

## НАУЧНЫЙ ОБЗОР

УДК 664.8

## ИННОВАЦИОННАЯ УПАКОВКА ДЛЯ ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ

Бурак Л.Ч., Сапач А.Н.

*ООО «Белросаква», Минск, e-mail: leonidburak@gmail.com, alexander@belrosakva.by*

Существенное влияние на качество и безопасность пищевых продуктов, а также срок годности продукта и привлекательность для покупателя оказывает упаковка. Традиционная пищевая упаковка обеспечивает защиту продуктов питания от порчи в процессе хранения пищевых продуктов до момента их употребления. Многие годы пластиковые пленки использовались в качестве барьера для защиты пищевых продуктов от тепла, влаги, микроорганизмов, пыли и частиц грязи. Научные исследования последних десятилетий и промышленное внедрение включают в себя дополнительные функции барьерных пленок для увеличения срока годности пищевых продуктов, такие как активная упаковка и интеллектуальная упаковка. Кроме того, восприятие потребителя влияет на упаковочные материалы, дизайн, и немаловажное значение имеет экологическая составляющая. Благодаря развитию прикладных технологий в пищевой промышленности появилась устойчивая упаковка, удовлетворяющая требованиям потребителей к экологически чистой продукции. В данной обзорной статье рассмотрены вопросы, касающиеся значения упаковки пищевых продуктов в отношении качества и безопасности пищевых продуктов. Проведен краткий критический обзор научных публикаций по разработке и применению передовых интеллектуальных, активных и интеллектуальных систем упаковки, их преимуществам и недостаткам, а также свойствам кислородного барьера.

**Ключевые слова:** активная упаковка, полимеры, интеллектуальная упаковка, качество, безопасность, пищевые продукты, прикладные технологии, потребитель

## INNOVATIVE FOOD PACKAGING

Burak L.Ch., Sapach A.N.

*LLC Belrosakva, Minsk, e-mail: leonidburak@gmail.com, alexander@belrosakva.by*

Packaging has a significant impact on the quality and safety of food products, as well as the shelf life of the product and attractiveness to the buyer. Traditional food packaging protects food from spoilage during the storage of food until it is consumed. For many years, plastic films have been used as a barrier to protect food from heat, moisture, micro-organisms, dust and dirt particles. Recent decades of scientific research and industrial adoption include additional features of barrier films to extend food shelf life, such as active packaging and smart packaging. In addition, consumer perceptions affect packaging materials, design and environmental considerations. Thanks to the development of applied technologies in the food industry, sustainable packaging has appeared that meets the requirements of consumers in environmentally friendly products. This review article addresses issues related to the importance of food packaging in relation to food quality and safety. A brief critical review of scientific publications on the development and application of advanced intelligent, active and intelligent packaging systems, their advantages and disadvantages, as well as the properties of the oxygen barrier was carried out.

**Keywords:** active packaging, polymers, intelligent packaging, quality, safety, food products, applied technologies, consumer

Технологический процесс производства пищевых продуктов включает в себя многие основные этапы, одними из которых являются подготовка сырья, обработка и упаковка. Упаковка оказывает существенное влияние на качество, безопасность пищевых продуктов, сохранение потребительского качества продукта и срок его годности. Основные задачи любой упаковки: обеспечивать надлежащую сохранность продукта в процессе хранения, транспортировки и реализации потребителю; обеспечивать защиту от физических повреждений, процессов химической и микробиологической порчи; хранить пищевые продукты до момента их потребления в течение всего срока годности, а также содержать всю необходимую информацию для потребителя в соответствии с требованиями законодательных актов и ТНПА [1, 2].

В последние годы в пищевой промышленности для упаковки стали применяться биоактивные пленки и умные технологии

[3–5]. Пластиковые пленки, благодаря их малому весу, простоте обработки и низкой стоимости, стали наиболее приемлемыми для применения в упаковке пищевых продуктов. Достижения последнего десятилетия включают в себя дополнительные функциональные возможности барьерных пленок для увеличения срока годности пищевых продуктов, такие как активная упаковка и интеллектуальная упаковка [6–9]. Данные виды упаковки позволяют обеспечить увеличение срока годности пищевых продуктов за счет упрощения производственных процессов или сохранения пищевых продуктов с минимальным использованием консервантов [10].

