметров обработки. В некоторых случаях нетермические технологии не позволяют добиться удовлетворительной деконтаминации без ущерба для качества продукта [86].

Эфирные масла и ультразвук. Когда УЗ распространяется в жидкой среде, он вызывает рост, колебание и схлопывание микроскопических пузырьков, высвобождая большое количество энергии, повышая локальную температуру до 5000 К и давление до 50 МПа [13]. Этот процесс сопровождается интенсивным микроструйным распылением, ударными волнами, сдвиговыми силами и образованием свободных радикалов. Считается, что антимикробное действие УЗ является результатом кавитации, которая непосредственно разрушает клеточную стенку и мембрану, что приводит к разрыву клетки, а также образованию высокоокислительных свободных радикалов, которые повреждают или изменяют структуру ДНК, вызывая деградацию ДНК [71]. По сравнению с традиционной термической обработкой УЗ обладает такими преимуществами, как высокая эффективность, низкое потребление энергии и неразрушающее воздействие. Однако обработка

УЗ может изменить физические и химические свойства пищевых продуктов. Чрезмерная интенсивность УЗ может вызвать окисление липидов, денатурацию белков, изменение цвета и текстуры, а также деградацию биологически активных соединений, что в итоге сказывается на качестве продукта [87]. Поэтому в некоторых случаях одного УЗ недостаточно для инактивации бактерий в пищевых продуктах. Результаты исследований показали, что сочетание эфирных масел и их активных компонентов с ультразвуком снижает эффективную дозу эфирных масел и интенсивность ультразвука, достигая при этом более высоких показателей микробной инактивации. Этот метод использовался для повышения качества и безопасности продуктов питания на растительной основе. Не и др. установили, что сочетание ультразвука с наноэмульсией эфирных масел тимьяна эффективно снижало *количество кишечной палочки* на томатах черри до 6.94 log КОЕ/образец без ущерба для качества плодов [44]. Синергизм объясняется вызванным ультразвуком повреждением мембраны, усиливающим проникновение эфирных масел, с последующим разрушением липидов и гибелью клеток. Исследования также показали, что УЗ снижает гидрофобность бактериальных клеточных мембран, тем самым усиливая взаимодействие между ЭМ и компонентами мембраны. Sharma и др. эмульгировали ЭМ гвоздики с сывороточным белком и объединили его с УЗ, что привело к значительному повышению антимикробной активности против *E. coli* и *B. subtilis* по сравнению с индивидуальными обработками. УЗ способствовал связыванию гидрофобных молекул ЭМ с β-лактоглобулином в сывороточном белке и снижал бактериальную адгезию. Кроме того, синергетический эффект усиливал внутриклеточный окислительный стресс, что приводило к перекисному окислению липидов и повреждению мембран [88]. Поддержание надлежащей текучести мембраны имеет решающее значение для жизнеспособности микроорганизмов, поскольку она регулирует такие важные функции, как транспорт питательных веществ, поддержание морфологии клеток и устойчивость к стрессу окружающей среды, потому как все они напрямую влияют на физиологические состояния клеток [89]. Сочетание УЗ и ЭМ приводит к большей деполяризации мембраны и значительному снижению текучести мембран, которое связано с уменьшением подвижности ацильных цепей в фосфолипидном бислое, что в итоге приводит к снижению проницаемости мембраны, клеточной дисфункции и гибели клеток [44].

Эфирные масла и обработка под высоким давлением. Высокое гидростатическое давление (ВГД) – это новая нетермическая технология, которая инактивирует микроорганизмы и ферменты путем применения давления 100–600 МПа при температуре окружающей среды. По сравнению с традиционными термическими методами ВГД сокращает потребление энергии и предотвращает вторичное загрязнение путем обработки продуктов после упаковки [13]. Таким образом, это считается щадящей технологией, которая продлевает срок годности, обеспечивает микробную безопасность и сохраняет органолептические показатели. Обработка ВГД высокоэффективена против грамотрицательных и некоторых грамположительных бактерий (например *L. monocytogenes*, *S. Aureus*), но бактериальные споры проявляют значительную устойчивость к давлению, что ограничивает эффективность ВГД в инактивации спор [71, 86]. Кроме того, сублетально поврежденные клетки могут восстанавливаться при благоприятных условиях, что создает риски для безопасности пищевых продуктов, а повторное воздействие может вызывать адаптивную резистентность [86]. Таким образом, сочетание ВГД с другими методами консервации является перспективной стратегией для улучшения микробной инактивации при более низких давлениях, сохраняя при этом качество продукта и повышая экономическую эффективность. Совместное использование ВГД и ЭМ применялось для обработки сырого мяса и продуктов из птицы для усиления инактивации пищевых патогенов, повышения безопасности пищевых продуктов и снижения интенсивности давления, необходимого для отдельной обработки ВГД, тем самым повышая экономическую целесообразность. Исследования показали, что в говяжьем фарше сочетание 1.00% (вес/вес) цитраля и ВГД (380 МПа, 15 мин) снижает количество *E. coli* O157:H7 и уропатогенных *E. coli* на 5 log КОЕ/г, превосходя по эффективности только ВГД при 500 МПа [47]. Аналогичным образом, обработка ВГД охлажденной курицы при 300 МПа в сочетании с активной упаковкой, содержащей 17% ЭМ корицы, обеспечило поддержание *L. monocytogenes* и *S. myphimurium* на безопасных уровнях в течение 21 дня, при этом снижая как интенсивность давления, так и дозировку ЭМ по сравнению с обычным ВГД, тем самым повышая экономическую эффективность и микробную безопасность [48]. Синергия ВГД с ЭМ и слабыми органическими кислотами дополнительно повышает антимикробную эффективность, поскольку органические кислоты (например, уксусная кислота) снижают внутриклеточный pH и нарушают бактериальные метаболические функции. В курином фарше сочетание 0.075% аллилизотиоцианата (АИТЦ), 0.10% уксусной кислоты и ВГД (350 МПа, 12 мин) снизило количество S. *Typhimurium* на 7 log КОЕ/г [49]. ВГД само

по себе может вызывать сублетальное повреждение бактерий, что позволяет им восстановиться при благоприятных условиях. Однако его сочетание с ЭМ поддерживает бактериальную инактивацию, предотвращая восстановление сублетально поврежденных клеток.

Эфирные масла и холодная плазма. Холодная плазма (ХП) состоит из частично или полностью ионизированных газов, включая положительно и отрицательно заряженные ионы, свободные радикалы, возбужденные молекулы, УФ-фотоны и другие реактивные виды. Обычно он генерируется посредством высоковольтного разряда, электромагнитных полей или микроволнового возбуждения, при этом обычно используются такие газы, как воздух, азот (N_2), кислород (O_2) и смеси благородных газов, такие как аргон (Ar), гелий (He) и неон [13, 90]. ХП в первую очередь использует активные формы кислорода (АФК) и активные формы азота (АФА), такие как OH•, O_3, H_2O_2 и NO, чтобы вызвать окислительное повреждение микробных белков, разрушить клеточные мембраны и вызвать фрагментацию ДНК [90]. Кроме того, накопление заряженных частиц может вызвать электропорацию и апоптоз [90]. Эти многоцелевые механизмы наделяют ХП широким спектром антимикробной активности против патогенов, микроорганизмов порчи, биопленок и спор. ХП действует независимо от тепла, что обеспечивает сохранение термочувствительных соединений и пригодность для различных пищевых матриц, оставаясь совместимым с упаковкой и технологиями модифицированной атмосферы [90]. Кроме того, его реакционноспособные виды естественным образом возвращаются в инертные формы, не оставляя вредных остатков, что позиционирует ХП как технологию «чистой этикетки». Однако его сильный окислительный потенциал может ускорить окисление липидов в пищевых продуктах с высоким содержанием жиров, а ограниченная глубина проникновения снижает эффективность на сложных или неровных поверхностях [91]. Синергетическое применение ХП и ЭМ использовалось для повышения качества и безопасности мясных продуктов. ХП в сочетании с нановолокнами фиброина шелка, с добавлением ЭМ тимьяна, снизило *S. Typhimurium* на 6 log КОЕ/г в мясе курицы и утки с устойчивой эффективностью в течение 7 дней при 25 °C и без ухудшения сенсорных качеств. ХП усилил высвобождение ЭМ за счет модификации поверхностей нановолокон [92]. Комбинированная обработка свиной корейки ХП (500 Вт, 120 с) и ЭМ лемонграсса (5 мг/мл, 30 мин) позволила достигнуть сопоставимого снижения *L. monocytogenes* (2.8 log КОЕ/г) по сравнению с более интенсивными индивидуальными обработками. Этот синергизм также замедлил процесс ухудшения сенсорных качеств, включая изменение цвета, потерю текстуры и окисление липидов [93]. Аналогичным образом комбинированная обработка салата ХП (400 Вт, 3 мин) и ЭМ гвоздики (1 мг/мл, 30 мин) способствовала снижению на поверхностях количества биопленок *E. coli* O157:H7 на 5.48 log КОЕ/см^2, что значительно превышает эффективность отдельных обработок и при этом минимизирует повреждение поверхности, связанное с длительным воздействием ХП или высокими концентрациями ЭМ [51]. Синергетический эффект ХП и эфирных масел обусловлен, главным образом, усилением разрушения клеточной мембраны. Гидрофобная природа эфирных масел позволяет им встраиваться в микробные фосфолипидные бислои, вызывая структурные изменения и образование пор. ХП дополнительно расширяет эти поры, увеличивая проницаемость мембраны и способствуя внутриклеточной утечке. Кроме того, эфирные масла снижают микробную резистентность, что приводит к более высокой скорости инактивации в сочетании с ХП [94].

