

DOI: <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2023-6-1-11-21>

Поступила 23.11.2022

Поступила после рецензирования 26.12.2023

Принята в печать 10.01.2023

© Мяленко Д. М., 2023



<https://www.fsjour.com/jour>

Обзорная статья

Open access

СОВРЕМЕННЫЕ БИОРАЗЛАГАЕМЫЕ МАТЕРИАЛЫ С УСКОРЕННОЙ ДЕГРАДАЦИЕЙ ДЛЯ МОЛОЧНОЙ И ПИЩЕВОЙ ПРОДУКЦИИ (ПРЕДМЕТНЫЙ ОБЗОР)

Мяленко Д. М.

Всероссийский научно-исследовательский институт молочной промышленности, Москва, Россия

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

биоразлагаемая упаковка, оксодоразложение, полилактид, полибутиленадипат-терефталат, биоразлагаемые добавки

АННОТАЦИЯ

Продукты полимерной промышленности, львиную долю которых составляет упаковка пищевой продукции, создают существенную угрозу для окружающей среды, что требует поиска наиболее действенных и функциональных решений. С каждым годом объемы производства полимерной упаковки растут в среднем на 10–12%, а в прошлом году из-за распространения по всему миру SARS-CoV-2 (COVID-19) и его штаммов прирост составил более 20%. Решение экологической проблемы возможно с использованием основных базовых подходов: утилизация и вторичная переработка отходов, которая даст возможность «второй жизни» уже использованным полимерам; разработка и создание новых биоразлагаемых материалов, способных деградировать полностью под влиянием внешних факторов на относительно более безопасные вещества. Однако следует отметить, что первый способ имеет ряд существенных недостатков, связанных с затруднением контроля количества осуществленных процессов рециклинга, что потенциально может привести к увеличению миграционных процессов из полимерных материалов. Вторым способом решения экологической проблемы утилизации и переработки упаковки является направление, связанное с созданием полимерных материалов, с заменой части традиционных коммерческих синтетических основ органическими и неорганическими наполнителями в различных концентрациях. Однако, можно предположить, что наиболее перспективным способом обращения с упаковочными отходами, является разработка технологий, направленных на создание полностью биоразлагаемых материалов с регулируемым сроком службы, которые после своего жизненного цикла утилизируются в короткие сроки без нанесения вреда окружающей среде. Настоящий обзор посвящен анализу рынка современных биоразлагаемых материалов и способов получения деградируемых композиций, способных стать существенной альтернативой традиционным пластикам.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Статья подготовлена в рамках выполнения исследований по государственному заданию НИР № FNSS-2022-0005 Всероссийского научно-исследовательского института молочной промышленности.

Received 23.11.2022

Accepted in revised 26.12.2023

Accepted for publication 10.01.2023

© Myalenko D. M., 2023

Available online at <https://www.fsjour.com/jour>

Review article

Open access

MODERN BIODEGRADABLE MATERIALS WITH ACCELERATED DEGRADATION FOR DAIRY AND FOOD PRODUCTS (SUBJECT REVIEW)

Dmitry M. Myalenko

All-Russian Dairy Research Institute, Moscow, Russia

KEY WORDS:

biodegradable packaging, oxo-degradation, polylactide, polybutylene adipate terephthalate, biodegradable additives

ABSTRACT

Products of the polymer industry, the lion's share of which is food packaging, create a significant threat to the environment, which requires a search for the most effective and functional solutions to this problem. Every year, the production of polymer packaging is growing by an average of 10–12%, and last year, due to the worldwide spread of SARS-CoV-2 (COVID-19) and its strains, the increase was more than 20%. A solution to the environmental problem is possible using the main basic approaches: disposal and recycling of waste, which will give the possibility of the “second life” to already used polymers; development and creation of new biodegradable materials capable of degrading completely under the influence of external factors into relatively safer substances. However, it should be noted that the first method has a number of significant drawbacks associated with the difficulty in controlling the amount of recycling processes carried out, which can potentially lead to an increase in migration processes from polymeric materials. The second way to solve the environmental problem of packaging disposal and recycling is the direction associated with the creation of polymeric materials with the replacement of part of the traditional commercial synthetic bases with organic and inorganic fillers in various concentrations. However, the most promising way to handle packaging waste, in our opinion, is the development of technologies aimed at creating fully biodegradable materials with a regulated service life, which, after their life cycle, are disposed of in a short time without harming the environment. This review is devoted to the analysis of the market of modern

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Мяленко Д. М. (2023). Современные биоразлагаемые материалы с ускоренной деградацией для молочной и пищевой продукции (Предметный обзор). *Пищевые системы*, 6(1), 11–21. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2023-6-1-11-21>

FOR CITATION: Myalenko, D. M. (2023). Modern biodegradable materials with accelerated degradation for dairy and food products (Subject review). *Food Systems*, 6(1), 11–21. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2023-6-1-11-21>

biodegradable materials and methods for obtaining degradable compositions that can become a significant alternative to traditional plastics.

FUNDING: The article was prepared within the framework of research on the state task of Research and Development No. FNSS-2022-0005 of the All-Russian Research Institute of Dairy Industry.

1. Введение

Экологические проблемы, вызванные антропогенным фактором, изучаются с прошлого века. Отдельное внимание уделяют вопросам загрязнения природы отходами жизнедеятельности человека [1,2]. Длительное время проблему обращения с отходами игнорировали во всем мире, что привело к накоплению использованных материалов в природе [3]. Результатом служит распространение пластика в каждой биосистеме планеты: в почве и отложениях, в океане, морях и реках, даже в биомассе животного мира и человека [3–6]. При этом развивается экологическая грамотность населения и повышается роль государственных регуляторов в данном направлении. На сегодняшний день мусор сортируют и перерабатывают с целью получения вторичного сырья или энергоресурсов, также отходы подлежат захоронению и сжиганию на полигонах и профилированных заводах соответственно [3,4]. Рециклинг полимерных материалов снижает степень загрязнения окружающей среды, однако процент переработанных отходов все еще значительно ниже по сравнению с количеством захороненных отходов производства. По данным отечественных исследователей, в России такой способ утилизации используется лишь для 3–4% мусора [7], в то время как образуется около 60 млн тонн твердых коммунальных отходов в год, 5% из которых составляет пластик [8]. Полимерное сырье привлекает производителей низкой стоимостью в сочетании с прекрасными механическими характеристиками, а также небольшим весом и длительным сроком использования. За последние 50 лет мировой объем производства пластмасс вырос с 30 до 367 млн тонн [9]. В то же время, по данным Европейской ассоциации производителей пластика, за последние 3 года в Европе снижается выпуск полимерного сырья и материалов. Такую динамику можно объяснить осуществлением разумной экологической политики [10]. В странах ЕС оказывают законодательную поддержку мер по защите окружающей среды, уделяют большое внимание постоянной переработке материалов и обращению с отходами. Помимо этого, европейские производители стараются предоставлять безвредное сырье. Такая тенденция объясняет снижение поступления привычных полимерных материалов на рынок. Однако в целом прогресс стран Европы не влияет на мировые мощности производства полимеров. Пластик до сих пор является одним из самых

востребованных сырьевых материалов (Рисунок 1 и Рисунок 2) [10,11].