Восприятие потребителя и его требования влияют на упаковочные материалы и дизайн [11]. Доля потребителей, предпочитающих экологически чистую упаковку и минимально обработанные продукты, существенно возрастает [12]. В ответ на предпочтения потребителей и экологические

проблемы развиваются прикладные технологии и внедряются в промышленное пищевое производство [13].

Цель данной статьи – обзор опубликованных, в основном за последние 10 лет, научных исследований, в которых рассматриваются важность упаковки пищевых продуктов в отношении качества и безопасности пищевых продуктов; применение упаковки из полимеров (на нефтяной и биологической основе); разработка и применение передовых интеллектуальных, активных и интеллектуальных упаковочных систем и, кроме того, свойства кислородного барьера.

#### *Полимеры для пищевой упаковки*

Полимеры широко используются для упаковки пищевых продуктов из-за простоты производства, прочных молекулярных сетей или сшивания и качественных эксплуатационных характеристик (например, прочности, барьера для кислорода и влаги и устойчивости к воздействию пищевых компонентов) [14–17]. Полимеры бывают биоразлагаемые и небiorазлагаемые. Полипропилен (ПП), полиэтилен (ПЭ), полиэтилен-со-винилацетат (ПЭСА), поливинилхлорид (ПВХ) и полиэтилентерефталат (ПЭТ) не являются биоразлагаемыми полимерами, которые обычно используются в упаковке активных пищевых продуктов [18]. Целлюлоза, хитозан, крахмал, агар, желатин, соевый белок и белок молочной сыворотки являются биоразлагаемыми полимерами на природной основе [19], которые имеют преимущества перед полимерами на нефтяной основе с точки зрения потребителя и экологической безопасности.

Биоразлагаемые, устойчивые и широкодоступные полимеры подразделяются на полимеры полисахаридного типа и полимеры на основе белков [20, 21]. Среди полимеров полисахаридного типа целлюлоза представляет собой полисахарид, состоящий из линейной цепи  $\beta$ -1,4 связанных звеньев D-глюкозы. Хитозан представляет собой линейный полисахарид, состоящий из случайных  $\beta$ -1,4-связанных D-глюкозамина и N-ацетил-D-глюкозамина. Целлюлоза и хитозан широко используются для упаковки пищевых продуктов благодаря их хорошей пленко- и гелеобразующей способности, возможности вторичной переработки и присущим им антимикробным свойствам [21]. Крахмал состоит из линейных и разветвленных звеньев D-глюкозы, связанных  $\alpha$ -1,4 и  $\alpha$ -1,6 гликозидными связями; его можно использовать для упаковки пищевых продуктов в качестве клея и добавки. Имеющиеся в продаже крахмал и крахмальные смеси включают Ecofram<sup>TM</sup>, Solanyl<sup>TM</sup>, Biocool<sup>TM</sup>, Bioplast

<sup>TM</sup> и Pantic<sup>TM</sup> [2]. Полимеры белкового типа, например соевый белок, обладают широким спектром функциональных свойств по сравнению с пленками на белковой основе из-за потенциала межмолекулярного связывания через ковалентные связи [20]. Желатин обладает сильной пленкообразующей способностью и широко используется из-за его доступности [22].

Смесь полимолочной кислоты (ПМК) представляет собой синтетический термопластичный полиэфир. Это промышленный экологически чистый биоразлагаемый полимер в сочетании с противомикробными агентами для формирования пленок на основе ПМК, используемых для упаковки сухих и скоропортящихся пищевых продуктов, обычно продуктов с коротким сроком хранения, таких как фрукты, овощи и мясо [2, 21, 22].

#### *Умные системы упаковки пищевых продуктов*

Быстрорастущее потребление упакованных продуктов питания и напитков привело к инновационным системам упаковки из-за увеличения сложности продукта, глобализации продуктов питания и потребностей потребителей в экологически чистой упаковке. В результате на мировом рынке появились умная упаковка, активная упаковка и интеллектуальная упаковка со своими приложениями.

Умные упаковочные системы широко используются в продуктах питания и напитках, товарах медицинского назначения, средствах личной гигиены и т.д., которые могут отслеживать физико-химические воздействия, такие как условия окружающей среды, а также предотвращать микробиологические изменения. Активная упаковка и интеллектуальная упаковка, которые подробно обсуждаются ниже, являются видами интеллектуальной упаковки.

