УДК 544.023

Пленки из хитозана: модификация, применение и функционализация электрохимически активированным водным раствором

О. А. Суворов[1,2], Л. Г. Ипатова[2], М. А. Погорелова[2], Д. А. Песоцкая[1], М. С. Сафонов[1,2], А. Г. Погорелов[2]

[1] Российский биотехнологический университет, г. Москва, Российская Федерация

[2] Институт теоретической и экспериментальной биофизики Российской академии наук, г. Пущино, Российская Федерация

КОРРЕСПОНДЕНЦИЯ:
Суворов Олег Александрович
E-mail: SuvorovOA@yandex.ru

ЗАЯВЛЕНИЕ О ДОСТУПНОСТИ ДАННЫХ: данные текущего исследования доступны по запросу у корреспондирующего автора.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:
Суворов, О.А., Ипатова, Л.Г., Погорелова, М.А., Песоцкая, Д.А., Сафонов, М.С., & Погорелов, А.Г. (2023). Пленки из хитозана: модификация, применение и функционализация электрохимически активированным водным раствором. *Хранение и переработка сельхозсырья,* (3), 13-27. https://doi.org/10.36107/spfp.2023.448

ПОСТУПИЛА: 19.06.2023
ПРИНЯТА: 15.09.2023
ОПУБЛИКОВАНА: 30.09.2023

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:
авторы сообщают об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ.
Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 20-16-00019, https://rscf.ru/project/20-16-00019/

АННОТАЦИЯ

Введение: Пролонгация срока хранения пищевых продуктов является актуальным вопросом индустрии питания. В данном обзоре предметного поля проанализированы научные источники опубликованных работ о способах изменения свойств полисахаридов (с 2013 по 2023 г.) с тем, чтобы использовать их в области производства упаковки для пищевых продуктов.

Цель: Целью работы является анализ методов модификации полисахаридов, создание биоразлагаемых защитных пленок, применение таких плёнок, в том числе в сочетании с обработкой их поверхности электрохимически активированным водным раствором (ЭХАР).

Материалы и методы: В обзор включены научные публикации российских и зарубежных авторов по вопросам пролонгации сроков хранения продуктов питания с помощью биоразлагаемых защитных пленок из хитозана. В работе систематизированы статьи, которые опубликованы в 2013–2023 годах в изданиях, включенных в базы данных Scopus и РИНЦ.

Результаты: Рассмотрены методы направленного изменения свойств полисахаридов, новые виды плёнок на основе хитозана с добавлением различных компонентов, а также результаты обработки поверхности пленки электрохимически активированным водным раствором. Настоящий обзор будет полезен при разработке способов хранения пищевых продуктов, используя упаковки на основе модифицированных полисахаридов в сочетании с другими средствами защиты.

Выводы: В обзоре систематизированы материалы, опубликованные за последние 10 лет, которые нацелены на разработку способов улучшения свойств пленок на основе полисахаридов. Анализ полученных результатов показывает, что хитозан уже используют для изготовления безопасной и биоразлагаемой упаковки. Такая упаковка становится значительно эффективнее при сочетанном воздействии физических или химически средств обеззараживания поверхности пищевых продуктов. В их ряду, пожалуй, наиболее перспективной является дополнительная обработка метастабильной фракцией ЭХАР, что одновременно обеззараживает поверхность пищевых продуктов и пролонгирует сроки их годности, не влияя при этом на качество и органолептические показатели.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

электрохимически активированный водный раствор, пищевые продукты и сырье, хитозан, модификация полисахаридов, биоразлагаемые плёнки

Chitosan Films: Modification, Use and Fictionalization with Electrochemically Activated Aqueous Solutions

Oleg A. Suvorov[1,2], Larisa G. Ipatova[2], Maria A. Pogorelova[2], Darya A. Pesotskaya[1], Maxim S. Safonov[1,2], Alexander G. Pogorelov[2]

[1] Russian Biotechnological University, Moscow, Russian Federation

[2] Institute of Theoretical and Experimental Biophysics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

CORRESPONDENCE:
Oleg A. Suvorov
E-mail: SuvorovOA@yandex.ru

FOR CITATIONS:
Suvorov, O.A., Ipatova, L.G., Pogorelova, M.A., Pesotskaya, D.A., Safonov, M.S., & Pogorelov, A.G. (2023). Chitosan films: Modification, use and fictionalization with electrochemically activated aqueous solutions. *Storage and Processing of Farm Products*, (3), 13-27. https://doi.org/10.36107/spfp.2023.448

RECEIVED: 08.01.2023
ACCEPTED: 15.09.2023
PUBLISHED: 30.09.2023

DECLARATION OF COMPETING INTEREST: none declared.

FUNDING.
The research was supported by Russian Science Foundation grant № 20-16-00019, https://rscf.ru/en/project/20-16-00019/

CC BY NC

ABSTRACT

Background: Prolongation of the shelf life of food products is an urgent issue of the food industry. This review of the subject field analyzes the scientific sources of published works on ways to change the properties of polysaccharides (from 2013 to 2023) in order to use them in the field of food packaging production.

Purpose: The aim of the work is to analyze the methods of modification of polysaccharides, the creation of biodegradable protective films, the use of such films, including in combination with the treatment of their surface with an electrochemically activated aqueous solution (ECAS).

Materials and Methods: The review includes scientific publications of Russian and foreign authors on the extension of the shelf life of food products using biodegradable protective films made of chitosan. The paper systematizes articles that were published in 2013–2023 in publications included in the Scopus and RSCI databases.

Results: Methods of directional change in the properties of polysaccharides, new types of films based on chitosan with the addition of various components, as well as the results of treatment of the film surface with an electrochemically activated aqueous solution are considered. This review will be useful in the development of food storage methods using packaging based on modified polysaccharides in combination with other protective equipment.

Conclusion: The review systematizes materials published over the past 10 years, which are aimed at developing ways to improve the properties of polysaccharide-based films. Analysis of the results shows that chitosan is already used for the manufacture of safe and biodegradable packaging. Such packaging becomes much more effective with the combined effect of physical or chemical means of disinfecting the surface of food products. Among them, perhaps the most promising is the additional treatment with the metastable fraction of ECAS, which simultaneously disinfects the surface of food products and increases their shelf life, without affecting the quality and organoleptic characteristics.

KEYWORDS
electrochemically activated aqueous solution, food and raw material, chitosan, polysaccharide modification, biodegradable films

ВВЕДЕНИЕ

Полисахариды, как биологические макромолекулы, в большом количестве содержат растения, микроорганизмы и животные. В пищевой промышленности их часто применяют для регуляции параметров продуктов. Направленная модификация физико-химических свойств и функциональных возможностей полисахаридов является актуальным направлением научных исследований, так как позволит расширить их область применения, используя не только в качестве пищевых ингредиентов и добавок, но и биоразлагаемых упаковок для хранения продуктов, созданных на основе защитных пленок из полисахаридов.

Большое внимание уделяется экологически безопасной упаковке, которая способна продлить срок годности пищевых продуктов и сохранить их качество, препятствуя окислению и росту микроорганизмов. Среди источников натурального сырья, используемых для изготовления упаковки, хитин и хитозан привлекают наибольшее внимание. Эти безвредные для природы материалы представляют альтернативу искусственным полимерам, доля которых составляет более 90 %.