Эфирные масла и импульсное электрическое поле. Импульсное электрическое поле (ИЭП) – это передовая технология нетермической стерилизации, основанная на применении высоковольтных электрических импульсов (20–80 кВ/см, 1–100 мкс) для обработки сырья и продуктов питания, используя механизмы электропорации и диэлектрического пробоя (т.е. потеря изолирующих свойств, когда применяемый ИЭП превышает их диэлектрическую прочность, что приводит к структурному коллапсу) для разрушения микробных мембран [13]. Как только трансмембранный потенциал превышает критический порог, необратимое образование пор приводит к лизису клеток. Эффективность ИЭП зависит от напряженности поля, параметров импульса и микробных свойств, таких как структура клетки и диэлектрическое поведение. Грамположительные бактерии обычно проявляют большую устойчивость к ИЭП по сравнению с грамотрицательными бактериями, в то время как сферические клетки более восприимчивы к инактивации, чем палочковидные аналоги. ИЭП особенно эффективен в кислых жидких продуктах питания (например, фруктовых соках), но ограничен в твердых веществах из-за низкой проводимости [13]. По сравнению с термической пастеризацией, метод ИЭП лучше сохраняет питательные вещества и органолептические свойства, одновременно снижая потребление энергии и воды [71]. Однако крупномасштабное промышленное внедрение сталкивается с рядом проблем, включая высокие капитальные и эксплуатационные расходы, ограниченную

эффективность при обработке твердых пищевых продуктов, потенциальное окисление липидов и необходимость предварительной обработки [86].

Многочисленные исследования продемонстрировали эффективность синергетической обработки ИЭП-ЭМ по инактивации пищевых патогенов из фруктовых соков. Например, сочетание коричного ЭМ (0.06 мкл/мл) и ИЭП (30 кВ, 604 мкс) снизило количество *E. coli* O157:H7 и *L. monocytogenes* в яблочном соке на 5.13 и 3.87 log КОЕ/мл соответственно, что значительно превышает снижение, достигнутое только при использовании ИЭП (2.3 и 1.6 log КОЕ/мл) [52]. Результаты другого исследования подтвердили синергетический антимикробный эффект ИЭП и цитраля, показав, что сочетание цитраля (0.1 мкл/мл) с ИЭП (30 кВ, 150 мкс) снизило количество *E. coli* O157:H7 в яблочном соке на 5 log КОЕ/мл – в пять раз больше, чем при использовании одного ИЭП [53]. Результаты показывают, что наноэмульгированные ЭМ, более высокие концентрации и более низкий pH сока заметно повышают эффективность инактивации [53]. Антимикробная эффективность ИЭП в сочетании с ЭМ была подтверждена для твердых продуктов, таких как сырая птица. Исследования показывают, что ЭМ орегано (62.5 мкг/мл) в сочетании с ИЭП (1 кВ/см, 20 мкс) привело к снижению численности *C. jejuni* на 1.5 log КОЕ/г, что свидетельствует о синергетическом бактерицидном эффекте. Следует отметить, что одновременное применение оказалось менее эффективным, чем последовательная обработка, а именно ИЭП с последующим воздействием ЭМ, поэтому можно предположить, что повреждение мембраны, вызванное ИЭП, усиливает поглощение и эффективность ЭМ [95]. Синергетический эффект ИЭП и ЭМ обусловлен, главным образом, разрушением мембраны под действием ЭМ и повышением проницаемости мембраны под действием ИЭП. Например, было обнаружено, что эвгенол повышает уровень ненасыщенных жирных кислот, одновременно снижая содержание циклических жирных кислот, что приводит к изменению текучести мембраны и повышению уязвимости бактерий к инактивации ИЭП [96].

Нетермические технологии с применением ЭМ демонстрируют высокий потенциал для инактивации микроорганизмов, однако механизмы их синергизма остаются недостаточно изученными. Хотя ИЭП может повышать эффективность ЭМ за счет увеличения проницаемости мембран и нарушения липидного состава, прямых молекулярных доказательств этого недостаточно. Синергетические эффекты различаются в зависимости от технологии: ХП обеспечивает эффективную стерилизацию поверхности посредством АФК/АФА, но не обладает достаточной проникающей способностью и может ускорять окисление липидов; УЗ способствует дисперсии ЭМ, но при высоких интенсивностях сопряжен с риском потери качества; ВГД является щадящим и подходит для упакованных пищевых продуктов, но является дорогостоящим и неэффективным против спор; ИЭП обеспечивает низкотемпературную инактивацию, но ограничено проводимостью твердых пищевых продуктов и требованиями к оборудованию. В таблице 3 показаны механизмы, области применения и ключевые характеристики ВГД, УЗ, ХП и ИЭП, интегрированных с ЭМ, которые служат ориентиром для выбора технологии и разработки процесса. Исследования в основном были сосредоточены на жидкостях, в то время как твердые пищевые продукты представляют собой проблемы из-за сложной структуры, изменчивости влажности и экранирования поля. Последовательность обработки также влияет на результаты.

Таблица 3. Сравнительная оценка нетермических методов консервирования пищевых продуктов с использованием эфирных масел

Нетермическая технология	Синергия с ЭМ	Наименование продуктов	Преимущества	Недостатки
Ультразвук	Улучшение дисперсии ЭМ и проницаемости клеточных мембран	Овощи, напитки	Энергоэффективность; улучшает эмульгирование ЭМ	Неэффективно для твердых продуктов
Обработка высоким давлением	Улучшает проникновение ЭМ за счет разрушения клеточных мембран; снижает микробную нагрузку	Соки, мясо, морепродукты	Улучшает микробную инактивацию; сохраняет сенсорные и питательные качества	Высокая стоимость оборудования; пакетная обработка
Импульсное электрическое поле (ИЭП)	Способствует диффузии ЭМ путем электропорации	Соки, жидкие продукты	Непрерывность процесса; усиливает антимикробную синергию	Менее эффективен для твердой или жирной пищи
Холодная плазма (ХП)	Изменяет свойства поверхности для лучшей адгезии ЭМ; инактивация патогенов	Фрукты и овощи	Эффективна при низких температурах; минимальный химический остаток	Потенциальное окисление липидов, ограничения по поверхности обработки

Эфирные масла и технология биоконтроля

Технология биоконтроля стала ключевым направлением в области безопасности и сохранения пищевых продуктов. Этот метод использует полезные микроорганизмы, такие как молочнокислые бактерии (МКБ) и дрожжи, а также натуральные антимикробные агенты, включая бактериоцины и ферменты, для избирательного подавления роста порчи и патогенных микроорганизмов, тем самым повышая безопасность пищевых продуктов и продлевая срок их годности. По сравнению с традиционными химическими консервантами подходы биоконтроля предлагают несколько явных преимуществ, включая высокую специфичность, высокую совместимость с окружающей средой и меньший риск развития резистентности [97]. Тем не менее практическое применение агентов биоконтроля часто ограничивается их чувствительностью к таким параметрам окружающей среды как температура, pH и активность воды. Дополнительные проблемы включают относительно медленное начало действия, более высокие производственные затраты, ограниченную стабильность при хранении и технические препятствия, связанные с крупномасштабным производством [98]. В таблице 1 представлены результаты недавних исследований по синергетическому применению агентов биологического контроля и эфирных масел как новой технологии консервирования. Эта синергия позволяет снизить дозировку эфирных масел, минимизируя сенсорные помехи, при этом используя пролонгированную эффективность агентов биологического контроля наряду с быстрым антимикробным действием эфирных масел. Одновременно с этим антиоксидантные свойства эфирных масел могут защищать агенты биологического контроля от окислительной деградации, дополнительно усиливая их консервирующие эффекты. Бактериофаги – это вирусы, которые специфически заражают и лизируют бактерии-хозяева, предлагая целенаправленный подход к сохранению пищевых продуктов путем эффективного устранения определенных пищевых патогенов. Их преимущества заключаются в высокой эффективности, специфичности, минимальном воздействии на собственную микробиоту и вкус пищи, а также низком риске возникновения устойчивости к противомикробным препаратам [99]. Управление по санитарному надзору за качеством пищевых продуктов и медикаментов США (FDA) одобрило несколько продуктов на основе бактериофагов для применения в пищевой промышленности, таких как Listex P100 для *L. monocytogenes* и SalmoFresh для *Salmonella*, которые эффективно снижают бактериальное загрязнение мяса, птицы и свежих продуктов. Однако узкий круг хозяев бактериофагов может способствовать появлению резистентных штаммов бактерий, а сложность пищевых матриц может влиять на их стабильность и активность [100]. Таким образом, применение исключительно бактериофагов остается неэффективным при контроле многоштаммового заражения и сложностей, присущих различным продовольственным системам.

Включение эфирных масел предлагает новый прорыв в улучшении биологического контроля на основе бактериофагов. Недавнее исследование показало, что сочетание бактериофага vB_LmoS-PLM9 (MOI 100) с эфирным маслом корицы (0.125%) эффективно снижало *L. monocytogenes* в молоке при 4 °C до неопределяемых уровней, при необходимости более низкой концентрации эфирного масла, чем при обработке только эфирным маслом, что подчеркивает его многообещающее применение в молочных продуктах [54]. Известно, что активные компоненты эфирных масел, такие как тимол, карвакрол и эвгенол, нарушают целостность бактериальной мембраны, тем самым облегчая проникновение фагов и усиливая литическую активность. Elafify и другие далее продемонстрировали, что обработка тимолом в сочетании с коктейлем фагов MS2 + T7 снизила количество *E. coli* на 5 log КОЕ/мл и значительно уменьшила частоту мутаций, что указывает на подавление развития резистентности [101]. Совместное использование бактериофагов и ЭМ также эффективно в контроле загрязнения биопленкой поверхностей, контактирующих с пищевыми продуктами. Han и соавторы подтвердили, что фаг CAU-SEP-3 (MOI 100) при использовании в сочетании с тимолом и гераниолом эффективно разрушал биопленки *Salmonella* ser. *Enteritidis* на перепелиных яйцах и таких поверхностях как нержавеющая сталь и полипропилен, одновременно подавляя гены вирулентности и реакции на стресс [56]. В сельском хозяйстве эта синергетическая стратегия является перспективной для использования в борьбе с болезнями растений. Бактериальный рак киви, вызываемый *Pseudomonas syringae* pv. *actinidiae* (Psa), представляет собой серьезную угрозу во всем мире. Хотя бактериофаг PN05 может подавлять рост Psa в краткосрочной перспективе, его действие является временным и склонно к бактериальному рикошету. Напротив, карвакрол может предотвращать образование биопленки, но неэффективен против существующих инфекций. В частности, комбинация низкой дозы PN05 и карвакрола не только продлевает антибактериальную активность, но и эффективно предотвращает повторный рост бактерий,

демонстрируя превосходную синергетическую эффективность и подавление резистентности [57]. Эти результаты подчеркивают потенциал комбинаций бактериофага и ЭМ как эффективной, безопасной и устойчивой стратегии безопасности пищевых продуктов, применимой для борьбы с пищевыми патогенами в птице, молочных продуктах, яйцах и свежих продуктах. Синергический антимикробный эффект эфирных масел и бактериофагов обусловлен их взаимодополняющими механизмами действия. ЭМ нарушают целостность бактериальной мембраны, облегчая адсорбцию и проникновение фагов, одновременно воздействуя на внутриклеточные сигнальные пути, ослабляя бактериальную защиту. Эта стратегия двойного действия не только повышает литическую эффективность фагов, но и подавляет образование биопленки, снижает вероятность возникновения мутаций резистентности и продлевает эффективность фагов. Более того, эта комбинация нарушает метаболизм бактерий и подавляет экспрессию факторов вирулентности, что приводит к расширению спектра антимикробного действия и значительному усилению бактерицидного эффекта.

