

<https://doi.org/10.36107/hfb.2023.i3.s232>

Современное состояние и использование биоразлагаемых материалов

Н. С. Баженов, М. И. Губанова, И. А. Кирш, О. А. Банникова,
В. А. Дымицкий

Российский биотехнологический
университет (РОСБИОТЕХ), Москва,
Россия

Корреспонденция:

Баженов Никита Сергеевич,
Российский биотехнологический
университет (РОСБИОТЕХ),
125080, Россия, г. Москва,
Волоколамское шоссе, 11
E-mail: bazhenovns@mgurp.ru

Конфликт интересов:

авторы сообщают об отсутствии
конфликта интересов.

Поступила: 17.09.2024

Поступила после
рецензирования: 30.11.2024

Принята: 30.11.2024

Copyright: © 2024 Авторы

АННОТАЦИЯ

Введение. Одним из важных факторов необходимости разработки биоразлагаемой упаковки является наличие ее не разлагаемых вариаций в отходах до 50%. В связи с этим актуальной задачей является модификация биоразлагаемых полимеров для придания упаковке высоких эксплуатационных свойств с сохранением способности к биоразложению.

Цель. Рассмотреть современное состояние и использование биоразлагаемых материалов в России и зарубежом.

Материалы и методы. Отбор исследований проводился в два этапа: принималось решение о включении публикации в обзор на основе ее названия и аннотации, проводилось изучение полнотекстовых статей для детальной оценки на соответствие критериям включения. Проводилась оценка качества подготовки в исследованиях. При проведении синтеза данных выполнено сопоставление, комбинация и краткое изложение результатов отдельных исследований. В обзор были включены статьи, опубликованные с 1999 по 2024 год. Статьи отбирались исходя из количества их цитирований по следующим ключевым словам: биоразлагаемая упаковка, медицина, фармацевтика, окружающая среда, пищевые технологии, биомасса и химический синтез.

Результаты. В результате интерактивного поиска было выделено 56 исследований. После анализа исследований было установлено, что разнообразие биоразлагаемых полимеров позволяет раскрыть их потенциал для применения в различных областях. Широкий выбор таких полимеров предоставляет возможность для создания новых материалов, которые могут эффективно разлагаться в природе и иметь необходимые нам эксплуатационные свойства. Также большинство исследований не обнаружили неблагоприятных последствий для различных организмов, как следствие, можно сделать лишь ограниченное заявление об экологической совместимости биоразлагаемых полимеров. Использование различных модификаций привело к расширению использования съедобных и биоразлагаемых пленок, что связано с улучшением общих характеристик биополимеров, повышением их механических, термических и барьерных свойств, как правило, даже при очень низком содержании. Таким образом, модификаторы играют важную роль в повышении эффективности использования биополимеров, которые сокращают количество отходов упаковки, связанных с обработанными пищевыми продуктами, и способствуют сохранению продуктов, продлевая срок их хранения.

Выводы. В данной статье проанализированы исследования о биоразлагаемых полимерах и композициях на их основе, современное состояние и использование биоразлагаемых материалов в различных областях. Приведены современные исследования по оценке возможного влияния биоразлагаемых полимеров на окружающую среду. Показаны перспективные тенденции использования биоразлагаемых полимеров в пищевой промышленности, а также в медицине и фармацевтике.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

биоразлагаемая упаковка; медицина; фармацевтика; окружающая среда; пищевые технологии; биомасса и химический синтез.

Для цитирования: Баженов, Н. С., Губанова, М.И., Кирш, И. А., Банникова, О.А., & Дымицкий, В. А. (2024). Современное состояние и использование биоразлагаемых материалов. *Health, Food & Biotechnology*, 6(3), 42–56. <https://doi.org/10.36107/hfb.2023.i3.s232>



<https://doi.org/10.36107/hfb.2023.i3.s232>

Current State and Use of Biodegradable Materials

Nikita S. Bazhenov, Marina I. Gubanova, Irina A. Kirsh, Olga A. Bannikova, Viktor A. Dymitsky

Russian Biotechnological University
(BIOTECH University), Moscow, Russia

Correspondence:

Nikita S. Bazhenov,
Russian Biotechnological University
(BIOTECH University), 11, Volokolamskoe
Highway, Moscow, 125080, Russia
Email address: bazhenovns@mgupp.ru

Declaration of competing interest:
none declared.

Received: 17.09.2024

Received in revised form: 30.11.2024

Accepted: 30.11.2024

Copyright: © 2024 The Authors

ABSTRACT

Introduction. One of the important factors in the need to develop biodegradable packaging is the presence of its non-decomposable variations in waste up to 50%. In this regard, the modification of biodegradable polymers to impart high performance properties while maintaining the ability to biodegrade is an urgent task.

Purpose. To consider the current state and the use of biodegradable materials in Russia and abroad.

Materials and Methods. The selection of studies was carried out in two stages: a decision was made to include a publication in the review based on its title and abstract, and full-text articles were studied for a detailed assessment of compliance with the inclusion criteria. An assessment of the research quality was conducted. During data synthesis, the results of individual studies were compared, combined, and summarized. The review included articles published from 1999 to 2024. The articles were selected based on the number of citations for the following keywords: biodegradable packaging, medicine, pharmaceuticals, environment, food technology, biomass and chemical synthesis.

Results. As a result of this interactive search, 56 studies were identified. After analyzing the research, it was found that the variety of biodegradable polymers allows them to unlock their potential for use in various fields. A wide range of such polymers provides an opportunity to create new materials that can efficiently decompose in nature and have the performance properties we need. Also, most studies have not found adverse effects for various organisms, and only a limited statement can be made about the environmental compatibility of biodegradable polymers. The use of various modifications has led to the expansion of the utilization of edible and biodegradable films, which is associated with an improvement in the general characteristics of biopolymers, increasing their mechanical, thermal and barrier properties, usually even at very low content. Thus, modifiers play an important role in increasing the efficiency of biopolymers application, which reduce the amount of packaging waste associated with processed foods and contribute to the preservation of products by extending their shelf life.

Conclusions. This article discusses biodegradable polymers and compositions based on them, the current state and use of biodegradable materials in various fields. Modern studies on the assessment of the possible impact of biodegradable polymers on the environment are presented. Promising trends in the use of biodegradable polymers in the food industry, as well as in medicine and pharmaceuticals are shown.

KEYWORDS

biodegradable packaging; medicine; pharmaceuticals; environment; food technology; biomass and chemical synthesis.



To cite: Bazhenov, N. S., Gubanova, M. I., Kirsh, I. A., Bannikova, O. A., & Dymitsky, V. A. (2024). The current state and use of biodegradable materials. *Health, Food & Biotechnology*, 6(3), 42–56. <https://doi.org/10.36107/hfb.2023.i3.s232>

ВВЕДЕНИЕ

В современном мире особое внимание уделяется упаковке, которая должна обладать способностью к биоразложению. В связи с этим растет интерес к разработке биополимеров и инновационным технологическим процессам, которые могут снизить зависимость от ископаемого топлива и перейти на экологически чистую материальную основу. Бионаноккомпозиты открывают возможности для создания новых, высокоэффективных, легких, экологически чистых нанокompозитных материалов, что позволяет им заменить обычные, не поддающиеся биологическому разложению пластиковые упаковочные материалы на нефтяной основе. На сегодняшний день наиболее изученными бионаноккомпозитами, подходящими для упаковки, являются производные крахмала и целлюлозы, полимолочная кислота (PLA), поликапролактон (PCL), полибутиленсукцинат (PBS) и полигидроксibuтират (PHB) (Vieira, 2011).

При внедрении в современное производство биоразлагаемых материалов одним из основных преимуществ является снижение потребности в синтетических полимерах при равной стоимости производства или ниже. Есть несколько путей получения синтеза биоразлагаемых полимеров: с помощью микроорганизмов, растений или животных; химическим способом из углеводов, белков или жиров. Все материалы, полученные различными способами, будут являться альтернативой их не биоразлагаемым аналогам, но использование их в чистом виде невозможно в связи с присущими им низкими барьерными, структурными и другими свойствами.

