ISSN 2074-9414 (Print)
ISSN 2313-1748 (Online)

https://doi.org/10.21603/2074-9414-2022-2-2366
https://elibrary.ru/RQQDYU

Обзорная статья
https://fptt.ru

Датчики цвета в «интеллектуальной упаковке» пищевых продуктов

Р. В. Крюк[1,*], М. Г. Курбанова[1], А. Ю. Колбина[1], К. Б. Плотников[1], И. Б. Плотников[1], А. Н. Петров[2,3], Мохаммед Эль Амин Хелеф[3]

[1] *Кемеровский государственный университет, Кемерово, Россия*

[2] *Всероссийский научно-исследовательский институт молочной промышленности, Москва, Россия*

[3] *Московский государственный университет пищевых производств, Москва, Россия*

Поступила в редакцию: 04.02.2022
Принята после рецензирования: 30.03.2022
Принята в печать: 24.05.2022

**Р. В. Крюк: roman.kryuk.94@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-5884-8598*
М. Г. Курбанова: https://orcid.org/0000-0003-0563-1007
А. Ю. Колбина: https://orcid.org/0000-0002-5986-1716
К. Б. Плотников: https://orcid.org/0000-0003-4145-0027
И. Б. Плотников: https://orcid.org/0000-0002-0149-1724
А. Н. Петров: https://orcid.org/0000-0001-9879-482X
Мохаммед Эль Амин Хелеф: https://orcid.org/0000-0002-9371-7670

© Р. В. Крюк, М. Г. Курбанова, А. Ю. Колбина, К. Б. Плотников, И. Б. Плотников, А. Н. Петров, М. Э. А. Хелеф, 2022

Аннотация.
Качество пищевой продукции зависит от соблюдения не только технологических параметров процесса производства, но и условий хранения. Применение интеллектуальной упаковки позволяет контролировать условия хранения и отслеживать нарушения. Целью работы является обзор типов и функций датчиков и их использование при хранении пищевых продуктов.
Объектом исследования являлась общедоступная информация об интеллектуальной упаковке для пищевых продуктов, снабженной датчиками и индикаторами. Информация была получена из открытых источников. Обзор литературы охватывает временной промежуток с 2016 по 2021 гг.
В работе были рассмотрены биосенсоры, химические датчики и индикаторы, которые позволяют определять некоторые характеристики пищевых продуктов и предоставляют информацию производителю, розничному продавцу и потребителю. В результате проведенных аналитических исследований было установлено, что наиболее перспективными из рассматриваемых датчиков, применяемых в интеллектуальной упаковке, являются индикаторы. Данный тип датчиков указывает на присутствие и концентрацию различных аналитов посредством изменения цвета. Среди большого разнообразия индикаторов можно выделить наиболее перспективные – радиочастотные (RFID), идентификаторы яда, индикаторы уплотнения (утечки) и свежести или спелости. Все рассмотренные индикаторы используют изменение цвета, что позволяет судить о качестве пищевых продуктов, представленных на рынке.
Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что развитие технологий интеллектуальной упаковки с применением датчиков и индикаторов является перспективным направлением, поскольку они позволяют отслеживать и контролировать качество продукции. Применение датчиков в интеллектуальной упаковке позволит потребителям самим проверять свежесть продуктов и контролировать их годность.

Ключевые слова. Детекторы, индикаторы, хранение продуктов, биосенсоры, безопасность пищевых продуктов

Для цитирования: Датчики цвета в «интеллектуальной упаковке» пищевых продуктов / Р. В. Крюк [и др.] // Техника и технология пищевых производств. 2022. Т. 52. № 2. С. 321–333. https://doi.org/10.21603/2074-9414-2022-2-2366

https://doi.org/10.21603/2074-9414-2022-2-2366
https://elibrary.ru/RQQDYU

Review article
Available online at https://fptt.ru/en

Color Sensors in Smart Food Packaging

Roman V. Kryuk[1,*], Marina G. Kurbanova[1], Anastasia Yu. Kolbina[1], Konstantin B. Plotnikov[1], Igor B. Plotnikov[1], Andrey N. Petrov[2,3], Mohammed El Amine Khelef[3]

[1] *Kemerovo State University, Kemerovo, Russia*

[2] *All-Russian Scientific Dairy Research Institute, Moscow, Russia*

[3] *Moscow State University of Food Production, Moscow, Russia*

Received: 04.02.2022
Revised: 30.03.2022
Accepted: 24.05.2022

**Roman V. Kryuk: roman.kryuk.94@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-5884-8598*
Marina G. Kurbanova: https://orcid.org/0000-0003-0563-1007
Anastasia Yu. Kolbina: https://orcid.org/0000-0002-5986-1716
Konstantin B. Plotnikov: https://orcid.org/0000-0003-4145-0027
Igor B. Plotnikov: https://orcid.org/0000-0002-0149-1724
Andrey N. Petrov: https://orcid.org/0000-0001-9879-482X
Mohammed El Amine Khelef: https://orcid.org/0000-0002-9371-7670

© R. V. Kryuk, M. G. Kurbanova, A. Yu. Kolbina, K. B. Plotnikov, I. B. Plotnikov, A. N. Petrov, M. E. A. Khelef, 2022

Abstract.
The quality of food products depends not only on the technological parameters of production process, but also on storage conditions. Smart packaging controls storage conditions and tracks violations. The research objective was to review the use of sensors in food storage.
The study featured publically available information on sensor-equipped smart food packaging. The information was obtained from open sources published in 2016–2021.
The paper describes biosensors, chemical sensors, and indicators that determine some of the characteristics of food products and provide information to the producer, retailer, and consumer. Indicators proved to be the most promising type of sensors used in smart packaging. This type of sensor indicates the presence and concentration of various analytes through color change. The best indicators are those based on radio frequency (RFID), poison identifiers, compaction/leaks indicators, indicators of freshness/ripeness, etc. All the considered indicators visualize their data by changing color, which makes it possible to assess the quality of food products on the market.
Sensor-based smart packaging is a promising direction in food industry because they make it possible to monitor and control product quality. Smart packaging allows consumers to check the freshness of products by themselves.

Keywords. Detectors, indicators, food storage, biosensors, food safety

For citation: Kryuk RV, Kurbanova MG, Kolbina AYu, Plotnikov KB, Plotnikov IB, Petrov AN, *et al.* Color Sensors in Smart Food Packaging. Food Processing: Techniques and Technology. 2022;52(2):321–333. (In Russ.). https://doi.org/10.21603/2074-9414-2022-2-2366

Введение

Государственная политика в области развития технологий предполагает инновационный путь становления агропромышленного комплекса, связанного с проблемой сохранения качества, экологии окружающей среды и безопасности пищевых продуктов. Такое решение должно рассматриваться с позиции развития современной технологии упаковки и упаковочных систем.

Постоянное совершенствование систем упаковки привело к созданию новых видов. Перспективным является создание и применение интеллектуальной упаковки, которая призвана анализировать влияние окружающей среды на состояние продукта и информировать об этом потребителя, отслеживать и контролировать изменения условий хранения, показателей качества и безопасности упакованного продукта до его реализации. Такая упаковка содержит интеллектуальные вещества – детекторы и сенсорные датчики, осуществляющие функции контроля в процессе хранения и информирования потребителя о состоянии продукта по

различным показателям. За рубежом и в нашей стране начинает развиваться производство экологически чистой биоразлагаемой упаковки для сохранения экосистемы мира [1–3].