Бактериоцины, класс антимикробных пептидов, секретируемых некоторыми бактериями, проявляют широкий спектр антибактериальной активности и легко расщепляются пищеварительными ферментами человека, что обеспечивает высокий профиль безопасности. Тем не менее их стабильность в значительной степени ограничена такими факторами как pH, температура и условия обработки пищевых продуктов, а их производство остается дорогостоящим [102]. Интеграция эфирных масел и молочнокислых бактерий (МКБ) широко изучалась с целью повышения безопасности молочных продуктов. Высокое содержание жира в молочных продуктах часто снижает активность антимикробных агентов, тогда как комплексные стратегии, сочетающие физическую инкапсуляцию с биологическим антагонизмом, повышают антимикробную эффективность. *B. cereus* и *Yersinia enterocolitica* являются одними из наиболее часто обнаруживаемых патогенов в сыром молоке и йогурте соответственно. Сочетание наноэмульгированного эфирного масла корицы с *Lactiplantibacillus plantarum* (*L. plantarum*) продемонстрировало высокий антибактериальный потенциал по сравнению с их индивидуальным применением [58]. Совместное использование эфирных масел и молочнокислых бактерий также показало сильную противогрибковую активность. Установлено, что *L. plantarum* A7 в сочетании с эфирным маслом тимьяна или тмина эффективно подавляло заражение клубники *Botrytis* spp., превосходя по эффективности отдельные обработки, сохраняя при этом pH, кислотность, содержание аскорбиновой кислоты и органолептические качества [27]. В другом исследовании результаты показали, что эфирное масло тимьяна в сочетании с *L. plantarum* обладает синергетическими противогрибковыми свойствами против рода *Penicillium.* Данное комбинирование снижает минимальную ингибирующую концентрацию (МИК) против этих грибов в четыре раза и полностью останавливает их рост в семенах риса. Это показывает о том, что комбинация значительно эффективнее, чем каждое из этих веществ по отдельности [103].

Несмотря на многие преимущества, практическое применение сталкивается с рядом сложностей. Во-первых, необходимо тщательно контролировать совместимость эфирных масел и пробиотиков, поскольку избыточные концентрации эфирных масел могут снизить жизнеспособность пробиотиков – например, было показано, что уровни тимола выше 200 мкл/л оказывают цитотоксическое действие на молочнокислые бактерии (МКБ). Микрокапсуляция и стратегии контролируемого высвобождения могут смягчить этот антагонизм, обеспечивая пространственное и временное разделение биоактивных компонентов. Во-вторых, сложность пищевых матриц существенно влияет на эффективность антимикробных препаратов. Белки и липиды в мясных продуктах могут адсорбировать компоненты эфирных масел, снижая их биодоступность, а колебания pH в молочных продуктах могут снижать активность бактериоцинов. Это требует разработки специализированных рецептур, оптимизированных для конкретных пищевых продуктов, с целью обеспечения стабильной эффективности. Кроме того, необходимо проведение дальнейших научных исследований для более глубокой и комплексной оценки безопасности и качества продуктов, с целью установления нормативных требований и получения разрешения надзорных органов на применения в промышленных условиях.

Проблемы и перспективы

Несмотря на результаты лабораторных исследований, промышленное применение технологии консервирования на основе эфирных масел (ЭМ) по-прежнему ограничено такими факторами как стоимость обработки, изменчивость сырья и совместимость с существующей производственной инфраструктурой. Например, наноинкапсуляции и обработка холодной плазмой требуют специализированного оборудования и технических знаний, что увеличивает капитальные вложения и сложность эксплуатации. Кроме того,

поддержание биоактивности и равномерного распределения ЭМ в больших партиях различных пищевых продуктов представляет собой сложную задачу разработки рецептур. Для устранения этих барьеров требуются масштабируемые, экономически эффективные платформы для инкапсуляции и доставки, а также пилотные валидационные исследования в реальных промышленных условиях. Качество и безопасность остается основной проблемой при применении ЭМ в пищевых системах, особенно в отношении порогов токсичности, взаимодействия с компонентами пищевых продуктов и рисков долгосрочного воздействия. Хотя многие ЭМ имеют статус GRAS в FDA США, их одобрение и максимально допустимые концентрации значительно различаются в разных странах. Например, Европейское управление по безопасности пищевых продуктов (EFSA) устанавливает более строгие ограничения по остаткам и требует обширных токсикологических данных. Гармонизация основных нормативных стандартов и установление стандартизированных методов оценки будут иметь решающее значение для международного сотрудничества. Кроме того, превышение концентраций ЭМ могут вызывать цитотоксичность или изменять органолептические свойства пищевых продуктов. Будущие исследования должны быть направлены на оценку влияния различных концентраций на качество, профилирование метаболизма и аллергенности, а также оценку риска кумулятивного воздействия в различных демографических группах. Несмотря на натуральность эфирных масел, сильный аромат или видимые изменения внешнего вида продуктов могут восприниматься негативно потребителем. Более того, использование нанотехнологий или вирусных агентов биологического контроля (например, бактериофагов) совместно с эфирными маслами может вызывать обеспокоенность общественности относительно безопасности пищевых продуктов и их «неестественности». Поэтому проведение дегустаций, разъяснительная работа, доступная и достоверная информация на маркировке продуктов питания играют важнейшую роль в преодолении разрыва между эффективностью обработки и доверием потребителей.

Заключение

Анализ результатов научных исследований за последнее десятилетие показал, что интегрированные стратегии не только расширяют сферу применения эфирных растительных масел в сложных пищевых матрицах, но и повышают эффективность консервирования при низких дозах, тем самым повышая безопасность пищевых продуктов, продлевая срок годности и соответствуя тенденциям «чистой этикетки» и устойчивого развития в современной пищевой промышленности. Однако широкое промышленное использование интегрированных технологий на основе ЭМ затруднено по ряду проблем, включая сложность рецептур, отсутствие стандартизированных методов оценки, проблемы безопасности, связанные с некоторыми наноматериалами, несоответствия в нормативно-правовой базе и ограниченное понимание потребителями этих «невидимых технологий». Для решения данных проблем необходимы скоординированные действия научного сообщества, организаций здравоохранения и других государственных органов. Дальнейшие научные исследования должны быть направлены на разработку экологичных, масштабируемых методов инкапсуляции ЭМ, в первую очередь основанных на биоразлагаемых полимерах растительного происхождения или липидных носителях. Разработка интеллектуальных, чувствительных к стимулам наносистем доставки, способных высвобождать ЭМ в условиях окружающей среды, как pH, температура или микробная нагрузка, представляет собой важнейшее направление для прецизионного применения. Также ключевая задача заключается в оптимизации дозировки ЭМ для обеспечения антимикробной эффективности при минимизации неблагоприятного воздействия на вкус, аромат и текстуру пищевых продуктов. Кроме того, разработка стандартизированных методов испытаний в условиях, приближенных к реальным условиям обработки пищевых продуктов, будет иметь решающее значение для повышения воспроизводимости и валидации безопасности рецептур на основе эфирных масел и нанотехнологий. Глобальная гармонизация нормативно-правовой базы и более эффективное информирование потребителей о рисках посредством прозрачной маркировки и научно обоснованного информирования общественности будут иметь решающее значение для достижения более широкого признания на рынке и международного внедрения. Эти стратегии ускорят перенос синергетических систем консервирования на основе применения эфирных масел из лабораторных масштабов в устойчивое промышленное применение.

Финансирование

Данная работа финансировалась за счет средств бюджета БЕЛРОСАКВА. Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

Конфликт интересов
Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Открытый доступ
Эта статья распространяется на условиях международной лицензии Creative Commons Attribution 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), которая разрешает неограниченное использование, распространение и воспроизведение на любом носителе при условии, что вы предоставите соответствующие ссылки на автора(ов), источник и Лицензию Creative Commons и укажете, были ли внесены изменения.

