



Обзорная статья
4.3.3 – Пищевые системы (технические науки)
УДК664.8

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2023.01.012

 EDN: ZHSWKW

ОБЗОР РАЗРАБОТОК БИОРАЗЛАГАЕМЫХ УПАКОВОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Леонид Чеславович Бурак

Общество с ограниченной ответственностью «Белросаква», Минск, Республика Беларусь
leonidburak@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-6613-439X>

Аннотация. Повышение заинтересованности потребителей в качественных и безопасных продуктах питания способствует развитию инноваций в области упаковочных материалов. Целью работы является обзор последних разработок в области биоразлагаемой активной и интеллектуальной упаковки для пищевых продуктов, анализ существующих проблем и ограничений в применении. В обзор включены статьи, опубликованные на английском и русском языках за период 2010–2022 гг. Для поиска были использованы базы данных Scopus, Web of Science, Elsevier, Elibrary. Проведенный обзор показал, что при разработке активных биоразлагаемых упаковок для продуктов питания широкое применение находят эфирные масла и растительные экстракты. Ключевая роль принадлежит полифенолам и особенно антоцианам, которые показывают все происходящие изменения качественных характеристик продуктов питания и увеличивают при этом их срок хранения. «Умная», биоразлагаемая упаковка является новой и перспективной областью научных исследований, которой за последние годы уделяется важное значение. С этой целью необходимо проводить дальнейшие исследования и разработки, направленные на улучшение качества биоразлагаемых видов упаковки, более полное высвобождение биологически активных соединений, снижение влияния pH, а также сохранение целостности пленки в интеллектуальной упаковке.

Ключевые слова: биоразлагаемая упаковка, активная упаковка, биополимеры, индикаторы, антиоксиданты, наночастицы, смарт-пленки.

Для цитирования: Бурак Л. Ч. Обзор разработок биоразлагаемых упаковочных материалов для пищевой промышленности // Ползуновский вестник. 2023. № 1. С. 91–105. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2023.01.012. EDN: <https://elibrary.ru/ZHSWKW>.

Original article

OVERVIEW OF DEVELOPMENTS OF BIODEGRADABLE PACKAGING MATERIALS FOR THE FOOD INDUSTRY

Leonid Ch. Burak

Belrosakva Limited Liability Company, Minsk, Republic of Belarus
leonidburak@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-6613-439X>

Abstract. Increasing consumer interest in quality and safe food is fueling innovation in packaging materials. The aim of the work is to review the latest developments in the field of biodegradable active and intelligent packaging for food products, to analyze existing problems and limitations in application. The review includes articles published in English and Russian for the period 2010-2022. The databases Scopus, Web of Science, Elsevier, Elibrary were used for the search. The review showed that in the development of active biodegradable packaging for food, essential oils and plant extracts are

© Бурак Л. Ч., 2023

widely used. The key role belongs to polyphenols and especially anthocyanins, which show all the ongoing changes in the quality characteristics of food products and at the same time increase their shelf life. Smart, biodegradable packaging is a new and promising area of scientific research, which has received great attention in recent years. To this end, further research and development is needed to improve the quality of biodegradable packaging, more fully release biologically active compounds, reduce the effect of pH, and maintain the integrity of the film in smart packaging.

Keywords: biodegradable packaging, active packaging, biopolymers, indicators, antioxidants, nanoparticles, smart films.

For citation: Burak, L.Ch. (2023). Overview of the development of biodegradable packaging materials for the food industry. *Polzunovskiy vestnik*, (1), 91-105. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2023.01.012. EDN: <https://elibrary.ru/ZHSWKW>.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время основная часть упаковочных материалов, предназначенных для сохранения качества и безопасности пищевых продуктов и применяемых в пищевой цепи производство – торговая сеть – потребитель, пригодны для одноразового использования и изготовлены из пластиковых материалов [1]. Общеизвестно, что пластик имеет длительный период разложения, и это является экологической проблемой. На сегодняшний день баланс между производством и переработкой упаковочных материалов также неблагоприятен для окружающей среды, так как производство в разы превышает объемы переработки отходов. Согласно опубликованным данным Европейского Союза, в 2019 г. на пластиковую упаковку (включая продукты питания и другие виды использования) приходилось более 15 миллионов тонн, что на 26 % больше по сравнению с 2009 г. [2]. Независимо от политических процессов в мире, пандемии и вооруженных конфликтов, необходимость снижения отходов и, как следствие, загрязнения окружающей среды очень актуальна.

Повышение осведомленности потребителей о безопасности и качестве пищевых продуктов стимулирует развитие инновации в области упаковки пищевых продуктов. Интеллектуальная и активная упаковка была разработана для расширения коммуникативной функции упаковки и соответственно поддержания и улучшения качества продуктов питания [3]. Активными принято считать любое вещество или материал, которые могут продлить срок годности или сохранить / улучшить состояние упаковки. Эти вещества целенаправленно добавляются в упаковку для выполнения определенных функций, таких как выделение или поглощение CO₂, O₂, этилена, антиоксидантов и противомикробных препаратов. Эти вещества чувствительны к изменению характеристик продукта или внутренней части упаковки. Сама упаковка не

продлевает срок годности и не улучшает качество пищевых продуктов, но такая упаковка может отслеживать качество продуктов и предоставлять количественную информацию в режиме реального времени с точки зрения изменения цвета или других физических параметров [4, 5]. Другими словами, активная упаковка (АУ) сохраняет или улучшает качество, а интеллектуальная упаковка (ИУ) дает информацию о качестве продукта. Кроме того, как отмечают ученые, интеллектуальные и активные технологии упаковки могут быть объединены для создания «умной упаковки» [6].

В настоящее время «умная» упаковка из пластика, металла, стекла и бумаги успешно применяется для многих видов пищевых продуктов. Однако их производство является энергоемким и приводит к выбросам вредных веществ, которые оказывают существенное влияние на окружающую среду [7]. Другой важной проблемой для всех стран, и развитых в том числе, является обращение с отходами упаковки. Кроме всего прочего, миграция опасных соединений из обычных интеллектуальных упаковочных систем и последующее потребление в результате неправильной утилизации упаковочных материалов на основе продуктов нефтепереработки вызывают серьезные проблемы со здоровьем и воздействием на окружающую среду. Поэтому с целью снижения вредного воздействия на окружающую среду разработка и применение натуральных соединений для упаковки пищевых продуктов вызывает повышенный интерес многих научных исследователей и является новым и перспективным направлением научных разработок.

Противомикробные агенты и антиоксиданты, получаемые из растительного сырья, находят применение в активной упаковке в качестве альтернативы искусственным пищевым консервантам. Периодическое высвобождение этих веществ оказалось очень эф-

ОБЗОР РАЗРАБОТОК БИОРАЗЛАГАЕМЫХ УПАКОВОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

фективным для предотвращения окисления пищевых продуктов и ингибирования микробиологической порчи пищевых продуктов. Кроме того, добавление натуральных красителей и наночастиц необходимого качества, пригодного для применения в пищевых продуктах, в биополимерную матрицу способствовало разработке биоразлагаемой интеллектуальной упаковки.

Следует отметить, что многие проведенные обзоры научных публикаций, как правило, были сосредоточены на одном аспекте характеристик биоразлагаемых пленок, таких как биополимеры, биологически активные соединения, функциональность (интеллектуальная или активная) или контролируемое высвобождение. Целью настоящей статьи является представление аналитического всестороннего обзора активных и интеллектуальных функций биоразлагаемых пленок как по отдельности, так и в комбинировании с другими, используемых для разработки «умной» упаковки. Представленный обзор, более обширный, и способен дать всестороннее представление об основных аспектах биоразлагаемых пленок, интеллектуальных, активных и умных упаковок пищевых продуктов для исследователей в этой области [8, 9, 10, 11].

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Поиск зарубежной научной литературы на английском языке по данной теме проводили в библиографических базах «Google Scholar», «Scopus», «Web of Science», «Elsevier». Для отбора научных статей на русском языке провели поиск по ключевым словам в «Научной электронной библиотеке eLIBRARY.RU». Также выполнили обзор научных журналов по тематике исследования. При отборе публикаций для обзора приоритет отдавали высокоцитируемым источникам. Были просмотрены списки литературы отобранных статей для выявления дополнительных релевантных источников информации. В качестве временных рамок для обзора научных публикаций был принят период 2010–2021 гг. Более ранние научные статьи изучали только при отсутствии новых публикаций по конкретным аспектам исследуемой темы.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

1. Биоразлагаемая интеллектуальная упаковка

В процессе хранения упакованные пищевые продукты претерпевают ряд изменений, что приводит к изменению состава среды упаковки. Это такие процессы, как изменения pH, состава газа в результате химической и микро-

биологической порчи, образование вредных соединений, таких как амины, аммиак, H_2S и т. д. С целью обнаружения и индикации присутствия данных ключевых соединений в биополимеры в ходе процесса производства упаковочного материала добавляются интеллектуальные соединения (вещества, чувствительные к присутствию одного конкретного соединения или класса соединений). Было установлено, что в результате реакции на происходящие изменения внутри упаковки, некоторые виды натуральных красителей меняют свой цвет. Изменение цвета может быть легко обнаружено потребителем, что и указывает на пригодность упакованного продукта к употреблению. Внесение натуральных красителей в биоразлагаемые пленки описано в следующих разделах.