Анализ научной литературы показал, что в существующей картине знания важным является обзор предметного поля по следующим наиболее популярным, но недостаточно изученным направлениям в области исследуемой проблематики:

(1) разработка новых методов направленной модификации полисахаридов, их биологическая и экологическая безопасность;
(2) применение в сфере пищевых технологий полисахаридов для разработки биоразлагаемой упаковки;
(3) реализация технологических свойств полисахаридов в сочетании с физико-химическими методами с тем, чтобы улучшить качество пищевых продуктов и продлить срок их хранения.

Обозначенные выше пробелы в знании позволили сформулировать следующее целеполагание исследования. С целью систематизации методов изменения свойств полисахаридов, необходимо получить ответы на актуальные вопросы. В их ряду: почему хитозан используют для изготовления защитных пленок? Как ЭХАР влияет на свойства полисахаридов? Насколько эффективно комбинирование нескольких видов обработки продуктов?

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Базы данных и временные рамки

Акценты исследования были расставлены и реализованы на диапазоне выявленных результатов в области модификации, применения и функционализации полисахаридов электрохимически активированным водным раствором. Создание настоящего обзора предметного поля обосновано сложностью и многогранностью проблематики и отсутствием ее всестороннего анализа в области разработки новых методов направленной модификации полисахаридов, их биологической и экологической безопасности, а также их реализацией в индустрии питания и пищевой промышленности для разработки биоразлагаемой упаковки в сочетании с физико-химическими методами обработки для улучшения качества пищевых продуктов и пролонгации их срока годности

Материалами для исследования послужили публикации из баз данных Scopus, РИНЦ и других источников, опубликованные с 2013–2023 г. в количестве 180 источников, из которых в обзор было включено 44 статьи. Анализировались источники, опубликованные в научных журналах, материалах конференций различных уровней, а также монографии, посвященные тематике исследования, нормативные документы и патенты.

Критерии включения и исключения источников

Ключевыми словами для осуществления поиска в российских электронных библиотеках являлись следующие слова и словосочетания: “электрохимически активированный водный раствор”, “пищевые продукты и сырье”, “хитозан”, “модификация полисахаридов”, “биоразлагаемые плёнки”. Ключевыми словами для осуществления поиска в базах данных Scopus и РИНЦ выступили:’electrochemically activated aqueous solution’, ‘food and raw material’, ‘chitosan’, ‘polysaccharide modification’, ‘biodegradable films’.

Критерии включения и исключения для статей, подлежащих анализу, были следующими:

Критерии включения:
1. Анализируемые источники написаны в период 2013–2023 годы;
2. Статья соответствует теме исследования;
3. Типами анализируемых статей являются оригинальные исследовательские и обзорные статьи, монографии.

Критерии исключения:
1. Анализируемые источники не соответствует теме данного обзора: не касаются области производства упаковки для пищевых продуктов; не касаются методов изменения свойств полисахаридов;
2. Статьи, написанные не на русском или английском языках;
3. Жанры статьи — не соответствуют указанным жанрам по критериям включения;
4. Содержание статьи дублируется. Если из разных баз данных или разных электронных библиотечных систем были извлечены повторяющиеся источники, и их классифицировали только один раз.

Анализ и систематизация данных

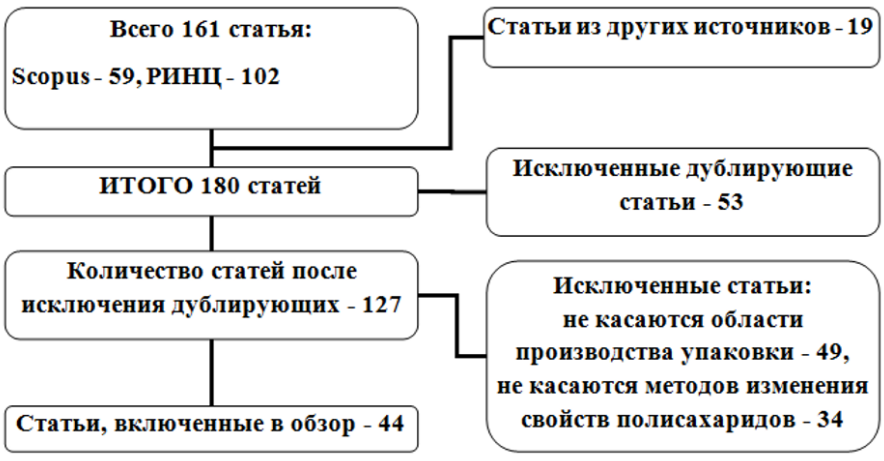
Результаты анализа были представлены в виде таблиц и диаграмм для визуализации данных. Для обзора предметного поля проведенного исследования использовали алгоритм в соответствии с протоколом PRIZMA и составили схему проведения исследования (Рисунок 1).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для реализации поставленной цели в части систематизации методов изменения свойств полисахаридов необходимо результаты работы и их обсуждение разбить на следующие тематические блоки «Методы изменения свойств полисахаридов», «Применение биоразлагаемых защитных пленок на основе хитозана в пищевой промышленности», «Эффективность биоразлагаемых защитных пленок в сочетании с другими физико-химическими методами обработки продуктов». В результате выполненной работы будут определены новые направления в исследованиях и выделены ключевые аспекты нового прочтения к ранее существующим подходам. Анализ полученных материалов позво-

Рисунок 1

Блок-схема, описывающая процесс выбора исследования, в соответствии с протоколом PRISMA



Примечание. PRISMA Extension for Scoping Reviews (PRISMA-ScR): Checklist and Explanation, 2018. https://doi.org/10.7326/M18–0850

лит ответить на актуальные вопросы использования хитозана для изготовления защитных пленок, влияния ЭХАР на свойства полисахаридов и эффективности комбинирования нескольких видов обработки продуктов для повышения их биологической и экологической безопасности и пролонгации срока годности.

Методы изменения свойств полисахаридов

Модификацию пищевых ингредиентов осуществляют посредством разнообразных физических воздействий, например, нагревом, ультразвуком, кавитацией, электрическим полем, СВЧ излучением, а также с помощью обработки химическими реагентами (Cui & Zhu, 2021). Рассмотрены физические, химические и биологические способы улучшения свойств полисахаридов и факторы, влияющие на применение их в пищевой промышленности (Tang & Huang, 2021). В данной работе наиболее актуальными направлениями считают изучение эмульгирования полисахаридов, воздействие процесса переработки, расширение применения. Описаны методы, способствующие протеканию в пищевом сырье реакции Майяра с образованием белково-полисахаридных соединений (Kan et al., 2021). В цитируемой публикации приведены источники и характеристики используемых белков и полисахаридов, рассмотрены свойства и механизмы повышения эмульгирующей активности белково-полисахаридных конъюгатов Майяра. Структурные особенности и эмульгирующие свойства белков и полисахаридов зависят от природного сырья, из которого их получают. Отмечают, что после реакции гликирования конъюгаты Майяра приобретают улучшенные технологические свойства: растворимость, термическую стабильность, способность к эмульгированию, образованию пены и геля.

Эффект воздействия паром на структурные свойства и иммунологическую активность полисахаридов из корней растения Polygonatum cyrtonema исследовали в работе Wu и соавторы (Wu et al., 2022). Длительность процедуры влияла на характер изменений в структуре и свойствах полисахаридов. Пропаривание приводило к изменению состава сахаров, в частности, к фрагментации молекул в результате их деполимеризации. После термического воздействия в течение нескольких часов полисахариды обладали более высокой иммунологической активностью, чем те, что получены из необработанного корневища. Результаты послужили обоснованием необходимости щадящей обработки Polygonatum cyrtonema.