Список литературы

1. Karoney E.M., Molelekoa T., Bill M., Siyoum N., Korsten L. Global Research Network Analysis of Fresh Produce Postharvest Technology: Innovative Trends for Loss Reduction // Postharvest Biology and Technology. 2024. Vol. 208. 112642. https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2023.112642.
2. Lisboa H.M., Pasquali M.B., dos Anjos A.I. et al. Innovative and Sustainable Food Preservation Techniques: Enhancing Food Quality, Safety, and Environmental Sustainability // Sustainability. 2024. Vol. 16, no. 18. 8223. https://doi.org/10.3390/su16188223.
3. Бурак Л.Ч., Ермошина Т.В., Саманкова Н.В. Достижение устойчивого развития за счет использования новых технологий переработки пищевых продуктов // Фундаментальные исследования. 2024. №10. С. 171–179. https://doi.org/10.17513/fr.43705.
4. Бурак Л.Ч., Сапач А.Н. Биологически активные вещества бузины: свойства, методы извлечения и сохранения // Пищевые системы. 2023. Т. 6, №1. С. 80–94. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2023-6-1-80-94.
5. Hanková K., Lupoměská P., Nový P., Všetečka D., Klouček P., Kouřimská L., Hlebová M., Božik M. Effect of Conventional Preservatives and Essential Oils on the Survival and Growth of *Escherichia coli* in Vegetable Sauces: A Comparative Study // Foods. 2023. Vol. 12. 2832. https://doi.org/10.3390/foods12152832.
6. Souza Pedrosa G.T., Carvalho R.J., Berdejo D., Souza E.L., Magnani M. Control of Autochthonous Spoilage Lactic Acid Bacteria in Apple and Orange Juices by Sensorially Accepted Doses of Citrus Spp. Essential Oils Combined With Mild Heat Treatments // Journal of Food Science. 2019. Vol. 84. Pp. 848–858. https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2020.108837.
7. Mohan A., Purohit A.S. Anti-Salmonella Activity of Pyruvic and Succinic Acid in Combination With Oregano Essential Oil // Food Control. 2020. Vol. 110. 106960. https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2019.106960.
8. Angane M., Swift S., Huang K., Butts C.A., Quek S.Y. Essential Oils and Their Major Components: An Updated Review on Antimicrobial Activities, Mechanism of Action and Their Potential Application in the Food Industry // Foods. 2022. Vol. 11, no. 3. 464. https://doi.org/10.3390/foods11030464.
9. Бурак Л.Ч. Обзор разработок биоразлагаемых упаковочных материалов для пищевой промышленности // Ползуновский вестник. 2023. №1. С. 91–105 https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2023.01.012.
10. Sani I.K., Aminoleslami L., Mirtalebi S.S. et al. Cold Plasma Technology: Applications in Improving Edible Films and Food Packaging // Food Packaging and Shelf Life. 2023. Vol. 37. 101087. https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2023.101087.
11. Amin U., Khan M.K.I., Maan A.A. et al. Biodegradable Active, Intelligent, and Smart Packaging Materials for Food Applications // Food Packaging and Shelf Life. 2022. Vol. 33. 100903. https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2022.100903.
12. Sobhy M., Abdelkarim E.A., Hussein M.A. et al. Essential Oils as Antibacterials Against Multidrug-Resistant Foodborne Pathogens: Mechanisms, Recent Advances, and Legal Considerations // Food Bioscience. 2025. Vol. 64. 105937. https://doi.org/10.1016/j.fbio.2025.105937.
13. Бурак Л.Ч. Влияние современных способов обработки и стерилизации на качество плодоовощного сырья и соковой продукции. М., 2025. 236 с. https://doi.org/10.12737/0.12737/2154991.
14. Hou T.Y., Sana S.S., Li H.Z. et al. Essential Oils and Its Antibacterial, Antifungal and Anti-Oxidant Activity Applications: A Review // Food Bioscience. 2022. Vol. 47. 101716. https://doi.org/10.1016/j.fbio.2022.101716.
15. Singh B.K., Maurya A. Antioxidant Activity of Essential Oils: A Mechanistic approach // Plant Essential Oils. Springer, 2024. Pp. 59–76. https://doi.org/10.1007/978-981-99-4370-8_3.
16. Hajibonabi A., Yekani M., Sharifi S., Sadri S., Nahad S., Maleki Dizaj M.Y. Memar Antimicrobial Activity of Nanoformulations of Carvacrol and Thymol: New Trend and Applications // OpenNano. 2023. Vol. 13. 100170. https://doi.org/10.1016/j.onano.2023.100170.
17. Shi C., Zhao X.C., Yan H.Y. et al. Effect of Tea Tree Oil on *Staphylococcus aureus* Growth and Enterotoxin Production // Food Control. 2016. Vol. 62. Pp. 257–263. https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2015.10.049.
18. Wu K.G., Zhang T., Chai X.H., Wang P.P., Duan X.J., Hu H.Y. Antibacterial Properties and Mechanism of 2-Methoxycinnamaldehyde Against Salmonella Enteritidis and Its Potential Application in Treating Raw Pork // LWT. 2025. Vol. 217. 117449. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2025.117449.
19. Yumura T., Nanjo T., Takemoto M. A Benzophenothiazine/Boronic Acid Hybrid Photocatalyst Enables the Single Electron Transfer (SET) to Carboxy Groups: SET-Initiated Cyclization of α, β-Unsaturated Carboxylic Acids // ACS Catalysis. 2023. Vol. 13, no. 19. Pp. 12803–12809. https://doi.org/10.1021/acscatal.3c03662.
20. Oliveira S.D.D.S., De Oliveira A.M., Silva E., Blank A.F. et al. Radical Scavenging Activity of the Essential Oils From Croton grewioides Baill Accessions and the Major Compounds Eugenol, Methyl Eugenol and Methyl Chavicol // Journal of Essential Oil Research. 2020. Vol. 33, no. 1. Pp. 94–103. https://doi.org/10.1080/10412905.2020.1779139.

21. Sharma K., Guleria S., Razdan V.K., Babu V. Synergistic Antioxidant and Antimicrobial Activities of Essential Oils of Some Selected Medicinal Plants in Combination and With Synthetic Compounds // Industrial Crops and Products. 2020. Vol. 154. 112569. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112569.
22. Vašková J., De Martino L., Caputo L., De Feo V. Two Representatives of Lamiaceae Essential Oils and Their Main Components Cause Changes in Glutathione Related Enzymatic Activities // Natural Product Research. 2020. Vol. 36, no. 2. Pp. 680–686. https://doi.org/10.1080/14786419.2020.1797728.
23. El Abdali Y., Beniaich G., Mahraz A.M. et al. Antibacterial, Antioxidant, and In Silico NADPH Oxidase Inhibition Studies of Essential Oils of Lavandula dentata Against Foodborne Pathogens // Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine. 2023. Vol. 11. 9766002. https://doi.org/10.1155/2023/9766002.
24. Shahbazi Y., Karami N., Shavisi N. Effect of Ziziphora clinopodioides Essential Oil on Shelf Life and Fate of Listeria monocytogenes and Staphylococcus aureus in Refrigerated Chicken Meatballs // Journal of Food Safety. 2018. Vol. 38. e12394. https://doi.org/10.1111/jfs.12394.
25. Бурак Л.Ч., Овсянникова Н.Л. Современные способы хранения и упаковки земляники садовой (Fragaria × ananassa Duch.) (обзор) // Современное садоводство. 2024. №3. С. 34–54. https://doi.org/10.12731/2312-6701-266171.
26. De Farias P.M., De Sousa R.V., Maniglia B.C. et al. Biobased Food Packaging Systems Functionalized With Essential Oil via Pickering Emulsion: Advantages, Challenges, and Current Applications // ACS Omega. 2025. Vol. 10, no. 5. Pp. 4173–4186. https://doi.org/10.1021/acsomega.4c09320.
27. Бурак Л.Ч., Сапач А.Н., Писарик М.И. Интеллектуальная упаковка для овощей и фруктов, классификация и перспективы использования: Обзор предметного поля // Health, Food & Biotechnology. 2023. Т. 5, №1. С. 51–80. https://doi.org/10.36107/hfb.2023.i1.s165.
28. Bill M., Pillai S.K., Tinyane P., Ray S.S., Sivakumar D. The Effect of Thyme Oil Low-Density Polyethylene Impregnated Pellets in Polylactic Acid Sachets on Storage Quality of Ready-to-Eat Avocado // Food and Bioprocess Technology. 2018. Vol. 11. Pp. 141–151. https://doi.org/10.1007/s11947-017-2001-5.
29. Azizi-Lalabadi M., Rahimzadeh-Sani Z., Feng J., Hosseini H., Jafari S.M. The Impact of Essential Oils on the Qualitative Properties, Release Profile, and Stimuli-Responsiveness of Active Food Packaging Nanocomposites // Critical Reviews in Food Science and Nutrition. 2023. Vol. 63, no. 13. Pp. 1822–1845. https://doi.org/10.1080/10408398.2021.1971154.
30. Sharma S., Barkauskaite S., Jaiswal A.K., Jaiswal S. Essential Oils as Additives in Active Food Packaging // Food Chemistry. 2021. Vol. 343. 128403. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128403.
31. Mohammadi A., Hashemi M., Hosseini S. The Control of Botrytis Fruit Rot in Strawberry Using Combined Treatments of Chitosan With Zataria multiflora or Cinnamomum zeylanicum Essential Oil // Journal of Food Science and Technology. 2015. Vol. 52. Pp. 7441–7448. https://doi.org/10.1007/s13197-015-1871-7.
32. Javidi Z., Hosseini S.F., Rezaei S.F. Development of Flexible Bactericidal Films Based on Poly (Lactic Acid) and Essential Oil and Its Effectiveness to Reduce Microbial Growth of Refrigerated Rainbow Trout // LWT. 2016. Vol. 72. Pp. 251–260. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2016.04.052.
33. MonteroY., Souza A.G., Oliveira E.R., Rosa D.S. Nanocellulose Functionalized With Cinnamon Essential Oil: A Potential Application in Active Biodegradable Packaging for Strawberry // Sustainable Materials and Technologies. 2021. Vol. 29. e00289. https://doi.org/10.1016/j.susmat.2021.e00289.
34. Daeialiakbar M., Yousefi S., Weisany W. Enhanced Properties of Chitosan-PVA Nanocomposite Films With Lemongrass Oil Microcapsules // Carbohydrate Polymer Technologies and Applications. 2025. Vol. 9. 100668. https://doi.org/10.1016/j.carpta.2025.100668.
35. Hosseinzadeh S., Partovi R., Talebi F. Chitosan/TiO_2 Nanoparticle/Cymbopogon citratus Essential Oil Film as Food Packaging Material: Physico-Mechanical Properties and Its Effects on Microbial, Chemical, and Organoleptic Quality of Minced Meat During Refrigeration // Journal of Food Processing and Preservation. 2020. Vol. 44. e14536. https://doi.org/10.1111/jfpp.14536.
36. Erceg T., Šovljanski O., Stupar A. et al. A Comprehensive Approach to Chitosan-Gelatine Edible Coating With β-Cyclodextrin/Lemongrass Essential Oil Inclusion Complex – Characterization and Food Application // International Journal of Biological Macromolecules. 2023. Vol. 228. Pp. 400–410. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.12.132.
37. Li C.Z., Chen W.Q., Siva S., Cui H.Y., Lin L. Electrospun Phospholipid Nanofibers Encapsulated With Cinnamaldehyde/HP-β-CD Inclusion Complex as a Novel Food Packaging Material // Food Packaging and Shelf Life. 2021. Vol. 28. 100647. https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2021.100647.
38. Ansarifar E., Moradinezhad F. Encapsulation of Thyme Essential Oil Using Electrospun Zein Fiber for Strawberry Preservation // Chemical and Biological Technologies in Agriculture. 2022. Vol. 9. 2. https://doi.org/10.1186/s40538-021-00267-y.
39. Perumal A.B., Nambiar R.B., Sellamuthu P.S., Emmanuel R.S. Use of Modified Atmosphere Packaging Combined With Essential Oils for Prolonging Post-Harvest Shelf Life of Mango (cv. Banganapalli and cv. Totapuri) // LWT. 2021. Vol. 148. 111662. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111662.
40. Kahramanoğlu I. Effects of Lemongrass Oil Application and Modified Atmosphere Packaging on the Postharvest Life and Quality of Strawberry Fruits // Scientia Horticulturae. 2019. Vol. 256. 108527. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.05.054.
41. Chen H.Q., Zhong Q.X. Physical and Antimicrobial Properties of Self-Emulsified Nanoemulsions Containing Three Synergistic Essential Oils // International Journal of Food Microbiology. 2022. Vol. 365. 109557. https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2022.109557.