1.1. Индикаторы свежести на основе pH

В результате процесса дыхания и действия микроорганизмов во время хранения овощей, фруктов, мясных и молочных продуктов происходит изменение pH. С целью контроля качества этих пищевых продуктов и изменение pH можно отслеживать путем включения в упаковочные материалы чувствительные к pH соединения для пищевых продуктов. Данные соединения претерпевают различные химико-структурные изменения, которые в итоге приводят к изменению цвета. Учитывая данные свойства, ученый Li в соавторстве с другими [5] проанализировал способность антоцианов, полученных из пурпурного картофеля, в качестве интеллектуального соединения в биоразлагаемых пленках на основе хитозана и хитина. Полученные пленки подвергали воздействию кислой и щелочной среды и в зависимости от pH отслеживали изменение цвета. Причину изменения окраски пленок авторы связывают с изменением химической структуры антоцианов при различных значениях pH. В частности, флавилиевый катион в антоциане является преобладающей формой при pH в диапазоне 1–3, что визуально воспринимается по преобладающему красному цвету в окраске. При pH 3,0–6,0 пленки обесцвечивались за счет гидратации флавилиевого катиона с последующим превращением в метанол и халконовое основание. Повышение pH до щелочного приводило к синей окраске, обусловленной образованием хинонового основания. Аналогичные результаты по изменению цвета были получены и другими исследователями, которые добавляли антоцианы из фиолетового картофеля, красной капусты, ягод жимолости и винограда в упаковочные пленки на основе целлюлозных нановолокон, нового конжака,

глюкоманнана, рыбьего желатина, хитозана и к-каррагинана [4, 12, 13].

Также для отслеживания изменений pH наряду с антоцианами pH-чувствительные экстракты зеленого чая и пуэра показали свою эффективность в пленках на основе фуцелларана и желатина [6]. В результате данного исследования установлено, что пленки становились белыми в буферном растворе, при pH 3,0 и приобретали оранжевый окрас при повышении pH до 12,0. При этом пленки, наполненные экстрактом пуэра, показали большее обесцвечивание при кислом pH, тогда как пленки, приготовленные с экстрактом зеленого чая, показали большее обесцвечивание при щелочном pH. Аналогичный результат обесцвечивания получен и при нанесении пленок на мясо рыбы, но нанесенные пленки при этом показали набухание и порчу (от краев) из-за высокой растворимости (43–44 %) и высокого индекса набухания (80 %) фуцелларан-желатина. Следует отметить и другие соединения, вызывающие изменение цвета в зависимости от pH в биоразлагаемых пленках, это экстракт розмарина, который добавляли в фуцелларан-желатин [3], экстракт жамуна в крахмале [6], беталаины в крахмале или желатине, поливиниловый спирт и ализарин в хитозане [14, 15].

Также в некоторых научных исследованиях показано применение различных комбинаций в производстве пленок для мониторинга изменения pH в пищевых продуктах. Одной из важных проблем, связанных с разработкой и внедрением этой категории инновационной упаковки, является использование безопасных красителей. Использование синтетических соединений с неизвестным уровнем безопасности может представлять опасность для здоровья потребителя [16]. На основании вышеизложенного в дальнейших научных исследованиях следует рассмотреть возможность использования натуральных красителей, таких как антоцианы и другие экстракты, богатые полифенолами, уделяя особое внимание побочным продуктам переработки агропромышленного производства.

1.2. Детекторы обнаружения углекислого газа CO₂

Процесс микробиологической порчи мясных продуктов, овощей, фруктов и других пищевых продуктов приводит к образованию и постоянному накоплению углекислого газа CO₂ в среде упаковки [17]. Проведенный анализ научных публикаций показывает, что некоторые исследования посвящены разработке биоразлагаемых пленок и покрытий, способных контролировать содержание CO₂

внутри упаковки. Так, например, авторы Saliu & Della Pergola [18] в ходе исследования изготовили этикетку из этилцеллюлозной пленки с водным индикатором, состоящим из лизина, полилизина и антоцианов. Этикетки быстро меняли свой цвет даже при низком уровне CO₂ (до 2,5 %), а на воздухе цвет менялся на первоначальный. Механизм процесса изменения окраски основан на реакции между ε-аминогруппой лизина и CO₂, приводящей к образованию производного карбаминовой кислоты и подкислению пленки, поэтому, цвет антоцианов изменился. Дальнейшие исследования в качестве активного покрытия для консервирования свежей куриной грудки оказались очень эффективными, поскольку указывали на образование CO₂ в результате микробной порчи при низкой температуре (0–5 °C).

Основываясь на полученных результатах, авторы Луи и другие соавторы [19] разработали систему упаковки с использованием бромтиолового синего и тетрабутиламмония в качестве индикаторов для обнаружения CO₂. Интеллектуальная упаковка оказалась чувствительной к изменениям содержания CO₂ в окружающей среде упаковки (от голубоватого до желтоватого цвета по мере увеличения концентрации CO₂). Также следует отметить эксперимент, проведенный учеными Wan X. и др. [20, 21], которые исследовали применение биоразлагаемой пленки, где в качестве индикаторов использовали бромкрезоловый синий и метиловый красный для контроля изменений в бананах в процессе хранения при 10 °C. Анализ процесса показал, что накопление CO₂ коррелирует с цветом пленки от синего (свежего) до желтого (не свежего).

Для контроля качества ферментированных продуктов ученые Jung и др. [22] разработали чувствительный к CO₂ индикатор на основе хитозана (0,1 %, 0,2 %, 0,3 %, 0,4 %) и 2-амино-2-метил-1-пропанола (АП). В ходе исследования авторы подвергали все хитозановые пленки воздействию 100 % CO₂ и установили, что индикатор с содержанием хитозана 0,2 % и 0,3 % становился прозрачным. Авторы объясняют это явление тем, что CO₂ поглощается водным раствором хитозана и образует угольную кислоту (HCO₃). Затем происходит процесс диссоциации H₂CO₃ на ион водорода (H⁺) и ион бикарбоната (HCO₃⁻). Ион водорода реагирует с аминогруппой хитозана и изменяет суспензию с непрозрачной на прозрачную, обеспечивая контроль качества продукта в режиме реального времени.

Данное исследование свидетельствует об эффективности применения биоразлагаемых чувствительных пленок для мониторинга обра-

ОБЗОР РАЗРАБОТОК БИОРАЗЛАГАЕМЫХ УПАКОВОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

зования CO_2 в пищевых продуктах в процессе обработки и хранения. Другим важным аспектом систем, разработанных в этих исследованиях, является их универсальность для индикации изменений доли CO_2 при изменении цвета, а также выбранных интеллектуальных соединений. В то время как высокая чувствительность к низкой концентрации CO_2 была получена в ходе исследования с использованием антоцианов (до 20 % CO_2) [18], другие исследования с использованием промышленных красителей, таких как бромтимоловый синий и смесь тетрабутиламмония, были более заметны при более высоком уровне CO_2 (≥ 60 % CO_2). На основании этого можно сделать вывод, что биоразлагаемая интеллектуальная упаковка может производиться и применяться для мониторинга CO_2 с целью достижения необходимого содержания CO_2 при ферментации или обеспечении срока годности.

1.3. Индикаторы температуры

Температура является важным фактором, определяющим рост микроорганизмов, метаболическую активность и другие химические реакции, происходящие в пищевом продукте. Поэтому осуществление контроля температуры во время хранения, транспортировки и розничной продажи является одной из важных задач по обеспечению безопасности и качества пищевых продуктов. Исследователи Maciel и др. [23] разработали биоразлагаемые термочувствительные пленки с использованием антоцианов в хитозане. Авторы выдерживали пленки при температуре 20 °C, 40 °C и 60 °C в течение 72 часов. Необратимое изменение цвета от светло-фиолетового до светло-желтого наблюдалось после выдержки при температуре 40 °C. Аналогичные результаты эти ученые получили в покрытиях из хитозана и антоцианина на картонной бумаге. Процесс изменения цвета авторы объясняют тепловой деградацией антоцианов, которые превращаются в халкон, а затем в производное глюкозида кумарина, что и дает желтый цвет. Другой класс температурных индикаторов, обычно известный как индикатор температуры-времени (ИТВ), был разработан группой ученых с использованием антоциана в хитозане и поливинилового спирте. Данные пленки применяли для контроля сроков хранения молока [24, 25]. В молоке воздействие температуры охлаждения выше оптимальной в течение длительного периода способствует микробной деградации и накоплению молочной кислоты, что в конечном итоге снижает pH молока. В этих условиях

антоцианы вызывают явное изменение цвета, воспринимаемое человеческим глазом, что приводит к дифференциации свежего (пленка темно-серого цвета при pH 6,7) до испорченного молока (пленка темно-розового цвета при pH 4,6 через 4 дня при 25 °C). В действительности температурные индикаторы чувствительны к изменению pH. Изменение цвета пленки происходит из-за изменения pH при колебаниях температуры. Это может ввести в заблуждение, так как колебания pH (в среде упаковки) могут происходить и из-за некоторых других факторов, таких как CO_2 , общий летучий азот и т. д. Поэтому важно и необходимо проводить поиск и разработку индикаторов, чувствительных к колебаниям температуры, не зависящих при этом от других промежуточных факторов.