Ежедневно растет желание потребителей иметь легкодоступные высококачественные продукты питания. Производство упаковки влияет на выпуск свежих продуктов и сокращение пищевых отходов за счет использования новых материалов и методов [4, 5]. Пищевая упаковка была разработана для защиты продуктов питания от тепла, света, влаги, кислорода, микроорганизмов, насекомых и пыли. Биоразлагаемые пленки для интеллектуальной упаковки пищевых продуктов – один из новых методов в этой области [6].

Большинство синтетических полимеров нефтяного происхождения, таких как полиолефины, нейлоны, полистирол и т. д., устойчивы к биологическому разложению, а их углеродные соединения не разрушаются ферментами микроорганизмов. Гидрофобность и низкая площадь поверхности полимеров, по сравнению с их высокой молекулярной массой, делают синтетические полимеры устойчивыми к воздействию ферментов микроорганизмов. Биоразлагаемые полимеры – это полимеры, разлагаемые в окружающей среде живыми организмами на натуральные продукты, такие как вода, диоксид углерода и биомасса, или ферменты [6]. Биополимеры, которые используются в упаковочной промышленности, можно разделить на четыре категории в зависимости от химической структуры:

1) белки – кукурузная шелуха, глютенин, желатин, коллаген, мясная миофибрилла, молочный казеин, сывороточные белки, молоко и т. д.;

2) полисахариды – целлюлоза и ее производные (метилцеллюлоза и карбоксиметилцеллюлоза), крахмал и его производные, пектиновые соединения, хитин и хитозан, камеди (альгинат, каррагинан, ксантан и т. д.);

3) липиды – растительные и животные жиры и масла, воски, производные глицеридов;

4) полиэфиры – полимолочная кислота.

Биополимеры в сочетании с синтетическими полимерами или без них используются для производства биологической упаковки. Биопакеты, изготовленные из чистых биополимеров, обладают более высокой способностью к биоразложению, чем композитные пленки, но их механическое качество ниже. Биопакеты можно разделить на съедобные и несъедобные.

С ростом потребительского спроса на безопасные высококачественные свежие продукты возрастает потребность в умной упаковке на основе цветных индикаторов [7, 8]. В последние годы в европейских странах были проведены исследования в области подготовки и использования пленок для цветных индикаторов, для производства которых необходимо использовать более чувствительные красители. Натуральные красители имеют преимущества перед синтетическими химическими красителями, потому что они более чувствительны к изменениям окружающей среды [9–11].

Целью работы является обсуждение типов и функций датчиков и их применение при хранении пищевых продуктов и идентификации пищевых новинок, а также характеристики, связанные с изменением цвета пищевых пленок.

Объекты и методы исследования

Объектом исследования является общедоступная научная информация, поиск которой осуществлялся в базах данных PubMed от National Center for Biotechnology Information (США) и Elsevier (Scopus, ScienceDirect), на платформе Web of Science и отечественной электронной библиотеке eLibrary.ru. Глубина поиска составляла 10 лет, язык поиска – английский и русский.

Результаты и их обсуждение

Интеллектуальная упаковка и датчики цвета. Умная упаковка – это тип упаковки, который контролирует некоторые характеристики содержимого пищевых продуктов и предоставляет информацию производителю, розничному продавцу и потребителю в процессе хранения и передачи продуктов питания [12]. В более точном определении интеллектуальная упаковка относится к системе, которая способна создавать, получать, записывать и обмениваться данными между продуктом и потребителем. Интеллектуальные системы создают условия для увеличения срока хранения, высокого уровня безопасности и хорошего качества продукции. Примеры методов, которые зависят от интеллектуальной системы упаковки, включают индексы температуры, времени и учета газа, этикетки и радиочастоты [13]. Эти методы позволяют определять внешний вид продукта, его качество и условия хранения [14].

Чтобы разработать коммерческое применение этой технологии, работникам пищевой промышленности необходимо знать о ее преимуществах. Типы интеллектуальной упаковки включают упаковку, основанную на измерении внешних условий или на прямом измерении качества пищевых продуктов внутри упаковки [15]. Индикаторы интеллектуальной упаковки либо встраиваются в виде этикеток на упаковочные материалы, либо печатаются на самой упаковке, чтобы повысить доступность за счет мониторинга качества продукта [16]. Датчики могут использоваться для определения физических, химических или биологических переменных. Детекторы предоставляют информацию о качестве продукта в зависимости от условий

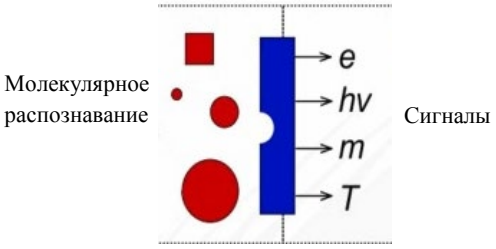

Рисунок 1. Схема химического сенсора: e – электрический заряд; hv – кислотность; m – молекулярная масса; T – температура

Figure 1. Chemical sensor: e – electric charge; hv – acidity; m – molecular weight; T – temperature

окружающей среды и пищевых газов в помещении. Детекторы также могут быть прикреплены к закрытой поверхности пищевых продуктов, что ускоряет обнаружение метаболитов, образующихся при хранении [17].

В основе активной упаковки лежит использование внутренних свойств полимеров или размещение специальных материалов. Активный агент можно добавлять в упаковочную пленку или размещать на поверхности и внутри ее многослойной структуры. Его также можно использовать внутри небольших упаковок как этикетку или на крышке бутылок [18]. Природа активных агентов разная и включает в себя органические кислоты, ферменты, антибактериальные и противогрибковые соединения, натуральные экстракты. К наиболее важным активным системам относятся системы адсорбции кислорода, выделения и адсорбции диоксида углерода, регулирования влажности, высвобождения антиоксидантов и антимикробных препаратов, высвобождения или абсорбции ароматизирующих веществ и запахов [19]. Активная упаковка относится к упаковке, которая, помимо преимуществ традиционной упаковки, изменяет ее условия, чтобы продлить срок годности или улучшить безопасность и сенсорные свойства пищевого продукта при сохранении его качества [20].

Биосенсоры. При разработке современной интеллектуальной упаковки используют биосенсоры для обнаружения, записи и передачи информации о биологических реакциях. Биосенсоры включают биорецепторы и преобразователи. Коммерческие биосенсоры были разработаны для пищевых патогенов. Некоторые антитела связываются с рецепторами биосенсоров и обнаруживают микробные и биологические агенты в пищевых упаковках [21].

Химические сенсоры. В химическом датчике приёмник представляет собой избирательный химический материал, который способен обнаруживать присутствие, активность, состав и концентрацию химических частиц или газоаналитов [22]. Присутствие химикатов преобразовывается в сигнал. Активные и пассивные преобразователи зависят от внешнего источника питания, необходимого для измерения. Углеродные наноматериалы, такие как наночастицы, графен, нанотрубки и нановолокна, используются в химических сенсорах из-за их электрических и механических свойств с высокой удельной поверхностью [23]. На рисунке 1 представлена простая схема химических сенсоров.