Исключением стал 2020 год, так как пандемия COVID-19 препятствовала привычной производственной работе. Помимо трудностей с поставками из-за усложнившейся процедуры таможенных проверок, на полимерную промышленность влияли такие факторы, как резкий ажиотажный спрос на медицинские изделия и индивидуальную упаковочную продукцию, в то время как к остальным сегментам рынка заинтересованность населения была практически потеряна. Переносы ремонтных работ, изменения инвестиционных планов и сроков выполнения проектов — все это привело к сбою в налаженной системе производства, что повлекло уменьшение объема производства некоторых групп технических полимеров [11].

Ввиду резко возросшего спроса на средства индивидуальной защиты проблема влияния пластикового мусора на экологию не уменьшилась. Большинство одноразовых медицинских масок, халатов содержат в составе полиэтилен, полипропилен и полиэтилентерефталат [12]. В России за год пандемии накопилось не меньше 30 тыс. тонн использованных средств индивидуальной защиты. Обращение с использованными СИЗ происходит так же, как и с любыми отходами [13], а значит, массивная часть используемых средств защиты захоронена и будет разлагаться в природе в течение десятков лет.

Сегодня биополимеры составляют примерно 1% от 335 млн тонн полимеров ежегодно, но по мере роста спроса и появления более совершенных биополимеров рынок постоянно растет [14].

Согласно последним данным от Европейского института биопластиков (European Bioplastics), научно-исследовательского института nova-Institute (Хюрт, Германия) и научно-исследовательского института новой школы (Хюрт, Германия), производственные мощности по изготовлению пластика будут увеличены на 20% до 2023 года [14].

Европейский институт биопластиков в 2018 году опубликовал доклад, в котором все производственные мощности производства биопластиков в мире рассортированы по названиям материалов (Рисунок 3).

На сегодняшний день практически для каждого коммерческого синтетического полимера можно подобрать альтернативный биоразлагаемый материал, который в боль-

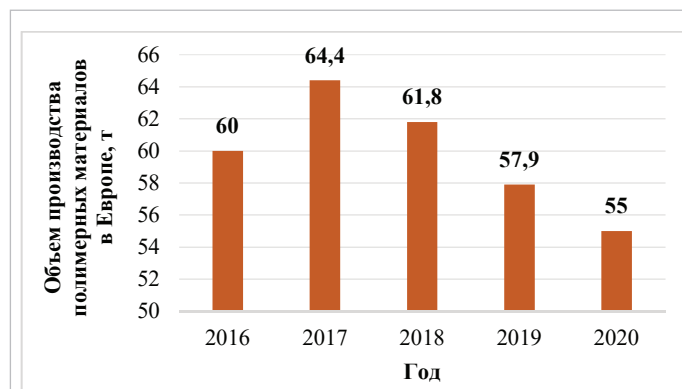


Рисунок 1. Объем производства пластика в Европе, т
Figure 1. Production volume of plastics in Europe, tonnes

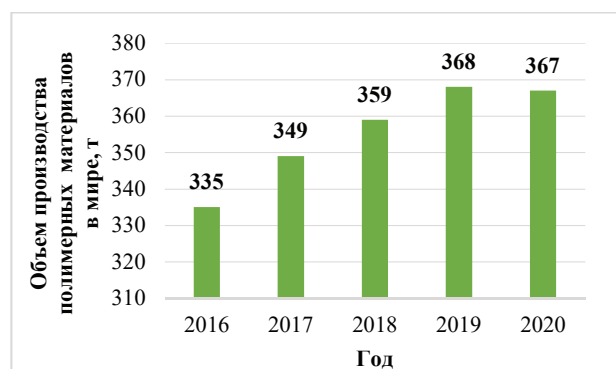


Рисунок 2. Мировой объем производства, т
Figure 2. Global production volume, tonnes

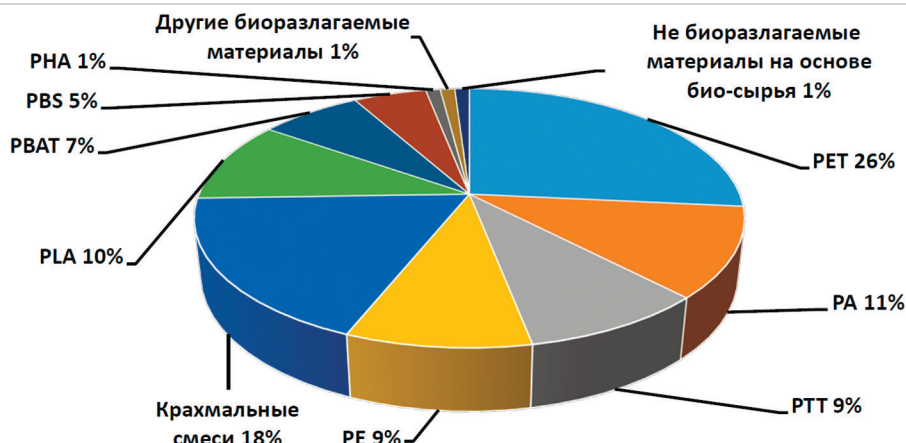


Рисунок 3. Видовое распределение биопластика в мире (2018–2019 гг.) в процентном соотношении из расчета глобальных производственных мощностей тыс. тонн за период 2018–2019 г. [14]
 Figure 3. Distribution of bioplastics in the world (2018–2019) as a percentage based on the global production capacity of thousand tons for the period 2018–2019 [14]

шинстве случаев имеет те же свойства, что и традиционные пластики, и обеспечивает некоторые преимущества, например, возможность управления отходами, использование промышленного компостирования и потенциальное уменьшение углеродного следа.

Объем производства биоразлагаемых полимеров по состоянию на 2018 год составляет 1,2 млн тонн [5], большую часть от этого числа (около 65%) составляет упаковка для пищевых и непищевых продуктов. Область применения деградируемой упаковки расширяется с каждым годом — от изготовления игрушек, производства бытовой электроники и автомобилей до сельскохозяйственной, пищевой, в частности молочной промышленности.

В настоящее время в производстве пластмасс очевидна тенденция к инновациям и экологичности продукции [15,16]. Медицина [17,18] и упаковочная промышленность [19] являются одними из многочисленных отраслей, в которых востребованы различные пластмассы. При этом с каждым годом обостряется проблема загрязнения окружающей среды, в том числе при потреблении этих материалов [20], поэтому активно развивается направление биоразлагаемых полимеров — полимеров, способных к быстрой биодеградации под воздействием факторов окружающей среды и микроорганизмов. Биоразлагаемые полимеры имеют свойства, аналогичные традиционным [21]. Комбинация используемых исходных материалов позволяет получить полимер с высокой гибкостью, отличной ударной вязкостью и относительным удлинением при разрыве (более 500%). Также полученный полимер будет обладать хорошей плавкостью (температура плавления 115–125 °C) и хорошей биоразлагаемостью [22,23].