42. Hadian M., Rajaei A., Mohsenifar A., Tabatabaei M. Encapsulation of Rosmarinus officinalis Essential Oils in Chitosan-Benzoic Acid Nanogel With Enhanced Antibacterial Activity in Beef Cutlet Against Salmonella Typhimurium During Refrigerated Storage // LWT. 2017. Vol. 84. Pp. 394–401. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.05.075.
43. Ghoflgar Ghasemi M.A., Hamishehkar H., Aavadi A., Homayouni-Rad A., Jafarizadeh-Malmiri H. Natural-Based Edible Nanocomposite Coating for Beef Meat Packaging // Food Chemistry. 2024. Vol. 435. 137582. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.137582.
44. He Q., Guo M.M., Jin T.Z., Arabi S., Liu D.H. Ultrasound Improves the Decontamination Effect of Thyme Essential Oil Nanoemulsions Against *Escherichia coli* O157: H7 on Cherry Tomatoes // International Journal of Food Microbiology. 2021. Vol. 337. 108936. https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2020.108936.
45. Su R.Y., Guo X.Y., Cheng S. et al. Inactivation of Salmonella Using Ultrasound in Combination With Litsea cubeba Essential Oil Nanoemulsion and Its Bactericidal Application on Cherry Tomatoes // Ultrasonics Sonochemistry. 2023. Vol. 98. 106481. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2023.106481.
46. Luo K.Y., Li Y.Z., Wang C. et al. Synergistic Bactericidal Effect of Ultrasound Combined With Oregano Essential Oil Nanoemulsion on *Listeria monocytogenes* and Its Application in Blueberry Preservation // Food Control. 2024. Vol. 165. 110619. https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2024.110619.
47. Chien S.Y., Sheen S., Sommers C., Sheen L.Y. Modeling the Inactivation of *Escherichia coli* O157:H7 and Uropathogenic *E. coli* in Ground Beef by High Pressure Processing and Citral // Food Control. 2017. Vol. 73. Pp. 672–680. https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2016.09.017.
48. Ahmed J., Mulla M., Arfat Y.A. Application of High-Pressure Processing and Polylactide/Cinnamon Oil Packaging on Chicken Sample for Inactivation and Inhibition of Listeria monocytogenes and Salmonella Typhimurium, and Post-Processing Film Properties // Food Control. 2017. Vol. 78. Pp. 160–168. https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2017.02.023.
49. Chai H.E., Sheen S. Effect of High Pressure Processing, Allyl Isothiocyanate, and Acetic Acid Stresses on Salmonella Survivals, Storage, and Appearance Color in Raw Ground Chicken Meat // Food Control. 2021. Vol. 123. 107784. https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2020.107784.
50. Cui H., Li W., Lin L. Antibacterial Activity of Liposome Containing Curry Plant Essential Oil Against Bacillus cereus in Rice // Journal of Food Safety. 2017. Vol. 37. e12302. https://doi.org/10.1111/jfs.12302.
51. Cui H.Y., Ma C.X., Lin L. Synergetic Antibacterial Efficacy of Cold Nitrogen Plasma and Clove Oil Against *Escherichia coli* O157:H7 Biofilms on Lettuce // Food Control. 2016. Vol. 66. Pp. 8–16. https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2016.01.035.
52. Akdemir Evrendilek G., Karaoğuz Turgut B. Processing and Preservation of Apple Juice by Pulsed Electric Fields Combined With Cinnamon Essential Oils: Exploring the Effect of Synergism // Journal of Food Safety. 2023. Vol. 43, no. 6. e13083. https://doi.org/10.1111/jfs.13083.
53. Pagán E., Berdejo D., Espina L., García-Gonzalo D., Pagán R. Antimicrobial Activity of Suspensions and Nanoemulsions of Citral in Combination With Heat or Pulsed Electric Fields // Letters in Applied Microbiology. 2018. Vol. 66, no. 1. Pp. 63–70. https://doi.org/10.1111/lam.12815.
54. Maung A.T., Abdelaziz M.N.S., Mohammadi T.N. et al. Single and Combined Application of Bacteriophage and Cinnamon Oils Against Pathogenic Listeria monocytogenes in Milk and Smoked Salmon // International Journal of Food Microbiology. 2024. Vol. 421. 110797. https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2024.110797.
55. Kim J., Kim S., Wang J., Ahn J. Synergistic Antimicrobial Activity of Essential Oils in Combination With Phage Endolysin Against Salmonella Typhimurium in Cooked Ground Beef // Food Control. 2024. Vol. 157. 110187. https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2023.110187.
56. Han S., Choi M.W., Byun K. et al. Characterization of Salmonella Ser. Enteritidis-Specific Bacteriophages and Biocontrol Strategy to Reduce S. Enteritidis on Egg Products Using Bacteriophages and Essential Oil Compounds // Food Control. 2024. Vol. 160. 110304. https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2024.110304.
57. Ni P., Wang L., Deng B. et al. Combined Application of Bacteriophages and Carvacrol in the Control of Pseudomonas syringae Pv. actinidiae Planktonic and Biofilm Forms // Microorganisms. 2020. Vol. 8. 837. https://doi.org/10.3390/microorganisms8060837.
58. Fathy S.S., Awad E.I., Abd-El S.F.A., Aal E.N., Tahoun A.B.M.B. Inhibitory Effect of Some Probiotic Strains and Essential Oils on the Growth of Some Foodborne Pathogens // Open Veterinary Journal. 2024. Vol. 14, no. 1. Pp. 470–480. https://doi.org/10.5455/OVJ.2024.v14.i1.43.
59. Fang Z.T., Yang Y.T., Lin S.M. et al. Development and Antimicrobial Activity of Composite Edible Films of Chitosan and Nisin Incorporated With Perilla Essential Oil-Glycerol Monolaurate Emulsions // Food Chemistry. 2025. Vol. 462. 141006. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.141006.
60. Бурак Л.Ч., Сапач А.Н. Инновационная упаковка для пищевых продуктов // Научное обозрение. Технические науки. 2023. №2. С. 50–57. https://doi.org/10.17513/srts.1434.
61. Grande-Tovar C.D., Chaves-Lopez C., Serio A., Rossi C., Paparella A. Chitosan Coatings Enriched With Essential Oils: Effects on Fungi Involved in Fruit Decay and Mechanisms of Action // Trends in Food Science & Technology. 2018. Vol. 78. Pp. 61–71. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.05.019.
62. He X., Li M., Gong X.C, Niu B.L., Li W.F. Biodegradable and Antimicrobial CSC Films Containing Cinnamon Essential Oil for Preservation Applications // Food Packaging and Shelf Life. 2021. Vol. 29. 100697. https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2021.100697.