Датчики на основе наноматериалов используются для обнаружения патогенов, химических загрязнителей, порчи и подделки пищевых продуктов.

Индикаторы. При разработке новых видов интеллектуальной упаковки приходится выбирать персонализированные индикаторы. Индикаторы – это материалы или инструменты, которые указывают на присутствие, отсутствие и концентрацию различных аналитов посредством изменения свойств. Например, изменение цвета [24].

Разработка интеллектуальной упаковочной системы с точки зрения температурно-временных показателей – уникальный метод в упаковочной технологии, т. к. потребитель может определять несоответствующую температуру пищевых продуктов [25]. Особенно индикаторы времени и температуры важны для охлажденных и замороженных пищевых продуктов, поскольку хранение, транспортировка и распространение оказывают влияние на их качество и безопасность [26]. Если пища подвергается воздействию высоких температур, то она может быстро испортиться. Идентификатор температуры и времени может быть размещен на пищевых контейнерах или отдельных упаковках в виде небольшой этикетки. Когда эти детекторы находятся в неприемлемом состоянии, происходит необратимое изменение, такое как изменение цвета [27]. Технология индикатора временной температуры используется в Великобритании [28].

Индикатор срока годности используется для измерения срока годности упаковки пищевых продуктов при определенной температуре. Эти индикаторы предоставляют информацию о времени первого открытия или первого использования продукта. Срок годности важен для многих групп продуктов, которые должны храниться при низких положительных температурных режимах. Например, соусы, кетчуп, майонез и т. д. [29].

Немаловажно использовать для вариативности визуальные индикаторы, цвет которых меняется в ответ на тепловое воздействие, а их основной механизм действия – химическая диффузия, полимеризация и ферментативные реакции. Эти индикаторы используются для защиты от несоответствующих температур во время транспортировки и хранения и являются признаком качества для производителя, поскольку подтверждают, что продукт доставляется потребителю в оптимальных условиях.

Система индикаторов, на которую стоит обратить внимание, – это радиочастоты (RFID), используемые для автоматического обнаружения и отслеживания продукта. В системе записи RFID индикатор получает данные из сигнала RFID, излучаемого радиоволнами, которые затем передаются на компьютер для анализа. Фрагмент RFID состоит из микрочипа, подключенного к антенне [30].

При разработке интеллектуальной упаковки основной проблемой является присутствие патогенных микроорганизмов в пище в очень низких концентрациях, которые неравномерно распределяются по продукту [31]. Поэтому необходимо использовать высокочувствительный и безопасный для продукта идентификатор яда, который находится в полном контакте с пищей.

Для разработки индикатора уплотнения (утечки) упаковки используют газ. Состав газа в упаковке для пищевых продуктов изменяется в результате активности продукта или утечки извне. Это часто приводит к изменению характеристик продуктов и условий окружающей среды. Индикаторы O_2 и CO_2 могут использоваться для контроля качества продуктов питания как индикатор герметичности/утечки для оценки эффективности абсорбентов кислорода. Изменение цвета индикаторов O_2 и CO_2 является результатом химических или ферментативных реакций и указывает на то, что в запечатанной упаковке слишком много накопленного кислорода. Основная проблема этих показателей заключается в том, что хранение упакованного продукта должно осуществляться в анаэробных условиях, поскольку он быстро портится в присутствии воздуха [32, 33].

Индикатор свежести или спелости указывает на порчу упакованных продуктов. Современные детекторы предоставляют информацию о качестве роста микробов или химических изменениях в продукте [34]. Качество микробов определяется реакциями, которые происходят между детекторами в упаковке и метаболитами роста микробов. Обнаружение химической порчи пищевых продуктов обеспечивается за счет новейших детекторов, которые разработаны на основе целевых метаболитов, связанных с микробиологической деградацией. Существует несколько типов индикаторов свежести, которые основаны на изменении цвета в ответ на микробные метаболиты, образующиеся в процессе порчи [35]. Реакцию этих индикаторов на свежесть продукта можно измерить, отслеживая изменения цвета. Цвет активного центра этих индикаторов сравнивается с эталонным цветом. Маркеры обнаруживают различные летучие соединения, такие как диацетил, амины, диоксид углерода, аммиак и сероводород, которые образуются при хранении пищевых продуктов. Также они широко используются в качестве детекторов метаболизма микробов.

Изменения концентрации сероводорода или органических кислот, таких как N-бутират, L-молочная кислота, D-лактат и уксусная кислота, во время хранения используются в качестве специфических маркеров для мясных продуктов, фруктов и овощей. Соединения, образующиеся при росте микробов (углекислый газ и сероводород), и биогенные амины указывают на свежесть мяса и рыбы. Биогенные амины (путресцин, кадаверин, гистамин и др.) образуются при расщеплении белка в продуктах, содержащих амины. Поэтому они являются индикатором деградации пищевых продуктов и косвенным индикатором свежести мяса и рыбы [36, 37]. На рисунке 2 показан пример применения индикатора свежести в упаковке продуктов питания.

Факторы, влияющие на порчу фруктов и овощей и работоспособность датчиков цвета. Свежие фрукты и овощи являются продуктами, для которых требуются контролируемые условия транспортировки от производства до потребления для поддержания качества и безопасности, а также увеличения срока хранения. Эти продукты относятся к живым продуктам, которые постоянно потребляют кислород и выделяют углекислый газ после сбора урожая. На послеуборочный процесс порчи влияют внутренние факторы урожая, стадия созревания, условия обработки и факторы окружающей среды. Температура является наиболее важным фактором, который можно использовать для замедления процесса порчи фруктов и овощей, поскольку она сильно влияет на процесс дыхания, выработку этилена и скорость транспирации. Повышение температуры на 10 °C увеличивает скорость дыхания в 2–3 раза. Однако некоторые культуры, такие как бананы, лимоны и манго, подвергаются физиологическому повреждению при низких температурах. Большинство изделий получает непоправимый ущерб при температуре ниже –1 °C. Поэтому для них важен контроль и мониторинг температуры на всех этапах распределения и хранения [38].

Спелые продукты – это термин, используемый для описания физиологических изменений фруктов и овощей. Процесс созревания улучшает текстуру и сенсорные свойства фруктов, делая их пригодными для употребления в пищу. Созревание фруктов и овощей увеличивает сладость (из-за разложения органических кислот и превращения крахмала в сахара), снижает прочность (из-за исчезновения набухания клеток, превращения пектинов и разрушения компонентов клеточной стенки) и усиливает вкус (из-за образования ароматических летучих соединений). Потребители могут использовать изменение цвета, чтобы выбрать спелые фрукты (например, бананы, авокадо, помидоры). Однако спелость таких фруктов, как киви и большинство видов груш визуально не определяется. Для определения спелости