В ряде исследований показана эффективность использования ультразвука для направленного изменения структуры и свойств полисахаридов. Изучены физико-химические и функциональные свойства полисахаридов, извлеченных из растения Sagittaria sagittifolia L. с помощью ультразвука различных частот и их комбинаций (Feng et al., 2021). Такой подход, по сравнению с экстракцией горячей водой, способствовал увеличению выхода вещества, повышал его растворимость и антиоксидантную активность, а также стабильность пены и термическую устойчивость. И это открывает перспективу ультразвуковой обработки полисахаридов в пищевой и косметической промышленности, медицине и смежных областях. Установлена взаимосвязь интенсивности воздействия ультразвука и кинетики деградации, физико-химических свойств и пребиотической активности полисахарида съедобного гриба Flammulina velutipes (Xiao et al., 2022). Экспериментально подтверждено, что деградация ускоряется при увеличении интенсивности ультразвука, уменьшении концентрации полисахарида, повышении температуры до 60 °C. При этом ультразвук изменяет конформацию полисахарида в растворе, частично разрушая его третичную структуру. Модификация молекулы способствовала снижению вязкости и прочности геля исследуемого образца, но улучшала его термическую стабильность. По сравнению с контролем, опытные образцы легче утилизировались кишечной микробиотой, способствуя росту Bifidobacterium и Brautella и ингибируя рост вредных бактерий. Установлено влияние ультразвука на пространственную структуру и антиоксидантные свойства полисахаридов, выделенных из желтого чая (Wang et al., 2021; Бахир, 2014; Brychcy et al., 2015; Kang et al., 2021; Hopkins et al., 2021). Фракции полисахаридов выделяли путем осаждения в водном растворе этанола разной концентрации с последующей их обработкой 20 кГц излучением. В результате уменьшалась молекулярная масса фракций YTPS-3N и YTPS-5N, что означало частичную деградацию полисахаридов. Разными методами подтверждено изменение строения молекулы полисахарида и ее фрагментацию и, как следствие, увеличивалась активность по утилизации свободных радикалов (2,2-дифенил-1-пикрилгидразила, супероксида, ги-

дроксил радикала). Прогнозируют, что усиление антиоксидантной активности полисахарида желтого чая может быть полезно для функциональных продуктов питания или лекарственных средств.

Воздействие электрического поля является одним из способов модификации полисахаридов, содержащих в боковых группах ионогенные группы. Полисахариды представляют собой молекулы полиэлектролиты, которые способны образовывать водородные связи и создавать стабильные многокомпонентные молекулярные сети, устанавливая центры связывания с белками, липидами и ионнами металлов (Tang & Huang, 2021; Jiang et al., 2020; Leceta et al., 2013; Lu et al., 2022; Rebezov et al., 2022; Riešutė et al., 2022; Turantaş et al., 2018). Наличие ионогенных групп обеспечивает макромолекулам характерные электрические, пространственные и гидродинамические свойства (Król et al., 2016). В зависимости от концентрации полиэлектролита в растворе, температуры, давления, присутствия низкомолекулярных веществ или величины pH меняется конформация и объем молекулы в растворе и, как следствие, его реологические свойства. На примере водных растворов каррагинана и альгината натрия, содержащих добавку хлорида натрия, показано, что обработка током 400 мА в течение 5 минут придавала растворам желательные физико-химические характеристики, при этом сохранялись реологических свойства гидрозолей, формируемых указанными растворами (Król et al., 2016).

Химические реагенты также изменяют структуру и технологические свойства полисахаридов. Установлено, что ионы кальция влияют на свойства полисахарида, выделенного из растения Lycium barbarum L., его реологические характеристики и механизм гелеобразования (Wang et al., 2022). В указанной работе определены химический состав, моносахаридный состав и молекулярная масса экстракта полисахарида, исследован эффект Ca^{2+} на дзета-потенциал, реологические свойства и инфракрасные спектры. Результаты показали, что экстракт полисахарида представляет собой кислую смесь гликопротеинов с молекулярной массой $4{,}05 \times 10^5$ Да. Показано, что добавление ионов Ca^{2+} улучшает структуру геля из экстракта полисахарида. Возможно, электростатическое взаимодействие и кальциевые мостики, образованные при добавлении катиона, сыграли ключевую роль в формировании структуры геля.

Liu с соавторами (Liu et al., 2019) изучали влияние карбоната натрия на образование, реологию, текстуру и свойства геля, образованного кукурузным крахмалом (MS) и анионным полисахаридом, выделенным из травы Mesona chinensis (MCP), которые используют для изготовления желейного десерта. Добавление Na_2CO_3 ускоряло процесс образования пасты и снижало вязкость смесей MS, которая увеличивалась с ростом концентрации MCP. Добавление Na_2CO_3 усиливало гелеобразование крахмальных гелей в присутствии 0,2 % MCP, если сравнивать с гелями MS-MCP. Результаты рентгеновской дифракции показали увеличение относительной кристалличности MS благодаря участию в желатинизации как MCP, так и Na_2CO_3. Текстурные свойства геля улучшались в присутствии Na_2CO_3 при том, что микроструктура комплекса MS-MCP-Na_2CO_3 состояла из поперечно распределенных крупных пор с более толстой стенкой. Конфокальная микроскопия подтвердила увеличение размера MS-MCP гранул, которые набухали в большей степени в присутствии Na_2CO_3. Улучшение реологических и текстурных свойств комплексных гелей MS-MCP-Na_2CO_3 позволило рассматривать Na_2CO_3 в качестве агента, укрепляющего гель в системе «крахмал — не крахмальный полисахарид». Присутствие таких полисахаридов во многом определяет характеристики геля, сформированного на основе крахмала. Отмечено, что добавление MCP оказывает значимое влияние на физико-химические и реологические свойства крахмала сладкого картофеля и свойства MCP-гелей на его основе. В частности, улучшается микроструктура, увеличивается вязкость и вязкоупругие свойства, повышается прочность и твердость геля, возможно, за счет образования водородных связей и электростатического взаимодействия, но без образования ковалентной связи. Последнее обстоятельство подтверждено методом инфракрасной спектрометрии (Ren et al., 2020).

Свойства полисахаридов определяются методами их экстракции. Группой Chen с соавторами (Chen et al., 2022) рассмотрено влияние концентрации щелочи на физико-химические характеристики, реологические и антиоксидантные свойства трех полисахаридов в процессе экстракции из кожицы бобов. Показано, что щелочная экстракция разрушает эфирные и водородные связи между полисахаридами, поэтому такая экстракция обеспечивает большее количество продукта, чем при экстракции горячей водой. Полисахариды, экстрагированные

щелочью, имели более низкий молекулярный вес, размер частиц и лучшую термическую стабильность. Отметим, образец с более высоким содержанием галактуроновой кислоты и более низкой молекулярной массой обладал повышенной антиоксидантной активностью.

Применение биоразлагаемых защитных пленок на основе хитозана в пищевой промышленности

Хитозан относится к нетоксичным и неаллергенным веществам, биосовместим с тканями человека и животных, безопасен для окружающей среды. В технологии формованных изделий хитозан используют в качестве структурообразующего агента, повышающего значения реологических характеристик пищевых масс. Данный полимер способен соединять в упорядоченную структуру фрагменты материалов различной влажности (Загрутдинова с соавт., 2014). Благодаря особенностям химического строения и структурно-механическим свойствам хитозан образует пленки, обладающие прочностью, необходимой для получения биоразлагаемой упаковки. Выраженный электрический заряд молекул хитозана, обусловленный наличием положительно заряженных аминогрупп, придает ему свойства полиэлектролита, способного длительное время сохранять фиксированный электрический заряд на поверхности (Загрутдинова с соавт., 2014).