63. Akhter R., Masoodi F.A., Wani T.A., Rather S.A. Functional Characterization of Biopolymer Based Composite Film: Incorporation of Natural Essential Oils and Antimicrobial Agents // International Journal of Biological Macromolecules. 2019. Vol. 137. Pp. 1245–1255. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.06.214.
64. Mohammadi M., Fasihi M. Eco-Friendly Polylactic Acid/Modified Thermoplastic Starch Films Enhanced With Clove Essential Oil and Cochineal for Dual-Functional Active and Intelligent Food Packaging // Carbohydrate Polymers. 2025. Vol. 354. 123320. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2025.123320.
65. Yue R., Zhang Y., Liu J., Sun J. Preparation of Steamed Purple Sweet Potato-Based Films Containing Mandarin Essential Oil for Smart Packaging // Molecules. 2024. Vol. 29, no. 10. 2314. https://doi.org/10.3390/molecules29102314.
66. Firmanda A., Fahma F., Warsiki E. et al. Antimicrobial Mechanism of Nanocellulose Composite Packaging Incorporated With Essential Oils // Food Control. 2023. Vol. 147. 109617. https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2023.109617.
67. Soufiani S.P., Yousefi S., Honarvar N., Weisany W., Asadi G. Polyvinyl Alcohol Films Incorporating Cellulose Nanocrystals, Chitosan, and Mesoporous Silica Nanoparticles for Enhanced Stability and Controlled Release of Beet Extracts // Carbohydrate Polymer Technologies and Applications. 2025. Vol. 10. 100740. https://doi.org/10.1016/j.carpta.2025.100740.
68. Couto C., Almeida A. Metallic Nanoparticles in the Food Sector: A Mini-Review // Foods. 2022. Vol. 11, no. 3. 402. https://doi.org/10.3390/foods11030402.
69. Weisany W., Soufiania S.P., Razmi J., Eshaghadadi A.H. Nano-Encapsulation of Fenugreek and Coriander Essential Oils Using Copper Oxide NPs: Novel Approach for Augmenting Their Effectiveness Against Colletotrichum nymphaeae // Industrial Crops and Products. 2024. Vol. 219. 119051. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.119051.
70. Hanan E., Dar A.H., Shams S., Goksen G. New Insights Into Essential Oil Nano Emulsions Loaded Natural Biopolymers Recent Development, Formulation, Characterization and Packaging Applications: A Comprehensive Review // International Journal of Biological Macromolecules. 2024. Vol. 280. 135751. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.135751.
71. Бурак Л.Ч. Использование современных технологий обработки для увеличения срока хранения фруктов и овощей. Обзор предметного поля // Ползуновский вестник. 2024. №1. С. 99–119. https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2024.01.013.
72. Zhu Y., Chen T., Meng Z.J. et al. Preparation and Characterization of a Novel Green Cinnamon Essential Oil Nanoemulsion for the Enhancement of Safety and Shelf-Life of Strawberries // International Journal of Food Microbiology. 2025. Vol. 427. 110935. https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2024.110935.
73. Huang H.T., Xv Z.M., Yang J.Y. et al. Preparation, Characterization of Basil Essential Oil Liposomes Unidirectional Single-Conducting Water Sustained-Release Pads and Their Preservation Properties to Lateolabrax japonicus Fillets // Food Chemistry. 2024. Vol. 440. 137835. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.137825.
74. Yousefi S., Weisany W., Hosseini S.E., Ghasemlou M. Mechanisms of Nanoencapsulation to Boost the Antimicrobial Efficacy of Essential Oils: A Review // Food Hydrocolloids. 2024. Vol. 150. 109655. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2023.109655.
75. Mukurumbira A.R., Shellie R.A., Keast R., Palombo E.A., Jadhav S.R. Encapsulation of Essential Oils and Their Application in Antimicrobial Active Packaging // Food Control. 2022. Vol. 136. 108883. https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2022.108883.
76. Lastra-Vargas L., Hernández-Nava R., Ruíz-González N., Jiménez-Munguía M.T., Palou E. Oregano Essential Oil as an Alternative Antimicrobial for the Control of Listeria monocytogenes and Salmonella in Turkey Mortadella During Refrigerated Storage // Food Chemistry Advances. 2023. Vol. 2. 100314. https://doi.org/10.1016/j.focha.2023.100314.
77. Prakash B., Kujur A., Yadav A., Kumar A., Singh N.K., Dubey P.P. Nanoencapsulation: An Efficient Technology to Boost the Antimicrobial Potential of Plant Essential Oils in Food System // Food Control. 2018. Vol. 89. Pp. 1–11. https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2018.01.018.
78. Das S., Singh D.K., Dwivedy A.K., Chaudhari A.K., Dubey N.K. Eugenol Loaded Chitosan Nanoemulsion for Food Protection and Inhibition of Aflatoxin B1 Synthesizing Genes Based on Molecular Docking // Carbohydrate Polymers. 2021. Vol. 255. 117339. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.117339.
79. Partheniadis I., Vergkizi S., Lazari D., Reppas C., Nikolakakis I. Formulation, Characterization and Antimicrobial Activity of Tablets of Essential Oil Prepared by Compression of Spray-Dried Powder // Journal of Drug Delivery Science and Technology. 2019. Vol. 50. Pp. 226–236. https://doi.org/10.1016/j.jddst.2019.01.031.
80. Бурак Л.Ч., Ермошина Т.В., Саманкова Н.В. Устойчивое производство. Концепция качества 4.0 // Фундаментальные исследования. 2025. №9. С. 81–90. https://doi.org/10.17513/fr.43905.
81. Kringel D.H., Lang G.H., Dias Á.R.G., Gandra E.A., da Rosa Zavareze E. Impact of Encapsulated Orange Essential Oil With β-Cyclodextrin on Technological, Digestibility, Sensory Properties of Wheat Cakes as Well as Aspergillus flavus Spoilage // Journal of the Science of Food and Agriculture. 2022. Vol. 101, no. 13. Pp. 5599–5607. https://doi.org/10.1002/jsfa.11211.
82. Chen H., Zhong Q. Physical and antimicrobial properties of self-emulsified nanoemulsions containing three synergistic essential oils // Int. J. Food Microbiol. 2022. Vol. 16. 109557 https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2022.109557.
83. Long Y., Huang W.Q., Wang Q.Y., Yang G.Y. Green Synthesis of Garlic Oil Nanoemulsion Using Ultrasonication Technique and Its Mechanism of Antifungal Action Against Penicillium italicum // Ultrasonics Sonochemistry. 2020. Vol. 64. 104970. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.104970.

84. Weisany W., Yousefi S., Soufiani S.P., Pashang D., McClements D.G., Ghasemlou M. Mesoporous Silica Nanoparticles: A Versatile Platform for Encapsulation and Delivery of Essential Oils for Food Applications // Advances in Colloid and Interface Science. 2024. Vol. 325. 103116. https://doi.org/10.1016/j.cis.2024.103116.
85. Keykhosravy K., Khanzadi S., Hashemi M., Azizzadeh M. Chitosan-Loaded Nanoemulsion Containing Zataria multiflora Boiss and Bunium persicum Boiss Essential Oils as Edible Coatings: Its Impact on Microbial Quality of Turkey Meat and Fate of Inoculated Pathogens // International Journal of Biological Macromolecules. 2020. Vol. 150. Pp. 904–913. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.02.092.
86. Бурак Л.Ч. Ограничения и возможности современных технологий по обеспечению микробиологической безопасности пищевых продуктов // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. 2024. №2-3(396). С. 6–13. https://doi.org/10.26297/0579-3009.2024.2-3.1.
87. Бурак Л.Ч., Сапач А.Н. Влияние действия ультразвука на функциональные свойства растительных белков. Обзор предметного поля // Химия растительного сырья. 2024. №4. С. 5–23. https://doi.org/10.14258/jcprm.20240413599.
88. Sharma M., Mann B., Pothuraju R., Sharma R., Kumar R. Physico-Chemical Characterization of Ultrasound Assisted Clove Oil-Loaded Nanoemulsion: As Enhanced Antimicrobial Potential // Biotechnology Reports. 2022. Vol. 34. e00720. https://doi.org/10.1016/j.btre.2022.e00720.
89. Ginez L. D., Osorio A., Vázquez-Ramírez R. et al. Changes in Fluidity of the E. coli Outer Membrane in Response to Temperature, Divalent Cations and Polymyxin-B Show Two Different Mechanisms of Membrane Fluidity Adaptation // The FEBS Journal. 2022. Vol. 289, no. 12. Pp. 3550–3567. https://doi.org/10.1111/febs.16358.
90. Бурак Л.Ч., Сапач А.Н., Завалей А.П. Влияние обработки холодной плазмой на качество и пищевую ценность растительного сырья. Обзор предметного поля // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2024. Т. 14, №2. С. 173–183. https://doi.org/10.21285/achb.914.
91. Ansari A., Parmar K., Shah M. A Comprehensive Study on Decontamination of Food-Borne Microorganisms by Cold Plasma // Food Chemistry: Molecular Sciences. 2022. Vol. 4. 100098. https://doi.org/10.1016/j.fochms.2022.100098.
92. Lin L., Liao X., Cui H.Y. Cold Plasma Treated Thyme Essential Oil/Silk Fibroin Nanofibers Against Salmonella Typhimurium in Poultry Meat // Food Packaging and Shelf Life. 2019. Vol. 21. 100337. https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2019.100337.
93. Cui H.Y., Wu J., Li C.Z., Lin L. Promoting Anti-Listeria Activity of Lemongrass Oil on Pork Loin by Cold Nitrogen Plasma Assist // Journal of Food Safety. 2017. Vol. 37. e12316. https://doi.org/10.1111/jfs.12316.
94. Yoo J.H., Baek K.H., Yong H.I., Jo C. Synergistic Bactericidal Effect of Clove Oil and Encapsulated Atmospheric Pressure Plasma Against Escherichia coli O157:H7 and Staphylococcus aureus and Its Mechanism of Action // Food Microbiology. 2021. Vol. 93. 103611. https://doi.org/10.1016/j.fm.2020.103611.
95. Clemente I., Condón-Abanto S. Pedrós-Garrido S., Whyte P., Lyng J.G. Efficacy of Pulsed Electric Fields and Antimicrobial Compounds Used Alone and in Combination for the Inactivation of Campylobacter jejuni in Liquids and Raw Chicken // Food Control. 2020. Vol. 107. 106491. https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2019.01.017.
96. Wang Q.Y., Zeng X.A., Liu Z.W, Brennan S.C. Variations in Cellular Membrane Fatty Acid Composition of Escherichia coli in Resistance to Pulsed Electric Fields Induced by Eugenol // Journal of Food Processing and Preservation. 2018. Vol. 42. e13740. https://doi.org/10.1111/jfpp.13740.
97. Meng F.Y., Cheng M.Z., Zhou Z.Q. et al. Application of Composite Biological Control Agent in Postharvest Preservation of Cherry Tomatoes // Physiological and Molecular Plant Pathology. 2025. Vol. 136. 102606. https://doi.org/10.1016/j.pmpp.2025.102606.
98. Nie X., Zuo Z., Zhang R. et al. New Advances in Biological Preservation Technology for Aquatic Products // NPJ Science of Food. 2025. Vol. 9. 15. https://doi.org/10.1038/s41538-025-00372-4.
99. Narayanan K.B., Bhaskar R., Han S.S. Bacteriophages: Natural Antimicrobial Bioadditives for Food Preservation in Active Packaging // International Journal of Biological Macromolecules. 2024. Vol. 276. 133945. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.133945.
100. Zhao M., Li H., Gan D., Wang M., Deng H., Yang Q.E. Antibacterial Effect of Phage Cocktails and Phage-Antibiotic Synergy Against Pathogenic Klebsiella pneumoniae // Msystems. 2024. Vol. 9, no. 9. e0060724. https://doi.org/10.1128/msystems.00607-24.
101. Elafify M., Mahmoud A.A., Wang X.Y., Zhang S., Ding T., Ahn J. Synergistic Antimicrobial Efficacy of Phage Cocktails and Essential Oils Against Escherichia coli // Microbial Pathogenesis. 2025. Vol. 200. 107330. https://doi.org/10.1016/j.micpath.2025.107330.
102. Singh B., Kumar N., Yadav A., Rohan, Bhandari K. Harnessing the Power of Bacteriocins: A Comprehensive Review on Sources, Mechanisms, and Applications in Food Preservation and Safety // Current Microbiology. 2025. Vol. 82. 174. https://doi.org/10.1007/s00284-025-04155-8.
103. Sriwattanachai S., Sadiq M.B., Anal A.K. Synergistic Antifungal Effects of Thyme Essential Oil and Lactobacillus plantarum Cell-Free Supernatant Against Penicillium Spp. and In Situ Effects // Journal of Food Processing and Preservation. 2018. Vol. 42. e13400. https://doi.org/10.1111/jfpp.13400.

Поступила в редакцию 24 ноября 2025 г.

После переработки 19 марта 2026 г.

Принята к публикации 20 мая 2026 г.

Burak L.Ch.[*], *Sapach A.N.* FOOD PRESERVATION BY COMBINING ESSENTIAL OILS AND INNOVATIVE TECHNOLOGIES. REVIEW

LLC "BELROSAKVA", st. Ponomarenko, 35A, Minsk, 220015, Republic of Belarus, leonidburak@gmail.com

The growing global demand for fresh food emphasizes the need for effective preservation methods. Widely used traditional processing methods ensure microbiological stability of foods but often reduce their nutritional value. The aim of this study is to review the results of combining plant-based essential oils with innovative technologies, including nanoencapsulation, edible coatings, modified atmosphere packaging, and modern non-thermal processing methods.