1.4. Индикаторы присутствия кислорода

Присутствие кислорода в пищевой упаковке стимулирует метаболическую и микробную активность, а также физико-химические изменения, которые можно заметить по цвету, вкусу и запаху обработанных и необработанных пищевых продуктов. Во избежание этих изменений в атмосфере упаковки снижают концентрацию кислорода. Но, как известно, кислород может проникать сквозь упаковочный слой и вызывать вышеупомянутые нежелательные процессы. В данном контексте в ходе нескольких исследований были проанализированы проявления пленок для обнаружения проникновения кислорода через материалы, упакованные с пищевыми продуктами. Ученые Mills и другие [26] разработали биоразлагаемую пленку для индикации воздействия кислорода. По данным этих авторов, через 15 мин пленка изменила свой цвет с синего на желтый. Также была разработана бесцветная и УФ-активируемая метилцеллюлозная пленка для индикации воздействия воздуха (21 % кислорода) [26].

В этом направлении также следует отметить эксперимент, проведенный группой ученых Deshwal и др. [27]. Авторы изучали формирование пленки, чувствительной к кислороду, активируемой ультрафиолетовым светом (альгинат натрия, казеинат натрия и каррагинан), с добавлением индикатора метилового синего. Пленки подвергались воздействию кислорода в диапазоне от 1 до 10 % и оказались одинаково чувствительными (как было видно из значений L^* , a^* и b^* , измеренных с помощью колориметра) при всех концентрациях кислорода. Было установлено,

что каррагинановая пленка имеет меньшую миграцию соединений в воду и пищевые имитаторы (10 % этанол, 50 % этанол, 3 % уксусная кислота и н-гептан) по отношению к двум другим пленкам. На основании этого авторы высказали предположение, что каррагинановая пленка является наиболее подходящим индикатором утечки кислорода среди всех трех пленок для прямого (вакуумного) и непрямого (упаковка в модифицированной газовой среде) пищевых продуктов.

Важным аспектом, связывающим текущие исследования с ожидаемым применением в пищевых продуктах, является характеристика способности данных видов пленок сохранять свои интеллектуальные соединения. В этом направлении авторы Vu и Won [28] разработали другое биоразлагаемое кислородное покрытие, активируемое ультрафиолетовым светом. В данном случае интеллектуальное покрытие готовили с использованием альгината и лизеина (биополимера) и комбинации тионина, P25TiO₂ и глицерина в качестве чувствительной системы. Тест на потерю соединений показал, что альгинатные покрытия обладают более высокой способностью удерживать соединения интеллектуальной системы по сравнению с зеином (5,80 против 80,8 % потери после 24 часов погружения в воду). Кроме того, авторы также отмечают, что альгинатное покрытие восстанавливало свой цвет после 4-часового воздействия УФ-излучения. В последующем исследовании той же группы ученых проведено исследование влияния биополимера (каррагенан или зеин) и окислительно-восстановительного красителя (метиленовый синий, азур А или тионин) на создание системы индикатора кислорода. Зеин имел низкую способность предотвращать снижение элементов интеллектуальной системы по отношению к каррагенановым пленкам. Авторы сделали предположение, что каррагинан с метиленовым синим можно рассматривать в качестве составляющих при проведении дальнейших исследований.

1.5. Показатели общего летучего основного азота

Общий летучий основной азот (TVB-N) относится к летучим аминам (таким, как триметиламин, диметиламин и аммиак), используемым для контроля срока годности рыбы и морепродуктов. Эти летучие соединения образуются в процессе микробной деградации аминокислот (особенно в мясе рыбы) [29]. Для контроля содержания TVB-N были раз-

работаны биоразлагаемые пленки на основе камеди и поливинилового спирта (PVOH) с использованием куркумина в качестве чувствительного материала [30]. Эта пленка подвергалась воздействию водно-аммиачной среды при относительной влажности 33 %, 53 %, 75 % и 90 %. Было установлено, что летучий аммиак реагировал с водой с образованием NH₄⁺ и OH⁻ при высокой относительной влажности. Данные условия создавали щелочную среду вокруг пленок и способствовали реакции между OH⁻ и куркумином. Затем образование фенольного аниона кислорода изменило цвет пленок (от желтого до оранжевого). Применение этой пленки на креветках показало аналогичные результаты при изменении содержания TVBN с 14,82 до 60,02 (мг/100 г). В своем исследовании авторы Liang и др. [31] установили эффективность использования экстракта краснокочанной капусты в качестве красителя для смолы *Artemisia sphaerocephala* Krasch и пленки из карбоксиметилцеллюлозы натрия. Изменение цвета с желто-зеленого на желтый наблюдалось при воздействии на пленки NH₃. Группа исследователей приготовили аналогичные пленки, включив антоцианы, полученные из рисовых отрубей, в матрицу из окисленного хитина и хитозана. Полученные пленки рекомендованы авторами для контроля сроков годности морепродуктов на белковой основе [32].

Беталаины представляют собой натуральные красители, которые можно применять при проявлении пленок для отслеживания накопления TVB-N. Одним из примеров является пленка из смеси крахмала и поливинилового спирта, содержащая беталаины из питайи, которая способствует постепенному изменению цвета из-за увеличения уровня TVB-N по причине ухудшения качества креветок [15].

Эти исследования дают основания возможности использования значения TVB-N для определения свежести рыбы и морепродуктов, поскольку для этих соединений во многих странах уже установлены предельные уровни содержания. Следует отметить, что определение TVB-N не считается достаточно надежным, чтобы полностью подтверждать свежесть курицы, свинины, говядины и козье-го / овечьего мяса [33]. Такой вывод можно сделать на основании несоответствия результатов различных исследований, позволяющих определить порог и четко отличить свежие образцы от испорченных. Поэтому научные разработки, направленные на анализ накопления TVB-N и подтверждением факта испорченности мяса является необходимым шагом для поддержки и продолжения

ОБЗОР РАЗРАБОТОК БИОРАЗЛАГАЕМЫХ УПАКОВОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

дальнейших разработок биоразлагаемых интеллектуальных упаковочных систем с использованием индикаторов TVB-N.

Дальнейшие разработки в области использования биоразлагаемых пленок для мониторинга TVB-N можно также рассматривать для применения при ферментации пищевых продуктов, поскольку его ингибирование является ключевым элементом качества и безопасности [34, 35].

1.6. Индикаторы сероводорода

Мясо и мясные продукты подвержены микробной деградации, что приводит к образованию сероводорода (H_2S). Наличие сероводорода может быть связано с качеством и сроком годности мяса и мясных продуктов. В этом направлении авторы Zhai и др. [36] изготовили пленки на основе гуарановой камеди, содержащей наночастицы серебра (Ag), и установили, что пленки могут обнаруживать H_2S до предела 0,81 мкмоль. Реакция между Ag и H_2S привела к образованию Ag_2S , вызывающее видимое изменение цвета с желтого на бесцветный. В аналогичном исследовании эффективность этого индикатора наночастиц Ag была проверена на альгинатной пленке [37]. Присутствие H_2S после бактериального разложения приводило к значительному изменению цвета от прозрачного светло-серовато-белого до желтоватого через 5 мин и затем до непрозрачного темно-коричнево-черного цвета через 24 ч воздействия H_2S . В основном чувствительность биоразлагаемых интеллектуальных пленок была доказана в контролируемых условиях лаборатории. Хотя проведение контроля H_2S в упаковке пищевых продуктов дает необходимую информацию о сроке годности пищевых продуктов, за последнее десятилетие было опубликовано незначительное количество исследований по использованию биоразлагаемых материалов. Возможной причиной такой тенденции может быть существующая зависимость от H_2S -продуцирующих бактерий в процессе порчи пищевых продуктов [38].

2. Биоразлагаемая активная упаковка

Упаковки для пищевых продуктов могут быть изготовлены из активных материалов, которые непрерывно выделяют и/или поглощают газы, а также компоненты, которые продлевают срок годности пищевых продуктов. Активная упаковка подразделяется на мигрирующую и немигрирующую. В мигрирующей активной упаковке активные материалы часто высвобождаются из упаковки пищевых продуктов.

2.1. Антимикробные биоразлагаемые пленки

Пищевые продукты обычно подвержены биологическим изменениям, таким как ферментативное потемнение (плоды и ягоды) и окислительная прогорклость (жиродержащие продукты). Неоднократно проводились исследования по использованию природных антиоксидантов в промышленных упаковочных материалах с целью сохранения качества и продления срока годности пищевых продуктов. Кроме того общеизвестно, что антиоксиданты оказывают благотворное влияние на организм в процессе употребления. Эти соединения обеспечивают устойчивость к окислительному стрессу, повреждению тканей и снижают риск развития различных заболеваний, таких как рак, желудочно-кишечные инфекции, гипертония и т. д. [39, 40, 41].

Также было доказано, что промышленные упаковочные материалы могут быть обогащены антимикробными агентами для замедления роста пищевых патогенов, таких как бактерии, дрожжи, плесень и т. д. [42, 43]. С этой целью проведено многочисленное количество исследований по применению в биоразлагаемых пленках и покрытиях растительных экстрактов, эфирных масел, органических кислот и других соединений.