Переход на биоразлагаемую упаковку приведет к снижению количества трудно перерабатываемой упаковки, которая составляет до 65 % от общего объема твердых коммунальных отходов (Zaikova, 2022). В рамках стратегии экономики замкнутого цикла по органике планируется, что до 2030 года в России введут 12,8 миллиона тонн мощностей по компостированию. В связи с этим актуальной задачей является модификация биоразлагаемых полимеров для придания высоких эксплуатационных свойств с сохранением способности к биоразложению.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Методология

На первом этапе была сформулирована тема исследования для определения объема и направления обзора. Разработана комплексная стратегия поиска, которая включает в себя разработку систематического и исчерпывающего плана выявления исследований

соответствующих тематике в различных базах данных и источников. Далее проведен скрининг и отбор работ по критериям включения и исключения, что обеспечивает объективность и воспроизводимость отбора исследований. Выполнен синтез данных (Унгуряну, 2019).

Процедура исследования

Отбор исследований для включения в обзор проводился в два этапа. На первом этапе принималось решение о включении публикации в обзор на основе ее названия и аннотации. На втором этапе проводилось изучение полнотекстовых статей для детальной оценки на соответствие критериям включения. Далее была проведена оценка качества подготовки в исследованиях. При проведении синтеза данных выполнено сопоставление, комбинация и краткое изложение результатов отдельных исследований.

В обзор были включены статьи, опубликованные с 1999 по 2024 год. Статьи отбирались исходя из количества их цитирований по следующим ключевым словам: «биоразлагаемая упаковка», «медицина», «фармацевтика», «окружающая среда», «пищевые технологии», «биомасса» и «химический синтез».

Первичное сканирование баз данных Scopus, WoS и Pubmed помогло выявить при помощи ключевых слов «биоразлагаемая упаковка», «медицина», «фармацевтика», «пищевые технологии», «биомасса» и «химический синтез», ряд исследований с заданным индексом цитирования (цитируется более 15 раз). Далее источники были ранжированы в рамках исследуемого временного промежутка. В результате этого интерактивного поиска было выделено 56 исследований.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

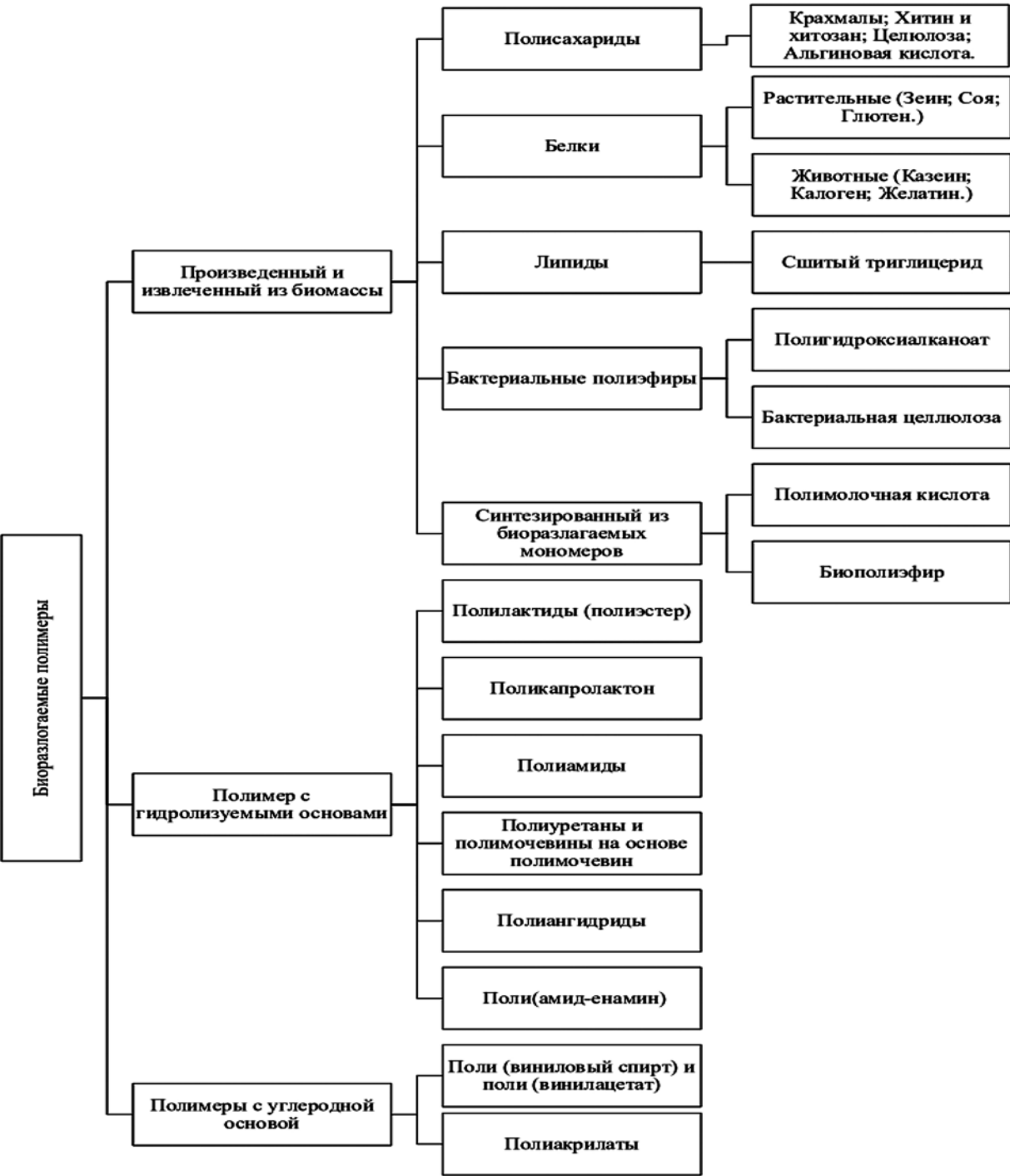
Виды биоразлагаемых полимеров и композиции на их основе

Биоразлагаемые полимеры можно разделить на три основные группы в зависимости от их происхождения и производства (Рисунок 1).

К группе биоразлагаемых полимеров, произведенных и извлеченных из биомассы, относятся крахмал, бактериальная целлюлоза, целлофан, белок и другие.

Крахмал считается перспективным среди всех материалов для упаковки пищевых продуктов на основе натуральных биополимеров из-за его легкой доступности, способности к биологическому разложению и более низкой стоимости. Крахмал является основной фор-

Рисунок 1
Группы биоразлагаемых полимеров
Figure 1
Groups of Biodegradable Polymers



мой запасаемых углеводов в таких растениях, как кукуруза, крупяные изделия, рис и картофель. Крахмал состоит из смеси двух полимеров α -глюкозы — линейной амилозы и сильно разветвленного амилопектина (Fredrikson et al., 1998; Ratnayake et al., 2001; Tang, 2012).

Крахмал проявляет термопластичные свойства при добавлении пластификатора — воды или глицерина. Термопластичный крахмал (TPS) может быть получен путем желатинизации гранулированного крахмала в присутствии пластификатора, тепла и давления. Продукты TPS с различной вязкостью, растворимостью в воде и водопоглощением были получены путем изменения содержания влаги/пластификатора, а также температуры и давления в экструдере (Mohanty, 2000). Пластификаторы могут повысить гибкость и технологичность TPS. Его пластифицируют путем деструкции в присутствии определенного количества воды или пластификаторов и тепла, а затем экструдуют. Термопластичный крахмал (TPS) обладает высокой чувствительностью к влажности и относительно низкими механическими свойствами, из-за чего не может быть использован во многих областях.

Было показано, что на тепловые свойства TPS в большей степени влияет содержание воды, чем молекулярная масса крахмала (Chandra & Rustgi 1998). Главным образом, термопластичный крахмал применяется в растворимых компостируемых пенопластах, вспененных лотках, формованных деталях и вспененных слоях в качестве замены полистирола.