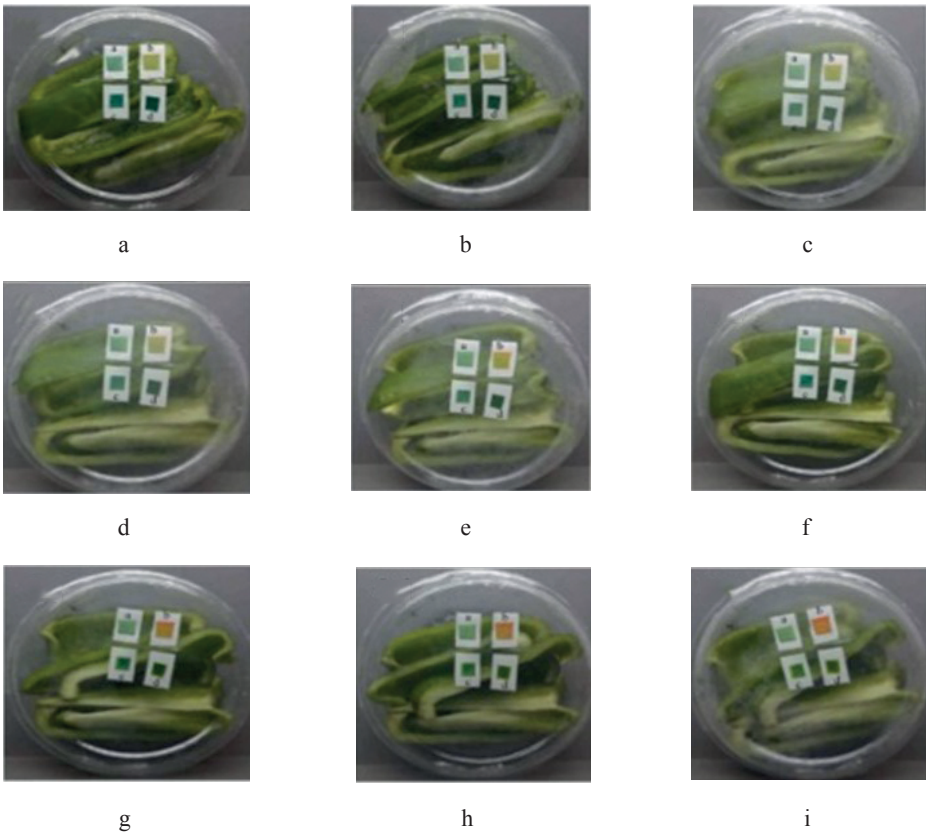

Рисунок 2. Применение индикатора свежести в пищевой упаковке:
a – свежий продукт, b – 1 неделя хранения, c – 3 недели хранения, d – 4 недели хранения, e – 5 недель хранения, f – 6 недель хранения, g – 7 недель хранения, h – 8 недель хранения, i – 9 недель хранения

Figure 2. Freshness indicators in food packaging: a – fresh product, b – week 1, c – week 3, d – week 4, e – weeks 5, f – week 6, g – week 7, h – week 8, i – week 9

этих плодов необходимы специальные индикаторы [39]. Например, упаковочная пленка ripeSenser, изготовленная из полиэтилентерефталата и разработанная для упаковки груш. Пленка включает вентиляционные отверстия, через которые выходит CO_2 и лишняя влага. Датчик коррелирует с ароматическими соединениями фруктов и меняет цвет: сначала красный, а по мере созревания плодов оранжевый и желтый [40]. Покупатели могут точно выбрать понравившиеся фрукты, подобрав цвет сенсора.

Условия обращения с фруктами и овощами после их уборки также важны, потому что механические повреждения от ударов, сжатия или вибрации ускоряют процесс старения. «Синяк» считается двухэтапным процессом, при котором сначала происходит механическое повреждение, а затем ферментативное разрушение ткани. Это действие может привести к быстрой ферментативной деградации полисахаридов клеточной стенки, которая проявляется на плодах в виде мягких пятен [41]. Например, механические повреждения при транспортировке, которые являются основной причиной потери качества томатов.

Концентрация газов в среде продукта также играет важную роль в частоте дыхания: с уменьшением концентрации кислорода частота дыхания снижается. Двуокись углерода производит противоположный эффект, хотя это зависит от типа продукта, степени зрелости, диапазона концентраций и времени воздействия. Например, большое количество углекислого газа может повредить ткани, что приведет к учащению дыхания. Чтобы продлить срок хранения, каждый продукт требует определенной концентрации конкретного газа [42].

Если упаковка с модифицированной атмосферой обеспечивает соотношения, полученные в процессе упаковки, то они изменяются со временем из-за респираторных процессов, особенно при колебаниях температуры. Концентрация внутренних газов зависит от скорости дыхания продукта и переноса газа от упаковочной пленки к продукту. В большинстве случаев эти процессы имеют разную чувствительность к температуре. Температурные изменения вызывают

отклонение от желаемого соотношения концентраций газа. Газопроницаемые упаковочные материалы, которые реагируют на изменения температуры, являются важным примером интеллектуальной упаковки, позволяющей компенсировать колебания температуры во время транспортировки [43].

Физические и химические повреждения овощей и фруктов вызваны повышенным дыханием и производством этилена, потерей воды и разрушением упаковки. Эти изменения повышают чувствительность продукта к разложению и вызывают накопление метаболитов, таких как этанол, молочная кислота и ацетилацетат. Поэтому для этих продуктов необходима интеллектуальная упаковка. Такие свойства, как удельная проницаемость для кислорода и углекислого газа являются параметрами, которые необходимо тщательно контролировать в упаковках, содержащих датчики цвета [44].

Индикаторы коммерческой свежести не только были разработаны как TTI, но и основаны на обнаружении летучих соединений, образующихся при порче пищевых продуктов, таких как диоксид углерода, диэтил, амины, аммиак, этанол и сероводород [45].

Интеллектуальная упаковка с индикатором pH. Индикатор pH как разновидность умной упаковки – одно из нововведений, которое постепенно расширяется. Изменение pH является важным показателем свежести и химического состояния пищевого продукта. Порча продуктов связана с изменением значений pH. Таким образом, можно установить взаимосвязь между свежестью или качеством пищевых продуктов и pH. В случае фруктов, овощей и молочных продуктов pH изменяется из-за изменений концентрации органических кислот в процессе хранения. Из-за микробного метаболизма, роста бактерий в продуктах с высоким содержанием белка (мясо, морепродукты и т. д.) и ряда биологических реакций образуются летучие соединения азота, такие как диметиламин, триметиламин, гистамин и тирамин, которые изменяют pH. Учеными были проведены исследования, посвященные разработке интеллектуальных систем упаковки в качестве визуальных индикаторов для мониторинга качества свежих продуктов питания на основе изменений pH [46].

Индикаторы pH состоят из двух частей – твердой основы и пигмента, – чувствительных к изменениям pH. Пигменты извлекаются из различных источников фруктов и овощей. Когда продукт начинает портится, pH изменяется. Это изменение является одним из показателей качества продукции. В начале процесса разложения pH изменяется, что приводит к трансформации цвета индикатора или упаковки. Таким образом, упаковка, на которой отображается pH продукта перед покупкой или употреблением, обеспечивает качество и безопасность продукта для потребителя.

Многофункциональная умная упаковка обладает антиоксидантными и антимикробными свойствами и привлекает все больше внимания в области упаковки продуктов питания. В случаях, когда используются натуральные полимеры, многофункциональная упаковка может быть биоразлагаемой или съедобной.

В большинстве исследований используются пленки природного происхождения, содержащие индикаторы pH. Когда происхождение каждого полимера разное и может быть модифицировано растительными пигментами, то пигменты могут быть извлечены из природных источников (фрукты и овощи) или являться синтетическими, цвет которых может изменяться при разном pH.