При исследованиях биоразлагаемых материалов [20,22,24–27] ученые уделяли большое внимание их свойствам и структуре, в то время как особенности применения таких материалов в качестве пищевой упаковки недостаточно хорошо изучены. Следует отметить, что многие полиэфиры из-за особенности своих свойств не могут использоваться в качестве полноценной упаковки для молочной и пищевой продукции. Они применяются в виде покрытий на биоразлагаемых полимерных материалах, тем самым придавая дополнительную стойкость к воздействию жиров и влаги, позволяя использовать их в качестве упаковки для любых продуктов, в том числе для продуктов с влажностью более 15,0% [28–30].

Кроме основных задач полимерной упаковки, которые заключаются в обеспечении сохранности молочной и пищевой продукции на протяжении всего жизненного цикла,

необходимо учитывать фактор ее экологичности [31–34]. Следует также отметить, что введение различных функциональных компонентов в полимерную основу может служить дополнительными факторами риска при обеспечении качества и безопасности упакованной продукции [31,33,35,36]. Это особенно актуально для продукции функциональной направленности и детского питания [35–37].

2. Материалы и методы

Объектами изучения являлись научные публикации и патентные исследования российских и зарубежных авторов в области создания и разработки современных биоразлагаемых материалов на основе синтетических и природных компонентов. В базах PubMed, Scopus, Mendeley и в открытых интернет-источниках был проведен поиск исследований, опубликованных в период с 1995 по 2022 годы, с использованием нескольких комбинаций ключевых слов, включая следующие: биоразлагаемая упаковка, оксоразложение, полилактид, полибутиленадипаттерефталат, полибутиленсубцинат, биоразлагаемые добавки. Результаты анализа литературы для подготовки обзора в виде схемы PRIZMA представлены на Рисунке 4.

Статьи, написанные не на английском и русском языках, а также без полнотекстовой информации, были исключены. Из подобранных материалов также были исключены статьи, не относящиеся к теме настоящего обзора.

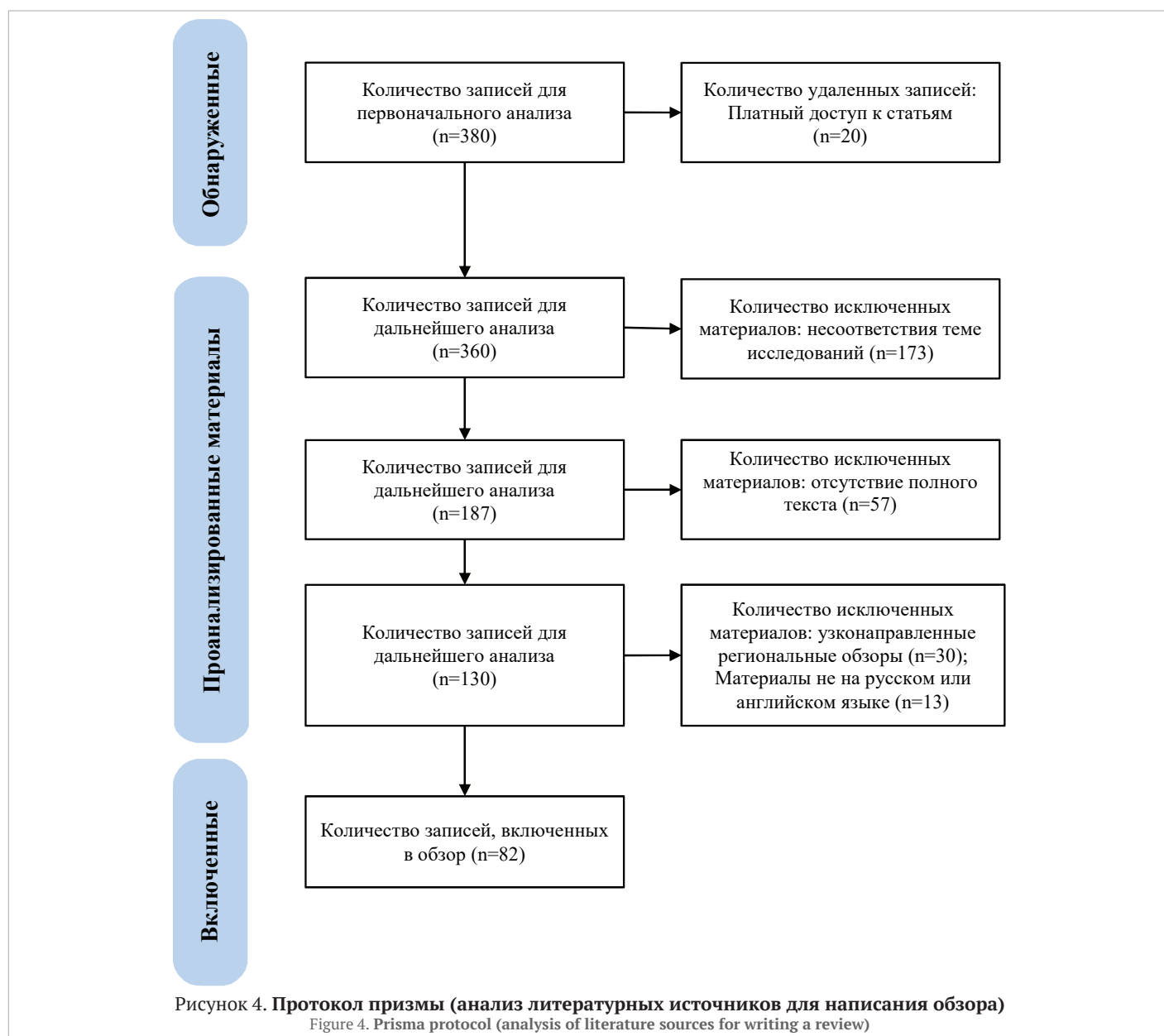
3. Результаты и обсуждение

Полимеры на биооснове, или упаковочные материалы на основе биополимеров, можно разделить на три основные группы в зависимости от их происхождения и способа производства: природные, синтетические и полусинтетические.

3.1. Природные полимеры

Хитин и Хитозан присутствуют в панцирях насекомых, крабов и креветок. В основном используются в медицине. Растворимость хитина очень низкая, поэтому его смешивают для получения упаковочных решений в виде барьерных покрытий продуктов [38].

Хитин и хитозан применяются в производстве различных биоразлагаемых пленок для упаковки, чаще используются в качестве съедобного покрытия для продления срока хранения свежих фруктов и овощей [39–41]. Они обладают хорошими антимикробными свойствами по отношению к различным грибкам, дрожжам и бактериям, встречающимся в пищевых продуктах.



Лидер производства хитина и хитозана — Япония. В России выпускают около 100 тонн этих природных полимеров в год из различных видов крабов [42].

Пластифицированный крахмал (TPS) — природный полимер, состоящий из амилопектина (поли- α -1,4-D-глюкопиранозид и α -1,6-D-глюкопиранозид) и амилозы (поли- α -1,4-D-глюкопиранозид). Сырьевые источники TPS — пшеница, рис, картофель и кукуруза. При изменении источника меняется содержание амилозы и амилопектина. Удлинение и прочность материалов на основе TPS увеличиваются по мере повышения содержания амилозы [43,44]. TPS очень чувствителен к влажности, термические свойства материала изменяются в зависимости от содержания воды [45–47]. Биоразложение происходит путем гидролиза ацетальной связи. Амилазы разрушают α -1,4-связь, а глюкозидазы расщепляют α -1,6-связь.