Группой ученых из России были исследованы пленки на основе крахмала. Ими было установлено, что одним из важнейших параметров является усадка. В качестве пластификатора был заявлен глицерин. Состав материала крахмал 70 % и 30 % глицерина дает наилучшие показатели усадки в размере 17 % (Аникеева, 2024). В другом исследовании разработана технология получения пленки из смеси маниокового крахмала, монтмориллонита (ММТ), хитозана, глицерина в качестве пластификатора и дистиллированной воды, доведенной до pH = 3 добавлением уксусной кислоты. Новая пленка продемонстрировала улучшение свойств при растяжении благодаря эффекту армирования хитозаном, а также гидрофобность поверхности пленки (Камреегараррин, 2007). Также было выявлено, что амилоза растворима в воде и образует спиральную структуру. Относительные количества и молярные массы амилозы и амилопектина варьируются в зависимости от источника крахмала, в результате получают материалы с различными механическими свойствами и способностью к биологическому разложению. По мере увеличения содержания амилозы в крахмале удлинение и прочность также увеличиваются (Fredrikson et al., 1998; Ratnayake et al., 2001).

Бактериальная целлюлоза (БЦ) представляет собой природный наноматериал, вырабатываемый в виде экзополисахарида некоторыми бактериями, например, из рода *Komagataeibacter* (ранее *Gluconacetobacter*), культивируемыми в среде с источниками углерода и азота (Rajwade et al., 2015). По сравнению с другими родами, *Komagataeibacter* обычно является предпочтительным родом для исследований и применения в пищевых продуктах из-за более высокого выхода и чистоты БЦ (Ruka et al., 2012). Некоторые возможные объяснения образования целлюлозы этими микроорганизмами заключаются в том, что БЦ образуется как механизм самозащиты, призванный защитить бактерии от разрушительного воздействия ультрафиолетового света или помочь бактериям плавать на границе раздела воздух-жидкость, чтобы обеспечить достаточное снабжение кислородом (Reiniati, 2017).

Другими уникальными свойствами БЦ являются более высокая степень полимеризации и высокие свойства на растяжение благодаря его сетчатой структуре. По сравнению с растительной целлюлозой волокна БЦ также имеют более высокую удельную площадь, более высокую водоудерживающую способность (удерживают воду в сотни раз больше своего веса) и более длительное время высыхания. Более того, его производство не требует жесткой химической обработки для выделения и очистки целлюлозы (Azeredo, 2019).

Основным недостатком БЦ является высокая себестоимость продукции, которая считается ограничивающим фактором. Многочисленные исследования направлены на оценку различных питательных сред из агропромышленных отходов с целью получения выгодных питательных сред, которые способствуют снижению производственных затрат БЦ (Azeredo et al., 2019; Wang, Tavakoli & Tang, 2019).

Высокая себестоимость производства была частично решена в исследовании Сюй и соавторов (2021). Они предлагают простой, быстрый и экологически чистый способ создания биоразлагаемой пленки с использованием хитозана, бактериальной целлюлозы и куркумина. Образцы хитозана (5 г) растворяли в колбе, содержащей 500 мл 1 %-ного раствора ледяной уксусной кислоты. Смеси непрерывно перемешивали с помощью магнитной мешалки при температуре 25 °C в течение ночи для получения 1 % (по массе) гомогенного раствора хитозана. Затем диспергировали глицерин и куркумин с концентрацией 0,5 %, а затем добавляли бактериальную суспензию для получения концентрации 5 %. Для гомогенизации смеси при 25000 об/мин в течение 25 мин использовали высокоскоростной гомогенизатор. Затем его дегазировали ультразвуком в течение 60 мин, и для приготовления пленок использовали метод заливки раствором (Xu et al., 2021).

Целлофан обладает хорошими механическими свойствами, но он чувствителен к влаге. Его часто покрывают нитроцеллюлозным воском или поливинилиденхлоридом для улучшения его влагозащитных свойств. Целлофан с покрытием используется для выпечки, свежих продуктов, мясных полуфабрикатов, сыра и конфет. Целлофан обладает хорошими газозащитными свойствами при низкой относительной влажности. Однако его барьерные свойства снижаются при средней и высокой относительной влажности. Целлофан не поддается термосвариванию из-за своей нетермопластичной природы (Peterson, 1999).

Биоразлагаемым материалом является белок. Пленки на его основе стали объектом исследований из-за высоких пленкообразующих свойств, низкой стоимости и способности к биологическому разложению. Белковые пленки были разработаны на основе пшеничного глютена, соевого белка, желатина, кукурузного зерна, казеина и сывороточного протеина. Продемонстрировано, что белковые пленки обладают низкой проницаемостью для кислорода. Однако белковые пленки обладают более высокой паропроницаемостью по сравнению с пластиковыми пленками из-за гидрофильной природы большинства белков (Tang, 2012).

Зеин — биоразлагаемый и биосовместимый материал, добываемый из возобновляемых источников; он составляет почти 80 % от общего содержания белка в кукурузе. Физические и химические характеристики и особая структура (на молекулярном, нано- и микроуровне) делают молекулы зеина по своей сути превосходящими многие другие полимеры из природных источников и синтетические. Отмечается, что способность к биологическому разложению и биосовместимость зеина связанные со структурой зеина, позволяют использовать его в различных сферах (Corradini, 2014).

Зеин — амфифильный белок, обладающий как гидрофобными, так и гидрофильными свойствами. Немного более 50 % аминокислотных остатков зеина являются гидрофобными, включая высокий процент лейцина (20 %), пролина (10 %) и аланина (10 %), но зеин также имеет относительно высокое содержание (21–26 %) глутамина (гидрофильного аминокислота) (Shukla, 2001). Традиционным способом экстракции этого белка является водно-спиртовой раствор. Экстракт осветляется центрифугированием, а затем охлаждается для осаждения зеина. Дополнительные экстракции и осаждения повышают чистоту зеина. После сушки зеин образует желтоватый порошок (Corradini, 2014).

Благодаря своей молекулярной массе, степени полимеризации и химической структуре зеин обладает хорошими пленкообразующими свойствами. Образование пленки зеина происходит благодаря трехмерной сети,

стабилизированной водородными взаимодействиями, гидрофобными взаимодействиями и дисульфидными связями между цепями белка. Пленки из зеина производятся двумя технологическими процессами: мокрым способом, основанным на солюбилизации, и сухим способом, основанным на термопластичных свойствах зеина в условиях очень низкой влажности. Мокрым способом пленки из зеина получают путем растворения в растворе алифатических спиртов и испарения растворителя на инертных поверхностях. Эти пленки твердые, хрупкие, ударопрочные и обычно требуют добавления пластификаторов для настройки некоторых свойств (Naushad Emmambux, 2007).

Упаковочные материалы на основе полимолочной кислоты (PLA) являются ведущими биоматериалами для многочисленных применений в медицине, а также в промышленности, заменяющим традиционные полимеры на основе нефтехимии. PLA может изготавливаться с использованием возобновляемых сельскохозяйственных ресурсов, таких как кукуруза или сахарная свекла. Материал обладает хорошими механическими и термическими свойствами; однако его свойства в значительной степени зависят от соотношения между двумя мезоформами D и L (Jacobsen & Fritz, 1999; Ke & Sun, 2001). В настоящее время PLA используется в упаковке в виде пленок, термоформованных и выдувных контейнеров, посуды для пищевых продуктов и бутылок с коротким сроком годности (Gross & Kalra, 2002).

Применение PLA рассмотрено в исследованиях Рима (2013). Он утверждает, что на сегодняшний день PLA является наиболее широко исследованным и используемым биоразлагаемым алифатическим полиэфиром в истории человечества. Основной целью исследования было улучшение механических и физических свойств, которые влияют на его стабильность, обрабатываемость, разложение, несмешиваемость с другими полимерами, старение и пригодность для вторичной переработки, и, следовательно, на его потенциальную пригодность для выполнения конкретных требований применения (Rhim, 2013).

Упаковочные материалы на основе полигидроксиалканоеата (PHA), обладают превосходными пленкообразующими и покрывающими свойствами. PHA обладают свойствами, близкими к свойствам полипропилена (PP). PHA более гидрофобны, чем материалы на основе полисахаридов, что обеспечивает их лучшие влагозащитные свойства. PHA поддаются биологическому разложению в почве и обладают превосходной технологичностью. Более высокая стоимость производства, хрупкость и плохие газобарьерные свойства ограничивают использование PHA (Peterson, 1999).