С тем, чтобы увеличить растворимость и усилить антибактериальные свойства, аминогруппы хитозана подвергают модификации (Варламов с соавт., 2020). В производстве упаковки полимерные электретные пленки рассматривают в качестве «активных» материалов, которые способны изменять газовую среду внутри упаковки, сохранять внешний вид и консистенцию пищевых продуктов, подавлять рост и развитие микроорганизмов (Загрутдинова с соавт., 2014). Последний фактор способен пролонгировать значительно срок хранения пищевых продуктов.

Хитозан ценен тем, что его полезные свойства усиливаются в сочетании с другими биокомпонентами. С целью улучшения потребительских характеристик, например, сопротивления растяжению и проницаемости водяного пара, в хитозановые пленки добавляют пластификаторы и сшивающие агенты. Известно влияние соотношения глутаральдегид/глицерин на свойства хитозановых пленок. Исследовали получение и характеристики пленок хитозана без глутаральдегидом или с его добавлением в присутствии различных концентраций глицерина (De Oliveira et al., 2021). В цитируемой работе получали однородные пленки, без разделения фаз и с похожей химической структурой. Глутаральдегид делает хитозан частично гидрофобным, что приводит к насыщению глицерином полученные образцы пленки. Комбинирование пластификатора и сшивки перспективно для улучшения свойств пленки на основе хитозана, что повышает конкурентоспособность произведенной упаковки (De Oliveira et al., 2021).

Для природного хитина разработан метод щелочного деацетилирования с целью получения хитозана посредством отщепления ацетильной группировки N-ацетил-D-глюкозамина от молекулы полимера (Камская, 2016). Хитин содержится в панцире ракообразных, кутикуле насекомых, в клеточной стенке мицелиальных грибов и диатомовых водорослей. Выполняя главным образом трофическую функцию, хитин формирует экзоскелеты членистоногих, внутренние опорные пластины некоторых головоногих, сетчатые структуры в трубках погонофор, створках диатомовых водорослей и клеточных стенках грибов, чем обеспечивает целостность организма (Варламов с соавт., 2020). Хитин встречается в комплексе с другими веществами и является самым распространенным биополимером после целлюлозы. В природе запасы этого вещества, как сырья для получения хитозана, возобновляемы и практически неисчерпаемы (Загрутдинова с соавт., 2014). Акватория Российской Федерации богата промыслами ракообразными, что делает экономически целесообразным получение хитозана в промышленных масштабах. Хитин представляет собой линейный полисахарид, состоящий из различного количества 2-амино-2-дезокси-β-D-глюкозы (глюкозамина) и его N-ацетилированного производного в пиранозной форме, связанных гликозидными связями. В выделенном из природных источников хитине, как правило, содержится 5–10% остатков 2-амино-2-дезокси-β-D-глюкозы (Варламов с соавт., 2020). Хитозан — продукт щелочного деацетилирования хитина. Реакция отщепления ацетильной группировки от структурной единицы хитина сопровождается одновре-

менным разрывом гликозидных связей полимера, т.е. уменьшением молекулярной массы, изменением надмолекулярной структуры, степени кристалличности и другими трансформациями. Хитозан — полидисперсный по молекулярной массе полимер D-глюкозамина, содержащий 5–15 % ацетамидных групп, а также до 1 % групп, соединенных с аминокислотами и пептидами (Камская, 2016). Будучи линейными полимерами, хитозан и его производные, подобно целлюлозе, обладают волокнообразующими и пленкообразующими свойствами (Камская, 2016).

Физико-химические, антиоксидантные, антимикробные и pH-чувствительные свойства пленок на основе хитозана

Следующий этап исследований был посвящен анализу физико-химических, антиоксидантных, антимикробных и pH-чувствительных свойств пленок на основе хитозана. Так, в работе (Jakubowska et al., 2021) определены физико-химические свойства хитозановых пленок, пластифицированных эвтектическим растворителем. Для этого ученые использовали хитозан в сочетании с холин хлоридом и малоновой кислотой. Оценивали структурные, механические, тепловые и барьерные свойства модифицированных и немодифицированных пленок. Добавление смеси приводило к значительному увеличению эластичности, по сравнению с контрольными образцами, и более выраженной шероховатости. Подтверждено увеличение паропроницаемости для всех вариантов модифицированных пленок (Jakubowska et al., 2020). В качестве пластификаторов также использовали растворитель, на основе смеси холина хлорида и молочной кислоты. Молекулярная структура и свойства пленок из хитозана с различной степенью деацетилирования изучали с помощью FTIR-спектроскопии, сканирующей электронной и атомно-силовой микроскопии, регистрируя оптические характеристики, скорость пропускания водяного пара, прочность на разрыв при растяжении. Микроснимки показали, что все исследуемые пленки были гладкими и однородными, значительно повышалась их гибкость, увеличивалось растяжение разрыва, улучшались антиоксидантные свойства. Другими словами, пленки из хитозана демонстрируют характеристики, которые перспективны при производстве упаковочного материала.

Опубликованы исследования антиоксидантных свойств хитозана и его производных, проявляющих свойства ловушки свободных радикалов (Варламов с соавт., 2020). Антиоксидантную активность хитозана объясняют наличием протонированной аминогруппы и связыванием ионов металлов, индуцирующих образование свободных радикалов. В производстве пищевых пленок из хитозана в качестве дополнительной присадки, нейтрализующей активные формы кислорода и обладающей бактерицидными свойствами, целесообразно применять побочные продукты переработки фруктов и ягод, остающихся после выделения целевых ингредиентов (Икрамов & Нилова, 2019).

Для формирования пленок с заданными механическими и барьерными свойствами оптимизируют соотношение и типы растительных экстрактов, пластификаторов и композиционных полисахаридных материалов. Пленки на основе полисахаридов, обогащенные полифенольными экстрактами, которые показали многофункциональный потенциал, могут быть основой для разработки активной и «умной» упаковки. С этой целью получали съедобную упаковку хитозана с экстрактами выжимок черники, красного винограда и петрушки (Dordevic et al., 2021). Для такой упаковки определили газобарьерные свойства, толщину, содержание воды, растворимость, степень набухания, текстурные свойства, общее содержание полифенолов, диффузию биологически активных веществ, антиоксидантную и антимикробную активность. Пленка, включающая в состав высокие концентрации экстракта красного винограда, показала максимальную антимикробную активность в отношении кишечной палочки, сниженный уровень газопроницаемости по отношению к кислороду и набухания.

Изучено влияние экстракта листьев манго (MLE) на антиоксидантную активность пленки хитозана в упаковке для пищевых продуктов (Rambabu et al., 2019). Введение MLE в концентрации 1–5 % изменяло морфологию, оптическую природу, воздействие воды и механические характеристики композитных пленок. Повышение концентрации вещества в экстракте приводило к получению пленок с увеличенной толщиной и уменьшенным содержанием влаги. Анализ контактного угла, растворимости в воде и проницаемости для пара показал снижение гидрофильности и паропроницаемости для пленок хитозан-MLE. У таких пленок увеличивалась проч-

ность на разрыв и уменьшалось значение коэффициента удлинения, по сравнению с пленкой чистого хитозана. Оценка общего содержания фенолов, поглощения радикалов DPPH и ABTS, способности восстанавливать железо показала улучшение антиоксидантной активности с увеличением содержания MLE в пленке. Микроскопические исследования показали гладкую, компактную и плотную природу MLE-хитозан пленок, обеспечивающую низкую скорость переноса кислорода. Исследования при длительном хранении орехов выявили повышение на 56 % устойчивости продукта к окислению для хитозановой пленки, содержащей 5 % MLE, по сравнению с пленкой из полиамида/полиэтилена. Авторы подчеркивают перспективность хитозановых пленок с MLE добавкой в качестве альтернативы коммерческим материалам, используемых для производства пищевых пленок.