Примеры некоторых коммерчески доступных крахмалов и их смесей включают Ecofram™ от National starch, Solanyl™ от Rodenburg bio-polymers, Biocool™ от Novamont, Bioplast™ от Biotec и Plantic™ от Plantic Technologies. В России: ООО «Парус», ООО «Фуд Пак» «Эко Флекс», ООО «Тарра».

Целлюлоза — это линейный полимер, образованный из повторяющихся единиц целлобиозы. Она кристаллическая

и не растворима в органических растворителях. Из-за своей нерастворимости и низкой текучести она трансформируется в различные формы.

Ацетаты целлюлозы (CA) являются производными целлюлозы с прочностью на разрыв, как у полипропилена. Высокая температура стеклования (T_g) ограничивает применение CA в термической обработке. Коммерчески доступные пленки CA включают Bioceta™, разработанную компанией Mazzucchelli, и EnviroPlastic Z™, созданную компанией Planet Polymer. Биоразложение CA осуществляется бактериями и грибами с помощью ферментного окисления, в частности, пероксидазами, выделяемыми грибами [48]. Коммерчески доступные полимеры марок Tenite™ от Eastman, Fasal™ от IFA и Natureflex™ от UCB содержат в своем составе ацетаты целлюлозы.

На диацетатные пленки (DCA) хорошо наносится печатный рисунок, что позволяет применять их в качестве износостойкого наружного слоя в многослойной упаковке. Пленки на основе DCA довольно чувствительны к изменению влажности, при этом обладают хорошими прочностными характеристиками, блеском и прозрачностью. Основная область применения таких материалов — упаковка для сухих сыпучих материалов.

Коллаген и желатин — это белки соединительной ткани, состоящие из различных полипептидов, в состав которых входят гидроксипролин, пролин, глицин и лизин. Содержание глицина отвечает за гибкость коллагена [49].

Более высокомолекулярный полипептид, образующийся в результате химической деградации коллагена — желатин. Он обладает отличной пленкообразующей способностью и состоит из 19 аминокислот. Распределение молекулярной массы, состав аминокислот и тип используемого пластификатора значительно влияют на барьерные и механические свойства пленки [50]. Термическая стабильность при обработке является важным фактором, ограничивающим ее применение. Для улучшения или изменения механических и барьерных свойств пленки при производстве материала применяют/вносят различные добавки, чтобы получить функциональные пленки для упаковки пищевых продуктов. Например, 4% желатиновая пленка с 2,5% кукурузного масла и 5% оливкового масла используется для упаковки колбас.

3.2. Полимеры, полученные классическим химическим синтезом из био-мономеров

Полилактид (PLA) — это тип алифатического полиэфира, получаемого путем полимеризации лактидного мономера с раскрытием кольца. Мономеры молочной кислоты обычно получают в результате ферментации возобновляемых материалов, таких как кукуруза, сахар, другое сырье. Он пригоден для вторичной переработки, компостирования, разлагается в течение короткого периода, имеет высокую молекулярную массу и обладает высокой прозрачностью [51]. При изменении соотношения мономеров свойства PLA могут быть изменены от кристаллических до аморфных. Температура стеклования коммерчески доступного PLA составляет 63,0–63,8 °C [52]. Начальная кристалличность и содержание мономера изменяют скорость деградации всего полимера, где наименьшая деградация наблюдается при наибольшем содержании мономера из-за высокой кристаллической природы [53].

Мировая практика по предоставлению налоговых льгот на выпуск продукции, не наносящей вред окружающей среде, стимулирует производителей PLA на наращивание своих производственных мощностей [54].

Лидер в производстве L-PLA — компания Nature Works — выпускает в среднем 140 000 тонн/год гранул. Классический PLA поставляется на рынок рядом компаний по всему миру: Toyota (Япония), Hitachi (Япония), Dupont (США), Galactic (Бельгия), Hisun Biomaterials (Китай) [54].

Обычно PLA используется для получения контейнеров, питьевых стаканчиков, стаканчиков для мороженого и салатов, оберточной пленки и блистерной упаковки, а также является хорошо биосовместимой пластмассой, которая может применяться в сфере медицины. Также часто встречается использование PLA в композитных пленках.

Поликапролактон (PCL) — полиэфир, обладает как желательными реологическими свойствами, так и низкой температурой плавления (минус 60 °C стеклования, Tg. 60 °C плавления, Tm) [55–57].

PCL стабилен в диапазоне температур обработки расплава в течение нескольких дней и демонстрирует значительную и быструю термическую деструкцию при температурах выше 170 °C. Синтезируется из ϵ -капролактона при нагреве и использовании катализаторов.

Поликапролактон может быть синтезирован из циклического эфира ϵ -капролактона (CL) путем кольцевой полимеризации, катализируемой металлоалкоксидами, карбоксилатами металлов или ионными инициаторами при

повышенной температуре (> 120 °C) [58–62]. В качестве альтернативы можно использовать поликонденсацию 6-гидроксигексановой кислоты, хотя при таком синтезе обычно получается продукт более низкого качества [63]. Сложность метода поликонденсации заключается в достижении высоких степеней полимеризации и молекулярных масс, превышающих 10 кДа, поэтому метод полимеризации с открытием кольца является более предпочтительным [63].

Добавление в PCL хитозана увеличивает общую гидрофобность смеси. В смеси наблюдаются низкие значения скорости пропускания водяных паров по сравнению с чистыми пленками. Благодаря этому свойству продукты, хранящиеся в таких пленках, имеют более длительный срок хранения [64]. Изделия из данного материала выпускаются под торговыми названиями Tone® от Union Carbide, Celgreen® от Daicel, CAPA® от Solvay. Производят поликапролактон также компании BASF SE, Sigma-Aldrich Corporation, Polysciences Inc. и некоторые другие.

Полибутилен сукцинат (PBS) — полимер, принадлежащий к семейству полиалкендикарбоксилатов, получаемый путем поликонденсации гликолей (1,4-бутандиол и этиленгликоль) с алифатическими дикарбоновыми кислотами (адипиновая и янтарная). PBS обладает примерно такими же механическими свойствами, как полиэтилен (PE) и полипропилен (PP) [65]. Благодаря высокой кристалличности и хорошим термическим свойствам гомополимеров, сополимер PBS и полибутилакрилата (PBA) может быть использован в качестве упаковочного [66]. Физические свойства и кристаллическая структура сополимера PBSA сильно зависят от состава полимерных соединений [67].

В 1993 году японская компания Showa High Polymer реализовала проект по строительству крупного предприятия по производству PBS мощностью 3000 т/г. Данный материал синтезируется путем конденсации в расплаве с применением диизоцианата. Полимер выпускается под торговой маркой Bionolle.

В 2003 году был реализован проект GS Pla (Green and Sustainable Plastic) с объемом производства 3000 т/г. На данный момент на рынке существует несколько крупных производителей PBS, среди которых: Hexing Chemical (Аньхой, Китай), Xinfu Pharmaceutical (Ханчжоу, Китай), IRe Chemical (Южная Корея).