К группе полимеров с углеродной основой относится поливиниловый спирт (PVA), который имеет уникальные свойства, такие как высокое оптическое пропускание, растворимость в воде, стабильная термическая и не коррозионная природа, что делает его хорошей основой для множества применений (Gaaz, 2015; Saini, 2017; Rivelilson, 2014). PVA представляет собой кремообразный или беловатый, без вкуса, запаха, нетоксичный, биосовместимый, термостабильный, гранулированный или порошкообразный полукристаллический или линейный синтетический полимер (Abdullah, 2017; Saini, 2017). Он обладает удивительными оптическими свойствами, большой диэлектрической прочностью и превосходной способностью накапливать заряд (Saini, 2017).

Впервые PVA был синтезирован в 1924 году Германом и Хенелем путем омыления поливинилового эфира раствором гидроксида натрия, в результате чего был получен раствор PVA (Ben Halima, 2016). Физико-химические и механические свойства PVA определяются количеством гидроксильных групп, присутствующих в полимере PVA. Для промышленного производства PVA основным сырьем для полимеризации PVA является винилацетат (в виде мономера). Проводится контролируемый частичный щелочной гидролиз (омыление) винилацетата, при котором сложноэфирная группа винилацетата частично заменяется гидроксильной группой в среде водного раствора гидроксида натрия. Осадок этой реакции называется PVA (Ben Halima, 2016).

Продолжительность периода реакции омыления определяет степень гидролиза PVA. Низкомолекулярный PVA получают полимеризацией ацетальдегида при низкой температуре от -80 °C до -20 °C с амальгамой натрия. В зависимости от степени гидролиза (%) и молекулярной массы на рынке доступны различные марки PVA, обладающие различными характеристиками, включая температуру плавления, вязкость, pH, показатель преломления (Aslam, 2018). Химические свойства чистого PVA приведены в Таблице 1.

Микробная инфекция остается одним из наиболее серьезных осложнений в области упаковки и хранения пищевых продуктов. Антимикробные препараты вызывают интерес как со стороны академических исследований, так и со стороны промышленности из-за их потенциала в обеспечении качества и безопасности многих материалов. Однако низкомолекулярные антимикробные агенты страдают от многих недостатков, таких как токсичность для окружающей среды и кратковременная антимикробная способность.

Для преодоления проблем, связанных с низкомолекулярными антимикробными агентами, в молекулы полимера могут быть введены антимикробные функциональные группы (Farah, 2016). Использование про-

тивомикробных полимеров остается широко исследуемым направлением, открывает перспективы для повышения эффективности некоторых существующих противомикробных агентов и минимизации экологических проблем, сопровождающих обычные противомикробные агенты, за счет снижения остаточной токсичности агентов, повышения их эффективности и селективности, а также продления срока службы противомикробных агентов.

Например, в работе Трипатчи (2009) было разработано новое антимикробное покрытие на основе хитозана и поливинилового спирта (ПВС) для оценки его воздействия на минимально обработанные помидоры с помощью микробиологических анализов. В работе антимикробная пленка была получена путем смешивания хитозана (CS) и ПВС с глутаровым альдегидом в качестве сшивающего агента. Микробиологический скрининг продемонстрировал антимикробную активность пленки в отношении пищевых патогенных бактерий, а именно кишечной палочки, золотистого стафилокока и *Bacillus subtilis* (Tripathi, 2009).

Значимое место в группе полимеров с гидролизуемой основой занимает поликапролактон (ПКЛ) — биоразлагаемый полиэфир с температурой плавления 59–64 °C. Один из его способов применения описали в работе Подденежного и соавторов (2024). В композит вводился порошок из пшеничной и ржаной муки с целью снижения себестоимости и повышения сроков разложения. Полученные материалы имели высокую скорость

Таблица 1
Химические свойства PVA
Table 1
Chemical Properties of PVA

Параметр	Значение
Молекулярная масса	от 20 000 до 400 000 г/моль
Структурная формула	$(\text{CH}_2\text{CHON})_n - (\text{CH}_2\text{CHOCOSCH}_3)_n$
Эмпирическая формула	$(\text{C}_2\text{H}_4\text{O})_n(\text{C}_4\text{H}_6\text{O}_2)_n$
Частично гидролизованный PVA	84.2 %–89 %
Умеренно гидролизованный PVA	92.2 %–96.5 %
Полностью гидролизует PVA	98 %–99 %
Растворимость	Растворим в воде. Нерастворим в алифатических и ароматических углеводородах, маслах, кетонах и сложных эфирах

разложения в сравнении с чистым ПКЛ (Подденежный и соавт., 2024)

Разнообразие структур и составов биоразлагаемых полимеров подчеркивает их уникальные свойства и потенциал для различных областей применения. Широкий выбор таких полимеров предоставляет возможность для создания новых материалов, которые могут эффективно разлагаться в природе. Дальнейшее исследования в данной области позволит расширить их применение и будет способствовать созданию более функциональных и безопасных материалов.

Влияние биоразлагаемых полимеров на окружающую среду

Разработка биоразлагаемых полимеров уже несколько лет находится на подъеме, поскольку они могут решить существующие проблемы вредного воздействия на окружающую среду отходов упаковки с длительным сроком разложения. Биоразлагаемые полимеры применяют в текстильной промышленности и медицине. Как материалы, биоразлагаемые полимеры также являются многообещающей альтернативой в основном неразлагаемыми промышленными полимерами для борьбы с глобальной проблемой пластиковых отходов. Ежегодно во всем мире производится более 250 миллионов тонн полимеров (в основном полиолефинов). Эти полимеры долговечны и демонстрируют высокую стойкость в окружающей среде, что рассматривается как преимущество во многих областях применения (например, в производстве труб, самолетов и т. д.). Однако при неконтролируемой утилизации они будут накапливаться в природе десятилетиями (Haider, 2018).

Согласно Международному союзу теоретической и прикладной химии (IUPAC), биоразлагаемые полимеры определяются как «полимеры, подверженные деградации под действием биологической активности, при этом деградация сопровождается снижением его массы». В целом процесс биodeградации полимеров можно разделить на четыре этапа: биodeградация, деполимеризация, биоассимиляция и минерализация. На первом этапе образование микробной биопленки приводит к поверхностной деградации, при которой полимерный материал фрагментируется на более мелкие частицы. Микроорганизмы биопленки выделяют внеклеточные ферменты, которые, в свою очередь, катализируют деполимеризацию полимерной цепи в олигомеры, димеры или мономеры. Поглощение небольших молекул, полученных таким образом, микробной клеткой и последующее производство первичных и вторичных метаболитов представляет собой процесс, называемый ассимиляцией. На последнем этапе эти метаболиты минерализуются, и конечные продукты,

такие как CO_2 , CH_4 , H_2O и N_2 , образуются и высвобождаются в окружающую среду (Lucas, 2008).

Полимер может подвергаться трансформациям (механическим, световым, термическим и химическим) при воздействии атмосферных условий, что может влиять на механические свойства полимера, например, полимер может стать хрупким под воздействием УФ-излучения (Lucas, 2008). Другим основным путем химической деградации полимеров, содержащих гетероатомы, такие как сложные эфиры, ангидриды, амиды или уретаны, является гидролиз (Lucas, 2008). Объемная эрозия описывает деградацию, которая происходит равномерно по всей толщине полимерного изделия, а поверхностная эрозия описывает уменьшение толщины поверхности.

Поверхностная эрозия является преобладающим механизмом для гидрофобных и полукристаллических полимеров и для полимеров, показывающих очень высокую скорость гидролиза. Напротив, объемная эрозия происходит, когда скорость диффузии воды превышает скорость реакции гидролиза. Материал может изменить свой механизм гидролиза с поверхностной на объемную эрозию, когда толщина образца падает ниже критического значения, так называемой критической толщины образца L_c крит (Luc, 2009). В целом, форма материала играет важную роль, поскольку большая площадь поверхности будет способствовать деградации.