2.1.1. Экстракты растений

Опубликованы исследования об использовании экстрактов растений (богатых полифенолами) в качестве противомикробных веществ в биоразлагаемых активных пленках. Фенольные соединения могут действовать как ионофоры и уменьшать значение pH через мембрану микроорганизмов, протонная движущая сила при этом уменьшается. В итоге это состояние препятствует усвоению питательных веществ и приводит к гибели бактериальных клеток [44]. Что касается применения натуральных экстрактов в активной упаковке, авторы Wu H и др. [45] использовали полифенолы из экстракта чая в различных концентрациях (5 %, 10 %, 15 % и 20 %) для разработки пленок с использованием порошка кожуры помело. Увеличение концентрации полифенолов чая улучшило антиоксидантный, а также антимикробный потенциал пленок в отношении кишечной палочки и золотистого стафилококка. Это исследование также показало, что пленка с экстрактом чая более эффективна против грамположительных бактерий (*S. aureus*). Аналогично другие авторы исследовали противомикробное и антиоксидантное действие экстракта хмеля (0 % и 0,15 % масс./масс. в пленкообразующем растворе) на

хитозановые и желатиновые пленки [46]. Помимо повышения антиоксидантной активности пленок, экстракт хмеля эффективно ингибировал рост грамположительных (*Bacillus subtilis* и *Listeria monocytogenes*) и грамотрицательных (*E. coli* и *Shigella sonnei*) бактерий. Однако больший эффект был выражен на грамположительных бактериях, по сравнению с грамотрицательными бактериями. Учеными Ja'skiewicz, Budryn, Nowak, Efenberger-Szmechtyk [46] было проанализировано антимикробное действие активных биоразлагаемых пленок в отношении грамотрицательных бактерий (*E. coli* и *Pseudomonas fluorescens*), грамположительных бактерий (*S. aureus* и *B. subtilis*) и грибы (*Candida albicans* и *Aspergillus niger*). *P. fluorescens* был наиболее чувствителен к экстракту цикория, тогда как *S. aureus* был менее чувствителен. Кроме того, дрожжи оказались более устойчивыми к антимикробным пленкам, содержащим экстракт цикория, чем протестированные бактерии.

Более устойчивый подход, принятый в последние годы, заключается в использовании экстрактов отходов растений для придания пленкам свойств поглощения свободных радикалов и улучшения их свойств. В данном направлении авторы Crizel и др. [47] исследовали антиоксидантный потенциал порошка кожуры папайи в виде макро- и микрочастиц, включенный в желатиновые пленки. Пленки, содержащие микрочастицы папайи, обладали более высокой антиоксидантной активностью по сравнению с пленками из микрочастиц папайи. Другие авторы изучали функциональные характеристики экстракта кожуры граната (10 г/л) в пленках карвакрола и хитозана. Установлено, что добавление экстракта кожуры увеличило содержание фенолов в пленках и показало высокую эффективность для ингибирования грамотрицательных (*E. coli*) и грамположительных (*S. aureus*) бактерий [48].

Ученые Ju и Song [49] использовали экстракт желтой луковой шелухи в фунорановых пленках, извлеченных из красных водорослей, и установили, что экстракт эффективно удаляет свободные радикалы. Аналогичным образом установлено, что включение экстракта кожуры манго эффективно увеличивает общее содержание фенолов и улучшает активность пленок на основе рыбьего желатина по удалению свободных радикалов [50].

2.1.2. Эфирные масла

Эфирные масла (ЭМ) представляют собой вторичные метаболиты, присутствующие в растениях. В настоящее время ЭМ исполь-

зуются для придания антимикробных и антиоксидантных свойств пищевым материалам. Противомикробное действие эфирных масел объясняется наличием нескольких соединений и их гидрофобной природой, что подтверждается результатами многих исследований [51,52].

В качестве примера также можно привести исследование группы ученых Jamr'oz и др. [53], которые изучали влияние концентрации эфирных масел лаванды на свойства биоразлагаемых пленок крахмала, фуцелларана и желатина. Эти авторы сообщают об увеличении антиоксидантной активности и зоны ингибирования (при повышении концентрации) в отношении грамотрицательных (*E. coli*) и грамположительных (*S. aureus*) бактерий [53].

Авторы исследования Saricaoglu and Turhan [54] сравнили влияние эфирных масел тимьяна, гвоздики и розмарина (1,5 %) на белковые пленки курицы. Самая высокая антиоксидантная активность была получена от эфирного масла гвоздики, затем следуют эфирные масла тимьяна и розмарина. Авторы также изучали противомикробные свойства пленок, обогащенных эфирными маслами, в отношении *B. subtilis*, *S. aureus*, *E. coli* и *L. monocytogenes*. Эфирное масло гвоздики было наиболее эффективным против *B. subtilis*, *S. aureus* и *E. coli*, тогда как эфирное масло тимьяна лучше действовало против *L. monocytogenes*. Наименьшая антимикробная активность отмечена у эфирного масла розмарина. Исследование, проведенное учеными Lian, Shi, Zhang и Peng [55] с эфирным маслом тимьяна в активных пленках на основе хитозана, показало снижение скорости роста *E. coli*. Проводились также исследования по применению эфирных масел розмарина, косточек абрикоса, имбиря и ладанника в биоразлагаемых пленках. Полученные результаты свидетельствуют, что данные эфирные масла придают биоразлагаемым пленкам антимикробную активность [56–58].

2.1.3. Органические кислоты

Действие органических кислот вызывает снижение pH клеток и изменение проницаемости клеточной мембраны. Немало научных исследований посвящено изучению антимикробного потенциала лимонной, винной, яблочной и молочной кислот в пленках из соевого белка. Установлено, что яблочная кислота (2,6 %) наиболее эффективна против *Salmonella gaminara*, *L. monocytogenes* и *E. Coli O157:H7.*, а лимонная кислота в поливиниловом спирте и пленках на основе крах-

ОБЗОР РАЗРАБОТОК БИОРАЗЛАГАЕМЫХ УПАКОВОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

мала показала высокую ингибирующую активность в отношении патогенов пищевого происхождения *L. monocytogenes* и *E. coli*. [59]. Аналогичные результаты были получены ученым El-Fawal [60] с лимонной кислотой в каррагинановой пленке против *S. aureus*, *Pseudomonasaeruginosa*, *Proteusmirabilis*, *Dickeyachrysanthemi* и *E. coli*.

2.1.4. Металлические наночастицы

Некоторые металлические наночастицы используются в биоразлагаемых активных упаковках в качестве поглотителей этилена, защиты от УФ-излучения и, что наиболее важно, в качестве антимикробных агентов [61]. В литературных источниках содержатся сведения о наночастицах оксида цинка, TiO_2 , меди и серебра, которые оказывали эффективное действие против *P. aeruginosa*, *Pseudomonasspp.*, *B. subtilis*, *Bacilluscereus*, *Bacillusemegaterium*, *Cryptococcus* и *Candida* [62, 63, 64]. Вместе с тем применение металлических наночастиц требует дополнительных исследований для выяснения цитотоксичности и генотоксичности этих новых материалов и определения возможности и целесообразности использования, а также безопасных пределов для включения в съедобные упаковки [65].

2.2. Кинетика высвобождения активных веществ

Эффективность активной упаковки зависит от их полного и своевременного высвобождения из системы упаковки. По сути, быстрое высвобождение может сократить срок годности пленок, тогда как медленное высвобождение может снизить эффективность пленок для сохранения пищевых продуктов, поэтому важно охарактеризовать кинетику высвобождения активных пленок. Это свойство зависит от многих факторов, включая свойства биополимера, тип и концентрацию пластификаторов, тип поверхностно-активных веществ, используемых для формирования пленки, характеристики активно-соединения и его концентрацию, а также тип пищевого симулятора. Касаемо биоразлагаемых упаковочных материалов были изучены некоторые ключевые аспекты для улучшения контроля за высвобождением активных соединений, которые включают модификацию состава пленки (например, биополимеры, пластификатор и поверхностно-активное вещество), активных соединений (наноинкапсулирование) и взаимодействие с пищевым симулятором [66].

В этой связи зарубежными учеными изу-

чались высвобождение общих фенолов из агар-зеленого чая (АГ) и агар-желатин-активные пленки на основе экстракта зеленого чая (АГЖ) в воде через 15 мин, 90 мин и 16 ч. Через 15 мин обе пленки выделяли одинаковое количество полифенолов (50 мг галловой кислоты/г пленки), но в интервале 15–90 мин выделение увеличивалось в 1,5 раза до 80 мг галловой кислоты/г пленки в пленках АГ. Однако высвобождение фенольных соединений немного увеличилось примерно до 84 мг галловой кислоты/г пленки через 90 мин. Наоборот, включение желатина в пленку (АГЖ) уменьшало высвобождение фенольных соединений (отсутствие значительного высвобождения в течение 15–90-минутного интервала), а накопленное высвобождение полифенолов достигало 60 мг галловой кислоты/г пленки через 16 часов [67].

Ученым Саго в соавторстве с другим [68] проведены исследования по изучению кинетики высвобождения наночастиц хитозантриполифосфат-тимола (ТТИ) из пленок хитозана, а также из белков хитозан/квиноа в воде. Различные тенденции диффузии наблюдались в течение 8 дней, при этом высвобождение ТТИ из пленки хитозана было более быстрым, чем из пленки хитозан/белок квиноа в первый и четвертый день испытаний. После четвертого дня обе пленки показали более медленное высвобождение ТТИ до конца тестирования (8-й день). По мнению авторов, эта разница в начале срока хранения может быть связана с расположением наночастиц на поверхности пленки хитозана (более подверженной воздействию воды), тогда как интернализация наночастиц происходит в пленке белка хитозан/хиноа, где воздействие воды уменьшилось.

Время высвобождения натамицина (бактериоцина) из альгинатно-пектиновых пленок в воде изучали авторы Bierhalz, Da Silva и Kieckbusch. Время высвобождения натамицина улучшилось с 30 ч (пектиновые пленки) до 70 ч в альгинатно-пектиновых пленках и до 800 ч в альгинатных пленках, что свидетельствует о высокой совместимости натамицина с альгинатом [69].