#### *Активная пищевая упаковка*

Система активной упаковки – это передовая технология, в которой активные компоненты (например, антиоксиданты) внедряются в полимерную матрицу упаковки [23]. Затем полимерная матрица высвобождает или поглощает вещества из консервированных пищевых продуктов или окружающей среды или в них, чтобы поддерживать и продлевать срок годности пищевых продуктов. Система функционирует как полимерная матрица, основанная на полимеризации полимеров или биополимеров и биоактивных веществ, высвобождаемых естественным путем в пищу или окружающую среду [10].

Активная упаковка для пищевых продуктов представляет собой хороший потенциал для поддержания качества и безопасности пищевых продуктов, особенно продуктов, чувствительных к окислению. Активные агенты для упаковки пищевых продуктов включают противомикробные препараты, антиоксиданты, излучатели/поглотители углекислого газа, поглотители кислорода и поглотители этилена [11].

#### *Антимикробные препараты*

Антимикробная упаковка интегрирует противомикробные агенты в полимерную пленку для подавления целевого микробного действия. Противомикробные агенты, такие как органические кислоты (например, бензойная кислота), ферменты (например, лизоцим), бактериоцины, фунгициды и поглотители кислорода (например, бутилированный

гидрокситолуол), широко используются в системах упаковки пищевых продуктов для предотвращения роста патогенных микроорганизмов во время хранения, производства, транспортировки и хранения пищевых продуктов. Преимуществом метода является контролируемое высвобождение в виде пролонгированного или медленного высвобождения активных веществ в течение постулируемого периода. Антимикробная упаковка применяется для пищевых продуктов без консервантов, в которых наиболее вероятно развитие патогенных микроорганизмов, таких как хлеб, торт, сыр и мясо [24].

Химические добавки постепенно заменяются природными соединениями, такими как фитохимические вещества, бактериоцины и ферменты, в связи с растущим потребительским спросом на натуральные и безопасные пищевые продукты.

Активные вещества, используемые для упаковки пищевых продуктов

Наименование	Функциональное назначение	Пищевые продукты
Хитозан	Антимикробный агент	Фрукты, хлеб, мясо, рыба
Эфирные масла		
Галловая кислота		
Лактоферрин		
Лизоцим		
Металлы		
Низин		
Эфирные масла	Антиоксидант	Зерновые, орехи, мясо, мясные продукты
Лигнин		
Экстракты растений		
Фенольные соединения		
А-токоферол		
Лимонная кислота	Поглотитель/излучатель углекислого газа	Мясо, фрукты, овощи
Карбонат железа		
Бикарбонат натрия		
Аскорбиновая кислота	Поглотитель/поглотитель кислорода	Большинство хлебобулочных изделий и орехи, мясо, рыба, фрукты
Галловая кислота	Поглотитель кислорода	Большинство хлебобулочных изделий, мясо, рыба, фрукты
Глюкозооксидаза		
Железо		
Лакказы		
Палладий		
Пирогаллол		
Активированный уголь	Поглотитель этилена	Фрукты, например киви, банан; овощи
Перманганат калия		
Оксиды металлов		
Диоксид титана		

Природные антимикробные агенты, содержащиеся в пищевых продуктах, имеют более широкое применение в упаковке пищевых продуктов и являются экологически более безопасными и эффективными, например эфирные масла, извлеченные из гвоздики, розмарина, орегано, лемонграсса, базилика и фенхеля [25]. Перечень активных веществ, применяемых для упаковки пищевых продуктов, указан в таблице.

#### *Антиоксиданты*

Антиоксиданты подавляют нежелательные микробиологические изменения и окислительные реакции, продлевая срок годности пищевых продуктов. Использование натуральных антиоксидантов в упаковке пищевых продуктов является новой тенденцией в пищевой промышленности в ответ на растущий потребительский спрос на натуральные продукты.

Экстракты растений из стеблей, корней, листьев и семян плодов эффективно используются в качестве антиоксидантных компонентов в упаковке пищевых продуктов [26]. Экстракты растений содержат значительное количество полифенолов, флавоноидов, алкалоидов и терпеновых веществ, обладающих доказанными антиоксидантными свойствами. Экстракты растений, добавляемые в упаковочные материалы, применяются в виде пленок.