Разработана биоразлагаемая пищевая упаковочная пленка на основе хитозана, содержащая экстракт корня китайского лука (Riaz et al., 2020). Исследовали структуру, потенциал взаимодействия и термическую стабильность приготовленной пленки. С помощью сканирующей электронной микроскопии обнаружено, что более высокая концентрация экстракта вызывала образование агломератов внутри пленок. Включение экстракта лука привело к снижению растяжимости пленки притом, что увеличилась ее толщина, но растворимость в воде, степень набухания и паропроницаемость снизились. Рассматриваемые комбинированные пленки продемонстрировали хорошую антиоксидантную и антимикробную активность, что свидетельствует о перспективности их использования в качестве композитного упаковочного материала для пищевой промышленности.

Исследовали антиоксидантные, антимикробные и pH-чувствительные свойства пленок на основе хитозана, экстракта фиолетовой кукурузы с высоким содержанием антоцианов с включением наночастиц серебра. Сравнительный анализ показал появление частиц и пятен на поверхности пленки и поперечном сечении пленок. Инфракрасный и рентгеноструктурный анализ подтвердили, что взаимодействие между хитозаном и частицами серебра основано на координационном эффекте, в то время как взаимодействие между хитозаном и антоцианами, как правило, устанавливается через водородные связи. Добавление экстракта кукурузы и/или наночастиц увеличило свето- и паронепроницаемость, механическую прочность, антиоксидантные и антимикробные свойства хитозановой пленки. Наличие антоцианов обусловило изменение цвета пленка в зависимости от pH раствора, что позволило предложить такой материал в качестве нового вида «умной» упаковки для пищевой промышленности.

Анализировали функциональные свойства и антимикробный эффект хитозановых пленок для упаковки пищевых продуктов, которые готовили путем литья и сушили при комнатной температуре или в процессе термической обработки (Leceta et al., 2013). Во всех случаях пленка оставалась гибкой и прозрачной, независимо от молекулярной массы хитозана, содержания глицерина и температурного режима. Растворы хитозана проявили антимикробный (бактериостатический) эффект в отношении Escherichia coli и Lactobacillus plantarum, выраженность которого зависела от температуры обработки. Нагревание вызывало изменения свойств пленок, например, механических показателей и цвета, гидрофобности, устойчивости к ультрафиолетовому излучению. Методами определения общего содержания растворимых веществ, ИК- спектрометрии, термогравиметрического и рентгеноструктурного анализа показано изменение химической структуры пленки хитозана в процессе термообработки, возможно, из-за реакции Майяра.

В литературе описано антимикробное защитное действие пленок из хитозана, нанесенных на поверхность яблок, апельсинов, земляники, томатов, перца. Однородные хитозановые пленки, не дающие трещин и гибкие, обладают избирательной проницаемостью подобно другим полимерным покрытиям, нанесенным на поверхность плодов и овощей. При этом пленки играют роль микробного фильтра и/или регулируют состав газов в растительной ткани, влияя на активность и тип дыхания, что способствует продлению сроков хранения сырья. Помимо этого, покрытие из хитозана вызывает морфологические изменения в возбудителях порчи томатов и перца (Камская, 2016). Изучали покрытие ягод клубники съедобными пленками на основе хитозана для механической/биологической защиты (Pavinatto et al., 2020; Qin et al., 2019). Защитный слой формировали методом капельного литья, используя глицерин для повышения эластичности и гидрофобности пленки. Клубника,

покрытая пленкой из хитозана/30 %/глицерина, продемонстрировала устойчивость к поражению серым грибком и незначительное изменение вкуса, внешнего вида, аромата и текстуры. Хитозановая пленка, оставаясь съедобным покрытием, защищала клубнику от развития грибковой инфекции.

Описаны бактерицидные свойства пленок из хитозана и желатин-хитозанового комплекса (Malinowska-Pańczyk et al., 2015). Доказано, что бактерицидное действие растворов хитозана усиливается со временем и повышением температуры инкубации образца. Выявлено, что два психротрофных штамма (Pseudomonas fluorescens и Listeria innocua) были более чувствительны к хитозану, чем мезофильные штаммы (Escherichia coli и Staphylococcus aureus). В случае двухкомпонентных желатино-хитозановых пленок также наблюдался сильный антимикробный эффект. Покрытия на основе хитозана с различными антимикробными добавками (аллилизоцианурат, низин, этиллауроиларгинат, органические кислоты) показали свою эффективность против ряда болезнетворных организмов на поверхностях сыров, фруктов, овощей, яиц, мясной продукции.

Исследован состав, антимикробные свойства, микрокапсуляцию эфирного масла базилика Ocimum basilicum в составе хитозановой пленки, предназначенной для увеличения срока хранения продуктов питания (Amor et al., 2021). Основным компонентом эфирного масла базилика, как показано, является линалоол. Выявлен значительный ингибирующий эффект в отношении всех протестированных микроорганизмов, в основном грамположительных бактерий. Испытание образцов вареной ветчины, обернутой в пленку на основе хитозана и эфирного масла базилика, показало наличие бактерицидного эффекта у пленки, которая подавляла повышение кислотности упакованного продукта.

Эффективность биоразлагаемых защитных пленок в сочетании с другими физико-химическими методами обработки продуктов

Добиться повышения дезинфицирующей активности хитозановой пленки с включенными в ее состав противомикробными добавками удается посредством комбинирования с методами обеззараживания поверхностей пищевых продуктов. В последние годы акцент делается на применение в качестве перспективного дезинфицирующего средства электрохимически активированного водного раствора (ЭХАР), который в англоязычной литературе называют «электролизная вода». Принцип получения ЭХАР состоит в накоплении фракций водного раствора в пространстве электролизера, прилегающем к аноду или катоду прибора, анолита или католита, соответственно (Bakhir & Pogorelov, 2018). Эти метастабильные фракции обладают особыми физико-химическими свойствами. Для анолита характерно аномально высокое положительное значение ОВП, увеличивается кислотность раствора и содержание в нем кислорода, а также его активных форм. Напротив, католит приобретает щелочную реакцию, а его ОВП можно снизить до отрицательных значений, при этом в растворе возрастает уровень молекулярного водорода. Подходы, разработанные на основе ЭХАР, относят к «зеленым» технологиям, так как это эффективное противомикробное средство, экологически чистое, безопасное для человека и экономически выгодное. Интерес представляет сочетанное применение ЭХАР с химическими и физическими методами воздействия, такими как ультрафиолетовое излучение и ультразвук.

Бактерицидные свойства биоразлагаемых пленок на основе полисахаридов могут быть усилены воздействием ЭХАР. Обрабатывая яйца слабокислой электролизной водой с последующим покрытием хитозановой пленкой, изучалась возможность защиты продукта от заражения микроорганизмами при его длительном хранении при комнатной температуре (Sheng et al., 2021). Такая процедура инактивирует бактерии на поверхности яиц, но при этом скорлупа повреждается, что показано методом сканирующей электронной микроскопии. Для того, чтобы избежать потери влаги и углекислого газа через поврежденную оболочку, было успешно применено покрытие скорлупы пленкой хитозана.