Компании Hexing Chemical и Xinfu Pharmaceutical с 2010 года являются крупнейшими производителями PBS (более 30 000 т/г), в том числе с применением технологии непрерывного производства.

PBS можно переработать в пленки, пакеты или коробки как для пищевой, так и для косметической упаковки, а также в одноразовые изделия, такие как посуда или медицинские изделия. В сельском хозяйстве PBS применяется производителями материалов с отсроченным высвобождением для пестицидов и удобрений, а также материал используется в лесном хозяйстве, гражданском строительстве или других областях, в которых сбор и переработка материалов после использования проблематичны. В области медицины PBS можно использовать в качестве систем инкапсуляции биоразлагаемых лекарств, а также при производстве имплантатов [68].

Алифатический сополимер полилактида (CPLA) образуется из смеси лактида, который является возобновляемым ресурсом, и дикарбоновой кислоты, которая представляет собой алифатический полиэфир. Он обладает свойствами PP и PS, которые зависят от процента полиэфира, присутствующего в смеси. CPLA стабилен до температуры 200 °C. При сгорании выделяется очень малое количество CO₂ по сравнению с PE и PP. При сжигании CPLA не образуются токсичных

веществ. В естественной среде фрагментарное разложение занимает 5–6 месяцев, а полное разложение — 12 месяцев [69]. Пленка производится в Японии компанией Dainippon Ink Chemicals под торговым названием CPLA™.

Полигликолид, или полигликолевая кислота, полученная поликонденсацией гликолевой кислоты, — это один из простейших алифатических полиэфиров с температурой стеклования (T_g) 35–40 °C и температурой плавления (T_m) приблизительно 220–250 °C. Он нерастворим в воде из-за высокой фторированности 40–55%, но растворим в большинстве фторированных растворителей, что позволяет использовать его для формирования высокомолекулярных полимерных пленок. Полимер полностью реабсорбируется организмом в течение 5–6 месяцев [70]. Полигликолид характеризуется гидролитической нестабильностью из-за наличия сложноэфирной связи в его основе. Процесс деградации является эрозионным и происходит в два этапа, во время которых полимер превращается обратно в мономер гликолевой кислоты: сначала вода диффундирует в аморфные (некристаллические) области полимерной матрицы, расщепляя эфирные связи; второй этап начинается после разрушения аморфных областей, оставляя кристаллическую часть полимера восприимчивой к гидролитической атаке. При разрушении кристаллических областей полимерная цепь растворяется [70].

Компания Kureha Chemical Industries коммерциализировала высокомолекулярный полигликолид для применения в пищевой упаковке под торговым названием Kuredux. Производство ведется в Белль, Западная Вирджиния, с предполагаемой мощностью 4000 тонн. Его свойства как барьерного материала обусловлены высокой степенью кристаллизации. Предполагается, что данный полимер будет использоваться в качестве прослойки между слоями PET для обеспечения улучшенной барьерной защиты скоропортящихся продуктов, включая газированные напитки и продукты, которые теряют свои потребительские свойства при длительном воздействии воздуха. Более тонкие пластиковые бутылки, сохраняющие желаемые барьерные свойства, также могут быть созданы с помощью технологии полигликолидной прослойки.

Полибутиленадипаттерефталат (PBAT) — это линейный ароматический сополиэфир, полученный в результате конденсации 1,4-бутандиола со смесью терефталевой и адипиновой кислот. При концентрации терефталевой кислоты более 35% он демонстрирует отличные свойства: гибкость и жесткость. При увеличении содержания выше 55% скорость биоразложения PBAT снижается. Этот материал гибкий и мягкий, как PCL, поэтому он используется в производстве пленок, нитей, бутылок и формованных изделий. PBAT можно смешивать с целлюлозой с целью улучшения гидрофобности, механических и термических свойств, а также с крахмалом и другими биоразлагаемыми полимерами. Добавление данного биополимера в PHBV снижает степень кристалличности полученной композиции [71].

Полибутиленадипаттерефталат в чистом виде производится компанией BASF под торговой маркой Ecoflex и в смеси с PLA под названием Ecovio. Компании Novamont, Zhuhai Wango Chemical Co Ltd, JinHui Zhaolong и Eastman Chemical выпускают биоразлагаемый компаунд под названием Origo-Bi®, Wango® и Ecoworld®, а также композиции с крахмалом под названием Mater-Bi®, Ecowill® и Eastar Bio®. Кроме того, производством PBAT занимаются поставщики в Китае и других странах: к таким компаниям относятся Zhejiang Biodegradable Advanced Material Co. Ltd., Dongguan Xinhai Environmental Protection Material Co., Ltd. (Китай), а также Green Chemical Co., Ltd. и WILLEAP (Южная Корея).

PBAT продается на коммерческом рынке как полностью биоразлагаемый пластик, при этом Ecoflex компании BASF показал 90% разложение после 80 дней испытаний [72]. Благодаря своей высокой гибкости и биоразлагаемости, PBAT также продается в качестве добавки к более жестким биоразлагаемым пластикам для придания гибкости при сохранении полной биоразлагаемости конечной смеси.

Полипропилен карбонат (PPC) — биополимер, являющийся наиболее распространенным алифатическим поликарбонатом, который производится из CO₂ и пропиленкарбоната путем сополимеризации. Пленки из PPC имеют ряд преимуществ — лучшая растяжимость и барьерные свойства (пары O₂ и H₂O) по сравнению с PBAT, PE и смесью PE/TPS. Сопротивление разрыву пленок PPC ниже, чем у PBAT, но выше, чем у LDPE и смеси PE/TPS. Однако аморфный PPC имеет ряд недостатков, включая плохую термическую стабильность, высокую усадку, недостаточные механические свойства, низкую температуру стеклования (25–45 °C) и изменчивость характеристик полимера в зависимости от типа катализатора, используемого для приготовления PPC [73].

Композиты полипропиленкарбоната с крахмалом (PPC/TPS) применяются в качестве биоразлагаемых пластиков. Одним из крупнейших производителей полипропиленкарбоната является компания Empower Materials (Нью-Касл, США).

3.3. Полимеры, полученные из природных или генетически модифицированных организмов

Полигидроксиканоаты (PHA) представляют собой природный полиэфир, получаемый путем бактериальной ферментации сахара, глюкозы или растительного масла. Это один из самых новых и широко используемых биоразлагаемых полимеров для упаковки пищевых продуктов [74]. Его T_m колеблется в пределах 40–180 °C в зависимости от мономеров, используемых для синтеза. В зависимости от источника углерода и природы происхождения, PHA может иметь различные прочностные характеристики: от хрупкого до резиноподобного [75,76].

PHA полностью биоразлагаема. Биоразложение происходит под действием эстеразы, разрывающей связи мономера с концами цепи. Наиболее распространенным PHA является полигидроксиканоат PHL, образующийся при полимеризации 3-гидроксиканоата. PHL известен своей превосходной устойчивостью к ультрафиолетовому воздействию и высокими оптическими свойствами с T_m 180 °C и T_g 55 °C. Кристалличность полигидроксиканоата составляет более 50%. Хорошо известно, что PHL нестабилен после температуры плавления 180 °C, а при хранении даже на 10 °C ниже температуры плавления может произойти снижение молекулярной массы, что ограничивает его технологичность [77].