Эфирные масла таких растений, как тмин, фенхель, мята, тимьян, розмарин, корица, лук и чеснок, признаны антиоксидантами. Эти соединения вводят в биополимерную матрицу, например желатиновые и желатин-монтмориллонитовые пленки, для улучшения антиоксидантных свойств [14].

Фенольные соединения, такие как полифенолы, флавоноиды и хиноны из растительных экстрактов, могут действовать как противомикробные, так и антиоксидантные агенты.

Антиоксиданты растительного происхождения, включенные в активную упаковку, препятствуют порче и ухудшению качества пищевых продуктов без прямого контакта с пищевыми продуктами и изменения органолептических качеств [27].

#### *Поглотители кислорода*

Остаточный кислород в пищевых упаковках вызывает бактериальную порчу, развитие неприятного вкуса, изменение цвета, потерю питательных веществ и образование токсичных конечных продуктов. Поглотители кислорода добавляются в закрытую упаковку для удаления или снижения уровня кислорода в упаковке, чтобы ингибировать образование аэробных патогенных

микроорганизмов и окисление, а также поддерживать качество продуктов с высоким содержанием ненасыщенных жиров. Поглотители кислорода обычно используются для упакованных пищевых продуктов и фармацевтических продуктов.

#### *Поглотители углекислого газа*

Роль двуокиси углерода ( $\text{CO}_2$ ), используемой в пищевой упаковке, связана с защитой пищевых продуктов от окисления и его противомикробным действием. Углекислый газ может ингибировать рост микробов и хорошо растворяется в пищевых матрицах при упаковке в модифицированной атмосфере. Упаковка в модифицированной атмосфере (УМА) – это метод упаковки, который включает активный или пассивный контроль или изменение газового состава среды хранения пищевых продуктов для уменьшения окисления пищевых продуктов и роста аэробных организмов, вызывающих порчу. Пассивная УМА достигается, когда желаемая атмосфера создается естественным образом за счет дыхания пищевого продукта. Активная УМА достигается заменой газов в упаковке желаемой смесью газов [28]. Метод поглотителя углекислого газа используется в сочетании с охлаждением для свежих и ферментированных пищевых продуктов. Промышленное использование активной упаковки пока ограничено из-за незначительного применения в промышленном масштабе и низкой стабильности активных агентов

#### *Поглотители этилена*

Поглотители этилена используются для хранения фруктов и овощей, поскольку этилен приводит к нежелательным изменениям цвета и неприятному привкусу, что сокращает срок хранения фруктов и овощей во время послеуборочной обработки и хранения

#### *Интеллектуальная упаковка*

Интеллектуальная система упаковки указывает и контролирует физико-химические параметры продукта (например, степень свежести) и его влияние на окружающую среду (например, температуру, уровень pH, газ) во время транспортировки и хранения [29]. Устройство, разработанное для упаковки, может воспринимать любые изменения внутри или снаружи, а затем информировать потребителя о состоянии продукта, предоставляя звуковую и визуальную информацию. Центральной частью интеллектуальной упаковки является интеграция датчиков, или индикаторов, или систем радиочастотной идентификации (РЧИ).

### *Датчики*

Интеллектуальный датчик (например, биосенсор, датчик газа) представляет собой устройство, которое содержит рецептор, преобразующий химическую или физическую информацию в форму энергии, и преобразователь, преобразующий энергию в полезный аналитический сигнал. Устройство может локализовать, обнаруживать или количественно определять материю или энергию, а затем посылать сигналы для обнаружения химического или физического свойства, на которое реагирует устройство [1]. Биосенсоры обнаруживают, передают и записывают информацию о биологических реакциях, которые включают биорецептор (специфический для целевого анализируемого вещества, такого как микробы, гормоны, ферменты, антигены) и преобразователь (для преобразования биологических сигналов в электрический ответ, такой как электрохимический, оптический) [30]. Сенсоры газа реагируют на наличие газообразного анализируемого вещества в упаковке количественно и обратимо, а затем изменяют физические параметры сенсора и контролируются внешним устройством. Зарубежные промышленные индикаторы газа: Ageless Eye™, Shelf Life Guard, Tell-Tab и Tufflex GS [31].