This study included scientific publications from 2015–2025. A scientific search and literature review were conducted in the bibliographic databases PubMed, Web of Science, and Google Scholar. Data from 103 scientific publications was analyzed using the methods of systematization, synthesis, interim conclusions, and overall conclusion.

Plant-based essential oils, known for their antimicrobial and antioxidant properties, are an effective natural alternative to various chemical preservatives. However, their volatility, instability, and compatibility issues limit their practical use. The combined use of essential oils with innovative processing technologies significantly enhances the stability and bioactivity of essential oils, while simultaneously improving their efficacy in various food products. The underlying mechanisms of this synergy increase their potential for ensuring food safety, extending shelf life, and reducing dependence on synthetic preservatives.

Modern innovative technologies represent a significant step toward more sustainable food preservation methods that meet consumer demands. However, despite the significant advantages of combined technologies, challenges associated with their widespread industrial implementation remain. Further research should be aimed at developing environmentally friendly, scalable methods for essential oil encapsulation based on biodegradable plant-based polymers or lipid carriers.

Keywords: essential oils, synergy, quality, safety, nanotechnology, active packaging, ultrasound, cold plasma, pulsed electric field.

For citing: Burak L.Ch., Sapach A.N. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya*, 2026, no. 4, pp. 25–51. (in Russ.). https://doi.org/10.14258/jcprm.20260418259.

References

1. Karoney E.M., Molelekoa T., Bill M., Siyoum N., Korsten L. *Postharvest Biology and Technology*, 2024, vol. 208, 112642. https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2023.112642.
2. Lisboa H.M., Pasquali M.B., dos Anjos A.I. et al. *Sustainability*, 2024, vol. 16, no. 18, 8223. https://doi.org/10.3390/su16188223.
3. Burak L.Ch., Yermoshina T.V., Samankova N.V. *Fundamental'nyye issledovaniya*, 2024, no. 10, pp. 171–179. https://doi.org/10.17513/fr.43705. (in Russ.).
4. Burak L.Ch., Sapach A.N. *Pishchevyye sistemy*, 2023, vol. 6, no. 1, pp. 80–94. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2023-6-1-80-94. (in Russ.).
5. Hanková K., Lupoměská P., Nový P., Všetečka D., Klouček P., Kouřimská L., Hlebová M., Božik M. *Foods*, 2023, vol. 12, 2832. https://doi.org/10.3390/foods12152832.
6. Souza Pedrosa G.T., Carvalho R.J., Berdejo D., Souza E.L., Magnani M. *Journal of Food Science*, 2019, vol. 84, pp. 848–858. https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2020.108837.
7. Mohan A., Purohit A.S. *Food Control*, 2020, vol. 110, 106960. https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2019.106960.
8. Angane M., Swift S., Huang K., Butts C.A., Quek S.Y. *Foods*, 2022, vol. 11, no. 3, 464. https://doi.org/10.3390/foods11030464.
9. Burak L.Ch. *Polzunovskiy vestnik*, 2023, no. 1, pp. 91–105 https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2023.01.012. (in Russ.).
10. Sani I.K., Aminoleslami L., Mirtalebi S.S. et al. *Food Packaging and Shelf Life*, 2023, vol. 37, 101087. https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2023.101087.
11. Amin U., Khan M.K.I., Maan A.A. et al. *Food Packaging and Shelf Life*, 2022, vol. 33, 100903. https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2022.100903.
12. Sobhy M., Abdelkarim E.A., Hussein M.A. et al. *Food Bioscience*, 2025, vol. 64, 105937. https://doi.org/10.1016/j.fbio.2025.105937.
13. Burak L.Ch. *Vliyaniye sovremennykh sposobov obrabotki i sterilizatsii na kachestvo plodoovoshchnogo syr'ya i sokovoy produktsii*. [The influence of modern processing and sterilization methods on the quality of fruit and vegetable raw materials and juice products]. Moscow, 2025, 236 p. https://doi.org/10.12737/0.12737/2154991. (in Russ.).
14. Hou T.Y., Sana S.S., Li H.Z. et al. *Food Bioscience*, 2022, vol. 47, 101716. https://doi.org/10.1016/j.fbio.2022.101716.
15. Singh B.K., Maurya A. *Plant Essential Oils*. Springer, 2024, pp. 59–76. https://doi.org/10.1007/978-981-99-4370-8_3.
16. Hajibonabi A., Yekani M., Sharifi S., Sadri S., Nahad S., Maleki Dizaj M.Y. *OpenNano*, 2023, vol. 13, 100170. https://doi.org/10.1016/j.onano.2023.100170.
17. Shi C., Zhao X.C., Yan H.Y. et al. *Food Control*, 2016, vol. 62, pp. 257–263. https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2015.10.049.
18. Wu K.G., Zhang T., Chai X.H., Wang P.P., Duan X.J., Hu H.Y. *LWT*, 2025, vol. 217, 117449. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2025.117449.
19. Yumura T., Nanjo T., Takemoto M. *ACS Catalysis*, 2023, vol. 13, no. 19, pp. 12803–12809. https://doi.org/10.1021/acscatal.3c03662.

[*] Corresponding author.

20. Oliveira S.D.D.S., De Oliveira A.M., Silva E., Blank A.F. et al. *Journal of Essential Oil Research*, 2020, vol. 33, no. 1, pp. 94–103. https://doi.org/10.1080/10412905.2020.1779139.
21. Sharma K., Guleria S., Razdan V.K., Babu V. *Industrial Crops and Products*, 2020, vol. 154, 112569. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112569.
22. Vašková J., De Martino L., Caputo L., De Feo V. *Natural Product Research*, 2020, vol. 36, no. 2, pp. 680–686. https://doi.org/10.1080/14786419.2020.1797728.
23. El Abdali Y., Beniaich G., Mahraz A.M. et al. *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*, 2023, vol. 11, 9766002. https://doi.org/10.1155/2023/9766002.
24. Shahbazi Y., Karami N., Shavisi N. *Journal of Food Safety*, 2018, vol. 38, e12394. https://doi.org/10.1111/jfs.12394.
25. Burak L.Ch., Ovsyannikova N.L. *Sovremennoye sadovodstvo*, 2024, no. 3, pp. 34–54. https://doi.org/10.12731/2312-6701-266171. (in Russ.).
26. De Farias P.M., De Sousa R.V., Maniglia B.C. et al. *ACS Omega*, 2025, vol. 10, no. 5, pp. 4173–4186. https://doi.org/10.1021/acsomega.4c09320.
27. Burak L.Ch., Sapach A.N., Pisarik M.I. *Health, Food & Biotechnology*, 2023, vol. 5, no. 1, pp. 51–80. https://doi.org/10.36107/hfb.2023.i1.s165. (in Russ.).
28. Bill M., Pillai S.K., Tinyane P., Ray S.S., Sivakumar D. *Food and Bioprocess Technology*, 2018, vol. 11, pp. 141–151. https://doi.org/10.1007/s11947-017-2001-5.
29. Azizi-Lalabadi M., Rahimzadeh-Sani Z., Feng J., Hosseini H., Jafari S.M. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2023, vol. 63, no. 13, pp. 1822–1845. https://doi.org/10.1080/10408398.2021.1971154.
30. Sharma S., Barkauskaite S., Jaiswal A.K., Jaiswal S. *Food Chemistry*, 2021, vol. 343, 128403. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128403.
31. Mohammadi A., Hashemi M., Hosseini S. *Journal of Food Science and Technology*, 2015, vol. 52, pp. 7441–7448. https://doi.org/10.1007/s13197-015-1871-7.
32. Javidi Z., Hosseini S.F., Rezaei S.F. *LWT*, 2016, vol. 72, pp. 251–260. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2016.04.052.
33. MonteroY., Souza A.G., Oliveira E.R., Rosa D.S. *Sustainable Materials and Technologies*, 2021, vol. 29, e00289. https://doi.org/10.1016/j.susmat.2021.e00289.
34. Daeialiakbar M., Yousefi S., Weisany W. *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*, 2025, vol. 9, 100668. https://doi.org/10.1016/j.carpta.2025.100668.
35. Hosseinzadeh S., Partovi R., Talebi F. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2020, vol. 44, e14536. https://doi.org/10.1111/jfpp.14536.
36. Erceg T., Šovljanski O., Stupar A. et al. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2023, vol. 228, pp. 400–410. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.12.132.
37. Li C.Z., Chen W.Q., Siva S., Cui H.Y., Lin L. *Food Packaging and Shelf Life*, 2021, vol. 28, 100647. https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2021.100647.
38. Ansarifar E., Moradinezhad F. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 2022, vol. 9, 2. https://doi.org/10.1186/s40538-021-00267-y.
39. Perumal A.B., Nambiar R.B., Sellamuthu P.S., Emmanuel R.S. *LWT*, 2021, vol. 148, 111662. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111662.
40. Kahramanoğlu I. *Scientia Horticulturae*, 2019, vol. 256, 108527. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.05.054.
41. Chen H.Q., Zhong Q.X. *International Journal of Food Microbiology*, 2022, vol. 365, 109557. https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2022.109557.
42. Hadian M., Rajaei A., Mohsenifar A., Tabatabaei M. *LWT*, 2017, vol. 84, pp. 394–401. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.05.075.
43. Ghoflgar Ghasemi M.A., Hamishehkar H., Aavadi A., Homayouni-Rad A., Jafarizadeh-Malmiri H. *Food Chemistry*, 2024, vol. 435, 137582. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.137582.
44. He Q., Guo M.M., Jin T.Z., Arabi S., Liu D.H. *International Journal of Food Microbiology*, 2021, vol. 337, 108936. https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2020.108936.
45. Su R.Y., Guo X.Y., Cheng S. et al. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2023, vol. 98, 106481. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2023.106481.
46. Luo K.Y., Li Y.Z., Wang C. et al. *Food Control*, 2024, vol. 165, 110619. https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2024.110619.
47. Chien S.Y., Sheen S., Sommers C., Sheen L.Y. *Food Control*, 2017, vol. 73, pp. 672–680. https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2016.09.017.
48. Ahmed J., Mulla M., Arfat Y.A. *Food Control*, 2017, vol. 78, pp. 160–168. https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2017.02.023.
49. Chai H.E., Sheen S. *Food Control*, 2021, vol. 123, 107784. https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2020.107784.
50. Cui H., Li W., Lin L. *Journal of Food Safety*, 2017, vol. 37, e12302. https://doi.org/10.1111/jfs.12302.
51. Cui H.Y., Ma C.X., Lin L. *Food Control*, 2016, vol. 66, pp. 8–16. https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2016.01.035.
52. Akdemir Evrendilek G., Karaoğuz Turgut B. *Journal of Food Safety*, 2023, vol. 43, no. 6, e13083. https://doi.org/10.1111/jfs.13083.
53. Pagán E., Berdejo D., Espina L., García-Gonzalo D., Pagán R. *Letters in Applied Microbiology*, 2018, vol. 66, no. 1, pp. 63–70. https://doi.org/10.1111/lam.12815.