Для повышения технологичности используются всевозможные стратегии, такие как сополимеризация с другими алканатами, добавление биоразлагаемого полимера или смешивание со вторым полимером. PHL подвергается деградации различными бактериями, грибами и водорослями в разных условиях окружающей среды.

Сополимер полигидроксиканоатвалерат (PHBV) синтезируется путем добавления пропионовой кислоты к исходному сырью. Он разлагается в течение 5–6 недель в микробиологически активной среде с образованием CO₂ и H₂O в аэробных условиях. В анаэробных условиях разложение происходит быстрее, с выделением метана [78]. PHL и PHBV продаются под разными торговыми названиями: Biopol™ от Monsanto, Nodax™ от Procter & Gamble и корпорации Kaneka, Eamat™ от Tianan и Biomer-P™ от Biomer.

3.4. Биоразлагающие добавки

Сейчас на рынке присутствует большое разнообразие биоразлагаемых упаковочных решений с разной стоимостью и трудоемкостью производства, качеством и свойствами. По мнению экспертов [49], наиболее распространенным решением является использование оксо-биоразлагаемой добавки. Упаковка из подобных экологических материалов позиционируется на рынке как биоразлагаемая, и популярность данного производства обуславливается его относительной дешевизной, способствуя продвижению продукции на рынке.

В качестве прооксидантов (инициаторов фотоокисления синтетических полимерных материалов) применяются соли кальция в виде карбонатов и карбоксилаты металлов [79].

Наименьшее влияние на окружающую среду наносит биодegradируемая композиция на основе полипропилена и карбоксилата железа [80].

Наибольшей популярностью на мировом рынке оксо-биоразлагаемых полимеров является прооксидант d2w, который в определенных условиях температуры и влажности является катализатором деструктивных процессов полимера. Крупнейшим поставщиком добавки является компания Symphony environmental technologies plc.

Компоненты, ускоряющие разрушение пластиков в виде продеградантов и прооксидантов различного состава, производят десятки компаний по всему миру (ЕС, США, Канада, Великобритания, Норвегия).

В Европейском союзе с 2020 года ввели запрет на производство ряда пластиковых изделий, а также планируется отказаться от синтетического пластика в тех отраслях промышленности, где возможно провести замену на аналогичные или близкие по своим свойствам биоразлагаемые

материалы. Кроме того, на ряд пластиков уже установлены целевые показатели в отношении переработки пластиковых бутылок, которые необходимо достигнуть к 2025 и 2030 годам [81,82].

Минприроды РФ предлагает сокращать потребление пластика в России на 10–20% ежегодно. Окончательно запретить производство одноразовых товаров и упаковки из пластика в России планируется в 2024 году [83].

4. Выводы

Решение проблемы защиты окружающей среды путем уменьшения производства полимерной упаковки за счет ее замены на биоразлагаемые материалы выглядит одним из наиболее перспективных. Однако следует отметить, что при разработке новых экологических материалов необходимо учитывать не только их способность к ускоренной деградации, но и безопасность таких материалов по отношению к пищевой продукции. Это особенно важно для оксоразлагаемой упаковки, где существуют риски миграции тяжелых металлов и их оксидов в продукт и в различные модельные среды. В Европе действует Директива 2019/904, запрещающая все изделия из оксоразлагаемого пластика. Директива частично реализована государствами-членами ЕС в июле 2021 года. Соответственно, производители и компании, производящие, продающие или планирующие продавать эти суперконцентраты в ЕС, должны будут адаптироваться к новым требованиям. Окончательные сроки вступления в силу Директивы — декабрь 2021 г. Очевидно, что задача обеспечения биоразложения упаковки с минимизацией химических рисков является/может являться предметом дальнейших исследований.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Бойко, А. Г. (2014). RosUpack — 2014. Тенденции российского рынка гибких упаковочных материалов. Электронный ресурс <https://plastinfo.ru/information/articles/473>. Дата доступа 01.08.2022.
- RUSTARA.RU (2015). История пластиковой тары. Электронный ресурс <https://www.rustara.ru/articles/Istoriya-plastikovo-j-tary/>. Дата доступа 01.08.2022.
- Белобородова, Т. Г. (09 февраля 2017). *Актуальные направления переработки вторичных полимерных материалов в изделия*. Проблемы и перспективы развития науки и образования в XXI веке. Материалы Международной (заочной) научно-практической конференции. София, Болгария, 2017.
- Технический регламент Таможенного союза ТР ТС 005/2011 «О безопасности упаковки» (с изменениями на 18 октября 2016 года) (утвержден решением комиссии Таможенного союза от 16 августа 2011 года № 769). Москва — 2011
- Bioplastics Europe. (2018). Global production capacities of bioplastics 2018–2023 Retrieved from <http://www.european-bioplastics.org/news/publications> Accessed: August 1, 2022.
- Lebreton, L., Andrady, A. (2019). Future scenarios of global plastic waste generation and disposal. *Palgrave Communications*, 1(5), Article 6. <https://doi.org/10.1057/s41599-018-0212-7>
- Пляскина, Н. И., Харникова, В. Н. (2016). Управление в сфере обращения с твердыми коммунальными отходами: современное состояние. *ЭКО*, 12, 7–21.
- РЭО (2021). РЭО подвел итоги года. Электронный ресурс <https://reo.ru/tpost/o5xr9cae1-reo-podvel-itogi-goda>. Дата доступа 01.08.2022.
- Market data Archives Plastics Europe. (2022). Quarterly Report Q1/2022 European plastics manufacturers (EU27) Retrieved from <https://plasticseurope.org/knowledge-hub/quarterly-report-q1-2022>. Accessed: August 01, 2022.
- Дубровин, Н. Н., Кондратьев, Д. А., Нефедова, Т. О. (27 декабря 2021). *Международный опыт стимулирования раздельного сбора бытовых отходов*. Теории, школы и концепции устойчивого развития науки в современных условиях. Сборник статей Международной научно-практической конференции. Уфа: OMEGA SCIENCE, 2021
- Ray, S. S., Lee, H. K., Huyen, D. T. T., Chen, S.-S., Kwon, Y.-N. (2022). Microplastics waste in environment: A perspective on recycling issues from PPE kits and face masks during the COVID-19 pandemic. *Environmental Technology and Innovation*, 26, Article 102290. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.102290>
- Prata, J. C., Silva, A. L. P., Duarte, A. C., Rocha-Santos, T. (2021). Disposable over reusable face masks: Public safety or environmental disaster? *Environments-MDPI*, 8(4), Article 31. <https://doi.org/10.3390/environments8040031>
- Квашнин, А. Б. (2021). Особенности утилизации средств индивидуальной защиты в условиях распространения COVID-19. *Инновационная наука*, 10–2, 22–25.
- Панфилов, Б. В. (2019). Мировой рынок биополимеров. *Полимерные материалы. Изделия, оборудование, технологии*, 7, 53.
- Hobbs, C. E. (2019). Recent advances in bio-based flame retardant additives for synthetic polymeric materials. *Polymers*, 11(2), Article 224. <https://doi.org/10.3390/polym11020224>
- Maraveas, C. (2020). Production of sustainable and biodegradable polymers from agricultural waste. *Polymers*, 12(5), Article 1127. <https://doi.org/10.3390/polym12051127>
- Qu, H., Fu, H., Han, Z., Sun, Y. (2019). Biomaterials for bone tissue engineering scaffolds: A review. *RSC Advances*, 9(45), 26252–26262. <https://doi.org/10.1039/c9ra05214c>
- Mochane, M. J., Motsoeneng, T. S., Sadiku, E. R., Mokheba, T. C., Se-fadi, J. S. (2019). Morphology and properties of electrospun PCL and its composites for medical applications: A mini review. *Applied Sciences (Switzerland)*, 9(11), Article 2205. <https://doi.org/10.3390/app9112205>
- Zabihzadeh Khajavi, M., Ebrahimi, A., Yousefi, M., Ahmadi, S., Farhoodi, M., Mirza Alizadeh, A. et al. (2020). Strategies for producing improved oxygen barrier materials appropriate for the food packaging sector. *Food Engineering Reviews*, 12(3), 346–363 <https://doi.org/10.1007/s12393-020-09235-y>
- Quecholac-Piña, X., Hernández-Berriel, M. C., Mañón-Salas, M. C., Espinosa-Valdemar, R.M., Vázquez-Morillas, A. (2020). Degradation of plastics under anaerobic conditions: A short review. *Polymers*, 12(1), Article 109. <https://doi.org/10.3390/polym12010109>
- Reichert, C. L., Bugnicourt, E., Coltelli, M.-B., Cinelli, P., Lazzeri, A., Cane-si, I. et al. (2020). Bio-based packaging: Materials, modifications, industrial applications and sustainability. *Polymers*, 12(7), Article 1558. <https://doi.org/10.3390/polym12071558>
- Jian, J., Xiangbin, Z., Xianbo, H. (2020). An overview on synthesis, properties and applications of poly (butylene-adipate-co-terephthalate)–PBAT. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, 3(1), 19–26. <https://doi.org/10.1016/j.aiepr.2020.01.001>
- Гарифуллина, Л. И., Ли, Н. И., Гарипов, Р. М., Миннахметова, А. К. (2019). Биоразложение полимерных пленочных материалов (обзор). *Вестник технологического университета*, 22(1), 47–53.