В отличие от многих других химических веществ, оценка воздействия полимеров на окружающую среду, как правило, не регламентируется. Поэтому экотоксикологические данные для биоразлагаемых полимеров скудны. Для компостируемых пластиков были установлены определенные стандарты и нормы, которые также включают требования к экотоксичности. Например, европейский стандарт EN 13432 требует данных о прорастании и росте растений. В этом контексте большинство опубликованных исследований сосредоточены на эффектах, которые могут возникнуть при применении определенных биоразлагаемых продуктов, таких как пластиковые пленки, используемые в сельском хозяйстве (Adhikari, 2016). Такие продукты тестируются на предмет их воздействия на почву или компост, в основном в сочетании с тестом на биоразложение. Эти сопряженные тесты и сроки оценки экотоксикологических эффектов важны, поскольку безопасный материал может стать токсичным во время деградации из-за определенных метаболитов или выделения вредных соединений, которые служат добавками в биоразлагаемых пластиках. В целом, полимерные добавки необходимо рассматривать отдельно при обсуждении токсичности разлагаемых пластиков.

Тем не менее, большинство исследований не описывали негативного воздействия продуктов деградации по-

лимеров. Однако Соуза и соавторы обнаружили цитотоксические и генотоксические воздействия продуктов деградации на луке репчатом (Souza, 2013). Аналогичным образом, Адхикари и соавторы выявили ингибирование микробной активности, вызванное пленками PLA после 84 дней инкубации в почве (Adhikari, 2016). Эти исследования демонстрируют некоторые ограничения: хотя они измеряли воздействие продуктов деградации в определенное время, они не предоставили информацию о компонентах, которые отвечают за токсичность. Недостающая информация необходима для дальнейшего изучения механизмов токсичности и производства безопасных биоразлагаемых пластиков.

Основным показателем биоразложения является уменьшение массы материала. Но данный процесс может быть интенсифицирован под воздействием ультрафиолетового излучения. В другом исследовании было доказано, что, после воздействия на полилактид, спектрограмма показала разрушение кристаллической структуры, приводящее к ухудшению показателей данного материала (Якубова, 2023).

Помимо использования биоразлагаемых полимеров в чистом виде их также соединяют в разных пропорциях с полиэтиленом. Так, например в исследовании группы российских ученых были произведены материалы с концентрацией полилактида от 20 до 100 % массы. По результатам исследования процесс деградации материала с потерей массы разными концентрациями был в районе 10 % (Подзорова, 2020).

Хотя большинство исследований не обнаружили неблагоприятного воздействия для различных организмов, можно сделать лишь ограниченное заявление об экологической совместимости биоразлагаемых полимеров. Положительные результаты требуют дальнейшего исследования, чтобы доказать, является ли сам полимер или добавки причиной неблагоприятного воздействия.

Перспективы использования биоразлагаемых полимеров как упаковочных материалов в пищевой промышленности

Упаковка для пищевых продуктов должна соответствовать ряду условий, таких как законодательство, безопасность, функциональность. Поскольку от нее требуется инновационность, простота в использовании и привлекательный дизайн, одной из основных задач упаковки в пищевой промышленности является защита продукта от химического, механического и микробиологического воздействия, а также сохранение свежести продукта и всей его питательной ценности.

Ключевым моментом в упаковке пищевых продуктов является то, что упаковка является неотъемлемой частью производства, консервации, хранения, дистрибуции, а в настоящее время и неотъемлемой частью приготовления пищевых продуктов. Свойства пищевого продукта возможно сохранить только с помощью надлежащим образом выбранной упаковки и технологического процесса упаковки. В последнее десятилетие в пищевой, упаковочной и дистрибьюторской промышленности возрос интерес к разработке и применению биополимеров для упаковки пищевых продуктов (Peelman, 2013).

В исследовании Ершовой и соавторов (2022) были рассмотрены полимерные материалы на основе ПЛА для применения в пищевой промышленности. Они доказали, что данный материал имеет лучшие физико-механические свойства в сравнении с синтетическими (Ершова, 2022). Это позволяет использовать биоразлагаемые полимеры, замещая синтетические. Модифицируя их возможно устранить недостатки сохранив полезные качества.

В другом исследовании российским ученым Поповой было установлено, что пленки из горохового крахмала являются предпочтительнее в сравнении с пленками на основе других видов крахмалов. Связано это с тем, что данные пленки содержат большее количество амилазы, что позволяет более активно им разлагаться в пищеварительной системе при их употреблении вместе с основным продуктом (Попова, 2022). В исследовании было показано, что салат, а также нарезанные овощи, плоды, зерна, бобовые и ягоды можно с успехом хранить в поддающихся биологическому разложению лотках из целлюлозы и капролактона. Такая упаковка устойчива к воздействию влаги, но хрупкая.

Биоразлагаемая упаковка содержащая серебро обладает антибактериальным действием. Серебро использовалось в борьбе с инфекциями еще в Древней Греции и Риме. В 19 веке ботаник фон Нагель доказал, что небольшие концентрации или частицы серебра положительно влияют на сохранность продуктов (Siva, 2022). Серебро сегодня используется в упаковке пищевых продуктов. Добавление серебра в упаковку позволяет дольше сохранять качество продуктов, улучшает их сохранность и повышает их безопасность. Серебро, как элемент при производстве биоразлагаемой упаковки, обладает антибактериальными свойствами. Оно повреждает клеточные стенки, клеточные мембраны и цитоплазму бактерий. Более поздние исследования показали, что серебро также влияет на репликацию ДНК. Серебро может быть включено в состав биополимера в виде чистого серебра, с серебряным покрытием или в виде микрочастиц. Биоразлагаемая пленка с серебром предпочтительнее любых других упаковочных материалов из-за ее эластичности и исключительной способности прилипать к фруктам. Он используется для

упаковки свежих фруктов и овощей, а также для хранения и транспортировки пищевых продуктов (Tokić, 2011, Otoni, 2016).

Использование различных модификаций привело к расширению использования съедобных и биоразлагаемых пленок, что связано с улучшением общих характеристик биополимеров, повышением их механических, термических и барьерных свойств, как правило, даже при очень низком содержании. Таким образом, модификаторы играют важную роль в повышении эффективности использования биополимеров, которые сокращают количество отходов упаковки, связанных с обработанными пищевыми продуктами, и способствуют сохранению продуктов, продлевая срок их хранения.

Тенденции развития и применение биоразлагаемых полимеров в медицине и фармацевтике

В настоящее время выбор биоматериалов играет ключевую роль в медицине и фармацевтике. В то время как классические критерии такие как безопасность и стабильность, являются основными параметрами, стало понятно, что их можно объединить под понятием инертность материала. В свою очередь любой искусственный материал, помещенный в организм пациента, не является абсолютно инертным и вызовет клеточный ответ (Langer, 2004).

Разработчикам биополимеров для медицины и фармацевтики важно иметь в своем распоряжении множество вариантов биоматериалов, поскольку для каждого применения требуется уникальная среда. Биополимеры также должны быть: технологичны в производстве; легко формируемые; иметь свойства, которые удовлетворяют краткосрочным требованиям и не влияют на долгосрочное функционирование; иметь низкую или незначительную токсичность продуктов распада, как с точки зрения местной реакции тканей, так и с точки зрения системной реакции; доставлять лекарственные средства, с возможностью длительного высвобождения фармацевтически активных соединений.

Полимеры биологического происхождения — это материалы, созданные живыми организмами, в отличие от синтетических материалов, созданных человеком. Это различие делит мир полезных с медицинской точки зрения биоразлагаемых полимеров на две большие подгруппы. Однако граница между этими группами не всегда четкая. В группу биополимеров биологического происхождения входят: пептиды, белки, биомиметические материалы, полисахариды, полигидроксиалканоаты и полинуклеотиды.

Пептиды и белки — это полимеры, полученные из встречающихся в природе α -L-аминокислот. Пептиды обычно представляют собой более короткие цепочки из десятков аминокислот, соединенных между собой амидными связями, в то время как белки представляют собой более длинные цепочки из сотен отдельных аминокислот.

Основным недостатком пептидов и белков в качестве исходных материалов является их низкая технологичность. Для данных биополимеров нельзя использовать традиционные методы переработки полимеров, используемых при производстве синтетических пластмасс: прессования, экструзии, литья под давлением и прядения волокон. Еще одним важным недостатком пептидов и белков как биоматериалов является присущая им иммуногенность. Любой пептид или белок несет в себе риск того, что иммунная система пациента распознает его как чужеродный. Также, большинство пептидов и белков обладают недостаточно высокими механическими свойствами, которые ограничивают их использование в медицине и фармацевтике. В Таблице 2 перечислены основные виды белков, используемых в данных целях.