### *Индикаторы*

Интеллектуальные индикаторы – это вещества, которые дают информацию о качестве, температуре, утечке, образовании и концентрации углекислого газа, микробиологическом статусе, свежести, внешнем виде или цвете. Более того, температурно-временные индикаторы дают информацию о температуре и показывают вариацию и историю изменения температуры [32]. Кислородные индикаторы дают информацию об утечке и ухудшении качества пищевых продуктов УМА [33]. Цветовые индикаторы сообщают информацию с помощью ярлыков, прикрепленных в виде небольших клейких этикеток к внешней стороне упаковки пищевых продуктов [34]. Индикаторы патогенов дают информацию о микробиологическом статусе. Индикаторы нарушения целостности дают информацию о поврежденной упаковке. Индикаторы свежести обнаруживают рост патогенных микроорганизмов и показывают информацию о качестве продуктов в отношении порчи и микробного роста [35, 36]. Fresh Tag®, Sensor<sup>QT</sup>™, Food Sentinel System и Toxin<sup>Guard</sup>® являются промышленными индикаторами свежести.

### *Радиочастотная идентификация (РЧИ)*

Радиочастотная идентификация (РЧИ) – это беспроводная связь, основанная на метках и считывателях, размещенных на контейнерах и поддонах, для сбора в режиме реального времени информации о температуре, относительной влажности, сроке годности и пищевой ценности посредством управления цепочкой поставок [4, 8]. Примерами таких устройств, промышленно используемых, являются Easy2log®, Intelligent Vox и Temptrip.

Преимущество интеллектуальной системы упаковки заключается в предоставлении информации, продлении срока годности, улучшении качества продуктов питания и повышении безопасности. Однако это увеличивает конечную стоимость пищевых продуктов, в частности системы РЧИ, а также риск потенциальной миграции частиц упаковки в пищевые продукты [6].

### *Свойства кислородного барьера*

Окислительная порча является одной из основных проблем, связанных со сроком годности пищевых продуктов. Добавление антиоксидантов является экономичным и эффективным физико-химическим способом. Методы кислородного барьера – это применение полимеров в пищевой упаковке [37, 38]. Функция полимерного барьера состоит в том, чтобы остановить проникновение кислорода через пищевую упаковку. Применяемые промышленные кислородные барьеры включают сополимер этилена и винилового спирта (СЭВС), полиакрилонитрил (ПАН), поликетон (ПК) и полиэтилен-терефталат (ПЭТ). Кислородные барьеры, например кислородный барьер BarrierGuard на основе ПЭТ, применяются для пищевых продуктов, чувствительных к окислению, включая орехи, масла, детское питание, кофе и овощи [39].

Полимеры полисахаридного типа образуют пленки и покрытия, которые являются хорошими кислородными барьерами, связанными с большим количеством водородных связей, которые помогают соседним цепям плотно связываться друг с другом. Полимеры на основе белков также являются хорошими кислородными барьерами и могут нести активные вещества, которые могут мигрировать на поверхность пищевых продуктов [40].

### *Восприятие потребителей*

Состав продукта, способ производства и упаковка являются тремя наиболее важными показателями, которые влияют на окружающую среду по результатам

опроса потребителей ( $n = 797$ ) [20]. С ростом осведомленности новой тенденцией в пищевом секторе становятся требования потребителей к экологически чистой упаковке. Упаковочные материалы и информация, отображаемая на упаковке, влияют на ожидания потребителей и готовность к покупке [41]. Потребители предпочитают упаковку пищевых продуктов с использованием добавок из природных источников и инновационных материалов, которые могут быть переработаны, например, на основе крахмала и белков [42].

Преимущественное использование в продуктах имеют пищевые пленки и покрытия с природными антимикробными агентами и биологически активными полимерами, содержащимися в углеводах или белках. Например, обычно используемые материалы для пищевых пленок и покрытий включают низин, соевый белок и желатин, хитозан, крахмал, кукурузный крахмал, рисовый крахмал, агар и каррагинан [43–45]. Съедобные пленки на основе агара, содержащие функциональные вещества (например, экстракт зеленого чая, эфирное масло корицы), подавляют рост пищевых патогенов, улучшают качество и продлевают срок годности пищевых продуктов. Пленки на основе крахмала с добавлением эфирных масел – это концепция экологичной упаковки пищевых продуктов из возобновляемых источников [46, 47]. Хитозановые пленки используются в качестве пищевых пленок и покрытий. Пленки соевого белка, покрытые низином и натуральными растительными экстрактами (например, экстрактом виноградных косточек, экстрактом зеленого чая), можно использовать для упаковки готового к употреблению мяса [19].