24. Van den Oever, M., Molenveld, K. (2017). Replacing fossil based plastic performance products by bio-based plastic products — Technical feasibility. *New Biotechnology*, 37, 48–59. <https://doi.org/10.1016/j.nbt.2016.07.007>
25. Iles, A., Martin, A. N. (2013). Expanding bioplastics production: sustainable business innovation in the chemical industry. *Journal of Cleaner Production*, 45, 38–49. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.05.008>
26. Van Der Zee, M. (2020). Methods for evaluating the biodegradability of environmentally degradable polymers. Chapter in a book: Handbook of biodegradable polymers. Smither Rapra, Shawbury, 2020. <https://doi.org/10.1515/9781501511967-001>
27. United Nations Sustainable Development. (2020). Take Action for the Sustainable Development Goals — United Nations Sustainable Development. Retrieved from <https://www.un.org/sustainabledevelopment/sustainable-development-goals>. Accessed: May 11, 2022.
28. Лоонг-Так, Л. (2011). Биоразлагаемая упаковка для пищевых продуктов. *Переработка молока*, 6(140), 61–67.
29. Kirsh, I., Frolova, Y., Bannikova, O., Beznaeva, O., Tveritnikova, I., Myalenko, D. et al. (2020). Research of the influence of the ultrasonic treatment on the melts of the polymeric compositions for the creation of packaging materials with antimicrobial properties and biodegradability. *Polymers*, 12(2), Article 275. <https://doi.org/10.3390/polym12020275>
30. Прудникова, С. В., Волова, Т. Г. (2012). Экологическая роль полигидроксикапаоатов-аналога синтетических пластмасс: закономерности биоразрушения в природной среде и взаимодействия с микроорганизмами. Красноярск: Красноярский писатель, 2012.
31. Радаева, И. А., Илларионова, Е. Е., Туровская, С. Н., Рябова, А. Е., Галстян, А. Г. (2019). Принципы обеспечения качества отечественного сухого молока. *Пищевая промышленность*, 9, 54–57. <https://doi.org/10.24411/0235-2486-2019-10145>
32. Илларионова, Е. Е., Туровская, С. Н., Радаева, И. А. (2020). К вопросу увеличения срока годности молочных консервов. *Актуальные вопросы молочной промышленности, межотраслевые технологии и системы управления качеством*, 1(1), 225–230. <https://doi.org/10.37442/978-5-6043854-1-8-2020-1-225-230>
33. Хуршудян, С. А., Пряничникова, Н. С., Рябова, А. Е. (2022). Качество и безопасность пищевых продуктов. Трансформация понятий. *Пищевая промышленность*, 3, 8–10. <https://doi.org/10.52653/PP.2022.3.3.001>
34. Федотова, О. Б. (2008). Упаковка для молока и молочных продуктов. Качество и безопасность. Москва: Россельхозакадемия.
35. Юрова, Е. А. (2020). Контроль качества и безопасности продуктов функциональной направленности на молочной основе. *Молочная промышленность*, 6, 12–15. <https://doi.org/10.31515/1019-8946-2020-06-12-15>
36. Юрова, Е. А., Фильчакова, С. А. (2019). Оценка качества и хранимостепособности молочных продуктов функциональной направленности. *Переработка молока*, 10(240), 6–11. <https://doi.org/10.33465/2222-5455-2019-10-6-10>
37. Кобзева, Т. В., Юрова, Е. А. (2016). Оценка показателей качества и идентификационных характеристик сухого молока. *Молочная промышленность*, 3, 32–35.
38. Мухатова, М. Д., Сколков, С. А., Моисеенко, М. С., Киричко, Н. А. (2018). Пищевая биоразлагаемая пленка с использованием хитозана. *Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: рыбное хозяйство*, 3, 124–131. <https://doi.org/10.24143/2073-5529-2018-3-124-131>
39. Пряничникова, Н. С. (2020). Защитные покрытия для пищевых продуктов, В сборнике: Современные достижения биотехнологии. Техника, технологии и упаковка для реализации инновационных проектов на предприятиях пищевой и биотехнологической промышленности. материалы VII Международной научно-практической конференции. Пятигорск, 2020.
40. Федотова, О. Б., Пряничникова, Н. С. (2021). Исследование изменения структуры полиэтиленового слоя упаковки, контактирующего с пищевым продуктом, при воздействии ультрафиолетового излучения. *Пищевые системы*, 4(1), 56–61. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2021-4-1-56-61>
41. Пряничникова, Н. С., Федотова, О. Б. (21 октября, 2020). Использование приемов квалитетического проектирования при создании функциональных покрытий на продуктах питания. Сборник тезисов Всероссийской с международным участием онлайн-конференции: «Современная биотехнология: актуальные вопросы, инновации и достижения». Кемерово, 2020.
42. Кубенко, Е. Г. (2014). Разработка технологии получения хитозана из гаммаруса азовского и его использование при производстве растительно-рыбных пищевых продуктов. Автореф. дис. канд. техн. наук. Краснодар: Кубанский государственный технический университет, 2014.
43. Angellier, H., Molina-Boisseau, S., Dole, P., Dufresne, A. (2006). Thermoplastic starch — waxy maize starch nanocrystals nanocomposites. *Biomacromolecules*, 7(2), 531–539. <https://doi.org/10.1021/bm050797s>
44. 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)
45. Федотова, О. Б. (2020). О биоразлагаемой упаковке и перспективе ее использования. *Молочная промышленность*, 1, 10–12. <https://doi.org/10.31515/1019-8946-2020-01-10-12>
46. Pryanichnikova, N., Fedotova, O. (November 18–20, 2021). Some aspects of creating functional coatings on dairy products. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Krasnoyarsk, Russia. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/677/3/032031>
47. Пряничникова, Н. С. (2020) Съедобная упаковка: транспорт для функциональных и биоактивных соединений. *Молочная река*, 4(80), 32–34.