Управление параметрами фракции ЭХАР позволяет модифицировать свойства пищевых защитных пленок, регулируя их растворимость, гидрофобность, эластичность (Brychcy, 2015). Физико-химические свойства композитных пленок на основе хитозана и гидроксипропилметилцеллюлозы (хитозан/ГПМЦ) направленно изменяли посредством добавления анолита и фермента лизоцима. Увеличение длительности электролиза и подбор концен-

трации хлорида натрия в исходном растворе вызывает снижение растворимости опытных образцов пленки, формирует структуру пленки в виде сети, обеспечивает однородное покрытие и сцепление с поверхностью. Увеличение концентрации соли, влияло на повышение гибкости пленки, увеличивало ее термомеханическую стойкость. При этом использование кислой фракции ЭХАР не меняло химический состав пленки, что подтверждено методами ЯМР ^{1}H, MALDI-TOF масс-спектрометрии и FT-IR спектрометрии.

Обработка продуктов кислой фракцией ЭХАР в сочетании с лизоцимом была эффективна для увеличения срока хранения охлажденного карпа (Cyprinus carpio), хранящегося в вакуумной упаковке при 2 °C (Palotás et al., 2020). В этом исследовании образцы свежего филе карпа с кожей помещали на 5 минут в ЭХАР, содержащий 100 мг/кг активного хлора. Другую группу образцов обрабатывали последовательно электролизной водой и 0,5 % раствором лизоцима. Еще одну группу после обработки ферментом обмывали ЭХАР. В течение периода хранения проводили химические и микробиологические тесты, а также делали органолептическую оценку. По сравнению с контролем, комбинация ЭХАР и лизоцима увеличивала срок хранения и обеспечивала снижение уровня обсемененности притом, что органолептические показатели образцов не менялись.

Показано влияние кислой фракции ЭХАР в сочетании с химическими и физическими процедурами для обеззараживания свежих яблок и томатов на фоне хранения при 4 °C и 23 ± 0,15 °C (Tango et al., 2017). Цельные яблочные и томатные плоды были привиты коктейльными штаммами Escherichia coli и Listeria monocytogenes. Плоды последовательно промывали дистиллированной водой или ЭХАР с добавлением в раствор оксидом кальция или фумаровой кислотой. По сравнению с контрольной обработкой водой, все процедуры приводили к снижению общего числа бактерий. Увеличение концентрации добавок усиливало бактерицидный эффект. Таким образом, ЭХАР в комбинации с другими дезинфицирующими средствами может быть использован для послеуборочной санитарной обработки в индустрии свежих фруктов.

Исследовали возможность удаления с поверхности крабов и креветок биопленки, сформированной Vibrio parahaemolyticus (Roy et al., 2021). В данной работе изучали обеззараживающее действие (отдельно или в комбинации) ультрафиолета (UV), гипохлорита натрия (NaOCl) и слабокислой фракции ЭХАР. Отметим то, что обработка ЭХАР превосходила по эффективности действие NaOCl. Комбинированная обработка UV/NaOCl показала снижение содержания V. parahaemolyticus на поверхности моллюсков, но сочетание UV/ЭХАР обеспечило более выраженный эффект. Таким образом, полученные результаты показали то, что в сочетании с воздействием UV как гипохлорит натрия, так и ЭХАР могут быть использованы для повышения микробиологической безопасности индустрии морепродуктов.

Последовательную обработку слабокислым ЭХАР и ультрафиолетом, источником которого были светодиоды, применяли и для дезактивации Salmonella Typhimurium на поверхности салата (Han et al., 2021). Обработка только промывкой ЭХАР или облучением ультрафиолетом привели к сокращению до 1–1,8 $\log_{10}$ КОЕ/г Salmonella Typhimurium на поверхности листьев. Более эффективной была последовательная обработка указанными воздействиями, снижая содержание бактерий до 2,56–2,97 $\log_{10}$ КОЕ, что подтверждает перспективность сочетанного действия UV и ЭХАР для обеспечения микробиологической безопасности свежих пищевых продуктов.

Микроорганизмы в естественной среде существуют, как правило, в форме симбиотической биопленки. Первичным источником формирования на поверхности оборудования пищевой промышленности биопленки является адгезия бактерий, которая является причиной загрязнения и, следовательно, несет риск инфицирования человека и/или нарушения технологического цикла.

Дезинтеграцию биопленки слабокислой фракцией ЭХАР изучали на образце, образованном из суспензии двух видов Listeria monocytogenes и Staphylococcus aureus (Yan et al., 2022). Кроме стабильности фракции ЭХАР при хранении, исследовали ее дезинфицирующую активность на (не) спорообразующие патогенные микроорганизмы. Установлено, что фракция ЭХАР, содержащая 30 ppm и 50 ppm соединений активного хлора, полностью уничтожала спорообразующий патоген Bacillus cereus. Кроме того, слабокислая

фракция ЭХАР в концентрации 25 мг/л инактивирует в биопленке клетки Listeria monocytogenes и Staphylococcus aureus. При этом клетки первого вида были более чувствительны к обработке. Эти результаты свидетельствуют об антибиопленочной активности слабокислой фракции ЭХАР, ее способности к нарушению гомеостаза внутри биопленки, снижению плотности клеток и, как следствие, дезинтеграции биопленки.

Перспективными представляются и такие новые направления исследований, направленные на создание активной упаковки хитозановой пленки, модифицированной маслом базилика, инкапсулированным в наночастицы кремнезема, в качестве альтернативы пластиковым упаковочным материалам (Sultan et al., 2023).

ВЫВОДЫ

Существующий спектр методов, направленных на изменение структуры и свойств полисахаридов, способствует решению актуальной задачи — разработке биоразлагаемой упаковки. Для этого используют отходы переработки природного сырья, содержащие полисахаридную компоненту. Интерес представляет упаковочный материал на основе пленок, изготовленных из хитозана с добавлением различных функционально активных компонент. Прочность, гибкость, антимикробная и антиоксидантная активность придают такой упаковке свойства, которые способны пролонгировать срок годности пищевых продуктов, сохраняя их полезные свойства и органолептические показатели. При этом обеспечивается биоразлагаемость — основной критерий экологической безопасности упаковочного материала.

В обзоре систематизированы материалы, опубликованные за последние несколько лет, которые нацелены на разработку способов улучшения свойств пленок на основе полисахаридов. Анализ полученных результатов показывает, что хитозан уже используют для изготовления безопасной и биоразлагаемой упаковки[1]. Такая упаковка становится значительно эффективнее при сочетанном воздействии физических или химически средств обеззараживания поверхности пищевых продуктов. В их ряду, пожалуй, наиболее перспективной является дополнительная обработка метастабильной фракцией ЭХАР, что одновременно обеззараживает поверхность пищевых продуктов и увеличивает сроков их хранения, не влияя при этом на качество. Предварительная обработка электрохимически активированным водным раствором с последующей упаковкой в материал на основе хитозановой пленки повышает противомикробную и антиоксидантную защиту пищевых продуктов. Исследования в указанном направлении вносят значимый вклад в развитие методов консервации и хранения продукции пищевой промышленности.