Биомиметические материалы являются синтетическими (искусственными) материалами, имитирующими натуральные или повторяющие их. Пример для такого материала — это работа Урри и его коллег, которые использовали методы пептидного синтеза для создания искусственных вариантов эластина (Urry, 1995). Они синтезировали несколько полимеров, которые содержали гомологии последовательностей эластиновых повторов валин-пролин-глицин-валин-глицин. Эти биомиметические полимеры обладали лучшими инженерными свойствами, чем их природные аналоги, что позволяло создавать пленки и волокна, которые затем можно было дополнительно модифицировать путем сшивания. Полученные пленки обладали интересными механическими свойствами, такими как обратный фазовый переход, который приводит к сокращению при повышении температуры, напоминая работу мышц (Urry, 1995).

Другие исследователи, в частности Тирелл и Каппелло, объединили методы молекулярной биологии и биологии ферментации для создания новых биоматериалов на основе белка (Van Nest, 2001). Этим исследователям пришла в голову удивительно инновационная идея создания генетически модифицированных микроорганизмов, которые производили бы именно те полимеры, которые исследователям нравилось изучать. Таким образом, можно было бы получать совершенно новые варианты пептидов и белков биологического происхождения.

Другим биополимером используемым в медицине и фармацевтике являются полисахариды — это полимеры, состоящие из различных сахарных соединений. Используемые в промышленности полисахариды (та-

Таблица 2

Основные виды белков, используемых в медицине и фармацевтике

Table 2

Main Types of Proteins Used in Medicine and Pharmaceuticals

Белки	Источник	Функция
Коллаген	Выделенный из кожи крупного рогатого скота, рыбы и других видов животных	Ключевой компонент структуры тканей, обеспечивает механическую прочность, поддерживает структуру и рост клеток, обеспечивает биосовместимую матрицу для трансплантации клеток. Широко используется в качестве средства для растяжения и придания им объема в косметических продуктах
Желатин	Частично гидролизированный коллаген	Используется в пищевой промышленности, широко используется исследователями в качестве матрицы для роста клеток и в качестве компонента каркасов для тканевой инженерии.
Эластин	Выделен из эластичных тканей крупного рогатого скота и птиц	Ключевой компонент тканевой архитектуры, обеспечивающий эластичность тканей
Кератин	Выделяют из кожи, волос и ногтей крупного рогатого скота и птиц	Ключевой структурный компонент кожи, волос и ногтей. Используется в качестве матрицы для роста клеток, а также в качестве компонента бинтов и средств по уходу за кожей
Шелк	Выделен из личинок насекомых	Используется в текстильной промышленности из-за своей исключительной прочности. Также изучается как компонент каркасов для тканевой инженерии и как субстрат для культивирования клеток
Протеогликаны	Различные экстракты тканей	Используется в исследованиях клеточно-матричных взаимодействий, матрично-матричных связей, клеточной пролиферации, миграции клеток

кие как крахмал и целлюлоза) представляют собой полимеры, содержащие исключительно различные сахара (сахариды) звенья в виде мономеров. Как правило, большинство природных полисахаридов не поддаются биологическому разложению при имплантации в любые клетки. млекопитающих из-за недостатка пищеварительных ферментов. Таким образом, без дальнейшей химической модификации большинство полисахаридов не являются очевидным выбором для использования в биомедицинских целях.

Полигидроксиалканоаты (ПГА) представляют собой группу сополимеров гидроксимасляной кислоты и гидроксивалериановой кислоты применяются для контролируемого высвобождения лекарств, изготовления искусственной кожи и сердечных клапанов, а также для промышленного применения, например, в качестве расходных материалов для парамедицины.

Алифатические полиэфиры, изготовленные из гидроксикислот, таких как гликолевая кислота, молочная кислота и ε-гидроксикапроновая кислота, используются в различных медицинских изделиях. В качестве примера можно привести биорассасывающиеся хирургические нити, изготовленные из поли(α-гидроксикислот), которые используются в клинической практике с 1969 года (Pillai, 2010).

Также в исследовании Туреевой был использован полимер натрий-карбоксиметилцеллюлоза для стоматологических пленок. Ими был отработан оптимальный состав, который позволял получить необходимые качественные показатели с использованием основного свойства данного полимера-биоразлагаемость (Туреева, 2024).

В другом исследовании L-лактид полимеризировался под воздействием катализатора и сохранял свои свойства биоразложения. Это позволяло изменять скорость его затвердевания и конечную массу при использовании в шивных тканях и ортопедии (Пучков и соавт., 2023).

Полиуретаны, полимеры, в которых повторяющийся элемент содержит уретановый фрагмент, были впервые получены компанией Bayer в 1937 году. Эти полимеры обычно получают в результате взаимодействия диизоцианата с полиолом. Обычными полиолами являются простые полиэфиры. Полиуретаны уже почти 50 лет используются в биомедицине, в частности, в качестве материала, контактирующего с кровью, в сердечно-сосудистых устройствах. Исследования структуры и состава полиуретана привели к разработке биоразлагаемых полиуретанов для различных применений в тканевой инженерии, таких как реконструкция менисков, восстановление миокарда и сосудистых тканей (Guan, 2005).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Существует широкий выбор биоразлагаемых полимеров с различными видами структур, что обеспечивает предпосылки к созданию новых видов композиционных упаковочных материалов, обладающих способностью к биоразложению в окружающей среде. С целью расширения области применения, функционала и безопасности необходимо проведение дальнейших исследований биоразлагаемых материалов.

При проведении ряда исследований были получены положительные результаты об экологической совместимости ряда биоразлагаемых полимеров. Модификация способствует улучшению свойств биополимеров, повышению их механических, термических и барьерных свойств, в том числе при очень низком содержании, расширению применения съедобных и биоразлагаемых пленок. Таким образом, введение модификаторов способствует повышению эффективности использования биополимеров, сокращению количества отходов упаковочных материалов для пищевых продуктов, и способствуют пролонгации сроков хранения.

Последние научные достижения в области технологии полимерных материалов открывают большие перспективы для достижения высокой степени биоразлагаемости с меньшим количеством загрязняющих веществ и выбросов парниковых газов.

ЛИТЕРАТУРА

Аникеева, К. Г., Сафин, Р. Р., & Хайруллин, Р. З. (2024). Подбор оптимального состава термопластичного крахмала для получения биоразлагаемой твердой упаковки В *Повышение энергоресурсоэффективности, экологической и технологической безопасности процессов и аппаратов химической и смежных отраслей промышленности*, Т. 2, (с. 39–56).

Anikeeva, K. G., Safin, R. R., & Khairullin, R. Z. (2024). Selection of the optimal composition of thermoplastic starch for obtaining biodegradable solid packaging In *Improving energy and resource efficiency, environmental and technological safety of processes and equipment in the chemical and related industries*, Vol. 2, (pp. 39–56). (In Russ.)

Ершова, О. В., Муллина, Э. Р., Бессонова, Ю. А., & Багреева, К. В. (2022). Исследование свойств синтетических и биоразлагаемых полимеров, с целью возможности их использовани в пищевой отрасли. *Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий*,

ВКЛАД АВТОРОВ

Баженов Н.С.: проведение исследования, создание черновика рукописи, рецензирование и редактирование рукописи

Губанова М.И.: концептуализация, руководство исследованием

Кириш И.А.: разработка методологии исследования

Банникова О.А.: курирование данных, верификация данных

Дымицкий В.А.: проведение исследования

AUTHORS CONTRIBUTION STATEMENT

Nilita S. Bazhenov: investigation, writing-original draft preparation, writing-review and editing

Marina I. Gubanov: conceptualization, supervision, project administration

Irina A. Kirsh: methodology

Olga A. Bannikova: data curation, data verification
Viktor A. Dymitsky: investigation

84(1), 245–251. <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2022-1-245-251>

Ershova, O. V., Mullina, E. R., Bessonova, J. A., & Bagreeva, K. V. (2022). Investigation of the properties of synthetic and biodegradable polymers, with a view to the possibility of their use in the food industry. *Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies*, 84(1), 245–251. <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2022-1-245-251> (In Russ.)