Пластификатор является еще одним ключевым фактором, который может повлиять на высвобождение активных соединений из биоразлагаемых упаковочных материалов. Это подтверждается экспериментом, проведенным учеными Arrieta и др. [70], которые изучали влияние ацетил (трибутилцитрата), пластификатора на скорость высвобождения активных пленок из полимолочной кислоты (PLA) и поли(гидроксibuтирата) (PBH) на ос-

нове катехина в течение 1, 5, 10 и 20 дней хранения. Эти авторы наблюдали, что ацетил(трибутилцитрат) в качестве пластификатора в матрицах ПЛА-ПГБ увеличивал коэффициент диффузии примерно в 3 раза (примерно с 0,02 до 0,25) после 10 дней хранения по сравнению с пленками без пластификаторов. Более того, обе активные пленки были одинаково эффективны для антирадикального и антимикробного действия.

Другим методом контроля высвобождения активных соединений считается использование поверхностно-активных веществ, которые имеют различные уровни гидрофильности. В этом контексте ученые попытались контролировать кинетику высвобождения аскорбиновой кислоты (АК), путем добавления различных поверхностно-активных веществ (Span 80 и Tween 20 с гидрофильно-липофильным балансом 4,3 (гидрофобный) и 16,7 (гидрофильный) соответственно, в активных пленках на основе крахмала кудзу (KS). Добавление Span 80 в качестве поверхностно-активного вещества снижает коэффициент диффузии пленок в воде с $2,22 \cdot 10^{-11} \text{ м}^2/\text{с}$ (для контрольных пленок) до $0,97 \cdot 10^{-11} \text{ м}^2/\text{с}$, кроме того, эффективность Tween 20 была менее значительной по причине его гидрофильной природы [71].

Анализ характеристик различных имитаторов пищевых продуктов является еще одним из ключевых аспектов для оценки миграции активных соединений. В данном контексте необходимо отметить работу ученых Requena, Vargas и Chiralt [71], которые изучили кинетику высвобождения эвгенола (Eg) и карвакрола (Cv) (13 %) в антимикробных пленках на основе поли(гидроксibuтирата-со-гидроксивалерата). В своем исследовании авторы использовали несколько модельных систем для имитации различных пищевых сред (A = 10 % этанола (об./об.), B = 3 % уксусной кислоты (вес./об.), C = 50 % этанола (об./об.) и D = изооктан), (водный раствор, кислый водный раствор, спиртовой и в виде эмульсии масла в воде) для оценки характеристик высвобождения биоактивных агентов при 20 °C. На скорость высвобождения обоих активных соединений влияла имитирующая композиция, в которой наибольшая скорость наблюдалась в растворе C (7,2 и 19,0 мкг/с для Cv и Eg соответственно), тогда как наименьшая скорость была получена при использовании раствора D (0,15 и 0,30 для Cv и Eg соответственно). Аналогичное исследование, характеризующее связь между добавлением морских водорослей в пленки из полимолочной кислоты и высвобождением сорби-

новой кислоты в пищевых стимуляторах, содержащих 10 или 95 % об./об. этанола, проводили авторы Rodríguez-Martínez и др. [72]. Самые высокие скорости диффузии были установлены в пищевом имитаторе, содержащем 95 % этанола, для пленок, изготовленных с использованием морских водорослей и без них, – ($2,8 \times 10^{-10}$ и $1,4 \times 10^{-10} \text{ см}^2/\text{с}$ соответственно). Влияние морских водорослей на диффузию сорбиновой кислоты в основном наблюдалось при нанесении пленок на пищевой имитатор с 10 % этанолом, при этом диффузия улучшалась от $1,5 \times 10^{-13}$ (без водорослей) до $2,2 \times 10^{-11}$ (с водорослями) $\text{см}^2/\text{с}$. Полученные результаты исследования дают основания предполагать наличие возможности контролировать высвобождение активных соединений в биоразлагаемых упаковочных материалах. Следует также отметить, что необходимо учитывать взаимодействие между пленкой и активными соединениями, чтобы высвобождение было постепенным, а не быстрым. Дальнейшие эксперименты по исследованию биоразлагаемой активной упаковки могут быть направлены на разработку методологий с имитаторами, способных повторять характеристики пищевых продуктов, в особенности твердых пищевых продуктов. Известно, что на скорость диффузии активных соединений влияют свойства пищевых продуктов, и результаты показывают, что в одном растворе можно получить более высокие скорости диффузии, чем в твердых пищевых продуктах, таких как сыр [73, 74].

3. Биоразлагаемая смарт-упаковка

«Умная упаковка» – это новая концепция биоразлагаемых упаковочных систем, которая предполагает использование как интеллектуальных, так и соответственно активных веществ для контроля и поддержания / улучшения качества упакованного продукта. Прогнозируется, что объем стоимости производства электронной смарт-упаковки в следующем десятилетии превысит 1,45 миллиарда долларов [75, 76]. Ученые активно работают над заменой части электронных умных упаковочных систем на биоразлагаемые вещества. Несколько активных и интеллектуальных упаковочных материалов на биологической основе были успешно разработаны и использованы для прямого и непрямого применения в пищевых продуктах. Так, например, группа ученых Янчикова и соавторы [3] исследовали активное и интеллектуальное действие экстракта розмарина (5 %, 10 % и 20 %) в пленках на основе фуруцелларана и гидролизата

ОБЗОР РАЗРАБОТОК БИОРАЗЛАГАЕМЫХ УПАКОВОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

желатина, а также в пленках, чувствительных к pH (изменение цвета с желтого на красный при pH 9 и 12 соответственно). Авторы заметили, что экстракт свежих листьев не улучшал антиоксидантную активность фулцелларановых пленок, но обработка высоким содержанием экстракта сухих листьев (20 %) успешно ингибировала 88 % радикала DPPH. На основании полученных результатов эти авторы рекомендовали пленки, содержащие 20 % сухого экстракта розмарина для производства умной упаковки.

Следует также отметить недавно проводимые исследования ученых, которые показали, что pH-чувствительные пленки на основе фулцелларана / желатина, содержащие экстракт зеленого чая, обладают высокой антиоксидантной активностью и одинаково эффективны против *E. coli* и *S. Aureus* [6, 15]. В ходе исследований для получения смарт-пленки использовали беталаины из экстракта кожуры красной питайи (0, 0,25, 0,50 и 1,00 мас.%) в водном растворе крахмала (6,8 г) и поливинилового спирта (3,4 г). Помимо чувствительности к pH, пленки с высоким содержанием бетацианина (1 %) показали активность DPPH около 35 %, при этом ингибировали рост *S. aureus*, *L. monocytogenes*, *E. coli* и *Salmonella*. Для дальнейшего улучшения биоактивных свойств смарт-пленок в суспензии целлюлозных нановолокон (ЦН) (60 мл 0,8 % ЦН в деионизированной воде) использовали комбинацию антоцианина (0,4 г) и эфирного масла орегано (4 %). Результаты данного исследования показали, что пленки эфирного масла орегано оказались эффективными против грамположительных и грамотрицательных бактерий (*E. coli* и *L. monocytogenes*), а степень их ингибирования составила около 99,99 %. Аналогичным образом антоцианы из экстракта пурпурного картофеля, краснокочанной капусты и ягод жимолости по отдельности придавали биоразлагаемым пленкам умные свойства. Эти исследования подтверждают прогресс в разработке «умных» биоразлагаемых пленок с использованием натуральных соединений. Однако все же еще необходимо проводить дополнительные дальнейшие исследования и особенно в отношении оценки этих пленок в течение всего срока годности пищевых продуктов [4, 18, 12].

4. Биоразлагаемость смарт-пленок

Термин «биоразлагаемый» используется для материалов, способных разрушаться в результате действия микроорганизмов. Согласно

определению Международной организации по стандартизации (ISO), любое вещество считается биоразлагаемым, если его исходная масса уменьшается на 90 % через шесть месяцев в условиях компоста при 58 °C [77, 78, 79].

Незначительное количество исследований выявило биоразлагаемость смарт-пленок на биологической основе. Согласно полученным результатам, смарт-пленки содержат биоактивные и антимикробные агенты для предотвращения микробной активности на пищевом продукте, что также может продлить срок годности упаковочных материалов. Ожидалось, что добавление противомикробных препаратов может препятствовать разложению смарт-пленок микроорганизмами. Однако недавно проведенное исследование, по изучению антимикробных свойств и характеристик биоразлагаемости пектиновых пленок, содержащих кожуру желтой маракуйи, показало обратное, результат был положительным [80]. Биоразлагаемость пектиновых пленок оценивали путем воздействия на них *Bradyrhizobium diazoefficiens*. Авторы научного эксперимента сообщили, что *B. diazoefficiens* повышал pH среды, и пленки полностью разрушались после 20 дней компостирования в аэробных условиях. Эти результаты подтвердили, что противомикробные пленки разлагались микроорганизмами, связанными с компостированием овощей. Кроме того, эта пленка также продемонстрировала превосходные антимикробные свойства в отношении *E. Coli* и *S. aureus* в кислых условиях [84].

Растворимость в воде и молекулярная масса являются ключевыми факторами, влияющими на биоразлагаемость пленок. С целью изучения влияния данных факторов ученые Ceballos, Ochoa-Yepes, Goyanes, Bernal и Fama изучили характеристики биоразлагаемости умных пленок, разработанных из модифицированного крахмала, содержащего мате [81, 82, 83].