Композитная пленка с экстрактом зеленого чая/фурцелларан/желатина как образец интеллектуальных упаковок с индикатором pH обладает антиоксидантными и антимикробными свойствами. Эта пленка показывает pH, меняет цвет в кислых и щелочных условиях, используется для умной упаковки и имеет способность предотвращать порчу упакованных пищевых продуктов.

Была разработана цветная пленка на основе каррагинана с *Lycium ruthenicum* Murr. для интеллектуальной упаковки жидких пищевых продуктов [11]. Экстракт, использованный в этой пленке, применялся в качестве индикатора pH свежести молока. Эта пленка имеет разные цвета в различных диапазонах pH и используется в качестве индикатора pH на упаковке пищевых продуктов. Было обнаружено, что пленка подходит для демонстрации свежести продуктов.

Пленки, сделанные из природного хитозана и антоцианов в качестве индикатора pH, могли показывать pH окружающей среды в кислых, нейтральных и щелочных условиях. Введение природных полифенольных соединений (таких как антоцианы) в качестве индикаторов pH, в дополнение к эластичности, придает пленке антиоксидантные и антимикробные свойства. Это указывает на многоцелевое применение этого типа пленки [47].

Антоцианы – важная группа природных пигментов после хлорофилла. Антоцианы нетоксичны и водорастворимы, содержатся в жидкости растительных клеток и отвечают за красный, синий, фиолетовый, оранжевый и розовый цвета многих фруктов, овощей и цветов. Эти пигменты принадлежат к флавоноидам. Антоцианы содержатся в виде натуральных пигментов в корнях, листьях, плодах и цветках растений, а также в кожуре яблок, груш, винограда, ежевики и слив. В природе обнаружено 17 типов антоцианов, 6 из которых важны в рационе человека. Это цианидин, дельфинидин, петунидин, пеонидин, пеларгонидин и малоидин [48].

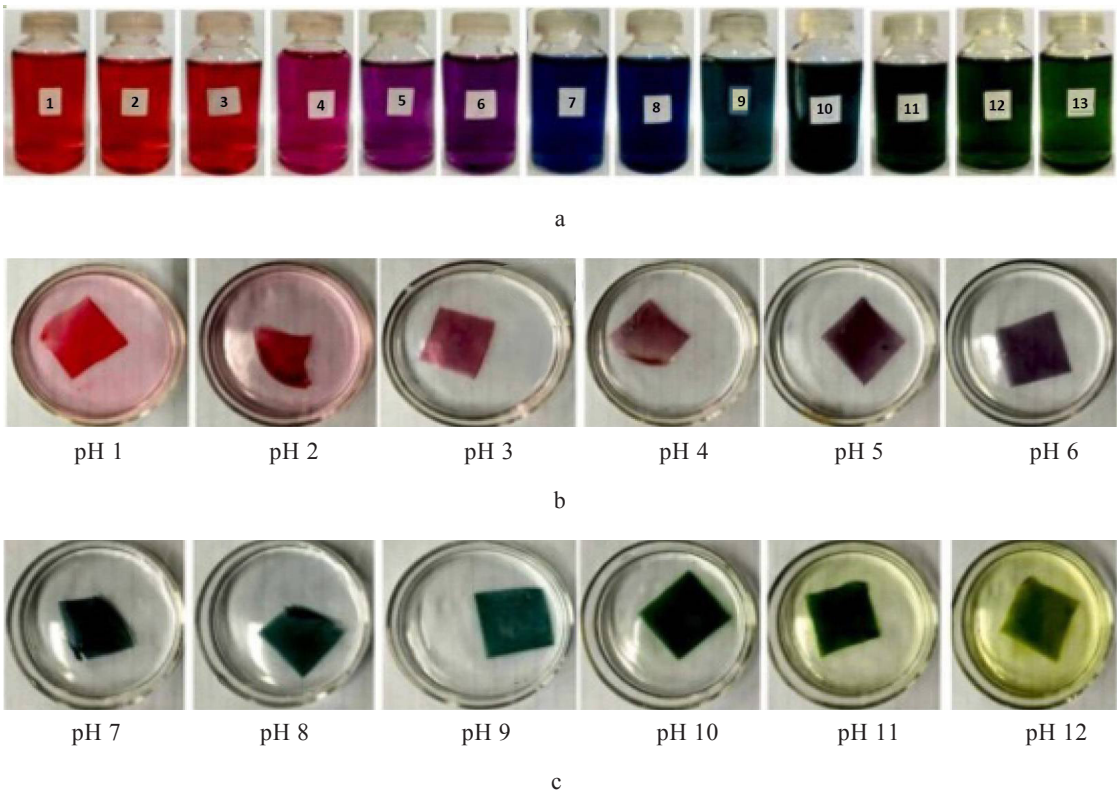

Рисунок 3. Цвет пленки индикатора pH при различных значениях pH: a – индикаторы кислотности, b – индикаторы кислой среды, c – индикаторы щелочной среды

Figure 3. Color of the pH indicator film at different pH values: a – indicators of acidity, b – indicators of acidic environment, c – indicators of alkaline environment

Антоцианы могут действовать как субстрат в реакциях потемнения. Они играют важную роль в качестве полезных и эффективных пищевых красителей в пищевой промышленности [49]. Антоцианы обладают несколькими полезными свойствами для здоровья, такими как антиоксидантные, противомикробные, противодиабетические противовоспалительные, антипролиферативные и противораковые средства и средства против ожирения. Антиоксидантная и противомикробная активность антоцианов полезна для производства активной и интеллектуальной упаковки.

Антоцианы показали хороший антиоксидантный потенциал, действуя как восстановители, доноры водорода, подавители кислорода и металлы. Антимикробные механизмы антоцианов связывают с нестабильностью цитоплазматической мембраны, проницаемостью клеточной мембраны, ингибированием внеклеточных ферментов и роста микробов. Антоцианы чувствительны к изменениям pH и имеют различную химическую структуру и цвет в растворах с разным pH. Кроме того, максимальное УФ-поглощение растворов антоцианов претерпевает батохромный сдвиг из-за увеличения значения pH.

Цвет раствора антоцианов зависит от их состава и источника и с повышением pH меняется с красного на желтый. Цвет антоцианов меняется в присутствии кислорода, различных ферментов и света [50]. Антоцианы хранятся в темном месте, потому что свет разрушает их структуру. Кроме того, кислород разлагает антоцианы на коричневые или бесцветные вещества. Гликозидазы как активный фермент разрушают химические связи между гликаном и гликозилом антоцианов. Некоторые катализаторы, такие как полифенолоксидазы, оксидируют антоцианы, поэтому для их стабилизации они должны состоять из алкалоидов и флавоноидов. Это делает антоцианы пригодными для использования в системе интеллектуальной упаковки.

Полимерная пленка, модифицированная антоцианами, может определять pH в различных средах, отслеживая цвет. Цвет раствора антоциана отличается от цвета антоциана, заключенного в пленку. pH-чувствительные свойства пленок, богатых антоцианами, связаны с природой биополимеров. Например, крахмалистая/желатиновая пленка,

содержащая водные экстракты растений Gliss, более чувствительна к pH, чем пленки хитозана, модифицированные водными экстрактами этого же растения. Из-за различий в составе и содержании антоцианов pH-чувствительные свойства пленок связаны с их источником. Также на пленки влияют условия экстракции антоцианов и pH раствора для их получения. pH-чувствительные свойства пленок, содержащих спиртовые экстракты антоцианов, более выражены, чем свойства водных экстрактов. Кроме того, пленка, приготовленная при pH 3, более чувствительна к pH среде [51].