Подденежный, Е. Н., Дробышевская, Н. Е., Бойко, А. А., Шаповалов, В. М., & Кузьмин, А. М. (2024). Биоразлагаемые композиционные материалы на основе поликапролактона с наполнением соломой зерновых культур. *Вестник Гомельского государственного технического университета им. П. О. Сухого*, 97(2), 27–33. <https://doi.org/10.62595/1819-5245-2024-2-27-33>

Poddeneznyi, E. N., Drobyshevskaya, N. E., Boika, A. A., Shapovalov, V. M., & Kuzmin, A. M. (2024). Biodegradable composite materials based on polycaprolactone filled with grain

- straw. *Vestnik Gomel'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni P. O. Sukhogo*, 97(2), 27–33. <https://doi.org/10.62595/1819-5245-2024-2-27-33> (In Russ.)
- Подзорова, М. В., Тертышная, Ю. В., Шибряева, Л. С., & Зиборов, Д. М. (2020). Влияние агрессивных факторов окружающей среды на деструкцию биоразлагаемых полимерных композитов. В *Физическая мезомеханика. Материалы с многоуровневой иерархически организованной структурой и интеллектуальные производственные технологии* (pp. 434–435). <https://doi.org/10.17223/9785946219242/271>
- Podzorova, M. V., Tertyshnaya, Yu. V., Shibryaeva, L. S., & Ziborov, D. M. (2020). Influence of aggressive environmental factors on the destruction of biodegradable polymer composites. In *Physical mesomechanics. Materials with multilevel hierarchically organized structure and intelligent manufacturing technologies* (pp. 434–435). <https://doi.org/10.17223/9785946219242/271> (In Russ.)
- Попова, О. С. (2022). Биоразлагаемые пленки на основе смеси крахмала-карбоксиметилцеллюлозы для пищевой промышленности. В *Потребительский рынок: устойчивое развитие в условиях новых вызовов* (с. 173–178). <https://doi.org/10.48642/3583.2022.31.28.001>
- Popova, O. S. (2022). Biodegradable films based on a starch-carboxymethylcellulose mixture for the food industry. In *Consumer market: sustainable development in the face of new challenges* (p. 173–178). <https://doi.org/10.48642/3583.2022.31.28.001> (In Russ.)
- Пучков, А. А., Седуш, Н. Г., Чиркова, А. С., Бозин, Т. Н., & Чвалун, С. Н. (2023). Синтез биоразлагаемых полимеров на основе L-лактида в присутствии безметаллового органического катализатора. *Высокомолекулярные соединения. Серия Б*, 65(4), 265–274. <https://doi.org/10.31857/S230811392370050X>
- Puchkov, A. A., Sedush, N. G., Chirkova, A. S., Bozin, T. N., & Chvalun, S. N. (2023). Synthesis of biodegradable polymers based on L-lactide in the presence of a metal-free organic catalyst. *VysokomolekulâRnye Soedineniâ. Seria B, Himiâ Polimerov*, 65(4), 265–274. <https://doi.org/10.31857/S230811392370050X> (In Russ.)
- Туреева, Г. М. (2024) Разработка оптимального состава стоматологических полимерных пленок метронидазола с облепиховым маслом. *Farmatsiya*, (3), 36–40.
- Tureeva, G. M. (2024). Development of the optimal composition of dental polymer films of metronidazole with sea buckthorn oil. *Farmatsiya*, (3), 36–40. (In Russ.)
- Унгуряну, Т. Н., Жамалиева, Л. М., & Гржибовский, А. М. (2019). Краткие рекомендации по подготовке систематических обзоров к публикации. *West Kazakhstan Medical Journal*, 61(1), 26–36.
- Unguryanu, T. N., Zhamaliyeva, K. M., & Grjibovski, A. M. (2019). Brief recommendations on how to write and publish systematic reviews. *West Kazakhstan Medical Journal*, 61(1), 26–36. (In Russ.)
- Якубова, Л. Ю., Селезнева, Л. Д., Дмитриенко, А. О., & Подзорова, М. В. (2023). Изменение структуры биоразлагаемых полимеров под влиянием агрессивных факторов окружающей среды. *Известия Кабардино-балкарского государственного университета*, (3), 119–124.
- Yakubova, L. Yu., Selezneva, L. D., Dmitrienko, A. O., & Podzorova, M. V. (2023). Changes in the structure of biodegradable polymers under the influence of aggressive environmental factors. *Bulletin of the Kabardino-Balkarian State University*, (3), 119–124. (In Russ.)
- Abdullah, Z. W., Dong, Y., Davies, I. J., & Barbhuiya, S. (2017). PVA, PVA blends, and their nanocomposites for biodegradable packaging application. *Polymer-Plastics Technology And Engineering*, 56(12), 1307–1344. <https://doi.org/10.1080/03602559.2016.1275684>
- Adhikari, D., Mukai, M., Kubota, K., Kai, T., Kaneko, N., Araki, K. S., & Kubo, M. (2016). Degradation of bioplastics in soil and their degradation effects on environmental microorganisms. *Journal of Agricultural Chemistry and Environment*, 5(01), 23–34. <https://doi.org/10.4236/jacen.2016.51003>
- Aslam, M., Kalyar, M. A., & Raza, Z. A. (2018). Polyvinyl alcohol: A review of research status and use of polyvinyl alcohol based nanocomposites. *Polymer Engineering & Science*. <https://doi.org/10.1002/pen.24855>
- Azeredo, H. M. C., Barud, H., Farinas, C. S., Vasconcellos, V. M., & Claro, A. M. (2019). Bacterial cellulose as a raw material for food and food packaging applications. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 3. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2019.00007>
- Ben Halima, N. (2016). Poly(vinyl alcohol): Review of its promising applications and insights into biodegradation. *RSC Advances*, 6(46), 39823–39832. <https://doi.org/10.1039/c6ra05742j>
- Chandra, R. (1998). Biodegradable polymers. *Progress in Polymer Science*, 23(7), 1273–1335. [https://doi.org/10.1016/s0079-6700\(97\)00039-7](https://doi.org/10.1016/s0079-6700(97)00039-7)
- Corradini, E., Curti, P., Meniqueti, A., Martins, A., Rubira, A., & Muniz, E. (2014). Recent advances in food-packing, pharmaceutical and biomedical applications of zein and zein-based materials. *International Journal of Molecular Sciences*, 15(12), 22438–22470. <https://doi.org/10.3390/ijms151222438>
- Farah, S., Anderson, D. G., & Langer, R. (2016). Physical and mechanical properties of PLA, and their functions in widespread applications — A comprehensive review. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 107, 367–392. <https://doi.org/10.1016/j.addr.2016.06.012>
- Fredriksson, H., Silverio, J., Andersson, R., Eliasson, A.-C., & Åman, P. (1998). The influence of amylose and amylopectin characteristics on gelatinization and retrogradation properties of different starches. *Carbohydrate Polymers*, 35(3–4), 119–134. [https://doi.org/10.1016/s0144-8617\(97\)00247-6](https://doi.org/10.1016/s0144-8617(97)00247-6)
- Gaaz, T., Sulong, A., Akhtar, M., Kadhum, A., Mohamad, A., & Al-Amiery, A. (2015). Properties and applications of polyvinyl alcohol, halloysite nanotubes and their nanocomposites.