### Заключение

Самыми последними достижениями в области упаковки пищевых продуктов стали разработка активной упаковки и интеллектуальной упаковки, а также разработка биоразлагаемых полимеров, пищевых пленок и покрытий. С экономической точки зрения инновационная упаковка для пищевых продуктов сокращает количество пищевых отходов или предотвращает потерю качества продуктов за счет увеличения срока годности продуктов. Кроме того, использование возобновляемых биоразлагаемых упаковочных материалов сводит к минимуму воздействие на окружающую среду. Это также приносит пользу здоровью потребителей.

Система активной упаковки включает активные компоненты для улучшения каче-

ства и срока хранения пищевых продуктов, а интеллектуальная система упаковки отслеживает условия и предоставляет информацию, касающуюся качества упакованных пищевых продуктов.

Активная упаковка имеет следующие преимущества: предотвращает окисление, рост микробов и потерю цвета, устраняет неприятный привкус и замедляет метаболизм пищи. Недостатки – это увеличение стоимости производства, возможная миграция сложных упаковочных материалов в продукты питания, отсутствие возможности вторичной переработки одноразовой упаковки.

Преимущество интеллектуальных упаковочных систем заключается в том, что они могут быть интегрированы в упаковку и их действие можно увидеть невооруженным глазом, а также в возможности непрерывного отслеживания внешних условий, способности предоставлять информацию о состоянии продуктов питания, предупреждать о возможных проблемах, снижать потери продуктов питания и обнаруживать повреждения во время транспортировки.

Натуральные антимикробные и антиоксидантные агенты (например, растительные экстракты, эфирные масла) являются наиболее предпочитаемыми потребителем и полезны для экосистемы, однако необходимы дальнейшие исследования *in vitro* для оценки безопасности и возможных побочных эффектов при использовании в пищевых продуктах. Кроме того, по сравнению с пластиковыми упаковочными материалами, пленки на биологической основе являются биоразлагаемыми, но имеют низкую эластичность, низкую термическую стабильность и высокую чувствительность к воде, поэтому необходимы дальнейшие исследования для улучшения их функциональных свойств.

Следует также отметить, что все обсуждаемые упаковочные системы должны быть недорогими по сравнению со стоимостью продукта, воспроизводимыми, приемлемыми для потребителя, не оказывать негативного воздействия на здоровье и быть безопасными для окружающей среды. На внедрение активной и интеллектуальной упаковки могут влиять различные факторы, такие как рыночные факторы, разрыв между наукой и промышленным внедрением и разрыв между производством и потребителями. В заключение можно сказать, что инновационная упаковка для пищевых продуктов представляет собой действенное решение для пищевой промышленности в поддержании качества и безопасности

пищевых продуктов. Дальнейшие научные исследования необходимы для восполнения вышеуказанных пробелов, с целью реализации крупномасштабного промышленного использования с минимальным воздействием на окружающую среду и удовлетворением запросов потребителя.