АВТОРСКИЙ ВКЛАД

Суворов Олег Александрович: концептуализация; подготовка и редактирование рукописи.

Ипатова Лариса Григорьевна: разработка методологии исследования; редактирование рукописи.

Погорелова Мария Александровна: администрирование и валидация данных.

Песоцкая Дарья Андреевна: проведение исследования; создание черновика рукописи.

Сафонов Максим Сергеевич: проведение исследования; валидация данных.

Погорелов Александр Григорьевич: общее руководство исследованием.

[1] Чувелёв, Д. И. (2022). *Патент РФ 2770588. Пищевая плёнка на основе хитозана, способ её получения и применения*.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

Бахир, В. М. (2014). *Электрохимическая активация. Изобретения, техника, технология.* М.: ВИВА-СТАР

Bakhir, V. M. (2014). *Electrochemical activation. Inventions, equipment, technology*. Moscow: VIVA-STAR. (In Russ.)

Варламов, В. П., Ильина, А. В., Шагдарова, Б. Ц., Луньков, А. П., & Мысякина, И. С. (2020). Хитин/хитозан и его производные: Фундаментальные и прикладные аспекты. *Успехи биологической химии*, 60, 317–368.

Varlamov, V. P., Il'ina, A. V., Shagdarova, B. Ts., Lun'kov, A. P., & Mysyakina, I. S. (2020). Chitin/chitosan and its derivatives: Fundamental and applied aspects. *Advances in Biological Chemistry, 60*, 317–368. (In Russ.)

Загрутдинова, А. К., Гужова, А. А., & Хайруллин, Р. З. (2014). Электретные биоразлагаемые материалы на основе полиэтилена высокого давления и хитозана. *Вестник технологического университета*, 17(14), 281–284

Zagrutdinova, A. K., Guzhova, A. A., & Khairullin, R. Z. (2014). Electret biodegradable materials based on high-pressure polyethylene and chitosan. *Bulletin of the Technological University, 17*(14), 281–284. (In Russ.)

Икрамов, Р. А., & Нилова, Л. П. (2019). Формирование антиоксидантных свойств желейных продуктов на основе композиций ягодных экстрактов. В *Потребительский рынок: Качество и безопасность товаров и услуг: Материалы X Международной научно-практической конференции, посвященной 100-летию Орловского государственного университета им. И.С. Тургенева* (с. 230–233). Орел: Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева.

Ikramov, R. A., & Nilova, L. P. (2019). Formation of antioxidant properties of jelly products based on berry extract compositions]. In *The Consumer Market: Quality and safety of goods and services: Materials of the International Scientific and Practical Conference dedicated to the 10th anniversary of the I. S. Turgenev Oryol State University* (pp. 230–233). Orel: Orlovskii gosudarstvennyi universitet imeni I.S. Turgeneva. (In Russ.)

Камская, В. Е. (2016). Хитозан: Структура, свойства и использование. *Научное обозрение. Биологические науки*, (6), 36–42.

Kamskaya, V. E. (2016). Chitosan: Structure, properties and use. *Scientific Review. Biological Sciences,* (6), 36–42. (In Russ.)

Amor, G., Sabbah, M., Caputo, L., Idbella, M., de Feo, V., Porta, R., Fechtali, T., Mauriello, G., (2021). Basil essential oil: Composition, antimicrobial properties, and microencapsulation to produce active chitosan films for food packaging. *Foods, 10*(1), Article 121. https://doi.org/10.3390/foods10010121

Bakhir, V. M., & Pogorelov, A. G. (2018). Universal electrochemical technology for environmental protection. *The International Journal of Pharmaceutical Research and Allied Sciences, 7*, 41–57.

Brychcy, E., Kulig, D., Zimoch-Korzycka, A., Marycz, K., Jarmoluk, A. (2015). Physicochemical properties of edible chitosan/hydroxypropyl methylcellulose/lysozyme films incorporated with acidic electrolyzed water. *International Journal of Polymer Science, 2015*, Article 604759. https://doi.org/10.1155/2015/604759

Chen, S., Qin, L., Xie, L., Yu, Q., Chen, Y., Chen, T., Lu, H., & Xie, J. (2022). Physicochemical characterization, rheological and antioxidant properties of three alkali-extracted polysaccharides from mung bean skin. *Food Hydrocolloids, 132*, Article 107867. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2022.107867

Cui, R., & Zhu, F. (2021). Ultrasound modified polysaccharides: A review of structure, physicochemical properties, biological activities and food applications. *Trends in Food Science & Technology, 107*, 491–508. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.11.018

De Oliveira, A. C. S., Ugucioni, J. C., & Borges, S. V. (2021). Effect of glutaraldehyde/glycerol ratios on the properties of chitosan films. *Journal of Food Processing and Preservation, 45*(1), Article e15060. https://doi.org/10.1111/jfpp.15060

Dordevic, S., Dordevic, D., Sedlacek, P., Kalina, M., Tesikova, K., Antonic, B., Tremlova, B., Treml, J., Nejezchlebova, M., Vapenka, L., Rajchl, A., & Bulakova, M. (2021). Incorporation of natural blueberry, red grapes and parsley extract by-products into the production of chitosan edible films. *Polymers, 13*(19), Article 3388. https://doi.org/10.3390/polym13193388

Feng, Y., Juliet, I. C., Wen, C., Duan, Y., Zhou, J., He, Y., Zhang, H., & Ma, H. (2021). Effects of multi-mode divergent ultrasound pretreatment on the physicochemical and functional properties of polysaccharides from Sagittaria sagittifolia L. *Food Bioscience, 42*, Article 101145. https://doi.org/10.1016/j.fbio.2021.101145

Han, R., Liao, X., Ai, C., Ding, T., & Wang, J. (2021). Sequential treatment with slightly acidic electrolyzed water (SAEW) and UVC light-emitting diodes (UVC-LEDs) for decontamination of Salmonella typhimurium on lettuce. *Food Control, 123*, Article 107738. https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2020.107738

Hopkins, D. Z., Parisi, M. A., Dawson, P. L., & Northcutt, J. K. (2021). Surface decontamination of fresh, whole peaches (prunus persica) using sodium hypochlorite or acidified electrolyzed water solutions. *International Journal of Fruit Science, 21*(1), 1–11. https://doi.org/10.1080/15538362.2020.1822269

Jakubowska, E., Gierszewska, M., Nowaczyk, J., & Olewnik-Kruszkowska, E. (2021). The role of a deep eutectic solvent in changes of physicochemical and antioxidative properties of chitosan-based films. Carbohydrate *Polymers, 255*, Article 117527. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.117527

Jakubowska, E., Gierzewska, M., Nowaczyk, J., & Olewnik-Kruszkowska, E. (2020). Physicochemical and storage properties of chitosan-based films plasticized with deep eutectic solvent. *Food Hydrocolloids, 108*, Article 106007. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106007

Jiang, Y. H., Cheng, J. H., & Sun, D. W. (2020). Effects of plasma chemistry on the interfacial performance of protein and polysaccharide in emulsion.