В обоих исследованиях установлено, что при замене крахмала с высокой молекулярной массой экстрактом с низкой молекулярной массой скорость биодegradации увеличивалась. По мере того, как микроорганизмы разлагают крахмал на небольшие единицы сахара (например, глюкозу), этот процесс занимает меньше времени в низкомолекулярных соединениях и вызывает более быструю биоразлагаемость. Следовательно, добавление экстракта мате в пленки приводило к быстрой биодegradации. Кроме того, более высокая растворимость пленок в воде из-за добавления экстракта мате могла вызвать набухание пленок и их быстрое разрушение.

В нескольких других исследованиях сообщалось об улучшении биоразлагаемости за счет включения биологически активных соединений, например, сливовая мука в модифицированной тыквенной муке, крахмальные пленки, обогащенные чечевичной мукой, экстракт маракуйи в пленках из кукурузного крахмала и т. д. [80].

ВЫВОДЫ

Дальнейший непрерывный процесс разработки интеллектуальных, активных и умных пленок с использованием биоразлагаемых материалов является необходимым этапом и эффективным методом снижения воздействия упаковки пищевых продуктов на окружающую среду. Обзор опубликованных результатов научных исследований подтверждает возможность функционального сочетания биоразлагаемых материалов, в особенности хитозана, хитина, каррагинана и альгината, с основными технологическими процессами. Неоднократно доказано, что природные соединения играют главную роль в процессе замедления окислительных процессов в продуктах питания, предотвращают рост микроорганизмов, вызывающих порчу и указывают на ухудшение качества упакованного продукта. Фенольные соединения, главная роль в которых принадлежит антоцианам, отличаются от всех других природных соединений своей чувствительностью к изменению pH в пищевых продуктах и упаковочном материале, а также антиоксидантной и противомикробной активностью. Учитывая роль полифенолов и воздействие на окружающую среду, связанное с упаковкой пищевых продуктов, проведение дальнейших научных исследований необходимо интенсивно вести в направлении усиления экологического аспекта биоразлагаемых интеллектуальных, активных и умных пленок. С этой целью необходимо особое внимание уделять использованию натуральных красителей, таких как антоцианы и другие экстракты, богатые полифенолами, извлечению их из побочных продуктов переработки агропромышленного производства.

Процесс улучшения контроля кинетики высвобождения остается одной из наиболее важных задач, по причине взаимодействия между упаковочным материалом и активными соединениями для обеспечения непрерывного высвобождения в течение всего срока годности упакованных пищевых продуктов. Полученные результаты исследований свидетельствуют о достижении лучшей кинетики высвобождения путем внесения изменений в

любой состав пленки активных соединений. С этой целью необходимо продолжать научные исследования и эксперименты для получения доказательной информации о взаимосвязи между высвобождением активных соединений, защитой от окислительных реакций и микробного роста в пищевых продуктах. Можно сделать вывод, что включение природных соединений, в основном с экстрактами, богатыми полифенолами, оказывает благоприятное влияние на компостируемость биоразлагаемых интеллектуальных, активных и интеллектуальных пленок и сокращает их время разложения.

Следует отметить, что кроме полифенолов, эфирных масел и беталаинов, на момент написания данного научного обзора нам не удалось установить наличие опубликованных научных исследований, которые касались бы других природных источников, потенциально используемых в различных видах пленок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Yates, J., Deeney, M., Rolker, H. B., White, H., Kalamatiou, S. & Kadiyala, S. (2021). A systematic scoping review of environmental, food security and health impacts of food system plastics. *Nature Food*, 2(2), 80-87. <https://doi.org/10.1038/s43016021-00221-z>.
2. Eurostat. (2020). Packaging waste statistics - Statistics Explained. Retrieved from https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Packaging_waste_statistics.
3. Jancikova, S., Jamr'oz, E., Kulawik, P., Tkaczewska, J. & Dordevic, D. (2019). Furcellaran/gelatin hydrolysate/rosemary extract composite films as active and intelligent packaging materials. *International Journal of Biological Macromolecules*, (131), 19-28. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.03.050>.
4. Chen, S., Wu, M., Lu, P., Gao, L., Yan, S. & Wang, S. (2020). Development of pH indicator and antimicrobial cellulose nanofibre packaging film based on purple sweet potato anthocyanin and oregano essential oil. *International Journal of Biological Macromolecules*, (149), 271-280. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.01.231>.
5. Li, Y., Ying, Y., Zhou, Y., Ge, Y., Yuan, C., Wu, C., et al. (2019). A pH-indicating intelligent packaging composed of chitosan-purple potato extractions strength by surface-deacetylated chitin nanofibers. *International Journal of Biological Macromolecules*, (127), 376-384. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.01.060>.
6. Jamr'oz, E., Kulawik, P., Krzy'sciak, P., Talaga-Cwiernia, K. & Juszczak, L. (2019). Intelligent and active furcellaran-gelatin films containing green or pu-erh tea extracts: Characterization, antioxidant and antimicrobial potential. *International Journal of Biological Macromolecules*, (122), 745-757. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.11.008>.
7. Zhong, Y., Godwin, P., Jin, Y. & Xiao, H. (2020). Biodegradable polymers and greenbased antimicrobial packaging materials: a mini-review. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, 3(1), 27-35. <https://doi.org/10.1016/j.aiepr.2019.11.002>.
8. Latos-Brozio, M. & Masek, A. (2020). The application of natural food colorants as indicator substances in intelligent biodegradable packaging materials. *Food and Chemical Toxicology*, (135), Article 110975. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2019.110975>.
9. Chen, X., Chen, M., Xu, C. & Yam, K.L. (2019). Critical review of controlled release packaging to improve food safety and quality. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 59(15), 2386-2399. <https://doi.org/10.1080/10408398.2018.1453778>.