### Список литературы

1. Drago E., Campardelli R., Pettinato M., Perego P. Innovations in Smart Packaging Concepts for Food: An Extensive Review // *Foods*. 2020. Vol. 9. P. 1628.
2. Shaikh S., Yaqoob M., Aggarwal P. An overview of biodegradable packaging in food industry. *Curr. Res. // Food Sci*. 2021. Vol. 4. P. 503–520.
3. Karmaus A.L., Osborn R., Krishan M. Scientific advances and challenges in safety evaluation of food packaging materials: Workshop proceedings. *Regul. Toxicol. Pharm.* 2018. Vol. 98. P. 80–87.
4. Nogueira G.F., Soares C.T., Cavasini R., Fakhouri F.M., de Oliveira R.A. Bioactive films of arrowroot starch and blackberry pulp. Physical, mechanical and barrier properties and stability to pH and sterilization // *Food Chem*. 2018. Vol. 275. P. 417–425.
5. Vanderroost M. et al. Intelligent food packaging: The next generation // *Trends in food science & technology*. 2014. Vol. 39. No. 1. P. 47–62.
6. Han J.W. et al. Food packaging: A comprehensive review and future trends // *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 2018. Vol. 17. No. 4. P. 860–877.
7. Schaefer D., Cheung W.M. Smart packaging: Opportunities and challenges // *Procedia Cirp*. 2018. Vol. 72. P. 1022–1027.
8. Müller P., Schmid M. Intelligent packaging in the food sector: A brief overview // *Foods*. 2019. Vol. 8. No. 1. P. 16.
9. Janjarasskul T., Suppakul P. Active and intelligent packaging: The indication of quality and safety // *Critical reviews in food science and nutrition*. 2018. Vol. 58. No. 5. P. 808–831.
10. Wicochea-Rodríguez J.D. et al. Active food packaging based on biopolymers and aroma compounds: How to design and control the release // *Frontiers in chemistry*. 2019. Vol. 7. P. 398.
11. Guillard V. et al. The next generation of sustainable food packaging to preserve our environment in a circular economy context // *Frontiers in nutrition*. 2018. Vol. 5. No. 121.
12. Ahmed T. et al. Biodegradation of plastics: current scenario and future prospects for environmental safety // *Environmental science and pollution research*. 2018. Vol. 25. P. 7287–7298.
13. Omerović N. et al. Antimicrobial nanoparticles and biodegradable polymer composites for active food packaging applications // *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 2021. Vol. 20. No. 3. P. 2428–2454.
14. Ncube L.K. et al. Environmental impact of food packaging materials: A review of contemporary development from conventional plastics to polylactic acid based materials // *Materials*. 2020. Vol. 13. No. 21. P. 4994.
15. Firouz M.S., Mohi-Alden K., Omid M. A critical review on intelligent and active packaging in the food industry: Research and development // *Food Research International*. 2021. Vol. 141. P. 110113.
16. Ketelsen M., Janssen M., Hamm U. Consumers' response to environmentally-friendly food packaging-A systematic review // *Journal of Cleaner Production*. 2020. Vol. 254. P. 120123.
17. Nilsen Nygaard J. et al. Current status of biobased and biodegradable food packaging materials: Impact on food quality and effect of innovative processing technologies // *Comprehensive reviews in food science and food safety*. 2021. Vol. 20. No. 2. P. 1333–1380.
18. Díez-Pascual A.M. Antimicrobial polymer-based materials for food packaging applications // *Polymers*. 2020. Vol. 12. No. 4. P. 731.
19. Asgher M. et al. Bio-based active food packaging materials: Sustainable alternative to conventional petrochemical-based packaging materials // *Food Research International*. 2020. Vol. 137. P. 109625.
20. Jamróz E., Kopel P. Polysaccharide and protein films with antimicrobial/antioxidant activity in the food industry: A review // *Polymers*. 2020. Vol. 12. No. 6. p. 1289.
21. Sarfraz J. et al. Biodegradable active packaging as an alternative to conventional packaging: A case study with chicken fillets // *Foods*. 2021. Vol. 10. No. 5. P. 1126.
22. Petrescu D.C., Vermeir I., Petrescu-Mag R.M. Consumer understanding of food quality, healthiness, and environmental impact: A cross-national perspective // *International journal of environmental research and public health*. 2020. Vol. 17. No. 1. P. 169.
23. Zhao Y. et al. Antimicrobial activity of bioactive starch packaging films against *Listeria monocytogenes* and reconstituted meat microbiota on ham // *International journal of food microbiology*. 2019. Vol. 305. P. 108253.
24. Sharma S. et al. Essential oils as additives in active food packaging // *Food Chemistry*. 2021. Vol. 343. P. 128403.
25. Bahrami A. et al. Antimicrobial-loaded nanocarriers for food packaging applications // *Advances in Colloid and Interface Science*. 2020. Vol. 278. P. 102140.
26. Amor G. et al. Basil essential oil: Composition, antimicrobial properties, and microencapsulation to produce active chitosan films for food packaging // *Foods*. 2021. Vol. 10. No. 1. P. 121.
27. Zhang Y. et al. Plant-derived antioxidants incorporated into active packaging intended for vegetables and fatty animal products: A review // *Food Additives & Contaminants: Part A*. 2021. Vol. 38. No. 7. P. 1237–1248.
28. Wan-Mohtar W.A.A.Q. I. et al. Total quality index of commercial oyster mushroom *Pleurotus sapidus* in modified atmosphere packaging // *British Food Journal*. 2019. Vol. 121. No. 8. P. 1871–1883.
29. Vasile C., Baican M. Progresses in food packaging, food quality, and safety –controlled-release antioxidant and/or antimicrobial packaging // *Molecules*. 2021. Vol. 26. No. 5. P. 1263.
30. Rodrigues C. et al. Bio-based sensors for smart food packaging – Current applications and future trends // *Sensors*. 2021. Vol. 21. No. 6. P. 2148.
31. Nešić A. et al. Prospect of polysaccharide-based materials as advanced food packaging // *Molecules*. 2019. Vol. 25. No. 1. P. 135.
32. Alam A.U. et al. Fruit quality monitoring with smart packaging // *Sensors*. 2021. Vol. 21. No. 4. P. 1509.
33. Rahimah S. et al. Betacyanin as bioindicator using time-temperature integrator for smart packaging of fresh goat milk // *The Scientific World Journal*. 2020. Vol. 208. P. 58–67.
34. Yang Z. et al. Bilayer pH-sensitive colorimetric films with light-blocking ability and electrochemical writing property: Application in monitoring crucial spoilage in smart packaging // *Food Chemistry*. 2021. Vol. 336. P. 127634.
35. Ibrahim S., Fahmy H., Salah S. Application of Interactive and Intelligent Packaging for Fresh Fish Shelf-Life Monitoring // *Frontiers in Nutrition*. 2021. Vol. 8. P. 677884.
36. Kim J. et al. Oxygen barrier properties of polyketone/EVOH blend films and their resistance to moisture // *Journal of Applied Polymer Science*. 2020. Vol. 137. No. 47. P. 49537.
37. Sahraee S. et al. Protection of foods against oxidative deterioration using edible films and coatings: A review // *Food Bioscience*. 2019. Vol. 32. P. 100451.
38. Chang Y. et al. Development of protein-based high-oxygen barrier films using an industrial manufacturing facility // *Journal of food science*. 2019. Vol. 84. No. 2. P. 303–310.