Trends in Food Science & Technology, 98, 129–139. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.115208

Kan, X., Chen, G., Zhou, W., & Zeng, X. (2021). Application of protein-polysaccharide Maillard conjugates as emulsifiers: Source, preparation and functional properties. *Food Research International, 150*, Article 110740. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2021.110740

Kang, M., Park, B., & Ha, J.-H. (2021). Characteristics in fresh cabbage disinfection against human norovirus. *Frontiers in Microbiology, 12*, Article 616297. https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.616297

Król, Ż., Malik, M., Marycz, K., & Jarmoluk, A. (2016). Characteristic of gelatine, carrageenan and sodium alginate hydrosols treated by direct electric current. *Polymers, 8*(8), Article 275. https://doi.org/10.3390/polym8080275

Leceta, I., Guerrero, P., Ibarburu, I., Duenas, M. T., & Caba, K. (2013). Characterization and antimicrobial analysis of chitosan-based films. *Journal of Food Engineering, 116*(4), 889–899. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2013.01.022

Liu, S., Xiao, Y., Shen, M., Zhang, X., Wang, W., & Xie, J. (2019). Effect of sodium carbonate on the gelation, rheology, texture and structural properties of maize starch-Mesona chinensis polysaccharide gel. *Food Hydrocolloids, 87*, 943–951. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2018.09.025

Lu, L., Guo, H., Kang, N., He, X., Liu, G., Li, J., He, X., Yan, X., & Yu, H. (2022). Application of electrolyzed water in the quality and safety control of fruits and vegetables: A review. *International Journal of Food Science & Technology, 57*(9), 5698–5711. https://doi.org/10.1111/ijfs.15916

Malinowska-Pańczyk, E., Staroszczyk, H., Gottfried, K., Kolodziejska, I., & Wojtasz-Pajak, A. (2015). Antimicrobial properties of chitosan solutions, chitosan films and gelatin-chitosan films. *Polimery, 60*(11–12), 735–741. https://doi.org/10.14314/polimery.2015.735

Palotás, P., Jonas, G., Lehel, J., & Friedrich, L. (2020). Preservative effect of novel combined treatment with electrolyzed active water and lysozyme enzyme to increase the storage life of vacuum-packaged carp. *Journal of Food Quality, 2020*, Article 4861471. https://doi.org/10.1155/2020/4861471

Pavinatto, A., de Almeida Mattos, A. V., Granato Malpass, A. C., Okura, M. H., Balogh, D. T., & Sanfelice, R. C. (2020). Coating with chitosan-based edible films for mechanical/biological protection of strawberries. *International Journal of Biological Macromolecules, 151*, 1004–1011. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.11.076

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

Rambabu, K., Bharath, G., Banat, F., Show, P. L., & Cocoletzi, H. H. (2019). Mango leaf extract incorporated chitosan antioxidant film for active food packaging. *International Journal of Biological Macromolecules, 126*, 1234–1243. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.12.196

Rebezov, M., Saeed, K., Khaliq, A., Ur Rahman, S. J., Sameed, N., Semenova, A., Khayrullin, M., Dydykin, A., Abramov, Y., Thiruvengadam, M., Ali Shariati, M., Bangar, S. P., Lorenzo, J. M. (2022). Application of electrolyzed water in the food industry: A review. *Applied Sciences, 12*(13), Article 6639. https://doi.org/10.3390/app12136639

Ren, Y., Jiang, L., Wang, W., Xiao, Y., Liu, S., Luo, Y., Shen, M., & Xie, J. (2020). Effects of mesona chinensis benth polysaccharide on physicochemical and rheological properties of sweet potato starch and its interactions. *Food Hydrocolloids, 99*, Article 105371. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.105371

Riaz, A., Lagnika, C., Luo, H., Dai, Z., Nie, M., Hashim, M. M., Liu, C., Song, J., & Li, D. (2020). Chitosan-based biodegradable active food packaging film containing Chinese chive (Allium tuberosum) root extract for food application. *International Journal of Biological Macromolecules, 150*, 595–604. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.02.078

Riešutė, R., Salomskiene, J., Salaseviciene, A., & Macioniene, I. (2022). Effect of anolyte on s. typhimurium and l. monocytogenes growth in minced pork and beef cuts. *Foods, 11*(3), Article 415. https://doi.org/10.3390/foods11030415

Roy, P. K., Mizan, M. F. R., Hossain, M. I., Han, N., Nahar, S., Ashrafudoulla, M., Toushik, S. H., Shim, W.-B., Kim, Y.-M., & Ha, S.-D. (2021). Elimination of Vibrio parahaemolyticus biofilms on crab and shrimp surfaces using ultraviolet C irradiation coupled with sodium hypochlorite and slightly acidic electrolyzed water. *Food Control, 128*, Article 108179. https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2021.108179

Sheng, X., Shu, D., Li, Y., Zhan, Z., Yuan, X., Liu, S., Wu, H., Bing, S., & Zang, Y. (2021). Combined approach consisting of slightly acidic electrolyzed water and chitosan coating to improve the internal quality of eggs during storage. Journal of the Science of Food and Agriculture, 101(6), 355–2361. https://doi.org/10.1002/jsfa.10858

Sultan, M., Abdelhakim, A. A., Nassar, M., & Hassan, Y. R. (2023). Active packaging of chitosan film modified with basil oil encapsulated in silica nanoparticles as an alternate for plastic packaging materials. *Food Bioscience, 51*, Article 102298. https://doi.org/10.1016/j.fbio.2022.102298

Tang, Q., & Huang, G. (2021). Improving method, properties and application of polysaccharide as emulsifier. *Food Chemistry, 2021*, Article 131937. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.131937

Tango, C. N., Khan, I., Kounkeu, P.-F., Momna, R., Hussain, M. S., & Oh, D.-H. (2017). Slightly acidic electrolyzed water combined with chemical and physical treatments to decontaminate bacteria on fresh fruits. *Food Microbiology, 67*, 97–105. https://doi.org/10.1016/j.fm.2017.06.007

Turantaş, Ersus-Bilek, S., Samek, A., & Kuayasu, A. (2018). Decontamination effect of electrolyzed water washing on fruit and vegetables. *Journal of Microbiology, Biotechnology and Food Sciences, 7*(4), 337–342. https://doi.org/10.15414/jmbfs.2018.7.4.337–342

Wang, H., Chen, J., Ren, P., Zhang, Y., & Onyango, S. O. (2021). Ultrasound irradiation alters the spatial structure and improves the antioxidant activity of the yellow tea polysaccharide. *Ultrasonics Sonochemistry, 70*, Article 105355. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105355

Wang, H., Ke, L., Ding, Y., Rao, P., Xu, T., Han, H., Zhou, J., Ding, W., & Shang, X. (2022). Effect of calcium ions on rheological properties and structure of Lycium barbarum L. polysaccharide and its gelation

mechanism. *Food Hydrocolloids, 122*, Article 107079. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.107079

Wu, W., Huang, N., Huang, J., Wang, L., Wu, L., Wang, Q., & Zhao, H. (2022). Effects of the steaming process on the structural properties and immunological activities of polysaccharides from Polygonatum cyrtonema. *Journal of Functional Foods, 88*, Article 104866. https://doi.org/10.1016/j.jff.2021.104866

Xiao, J., Chen, X., Zhan, Q., Zhong, L., Hu, Q., & Zhao, L. (2022). Effects of ultrasound on the degradation kinetics, physicochemical properties and prebiotic activity of Flammulina velutipes polysaccharide. *Ultrasonics Sonochemistry, 82*, Article 105901. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2021.105901

Yan, P., Chelliah, R., Jo, K.-H., Selvakumar, V., Chen, X., Jo, H.-Y., & Oh, D. H. (2022). Stability and antibiofilm efficiency of slightly acidic electrolyzed water against mixed-species of listeria monocytogenes and staphylococcus aureus. *Frontiers in Microbiology, 13*, Article 865918. https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.865918