ОБЗОР РАЗРАБОТОК БИОРАЗЛАГАЕМЫХ УПАКОВОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

10. Jafarzadeh, S., Jafari, S.M., Salehabadi, A., Nafchi, A.M. & Uthaya Kumar, U.S. (2020). Biodegradable green packaging with antimicrobial functions based on the bioactive compounds from tropical plants and their byproducts. *Trends in Food Science and Technology*. 100. 262-277. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.04.017>.
11. Haghghi, H., Licciardello, F., Fava, P., Siesler, H.W. & Pulvirenti, A. (2020). Recent advances on chitosan-based films for sustainable food packaging applications. *Food Packaging and Shelf Life*. (26). Article 100551. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.100551>.
12. Liu, J., Yong, H., Liu, Y., Qin, Y., Kan, J. & Liu, J. (2019). Preparation and characterization of active and intelligent films based on fish gelatin and haskap berries (*Lonicera caerulea* L.) extract. *Food Packaging and Shelf Life*. (22). 100417. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.100417>.
13. Wu, C., Li, Y., Sun, J., Lu, Y., Tong, C. & Wang, L. (2020). Novel konjac glucomannan films with oxidized chitin nanocrystals immobilized red cabbage anthocyanins for intelligent food packaging. *Food Hydrocolloids*. (98). 105245. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.105245>.
14. Ezati, P. & Rhim, J.W. (2020). pH-responsive chitosan-based film incorporated with alizarin for intelligent packaging applications. *Food Hydrocolloids*. (102). Article 105629. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.105629>.
15. Qin, Y., Liu, Y., Zhang, X. & Liu, J. (2020). Development of active and intelligent packaging by incorporating betalains from red pitaya (*Hylocereus polyrhizus*) peel into starch/polyvinyl alcohol films. *Food Hydrocolloids*. (100). 105410. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.105410>.
16. Ding, L., Li, X., Hu, L., Zhang, Y., Jiang, Y. & Mao, Z. (2020). A naked-eye detection polyvinyl alcohol/cellulose-based pH sensor for intelligent packaging. *Carbohydrate Polymers*. (233). Article 115859. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.115859>.
17. Kimbuathong, N., Leelaphiwat, P. & Harkamsujarit, N. (2020). Inhibition of melanosis and microbial growth in Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) using high CO₂ modified atmosphere packaging. *Food Chemistry*. (312). Article 126114. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.126114>.
18. Saliu, F. & Pergola, R.D. (2018). Carbon dioxide colorimetric indicators for food packaging application: Applicability of anthocyanin and poly-lysine mixtures. *Sensors and Actuators B: Chemical*. (258). 1117-1124. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2017.12.007>.
19. Lyu, J.S., Choi, I., Hwang, K.S., Lee, J.Y., Seo, J., Kim, S.Y., et al. (2019). Development of a BTB-/TBA + ion-paired dye-based CO₂ indicator and its application in a multilayered intelligent packaging system. *Sensors and Actuators B: Chemical*. (282). 359-365. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2018.11.073>.
20. Wan, X., He, Q., Wang, X., Liu, M., Lin, S. & Shi, R. (2021). Water-soluble chitosan-based indicator label membrane and its response behavior to carbon dioxide. *Food Control*. (130). Article 108355. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2021.108355>.
21. Liu, Y., Zhang, X., Li, C., Qin, Y., Xiao, L. & Liu, J. (2020). Comparison of the structural, physical and functional properties of κ-carrageenan films incorporated with pomegranate flesh and peel extracts. *International Journal of Biological Macromolecules*. (147). 1076-1088. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.10.075>.
22. Jung, J., Puligundla, P. & Ko, S. (2012). Proof-of-concept study of chitosan-based carbon dioxide indicator for food packaging applications. *Food Chemistry*. 135(4). 2170-2174. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.07.090>.
23. Maciel, V.B.V., Yoshida, C.M.P. & Franco, T.T. (2012). Development of a prototype of a colorimetric temperature indicator for monitoring food quality. *Journal of Food Engineering*. 111(1). 21-27. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2012.01.037>.
24. Maciel, V.B.V., Yoshida, C.M.P. & Franco, T.T. (2014). Development of temperature indicator prototype: Cardpaper coated with chitosan intelligent films. *Journal of Agricultural Chemistry and Environment*. 3(01). 5-10. <https://doi.org/10.4236/jacen.2014.31b002>.
25. Pereira, V.A., de Arruda, I.N.Q. & Stefani, R. (2015). Active chitosan/PVA films with anthocyanins from *Brassica oleracea* (Red Cabbage) as Time-Temperature Indicators for application in intelligent food packaging. *Food Hydrocolloids*. (43). 180-188. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2014.05.014>.
26. Mills, A., Tommons, C., Bailey, R.T., Tedford, M.C. & Crilly, P.J. (2008). UV-activated luminescence/colorimetric O₂ indicator. *International Journal of Photoenergy*. <https://doi.org/10.1155/2008/547301>.
27. Deshwal, G.K., Panjagari, N.R., Badola, R., Singh, A.K., Minz, P.S. & Ganguly, S. (2018). Characterization of biopolymer-based UV-activated intelligent oxygen indicator for food-packaging applications. *Journal of Packaging Technology and Research*. 2(1). 29-43. <https://doi.org/10.1007/s41783-018-0029-2>.
28. Vu, C.H.T. & Won, K. (2013). Novel water-resistant UV-activated oxygen indicator for intelligent food packaging. *Food Chemistry*. 140 (1-2). 52-56. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.02.056>.
29. Wells, N., Yusufu, D. & Mills, A. (2019). Colorimetric plastic film indicator for the detection of the volatile basic nitrogen compounds associated with fish spoilage. *Talanta*. 194. 830-836. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2018.11.020>.
30. Ma, Q., Du, L. & Wang, L. (2017). Tara gum/polyvinyl alcohol-based colorimetric NH₃ indicator films incorporating curcumin for intelligent packaging. *Sensors and Actuators B: Chemical*. (244). 759-766. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2017.01.035>.
31. Liang, T., Sun, G., Cao, L., Li, J. & Wang, L.A. (2019). pH and NH₃ sensing intelligent film based on *Artemisia sphaerocephala* Krasch. gum and red cabbage anthocyanins anchored by carboxymethyl cellulose sodium added as a host complex. *Food Hydrocolloids*. (87). 858-868. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2018.08.028>.
32. Wu, C., Sun, J., Zheng, P., Kang, X., Chen, M., Li, Y. (2019). Preparation of an intelligent film based on chitosan/oxidized chitin nanocrystals incorporating black rice bran anthocyanins for seafood spoilage monitoring. *Carbohydrate Polymers*. (222). 115006. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.115006>.
33. Bekhit, A.E.D.A., Holman, B.W.B., Giteru, S.G., & Hopkins, D.L. (2021). Total volatile basic nitrogen (TVB-N) and its role in meat spoilage: A review. *Trends in Food Science and Technology*. (109). 280-302. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.01.006>.
34. Yang, Z., Wu, R., Wei, X., Zhang, Z., Wang, W. & Liu, A. (2021). Moderate fermentation contributes to the formation of typical aroma and good organoleptic properties: A study based on different brands of Chouguiyu. *LWT - Food Science and Technology*. (152). Article 112325. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112325>.
35. Yang, B., Tan, Y. & Kan, J. (2020). Regulation of quality and biogenic amine production during sufu fermentation by pure *Mucor* strains. *LWT - Food Science and Technology*. (117). Article 108637. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.108637>.
36. Zhai, X., Li, Z., Shi, J., Huang, X., Sun, Z., Zhang, D., et al. (2019). A colorimetric hydrogen sulfide sensor based on gellan gum-silver nanoparticles bionanocomposite for monitoring of meat spoilage in intelligent packaging. *Food Chemistry*. (290). 135-143. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.03.138>.
37. Sukhavattanakul, P. & Manuspiya, H. (2020). Fabrication of hybrid thin film based on bacterial cellulose nanocrystals and metal nanoparticles with hydrogen sulfide gas sensor ability. *Carbohydrate Polymers*. (230). Article 115566. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.115566>.
38. Koskela, J., Sarfraz, J., Ihalainen, P., Määtänen, A., Pulkkinen, P., Tenhu, H., et al. (2015). Monitoring the quality of raw poultry by detecting hydrogen sulfide with printed sensors. *Sensors and Actuators B: Chemical*. (218). 89-96. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2015.04.093>.
39. Domínguez, R., Barba, F.J., Gómez, B., Putnik, P., Kovačević, D.B., Pateiro, M., et al. (2018). Active packaging films with natural antioxidants to be used in meat industry: A review. *Food Research International*. (113). 93-101.

<https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.06.073>.

40. Pateiro, M., Barba, F.J., Dominguez, R., Sant'Ana, A.S., Mousavi Khaneghah, A., Gavahian, M., et al. (2018). Essential oils as natural additives to prevent oxidation reactions in meat and meat products: A review. *Food Research International*. (113). 156-166. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.07.014>.

41. Jiang, J. & Xiong, Y.L. (2016). Natural antioxidants as food and feed additives to promote health benefits and quality of meat products: A review. *Meat Science*. (120). 107-117. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2016.04.005>.

42. Lorenzo, J. M., Battle, R. & Gómez, M. (2014). Extension of the shelf-life of foal meat with two antioxidant active packaging systems. *LWT - Food Science and Technology*. 59(1). 181-188. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2014.04.061>.

43. Pateiro, M., Domínguez, R., Bermúdez, R., Munekata, P.E.S., Zhang, W., Gagaoua, M., et al. (2019). Antioxidant active packaging systems to extend the shelf life of sliced cooked ham. *Current Research in Food Science*. (1). 24-30. <https://doi.org/10.1016/j.crs.2019.10.002>.

44. Xu, D., Chen, T. & Liu, Y. (2021). The physical properties, antioxidant and antimicrobial activity of chitosan-gelatin edible films incorporated with the extract from hop plant. *Polymer Bulletin*. 78(7). 3607-3624. <https://doi.org/10.1007/s00289-02003294-1>.

45. Wu, H., Lei, Y., Zhu, R., Zhao, M., Lu, J., Xiao, D., et al. (2019). Preparation and characterization of bioactive edible packaging films based on pomelo peel flours incorporating tea polyphenol. *Food Hydrocolloids*. (90). 41-49. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2018.12.016>.

46. Jaśkiewicz, A., Budryn, G., Nowak, A. & Efenberger-Szmechtyk, M. (2020). Novel biodegradable starch film for food packaging with antimicrobial chicory root extract Amin et al. *Food Packaging and Shelf Life* 33 (2022) 100903 and phytic acid as a cross-linking agent. *Foods*. 9(11). 1696. <https://doi.org/10.3390/foods9111696>.

47. Crizel, T., de, M., Rios, A., de, O., Alves, V.D., Bandarra, N., Hickmann Flores, S. (2018). Biodegradable films based on gelatin and papaya peel microparticles with antioxidant properties. *Food and Bioprocess Technology*. 11(3). 536-550. <https://doi.org/10.1007/s11947-017-2030-0>.

48. Yuan, G., Lv, H., Yang, B., Chen, X. & Sun, H. (2015). Physical properties, antioxidant and antimicrobial activity of chitosan films containing carvacrol and pomegranate peel extract. *Molecules*. 20(6). 11034-11045. <https://doi.org/10.3390/molecules.200611034>.

49. Ju, A. & Song, K.B. (2020). Incorporation of yellow onion peel extract into the funoranbased biodegradable films as an antioxidant packaging material. *International Journal of Food Science and Technology*. 55(4). 1671-1678. <https://doi.org/10.1111/ijfs.14436>.

50. Adilah, A.N., Jamilah, B., Noranizan, M.A. & Hanani, Z.A.N. (2018). Utilization of mango peel extracts on the biodegradable films for active packaging. *Food Packaging and Shelf Life*. (16). 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.foodps.2018.01.006>.

51. Pateiro, M., Munekata, P.E.S., Sant'Ana, A.S., Domínguez, R., Rodríguez-L'azaro, D. & Lorenzo, J.M. (2021). Application of essential oils as antimicrobial agents against spoilage and pathogenic microorganisms in meat products. *International Journal of Food Microbiology*. (337). Article 108966. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2020.108966>.

52. Umaraw, P., Munekata, P.E.S., Verma, A.K., Barba, F.J., Singh, V.P. & Kumar, P. (2020). Edible films/coating with tailored properties for active packaging of meat, fish and derived products. *Trends in Food Science and Technology*. (98). 10-24. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.01.032>.

53. Jamr'oz, E., Juszcak, L. & Kucharek, M. (2018). Investigation of the physical properties, antioxidant and antimicrobial activity of ternary potato starch-furcellaran-gelatin films incorporated with lavender essential oil. *International Journal of Biologica. Macromolecules*. (114). 1094-1101. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.04.014>.

54. Saricaoglu, F.T. & Turhan, S. (2020). Physicochemical, antioxidant and antimicrobial properties of mechanically deboned

chicken meat protein films enriched with various essential oils. *Food Packaging and Shelf Life*. (25). 100527. <https://doi.org/10.1016/j.foodps.2020.100527>.