Цвет пленки каррагинана/антоциана изменяется в присутствии раствора аммиака при различной температуре. Отрицательно влияют на цвет пленок условия окружающей среды, такие как кислород, свет и температура. Цвет пленки на основе антоциана зависит от его содержания, источника и условий хранения пленки. Например, порча свинины может быть обнаружена с помощью биоразлагаемой пленки, модифицированной антоцианином, поскольку pH свинины увеличивается во время хранения и изменяется цвет пленки. Также биоразлагаемая пленка, модифицированная аноцианином, была использована для обнаружения порчи молока. В молочных продуктах во время хранения вырабатываются уксусная и молочная кислоты, а pH изменяется. Пленки с умеренным содержанием антоцианов могут показать быстрые и значительные изменения цвета в зависимости от pH. Цвет сухих пленок, богатых антоцианами, иногда отличается от цвета пленкообразующих растворов из-за постепенного испарения летучих веществ (например, соляной и уксусной кислоты) в процессе сушки. Кроме того, пленки, богатые антоцианином и смешанные с куркумином, улучшают способность контролировать свежесть продуктов. Поэтому комбинация других пигментов полезна для улучшения pH-чувствительных свойств пленок, богатых антоцианами, а также их стабильности [52]. В пленки следует включать гидрофобные соединения, чтобы предотвратить миграцию пигментов в продукт [53].

Толщина пленки является важным параметром при их изготовлении, поскольку влияет на механическую прочность, проницаемость водяного пара, светопропускание и непрозрачность пленки. Толщина пленок, богатых антоцианами, зависит от общего количества твердых веществ в ее составе. Низкое содержание антоциана может быть равномерно распределено по матрице пленки, минимизируя изменение толщины пленки и вызывая сжатие ее структуры. Напротив, высокое содержание антоцианов может нарушить внутреннюю структуру матрицы пленки и увеличить ее толщину. Кроме того, на толщину пленок влияют источник антоцианов, природа биополимеров и условия хранения пленки (относительная влажность и свет). Толщина пленки увеличивается в процессе хранения в условиях высокой относительной влажности и темноты, но уменьшается при воздействии света [54].

Водорастворимость пленок – важное свойство для упаковочных пленок нового поколения. Пленки должны иметь оптимальную водостойкость, поэтому для упаковочного материала очень важна низкая растворимость в воде. Водорастворимость пленок на основе биополимеров обычно увеличивается после добавления в них экстрактов, богатых антоцианами. С одной стороны, высокогидрофильные антоцианы могут легко взаимодействовать с молекулами воды, с другой – комбинация экстрактов, богатых антоцианами, может уменьшить взаимодействие полимерных цепей и вызвать растворение матрицы пленки в воде. Растворимость пленок в воде возрастает с увеличением содержания антоцианов. Это связано с присутствием гидрофильных антоцианов, растворяющихся в воде. Кроме того, водорастворимость пленок зависит от источника и условий экстракции антоцианов, типа биополимеров и условий приготовления пленки. Растворимость в воде пленок увеличивается за счет гликозилирования антоцианов, а снижается за счет ацилирования. Антоцианы, экстрагированные спиртом, обладают высокой растворимостью в воде при использовании для приготовления пленки, в то время как антоцианы, экстрагированные водой, имеют низкую растворимость. Если пленка, содержащая антоцианы, изготовлена при низком pH, то она будет иметь высокую растворимость [55, 56].

Выводы

Интеллектуальные системы упаковки обеспечивают безопасность пищевых продуктов, информируя розничных продавцов и конечных пользователей о потенциальных проблемах с продуктами питания во время транспортировки и хранения, а также гарантируют безопасность пищевых продуктов для потребителей. Индикаторы (TTI, индикаторы свежести и индикаторы утечки) предоставляют информацию о свежести, микробиологическом качестве, безопасности, температурном статусе и сроке хранения пищевых продуктов. Датчики – это современные упаковочные системы, которые предоставляют быструю, надежную и точную информацию о безопасности и качестве пищевых продуктов и пытаются противодействовать негативным изменениям в них. Штрих-коды и теги предоставляют быструю информацию об аутентификации и отслеживании продукта, тем самым повышая эффективность и скорость распространения. Сегодня исследования сосредоточены на возобновляемых органических и натуральных материалах для использования в качестве нанокомпозитных биоматериалов в упаковке пищевых

продуктов. Эти натуральные материалы могут решить проблемы безопасности. Интеллектуальная упаковка помогает повысить безопасность, качество, долговечность, подлинность, отслеживаемость и стабильность продуктов.

Цветные полимеры на основе биоразлагаемых полимеров являются новейшим типом маркеров в пищевой упаковке, которые не загрязняют окружающую среду (поскольку они биоразлагаемы) и визуально указывают на возможную порчу пищевых продуктов. Эти цветовые индикаторы не требуют каких-либо дополнительных инструментов для индикации качества, возможной порчи и практического срока годности пищевых продуктов. Визуально, исследуя цвет индикатора, можно определить качество пищевого продукта.

Использование интеллектуальной упаковки произведет революцию в упаковочном секторе и в ближайшие дни мы увидим новые подходы и инновации в упаковке пищевых продуктов. Современные датчики в интеллектуальной упаковке помогут потребителям контролировать качество и годность продуктов питания.

Критерии авторства

М. Г. Курбанова – руководство работой в целом. Р. В. Крюк – поиск статей в базах данных PubMed от National Center for Biotechnology Information (США), Elsevier (Scopus, ScienceDirect), на платформе Web of Science и отечественной электронной библиотеке eLibrary.ru, обработка результатов, написание рукописи статьи. А. Ю. Колбина, К. Б. Плотников, И. Б. Плотников, А. Н. Петров и М. Э. А. Хелеф – консультация в ходе написания рукописи статьи.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution

M.G. Kurbanova supervised the research. R.V. Kryuk obtained scientific publications from PubMed databases from the National Center for Biotechnology Information (USA), Elsevier (Scopus, ScienceDirect), the Web of Science, and eLibrary.ru, processed the results, abd wrote the manuscript. A.Yu. Kolbina, K.B. Plotnikov, I.B. Plotnikov, A.N. Petrov, and M.E.A. Khelef provided consultation.

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest regarding the publication of this article.

References/Список литературы

1. Vu CHT, Won K. Novel water-resistant UV-activated oxygen indicator for intelligent food packaging. Food Chemistry. 2013;140(1–2):52–56. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.02.056

2. Sai-Ut S, Suthiluk P, Tongdeesoontorn W, Rawdkuen S, Kaewprachu P, Karbowiak T, *et al.* Using anthocyanin extracts from butterfly pea as pH indicator for intelligent gelatin film and methylcellulose film. Current Applied Science and Technology. 2021;21(4):652–661.