39. Souza E., Gottschalk L., Freitas-Silva O. Overview of nanocellulose in food packaging // *Recent Patents on Food, Nutrition & Agriculture*. 2020. Vol. 11. No. 2. P. 154–167.
40. Kawhena T.G., Opara U.L., Fawole O.A. Effect of Gum Arabic and Starch-Based Coating and Different Polyliners on Postharvest Quality Attributes of Whole Pomegranate Fruit // *Processes*. 2022. Vol. 10. No. 1. P. 164.
41. Yao X. et al. Development of active and smart packaging films based on starch, polyvinyl alcohol and betacyanins from different plant sources // *International journal of biological macromolecules*. 2021. Vol. 183. P. 358–368.
42. Jeevahan J., Chandrasekaran M. Influence of nanocellulose additive on the film properties of native rice starch-based edible films for food packaging // *Recent patents on nanotechnology*. 2019. Vol. 13. No. 3. P. 222–233.
43. Vianna T.C. et al. Essential oils as additives in active starch-based food packaging films: A review // *International Journal of Biological Macromolecules*. 2021. Vol. 182. P. 1803–1819.
44. Salgado P.R. et al. Recent developments in smart food packaging focused on biobased and biodegradable polymers // *Frontiers in Sustainable Food Systems*. 2021. Vol. 5. P. 630393.
45. Sani M.A. et al. Recent advances in the development of smart and active biodegradable packaging materials // *Nanomaterials*. 2021. Vol. 11. No. 5. P. 1331.
46. Ribeiro-Santos R. et al. Use of essential oils in active food packaging: Recent advances and future trends // *Trends in food science & technology*. 2017. Vol. 61. P. 132–140.
47. Tiekstra S. et al. Holistic approach to a successful market implementation of active and intelligent food packaging // *Foods*. 2021. Vol. 10. No. 2. P. 465.