- Molecules*, 20(12), 22833–22847. <https://doi.org/10.3390/molecules201219884>
- Gross, R. A., & Kalra, B. (2002) Biodegradable polymers for the environment. *Green Chemistry*, 297, 803–807.
- Guan, J., Fujimoto, K. L., Sacks, M. S., & Wagner, W. R. (2005). Preparation and characterization of highly porous, biodegradable polyurethane scaffolds for soft tissue applications. *Biomaterials*, 26(18), 3961–3971. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2004.10.018>
- Haider, T. P., Völker, C., Kramm, J., Landfester, K., & Wurm, F. R. (2018). Plastics of the future? The impact of biodegradable polymers on the environment and on society. *Angewandte Chemie International Edition*, 58(1), 50–62. <https://doi.org/10.1002/anie.201805766>
- Jacobsen, S., & Fritz, H. G. (1999). Plasticizing polylactide: The effect of different plasticizers on the mechanical properties. *Polymer Engineering and Science*. 39(7), 1303–1310.
- Kampeerappun, P., Aht-ong Duangdao, Pentrakoon, D., & Srikulkit, K. (2007). Preparation of cassava starch/montmorillonite composite film. *Carbohydrate Polymers*, 67(2), 155–163. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2006.05.012>
- Ke, T. Y., & Sun, X. Z. (2000). Physical properties of poly(lactic acid) and starch composites with various blending ratios. *Cereal Chemistry*, 77(6), 761–768.
- Kenawy, E.-R., Worley, S. D., & Broughton, R. (2007). The chemistry and applications of antimicrobial polymers: A state-of-the-art review. *Biomacromolecules*, 8(5), 1359–1384. <https://doi.org/10.1021/bm061150q>.
- Langer, R., & Tirrell, D. A. (2004). Designing materials for biology and medicine. *Nature*, 428(6982), 487–492. <https://doi.org/10.1038/nature02388>
- Lucas, N., Bieniaime, C., Belloy, C., Queneudec, M., Silvestre, F., & Nava-Saucedo, J.-E. (2008). Polymer biodegradation: Mechanisms and estimation techniques – A review. *Chemosphere*, 73(4), 429–442. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2008.06.064>
- Lyu, S., & Untereker, D. (2009). Degradability of polymers for implantable biomedical devices. *International Journal of Molecular Sciences*, 10(9), 4033–4065. <https://doi.org/10.3390/ijms10094033>
- Mohanty, A. K., Misra, M., & Hinrichsen, G. (2000). Biofibres, biodegradable polymers and biocomposites: An overview. *Macromolecular Materials and Engineering*, 276/277, 1–24.
- Naushad Emmambux, M., & Stading, M. (2007). In situ tensile deformation of zein films with plasticizers and filler materials. *Food Hydrocolloids*, 21(8), 1245–1255. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2006.09.013>
- Otoni, C. G., Espitia, P. J. P., Avena-Bustillos, R. J., & McHugh, T. H. (2016). Trends in antimicrobial food packaging systems: Emitting sachets and absorbent pads. *Food Research International*, 83, 60–73. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2016.02.018>
- Peelman, N., Ragaert, P., De Meulenaer, B., Adons, D., Peeters, R., Cardon, L., Van Impe, F., & Devlieghere, F. (2013). Application of bioplastics for food packaging. *Trends in Food Science & Technology*, 32(2), 128–141. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2013.06.003>
- Peterson, K., Nielsen, P. V., Bertelsen, G., Lawther, M., Olsen, M. B., Nilsson, N. H., & Mortensen, G. (1999). Potential of biobased materials for food packaging. *Trends in Food Science & Technology*, 10, 52–68.
- Pillai, C. K. S., & Sharma, C. P. (2010). Review paper: Absorbable polymeric surgical sutures: chemistry, production, properties, biodegradability, and performance. *Journal of Biomaterials Applications*, 25(4), 291–366. <https://doi.org/10.1177/0885328210384890>
- Rajwade, J. M., Paknikar, K. M., & Kumbhar, J. V. (2015). Applications of bacterial cellulose and its composites in biomedicine. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 99, 2491–2511. <https://doi.org/10.1007/s00253-015-6426-3>.
- Ratnayake, W. S., Hoover, R., Shahidi, F., Perera, C., & Jane, J. (2001). Composition, molecular structure, and physicochemical properties of starches from four field pea (*Pisum sativum* L.) cultivars. *Food Chemistry*, 74(2), 189–202. [https://doi.org/10.1016/s0308-8146\(01\)00124-8](https://doi.org/10.1016/s0308-8146(01)00124-8)
- Reiniati, I., Hrymak, A. N., & Margaritis, A. (2017). Recent developments in the production and applications of bacterial cellulose fibers and nanocrystals. *Critical Reviews in Biotechnology*, 37, 510–524. <https://doi.org/10.1080/07388551.2016.1189871>
- Rhim, J.-W., Park, H.-M., & Ha, C.-S. (2013). Bio-nanocomposites for food packaging applications. *Progress in Polymer Science*, 38(10–11), 1629–1652. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2013.05.008>
- Rivelilson, M. de F. (2014). Technological development and evaluation on sialagogue activity of a spray-like liquid formulation of pilocarpine. *African Journal of Pharmacy and Pharmacology*, 8(35), 868–674. <https://doi.org/10.5897/ajpp2014.4027>
- Ruka, D. R., Simon, G. P., & Dean, K. M. (2012). Altering the growth conditions of *Gluconacetobacter xylinus* to maximize the yield of bacterial cellulose. *Carbohydrate Polymers*, 89, 613–622. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2012.03.059>
- Saini, I., Sharma, A., Dhiman, R., Aggarwal, S., Ram, S., & Sharma, P. K. (2017). Grafted SiC nanocrystals: For enhanced optical, electrical and mechanical properties of polyvinyl alcohol. *Journal of Alloys and Compounds*, 714, 172–180. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.04.183>
- Shukla, R., & Cheryan, M. (2001). Zein: the industrial protein from corn. *Industrial Crops and Products*, 13(3), 171–192. [https://doi.org/10.1016/s0926-6690\(00\)00064-9](https://doi.org/10.1016/s0926-6690(00)00064-9)
- Siva, P., Tareq, M. A., & Shameli, K. (2022). Biodegradable polymers for packaging: A bibliometric overview of the publication in web of science in year 2012–2021. *Journal of Research in*

- Nanoscience and Nanotechnology*, 5(1), 29–42. <https://doi.org/10.2376/0003-925X-68-26>
- Souza, P. M. S., Morales, A. R., Marin-Morales, M. A., & Mei, L. H. I. (2013). PLA and montmorillonite nanocomposites: Properties, biodegradation and potential toxicity. *Journal of Polymers and the Environment*, 21(3), 738–759. <https://doi.org/10.1007/s10924-013-0577-z>
- Tang, X. Z., Kumar, P., Alavi, S., & Sandeep, K. P. (2012). Recent advances in biopolymers and biopolymer-based nanocomposites for food packaging materials. *Critical reviews in food science and nutrition*, 52(5), 426–442. <https://doi.org/10.1080/10408398.2010.500508>
- Tokić, I., Fruk, G., & Jermić, T. (2011). Biorazgradiva ambalaža za čuvanje voća i drugih hortikulturnih proizvoda: materijali, svojstva i učinak na kakvoću. *Journal of Central European Agriculture*, 12(1), 226–238.
- Tripathi, S., Mehrotra, G. K., & Dutta, P. K. (2009). Physicochemical and bioactivity of cross-linked chitosan–PVA film for food packaging applications. *International Journal of Biological Macromolecules*, 45(4), 372–376. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2009.07.00>
- Urry, D. W. (1995). Elastic biomolecular machines. *Scientific American*, 272(1), 64–69.
- Van Hest, J. C. M., & Tirrell, D. A. (2001). Protein-based materials, toward a new level of structural control. *Chemical Communications*, 19, 1897–1904. <https://doi.org/10.1039/b105185g>
- Vieira, M. G. A., da Silva, M. A., dos Santos, L. O., & Beppu, M. M. (2011). Natural-based plasticizers and biopolymer films: A review. *European Polymer Journal*, 47(3), 254–263. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2010.12.011>
- Wang, J., Tavakoli, J., & Tang, Y. (2019). Bacterial cellulose production, properties and applications with different culture methods — a review. *Carbohydrate Polymers*, 219, 63–76. <https://doi.org/10.1016/J.CARBPOL.2019.05.008>
- Xu, Y., Liu, X., Jiang, Q., Yu, D., Xu, Y., Wang, B., & Xia, W. (2021). Development and properties of bacterial cellulose, curcumin, and chitosan composite biodegradable films for active packaging materials. *Carbohydrate Polymers*, 260, 117778. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2021.117778>
- Zaikova, A., Deviatkin, I., Havukainen, J., Horttanainen, M., Astrup, T. F., Saunila, M., & Happonen, A. (2022). Factors Influencing Household Waste Separation Behavior: Cases of Russia and Finland. *Recycling*, 7(4), 52. <https://doi.org/10.3390/recycling7040052>