3. Giro TM, Kulikovsky AV, Andreeva SV, Gorlov IF, Giro AV. Production of enriched lamb in biodegradable packaging. Foods and Raw Materials. 2020;8(2):312–320. https://doi.org/10.21603/2308-4057-2020-2-312-320.

4. Pourjavaher S, Almasi H, Meshkini S, Pirsa S, Parandi E. Development of a colorimetric pH indicator based on bacterial cellulose nanofibers and red cabbage (*Brassica oleraceae*) extract. Carbohydrate Polymers. 2017;156:193–201. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2016.09.027

5. Dinika I, Utama GL. Cheese whey as potential resources for antimicrobial edible film and active packaging production. Foods and Raw Materials. 2019;7(2):229–239. https://doi.org/10.21603/2308-4057-2019-2-229-239

6. Roy S, Rhim J-W. Anthocyanin food colorant and its application in pH responsive color change indicator films. Critical Reviews in Food Science and Nutrition. 2021;61(14):2297–2325. https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1776211

7. Niponsak A, Laohakunjit N, Kerdchoechuen O, Wongsawadee P. Development of smart colourimetric starch-based indicator for liberated volatiles during durian ripeness. Food Research International. 2016;89:365–372. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2016.08.038

8. Peralta J, Bitencourt-Cervi CM, Maciel VBV, Yoshida CMP, Carvalho RA. Aqueous hibiscus extract as a potential natural pH indicator incorporated in natural polymeric films. Food Packaging and Shelf Life. 2019;19:47–55. https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2018.11.017

9. Liu J, Zhuang Y, Hu Y, Xue S, Li H, Chen L, *et al.* Improving the color stability and antioxidation activity of blueberry anthocyanins by enzymatic acylation with p-coumaric acid and caffeic acid. LWT. 2020;130. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109673

10. Liu S, Fu Y, Nian S. Buffering colour fluctuation of purple sweet potato anthocyanins to acidity variation by surfactants. Food Chemistry. 2014;162:16–21. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.04.029

11. Gounga ME, Xu S-Y, Wang Z. Film forming mechanism and mechanical and thermal properties of whey protein isolate-based edible films as affected by protein concentration, glycerol ratio and pullulan content. Journal of Food Biochemistry. 2010;34(3):501–519. https://doi.org/10.1111/j.1745-4514.2009.00294.x

12. Ghaani M, Cozzolino CA, Castelli G, Farris S. An overview of the intelligent packaging technologies in the food sector. Trends in Food Science and Technology. 2016;51:1–11. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2016.02.008

13. Hoffmann TG, Peters DA, Angioletti BL, Bertoli SL, Péres LV, Ratto Reiter MG, *et al.* Potentials nanocomposites in food packaging. Chemical Engineering Transactions. 2019;75:253–258. https://doi.org/10.3303/CET1975043

14. Chen H, Zhang M, Bhandari B, Guo Z. Applicability of a colorimetric indicator label for monitoring freshness of fresh-cut green bell pepper. Postharvest Biology and Technology. 2018;140:85–92. https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2018.02.011

15. Deng Y, Liu K, Liu Y, Dong H, Li S. An novel acetylcholinesterase biosensor based on nano-porous pseudo carbon paste electrode modified with gold nanoparticles for detection of methyl parathion. Journal of Nanoscience and Nanotechnology. 201;16(9):9460–9467. https://doi.org/10.1166/jnn.2016.13059

16. Aman Mohammadi M, Hosseini SM, Yousefi M. Application of electrospinning technique in development of intelligent food packaging: A short review of recent trends. Food Science and Nutrition. 2020;8(9):4656–4665. https://doi.org/10.1002/fsn3.1781

17. Chavoshizadeh S, Pirsa S, Mohtarami F. Sesame oil oxidation control by active and smart packaging system using wheat gluten/chlorophyll film to increase shelf life and detecting expiration date. European Journal of Lipid Science and Technology. 2020;122(3). https://doi.org/10.1002/ejlt.201900385

18. Halász K, Csóka L. Black chokeberry (*Aronia melanocarpa*) pomace extract immobilized in chitosan for colorimetric pH indicator film application. Food Packaging and Shelf Life. 2018;16:185–193. https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2018.03.002

19. Liu K, Zhang C. Volatile organic compounds gas sensor based on quartz crystal microbalance for fruit freshness detection: A review. Food Chemistry. 2021;334. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.127615

20. Sun G, Chi W, Zhang C, Xu S, Li J, Wang L. Developing a green film with pH-sensitivity and antioxidant activity based on κ-carrageenan and hydroxypropyl methylcellulose incorporating *Prunus maackii* juice. Food Hydrocolloids. 2019;94:345–353. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.03.039

21. Wei Y-C, Cheng C-H, Ho Y-C, Tsai M-L, Mi F-L. Active gellan gum/purple sweet potato composite films capable of monitoring pH variations. Food Hydrocolloids. 2017;69:491–502. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2017.03.010

22. Zhai X, Li Z, Zhang J, Shi J, Zou X, Huang X, *et al.* Natural biomaterial-based edible and pH-sensitive films combined with electrochemical writing for intelligent food packaging. Journal of Agricultural and Food Chemistry. 2018;66(48):12836–12846. https://doi.org/10.1021/acs.jafc.8b04932

23. Rawdkuen S, Faseha A, Benjakul S, Kaewprachu P. Application of anthocyanin as a color indicator in gelatin films. Food Bioscience. 2020;36. https://doi.org/10.1016/j.fbio.2020.100603

24. Qin Y, Liu Y, Yuan L, Yong H, Liu J. Preparation and characterization of antioxidant, antimicrobial and pH-sensitive films based on chitosan, silver nanoparticles and purple corn extract. Food Hydrocolloids. 2019;96:102–111. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.05.017

25. Moreira JB, Terra ALM, Costa JAV, de Morais MG. Development of pH indicator from PLA/PEO ultrafine fibers containing pigment of microalgae origin. International Journal of Biological Macromolecules. 2018;118:1855–1862. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.07.028

26. Latos-Brozio M, Masek A. The application of natural food colorants as indicator substances in intelligent biodegradable packaging materials. Food and Chemical Toxicology. 2020;135. https://doi.org/10.1016/j.fct.2019.110975

27. Moradi M, Tajik H, Almasi H, Forough M, Ezati P. A novel pH-sensing indicator based on bacterial cellulose nanofibers and black carrot anthocyanins for monitoring fish freshness. Carbohydrate Polymers. 2019;222. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.115030

28. Heising JK, Dekker M, Bartels PV, van Boekel MAJS. Monitoring the quality of perishable foods: Opportunities for intelligent packaging. Critical Reviews in Food Science and Nutrition. 2014;54(5):645–654. https://doi.org/10.1080/10408398.2011.600477

29. Bratovčić A, Odobašić A, Ćatić S, Šestan I. Application of polymer nanocomposite materials in food packaging. Croatian Journal of Food Science and Technology. 2015;7(2):86–94. https://doi.org/10.17508/CJFST.2015.7.2.06

30. Andretta R, Luchese CL, Tessaro IC, Spada JC. Development and characterization of pH-indicator films based on cassava starch and blueberry residue by thermocompression. Food Hydrocolloids. 2019;93:317–324. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.02.019