54. Maung A.T., Abdelaziz M.N.S., Mohammadi T.N. et al. *International Journal of Food Microbiology*, 2024, vol. 421, 110797. https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2024.110797.
55. Kim J., Kim S., Wang J., Ahn J. *Food Control*, 2024, vol. 157, 110187. https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2023.110187.
56. Han S., Choi M.W., Byun K. et al. *Food Control*, 2024, vol. 160, 110304. https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2024.110304.
57. Ni P., Wang L., Deng B. et al. *Microorganisms*, 2020, vol. 8, 837. https://doi.org/10.3390/microorganisms8060837.
58. Fathy S.S., Awad E.I., Abd-El S.F.A., Aal E.N., Tahoun A.B.M.B. *Open Veterinary Journal*, 2024, vol. 14, no. 1, pp. 470–480. https://doi.org/10.5455/OVJ.2024.v14.i1.43.
59. Fang Z.T., Yang Y.T., Lin S.M. et al. *Food Chemistry*, 2025, vol. 462, 141006. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.141006.
60. Burak L.Ch., Sapach A.N. *Nauchnoye obozreniye. Tekhnicheskiye nauki*, 2023, no. 2, pp. 50–57. https://doi.org/10.17513/srts.1434. (in Russ.).
61. Grande-Tovar C.D., Chaves-Lopez C., Serio A., Rossi C., Paparella A. *Trends in Food Science & Technology*, 2018, vol. 78, pp. 61–71. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.05.019.
62. He X., Li M., Gong X.C, Niu B.L., Li W.F. *Food Packaging and Shelf Life*, 2021, vol. 29, 100697. https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2021.100697.
63. Akhter R., Masoodi F.A., Wani T.A., Rather S.A. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2019, vol. 137, pp. 1245–1255. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.06.214.
64. Mohammadi M., Fasihi M. *Carbohydrate Polymers*, 2025, vol. 354, 123320. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2025.123320.
65. Yue R., Zhang Y., Liu J., Sun J. *Molecules*, 2024, vol. 29, no. 10, 2314. https://doi.org/10.3390/molecules29102314.
66. Firmanda A., Fahma F., Warsiki E. et al. *Food Control*, 2023, vol. 147, 109617. https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2023.109617.
67. Soufiani S.P., Yousefi S., Honarvar N., Weisany W., Asadi G. *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*, 2025, vol. 10, 100740. https://doi.org/10.1016/j.carpta.2025.100740.
68. Couto C., Almeida A. *Foods*, 2022, vol. 11, no. 3, 402. https://doi.org/10.3390/foods11030402.
69. Weisany W., Soufiania S.P., Razmi J., Eshaghadadi A.H. *Industrial Crops and Products*, 2024, vol. 219, 119051. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.119051.
70. Hanan E., Dar A.H., Shams S., Goksen G. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2024, vol. 280, 135751. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.135751.
71. Burak L.Ch. *Polzunovskiy vestnik*, 2024, no. 1, pp. 99–119. https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2024.01.013. (in Russ.).
72. Zhu Y., Chen T., Meng Z.J. et al. *International Journal of Food Microbiology*, 2025, vol. 427, 110935. https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2024.110935.
73. Huang H.T., Xv Z.M., Yang J.Y. et al. *Food Chemistry*, 2024, vol. 440, 137835. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.137825.
74. Yousefi S., Weisany W., Hosseini S.E., Ghasemlou M. *Food Hydrocolloids*, 2024, vol. 150, 109655. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2023.109655.
75. Mukurumbira A.R., Shellie R.A., Keast R., Palombo E.A., Jadhav S.R. *Food Control*, 2022, vol. 136, 108883. https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2022.108883.
76. Lastra-Vargas L., Hernández-Nava R., Ruíz-González N., Jiménez-Munguía M.T., Palou E. *Food Chemistry Advances*, 2023, vol. 2, 100314. https://doi.org/10.1016/j.focha.2023.100314.
77. Prakash B., Kujur A., Yadav A., Kumar A., Singh N.K., Dubey P.P. *Food Control*, 2018, vol. 89, pp. 1–11. https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2018.01.018.
78. Das S., Singh D.K., Dwivedy A.K., Chaudhari A.K., Dubey N.K. *Carbohydrate Polymers*, 2021, vol. 255, 117339. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.117339.
79. Partheniadis I., Vergkizi S., Lazari D., Reppas C., Nikolakakis I. *Journal of Drug Delivery Science and Technology*, 2019, vol. 50, pp. 226–236. https://doi.org/10.1016/j.jddst.2019.01.031.
80. Burak L.Ch., Yermoshina T.V., Samankova N.V. *Fundamental'nyye issledovaniya*, 2025, no. 9, pp. 81–90. https://doi.org/10.17513/fr.43905. (in Russ.).
81. Kringel D.H., Lang G.H., Dias Á.R.G., Gandra E.A., da Rosa Zavareze E. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2022, vol. 101, no. 13, pp. 5599–5607. https://doi.org/10.1002/jsfa.11211.
82. Chen H., Zhong Q. *Int. J. Food Microbiol*., 2022, vol. 16, 109557 https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2022.109557.
83. Long Y., Huang W.Q., Wang Q.Y., Yang G.Y. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2020, vol. 64, 104970. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.104970.
84. Weisany W., Yousefi S., Soufiani S.P., Pashang D., McClements D.G., Ghasemlou M. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2024, vol. 325, 103116. https://doi.org/10.1016/j.cis.2024.103116.
85. Keykhosravy K., Khanzadi S., Hashemi M., Azizzadeh M. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2020, vol. 150, pp. 904–913. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.02.092.
86. Burak L.Ch. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Pishchevaya tekhnologiya*, 2024, no. 2-3(396), pp. 6–13. https://doi.org/10.26297/0579-3009.2024.2-3.1. (in Russ.).

87. Burak L.Ch., Sapach A.N. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*, 2024, no. 4, pp. 5–23. https://doi.org/10.14258/jcprm.20240413599. (in Russ.).
88. Sharma M., Mann B., Pothuraju R., Sharma R., Kumar R. *Biotechnology Reports*, 2022, vol. 34, e00720. https://doi.org/10.1016/j.btre.2022.e00720.
89. Ginez L. D., Osorio A., Vázquez-Ramírez R. et al. *The FEBS Journal*, 2022, vol. 289, no. 12, pp. 3550–3567. https://doi.org/10.1111/febs.16358.
90. Burak L.Ch., Sapach A.N., Zavaley A.P. *Izvestiya vuzov. Prikladnaya khimiya i biotekhnologiya*, 2024, vol. 14, no. 2, pp. 173–183. https://doi.org/10.21285/achb.914. (in Russ.).
91. Ansari A., Parmar K., Shah M. *Food Chemistry: Molecular Sciences*, 2022, vol. 4, 100098. https://doi.org/10.1016/j.fochms.2022.100098.
92. Lin L., Liao X., Cui H.Y. *Food Packaging and Shelf Life*, 2019, vol. 21, 100337. https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2019.100337.
93. Cui H.Y., Wu J., Li C.Z., Lin L. *Journal of Food Safety*, 2017, vol. 37, e12316. https://doi.org/10.1111/jfs.12316.
94. Yoo J.H., Baek K.H., Yong H.I., Jo C. *Food Microbiology*, 2021, vol. 93, 103611. https://doi.org/10.1016/j.fm.2020.103611.
95. Clemente I., Condón-Abanto S. Pedrós-Garrido S., Whyte P., Lyng J.G. *Food Control*, 2020, vol. 107, 106491. https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2019.01.017.
96. Wang Q.Y., Zeng X.A., Liu Z.W, Brennan S.C. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2018, vol. 42, e13740. https://doi.org/10.1111/jfpp.13740.
97. Meng F.Y., Cheng M.Z., Zhou Z.Q. et al. *Physiological and Molecular Plant Pathology*, 2025, vol. 136, 102606. https://doi.org/10.1016/j.pmpp.2025.102606.
98. Nie X., Zuo Z., Zhang R. et al. *NPJ Science of Food*, 2025, vol. 9, 15. https://doi.org/10.1038/s41538-025-00372-4.
99. Narayanan K.B., Bhaskar R., Han S.S. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2024, vol. 276, 133945. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.133945.
100. Zhao M., Li H., Gan D., Wang M., Deng H., Yang Q.E. *Msystems*, 2024, vol. 9, no. 9, e0060724. https://doi.org/10.1128/msystems.00607-24.
101. Elafify M., Mahmoud A.A., Wang X.Y., Zhang S., Ding T., Ahn J. *Microbial Pathogenesis*, 2025, vol. 200, 107330. https://doi.org/10.1016/j.micpath.2025.107330.
102. Singh B., Kumar N., Yadav A., Rohan, Bhandari K. *Current Microbiology*, 2025, vol. 82, 174. https://doi.org/10.1007/s00284-025-04155-8.
103. Sriwattanachai S., Sadiq M.B., Anal A.K. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2018, vol. 42, e13400. https://doi.org/10.1111/jfpp.13400.

Received November 24, 2025

Revised March 19, 2026

Accepted May 20, 2026

Сведения об авторах

Бурак Леонид Чеславович – доктор философии в области пищевых наук, кандидат технических наук, директор, leonidburak@gmail.com

Сапач Александр Николаевич – инженер-химик, sapabra7@gmail.com

Information about authors

Burak Leonid Cheslavovich – PhD in Food Sciences, Candidate of Technical Sciences, Director, leonidburak@gmail.com

Sapach Aleksandr Nikolayevich – Chemical Engineer, sapabra7@gmail.com