55. Lian, H., Shi, J., Zhang, X. & Peng, Y. (2020). Effect of the added polysaccharide on the release of thyme essential oil and structure properties of chitosan based film. *Food Packaging and Shelf Life*. (23). Article 100467. <https://doi.org/10.1016/j.foodps.2020.100467>.

56. Priyadarshi, R., Sauraj, Kumar, B., Deeba, F., Kulshreshtha, A. & Negi, Y.S. (2018). Chitosan films incorporated with Apricot (*Prunus ameniaca*) kernel essential oil as active food packaging material. *Food Hydrocolloids*. 85. 158-166. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2018.07.003>.

57. Luís, A., Ramos, A. & Domingues, F. (2020). Pullulan films containing rockrose essential oil for potential food packaging applications. *Antibiotics*. 9(10). 1-20. <https://doi.org/10.3390/antibiotics9100681>.

58. Moghimi, R., Aliahmadi, A. & Rafati, H. (2017). Antibacterial hydroxypropylmethyl cellulose edible films containing nanoemulsions of *Thymus daenensis* essential oil for food packaging. *Carbohydrate Polymers*. (175). 241-248. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2017.07.086>.

59. Wu, Z., Wu, J., Peng, T., Li, Y., Lin, D. & Xing, B. (2017). Preparation and application of starch/polyvinyl alcohol/citric acid ternary blend antimicrobial functional food packaging films. *Polymers*. 9(3). 102. <https://doi.org/10.3390/polym9030102>.

60. El-Fawal, G. (2014). Preparation, characterization and antibacterial activity of biodegradable films prepared from carrageenan. *Journal of Food Science and Technology*. 51(9). 2234-2239. <https://doi.org/10.1007/s13197-013-1255-9>.

61. Kumar, S., Mudai, A., Roy, B., Basumatary, I.B., Mukherjee, A. & Dutta, J. (2020). Biodegradable hybrid nanocomposite of chitosan/gelatin and green synthesized zinc oxide nanoparticles for food packaging. *Foods*. 9(9). 1143. <https://doi.org/10.3390/foods9091143>.

62. Abutalib, M.M. & Rajeh, A. (2020). Preparation and characterization of polyaniline/ sodium alginate-doped TiO₂ nanoparticles with promising mechanical and electrical properties and antimicrobial activity for food packaging applications. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 31(12). 9430-9442. <https://doi.org/10.1007/s10854-020-03483-8>.

63. Chougule, S.S., Gurme, S.T., Jadhav, J.P., Dongale, T.D. & Tiwari, A.P. (2021). Low density polyethylene films incorporated with biosynthesised silver nanoparticles using *Moringa oleifera* plant extract for antimicrobial, food packaging, and photocatalytic degradation applications. *Journal of Plant Biochemistry and Biotechnology*. 30(1). 208-214. <https://doi.org/10.1007/s13562-020-00584-7>.

64. Saravanakumar, K., Sathiyaseelan, A., Mariadoss, A.V.A., Xiaowen, H. & Wang, M. (2020). Physical and bioactivities of biopolymeric films incorporated with cellulose, sodium alginate and copper oxide nanoparticles for food packaging application. *International Journal of Biological Macromolecules*. (153). 207-214. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.02.250>.

65. M'archidanu, C.-A., Lungu, M.-V., Gheorghe, I., Husien, M.D., Telcian, A., Pirc'abioru, G.G. (2017). Cytotoxicity and genotoxicity aspects of ZnO and silver nanoparticles designed for antimicrobial applications. *Romanian Archives*. 76(2). 91-101.

66. Almasi, H., Oskouie, M.J. & Saleh, A. (2021). A review on techniques utilized for design of controlled release food active packaging. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 61(15). 2601-2621. <https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1783199>.

67. Gim'enez, B., L'opez de Lacey, A., P'erez-Santín, E., L'opez-Caballero, M.E. & Montero, P. (2013). Release of active compounds from agar and agar-gelatin films with green tea extract. *Food Hydrocolloids*. 30(1). 264-271. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2012.05.014>.

68. Caro, N., Medina, E., Díaz-Dosque, M., L'opez, L., Abugoch, L. & Tapia, C. (2016). Novel active packaging based on films of chitosan and chitosan/quinoa protein printed with chitosan-tripolyphosphate-thymol nanoparticles via thermal ink-jet printing.

ОБЗОР РАЗРАБОТОК БИОРАЗЛАГАЕМЫХ УПАКОВОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

- Food Hydrocolloids. (52). 520-532. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2015.07.028>.
69. Bierhalz, A.C.K., Da Silva, M.A. & Kieckbusch, T.G. (2012). Natamycin release from alginate/pectin films for food packaging applications. *Journal of Food Engineering*. 110(1). 18-25. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2011.12.016>.
70. Arrieta, M.P., Castro-López, M.D.M., Rayón, E., Barral-Losada, L.F., López-Vilariño, J.M., López, J., et al. (2014). Plasticized poly(lactic acid)-poly(hydroxybutyrate) (PLA-PHB) blends incorporated with catechin intended for active food-packaging applications. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 62(41). 10170-10180. <https://doi.org/10.1021/jf5029812>.
71. Requena, R., Vargas, M. & Chiralt, A. (2017). Release kinetics of carvacrol and eugenol from poly(hydroxybutyrate-co-hydroxyvalerate) (PHBV) films for food packaging applications. *European Polymer Journal*. (92). 185-193. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2017.05.00812>.
72. Rodríguez-Martínez, A.V., Sendón, R., Abad, M.J., González-Rodríguez, M.V., Barros Velázquez, J., Aubourg, S.P., et al. (2016). Migration kinetics of sorbic acid from polylactic acid and seaweed based films into food simulants. *LWT - Food Science and Technology*. (65). 630-636. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2015.08.029>.
73. Fajardo, P., Martins, J.T., Fuciños, C., Pastrana, L., Teixeira, J.A. & Vicente, A.A. (2010). Evaluation of a chitosan-based edible film as carrier of natamycin to improve the storability of Saloio cheese. *Journal of Food Engineering*. 101(4). 349-356. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2010.06.029>.
74. Wu, S., Wang, W., Yan, K., Ding, F., Shi, X., Deng, H., et al. (2018). Electrochemical writing on edible polysaccharide films for intelligent food packaging. *Carbohydrate Polymers*. (186). 236-242. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.01.058>.
75. Ezati, P. & Rhim, J.W. (2020). pH-responsive chitosan-based film incorporated with alizarin for intelligent packaging applications. *Food Hydrocolloids*. (102). Article 105629. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.105629>.
76. Schaefer, D. & Cheung, W.M. (2018). Smart packaging: Opportunities and challenges. *Procedia CIRP*. 72. 1022-1027. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.03.240>.
77. Liu, J., Yong, H., Liu, Y., Qin, Y., Kan, J. & Liu, J. (2019). Preparation and characterization of active and intelligent films based on fish gelatin and haskap berries (*Lonicera caerulea* L.) extract. *Food Packaging and Shelf Life*. (22). 100417. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2019.100417>.
78. Pepper, I.L., Gerba, C.P., Gentry, T.J. & Maier, R.M. In I. Pepper, C. Gerba, T. Gentry & R. Maier (Eds.). (2011). *Environmental Microbiology* (second ed.) Burlington: Academic Press.
79. Determination of the ultimate aerobic biodegradability of plastic materials under controlled composting conditions. (2012). Method by analysis of evolved carbon dioxide. Part 1: General method. *ISO 14855-1:2012*.
80. Munhoz, D.R., Moreira, F.K.V., Bresolin, J.D., Bernardo, M.P., De Sousa, C.P. & Mattoso, L.H.C. (2018). Sustainable Production and in vitro Biodegradability of Edible Films from Yellow Passion Fruit Coproducts via Continuous Casting. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*. 6(8). 9883-9892. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.8b01101>.
81. Ceballos, R.L., Ochoa-Yepes, O., Goyanes, S., Bernal, C. & Famá, L. (2020). Effect of yerba mate extract on the performance of starch films obtained by extrusion and compression molding as active and smart packaging. *Carbohydrate Polymers*. (244). Article 116495. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.116495>.
82. Gutiérrez, T.J. (2018). Are modified pumpkin flour/plum flour nanocomposite films biodegradable and compostable. *Food Hydrocolloids*. (83). 397-410. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2018.05.035>.
83. Gutiérrez, T.J., Toro-Márquez, L.A., Merino, D. & Mendieta, J.R. (2019). Hydrogenbonding interactions and compostability of bionanocomposite films prepared from corn starch and nano-fillers with and without added Jamaica flower extract. *Food Hydrocolloids*. (89). 283-293. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2018.10.058>.
84. Ochoa-Yepes, O., Medina-Jaramillo, C., Guz, L. & Famá, L. (2019). Biodegradable and edible starch composites with fiber-rich lentil flour to use as food packaging. *Starch/ Stärke*. 70 (7-8). 1700222. <https://doi.org/10.1002/star.201700222>.

Информация об авторах

Л. Ч. Бурак – доктор философии в области пищевых наук, кандидат технических наук, профессор РАЕ, директор Общества с ограниченной ответственностью «Белросаква».

Information about the authors

L.Ch. Burak - Doctor of Philosophy in the field of food sciences, Candidate of Technical Sciences, Professor of the Russian Academy of Natural Sciences, Director of the Limited Liability Company "Belrosakava".

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 10.10.2022; одобрена после рецензирования 13.03.2023; принята к публикации 21.03.2023.

The article was received by the editorial board on 10 Oct 2022; approved after editing on 13 Mar 2023; accepted for publication on 21 Mar 2023.