31. Jiang G, Hou X, Zeng X, Zhang C, Wu H, Shen G, *et al.* Preparation and characterization of indicator films from carboxymethyl-cellulose/starch and purple sweet potato (*Ipomoea batatas* (L.) lam) anthocyanins for monitoring fish freshness. International Journal of Biological Macromolecules. 2020;143:359–372. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.12.024

32. Kour H, Towseef Wani NA, Malik A, Kaul R, Chauhan H, Gupta P, *et al.* Advances in food packaging – a review. Stewart Postharvest Review. 2013;9(4):1–7a. https://doi.org/10.2212/spr.2013.4.7

33. Lv R, Huang X, Ye W, Aheto JH, Xu H, Dai C, *et al.* Research on the reaction mechanism of colorimetric sensor array with characteristic volatile gases-TMA during fish storage. Journal of Food Process Engineering. 2029;42(1). https://doi.org/10.1111/jfpe.12952

34. Pirsa S, Zandi M, Almasi H. Determination of quality and spoilage of milk by synthesized polypyrrole-Ag nanocomposite fiber at room temperature. Journal of Food Process Engineering. 2016;39(3):266–272. https://doi.org/10.1111/jfpe.12219

35. Vo T-V, Dang T-H, Chen B-H. Synthesis of intelligent pH indicative films from chitosan/poly(vinyl alcohol)/anthocyanin extracted from red cabbage. Polymers. 2019;11(7). https://doi.org/10.3390/polym11071088

36. Ramon-Marquez T, Medina-Castillo AL, Fernandez-Gutierrez A, Fernandez-Sanchez JF. Novel optical sensing film based on a functional nonwoven nanofibre mat for an easy, fast and highly selective and sensitive detection of tryptamine in beer. Biosensors and Bioelectronics. 2016;79:600–607. https://doi.org/10.1016/j.bios.2015.12.091

37. Merz B, Capello C, Leandro GC, Moritz DE, Monteiro AR, Valencia GA. A novel colorimetric indicator film based on chitosan, polyvinyl alcohol and anthocyanins from jambolan (*Syzygium cumini*) fruit for monitoring shrimp freshness. International Journal of Biological Macromolecules. 2020;153:625–632. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.03.048

38. Magagna F, Valverde-Som L, Ruíz-Samblás C, Cuadros-Rodríguez L, Reichenbach SE, Bicchi C, *et al.* Combined untargeted and targeted fingerprinting with comprehensive two-dimensional chromatography for volatiles and ripening indicators in olive oil. Analytica Chimica Acta. 2016;936:245–258. https://doi.org/10.1016/j.aca.2016.07.005

39. Liu B, Xu H, Zhao H, Liu W, Zhao L, Li Y. Preparation and characterization of intelligent starch/PVA films for simultaneous colorimetric indication and antimicrobial activity for food packaging applications. Carbohydrate Polymers. 2017;157:842–849. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2016.10.067

40. Jang NY, Won K. New pressure-activated compartmented oxygen indicator for intelligent food packaging. International Journal of Food Science and Technology. 2014;49(2):650–654. https://doi.org/10.1111/ijfs.12310

41. Yong H, Liu J, Qin Y, Bai R, Zhang X, Liu J. Antioxidant and pH-sensitive films developed by incorporating purple and black rice extracts into chitosan matrix. International Journal of Biological Macromolecules. 2019;137:307–316. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.07.009

42. Kim D, Lee S, Lee K, Baek S, Seo J. Development of a pH indicator composed of high moisture-absorbing materials for real-time monitoring of chicken breast freshness. Food Science and Biotechnology. 2017;26(1):37–42. https://doi.org/10.1007/s10068-017-0005-6

43. Domínguez R, Barba FJ, Gómez B, Putnik P, Bursać Kovačević D, Pateiro M, *et al.* Active packaging films with natural antioxidants to be used in meat industry: A review. Food Research International. 2018;113:93–101. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.06.073

44. Ezati P, Tajik H, Moradi M. Fabrication and characterization of alizarin colorimetric indicator based on cellulose-chitosan to monitor the freshness of minced beef. Sensors and Actuators B: Chemical. 2019;285:519–528. https://doi.org/10.1016/j.snb.2019.01.089

45. Balbinot-Alfaro E, Craveiro DV, Lima KO, Costa HLG, Lopes DR, Prentice C. Intelligent packaging with pH indicator potential. Food Engineering Reviews. 2019;11(4):235–244. https://doi.org/10.1007/s12393-019-09198-9

46. Banerjee S, Kelly C, Kerry JP, Papkovsky DB. High throughput non-destructive assessment of quality and safety of packaged food products using phosphorescent oxygen sensors. Trends in Food Science and Technology. 2016;50:85–102. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2016.01.021

47. Costa C, Antonucci F, Pallottino F, Aguzzi J, Sarriá D, Menesatti P. A review on agri-food supply chain traceability by means of RFID technology. Food and Bioprocess Technology. 2013;6(2):353–366. https://doi.org/10.1007/s11947-012-0958-7

48. Moazami Goodarzi M, Moradi M, Tajik H, Forough M, Ezati P, Kuswandi B. Development of an easy-to-use colorimetric pH label with starch and carrot anthocyanins for milk shelf life assessment. International Journal of Biological Macromolecules. 2020;153:240–247. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.03.014

49. Bazhenova BA, Zhamsaranova SD, Zabalueva YuYu, Gerasimov AV, Zambulaeva ND. Effects of lingonberry extract on the antioxidant capacity of meat paste. Foods and Raw Materials. 2020;8(2):250–258. https://doi.org/10.21603/2308-4057-2020-2-250-258

50. Hsu C-P, Chen P-C, Wang Y-L. A novel packaging technology for disposable FET-based biosensors with microfluidic channels. Proceedings of the 2017 IEEE 12th International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems; 2017; Los Angeles. Los Angeles, 2017. p. 375–378. https://doi.org/10.1109/NEMS.2017.8017045

51. Kuswandi B, Nurfawaidi A. On-package dual sensors label based on pH indicators for real-time monitoring of beef freshness. Food Control. 2017;82:91–100. https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2017.06.028

52. Pankaj SK, Kelly CA, Bueno-Ferrer C, Kerry JP, Papkovsky DB, Bourke P, *et al.* Application of phosphorescent oxygen sensors in in-package dielectric barrier discharge plasma environment. Innovative Food Science and Emerging Technologies. 2016;33:234–239. https://doi.org/10.1016/j.ifset.2015.11.005

53. Liu Y, Qin Y, Bai R, Zhang X, Yuan L, Liu J. Preparation of pH-sensitive and antioxidant packaging films based on **к**-carrageenan and mulberry polyphenolic extract. International Journal of Biological Macromolecules. 2019;134:993–1001. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.05.175

54. Pavelková A. Time temperature indicators as devices intelligent packaging. Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis. 2013;61(1):245–251. https://doi.org/10.11118/actaun201361010245

55. Singh BP, Shukla V, Lalawmpuii H, Kumar S. Indicator sensors for monitoring meat quality: A review. Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry. 2018;7(4):809–812.

56. Ebrahimi Tirtashi F, Moradi M, Tajik H, Forough M, Ezati P, Kuswandi B. Cellulose/chitosan pH-responsive indicator incorporated with carrot anthocyanins for intelligent food packaging. International Journal of Biological Macromolecules. 2019;136:920–926. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.06.148