48. Klemm, D., Schmauder, H. P., Heinze, T. (2001). Cellulose. Chapter in a book: Biopolymers, 6. Wiley-VCH, Weinheim, 2001.
49. Gelse, K., Pöschl, E., Aigner, T. (2003). Collagens — Structure, function, and biosynthesis. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 55(12), 1531–1546. <https://doi.org/10.1016/j.addr.2003.08.002>
50. Yoshioka, N. K., Young, G. M., Khajuria, D. K., Karuppagounder, V., Pinamont, W., Fanburg-Smith, J. C. et al. (2022). Structural changes in the collagen network of joint tissues in late stages of murine OA. *Scientific Reports*, 12(1), Article 9159. <https://doi.org/10.1016/10.1038/s41598-022-13062-y>
51. Singla, R., Mehta, R. (2012). Preparation and characterization of polylactic acid-based biodegradable blends processed under microwave radiation. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 51(10), 1014–1017. <https://doi.org/10.1080/03602559.2012.680562>
52. Briassoulis, D. (2004). An overview on the mechanical behaviour of biodegradable agricultural films. *Journal of Polymers and the Environment*, 12(2), 65–81. <https://doi.org/10.1023/B: JOOE.0000010052.86786.ef>
53. Kale, G., Auras, R., Singh, S. P. (2006). Degradation of commercial biodegradable packages under real composting and ambient exposure conditions. *Journal of Polymers and the Environment*, 14(3), 317–334. <https://doi.org/10.1007/s10924-006-0015-6>
54. Wikipedia (2021) Полилактид. Электронный ресурс: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Полилактид>. Дата доступа: 01.08.2022.
55. Tsuji, H., Ishizaka, T. (2001). Blends of aliphatic polyesters. VI. Lipase-catalyzed hydrolysis and visualized phase structure of biodegradable blends from poly (ϵ -caprolactone) and poly (l-lactide). *International Journal of Biological Macromolecules*, 29(2), 83–89. [https://doi.org/10.1016/S0141-8130\(01\)00158-1](https://doi.org/10.1016/S0141-8130(01)00158-1)
56. Woodruff, M. A., Hutmacher, D. W. (2010). The return of a forgotten polymer — Polycaprolactone in the 21st century. *Progress in Polymer Science (Oxford)*, 35(10), 1217–1256. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2010.04.002>
57. Sailema-Palate, G. P., Vidaurre, A., Campillo, A. F., Castilla-Cortázar, I. (2016). A comparative study on Poly (ϵ -caprolactone) film degradation at extreme pH values. *Polymer Degradation and Stability*, 130, 118–125. <https://doi.org/10.1016/j.polydegradstab.2016.06.005>
58. Malinová, L., Brožek, J. (2014). Ethyl magnesium bromide as an efficient anionic initiator for controlled polymerization of ϵ -caprolactone. *Polymer Bulletin*, 71(1), 111–123. <https://doi.org/10.1007/s00289-013-1048-3>
59. Limwanich, W., Meepowpan, P., Nalampang, K., Kungwan, N., Molloy, R., Punyodom, W. (2015). Kinetics and thermodynamics analysis for ring-opening polymerization of ϵ -caprolactone initiated by tributyltin n-butoxide using differential scanning calorimetry. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 119(1), 567–579. <https://doi.org/10.1007/S10973-014-4111-x>
60. Kricheldorf, H. R., Berl, M., Scharnag, N. (1988). Poly (lactones). 9. Polymerization mechanism of metal alkoxide initiated polymerizations of lactide and various lactones. *Macromolecules*, 21(2), 286–293. <https://doi.org/10.1021/ma00180a002>
61. Storey, R. F., Sherman, J. W. (2002). Kinetics and mechanism of the stannous octoate-catalyzed bulk polymerization of ϵ -caprolactone. *Macromolecules*, 35(5), 1504–1512. <https://doi.org/10.1021/ma010986c>
62. Agarwal, S. (2010). Chemistry, chances and limitations of the radical ring-opening polymerization of cyclic ketene acetals for the synthesis of degradable polyesters. *Polymer Chemistry*, 1(7), 953–964. <https://doi.org/10.1039/c0py00040j>
63. Labet, M., Thielemans, W. (2009). Synthesis of polycaprolactone: A review. *Chemical Society Reviews*, 38(12), 3484–3504. <https://doi.org/10.1039/b820162p>
64. Sarasam, A. R., Krishnaswamy, R. K., Madhally, S. V. (2006). Blending chitosan with polycaprolactone: Effects on physicochemical and antibacterial properties. *Biomacromolecules*, 7(4), 1131–1138. <https://doi.org/10.1021/bm050935d>
65. Wang, X., Zhou, J., Li, L. (2007). Multiple melting behavior of poly (butylene succinate). *European Polymer Journal*, 43(8), 3163–3170. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2007.05.013>
66. Tserki, V., Matzinos, P., Pavlidou, E., Vachliotis, D., Panayiotou, C. (2006). Biodegradable aliphatic polyesters. Part I. Properties and biodegradation of poly (butylene succinate-co-butylene adipate). *Polymer Degradation and Stability*, 91(2), 367–376. <https://doi.org/10.1016/j.polydegradstab.2005.04.035>
67. Nikolic, M. S., Djonlagic, J. (2001). Synthesis and characterization of biodegradable poly (butylene succinate-co-butylene adipate) s. *Polymer Degradation and Stability*, 74(2), 263–270. [https://doi.org/10.1016/S0141-3910\(01\)00156-2](https://doi.org/10.1016/S0141-3910(01)00156-2)
68. Wikipedia (2020). Polybutylene succinate. Retrieved from https://wiki5.ru/wiki/Polybutylene_succinate. Accessed: August 01, 2022.
69. Siracusa, V., Rocculi, P., Romani, S., Rosa, M. D. (2008). Biodegradable polymers for food packaging: a review. *Trends in Food Science and Technology*, 19(12), 634–643. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2008.07.003>

70. Pedersen, D.D., Kim, S., Wagner, W.R. (2022). Biodegradable polyurethane scaffolds in regenerative medicine: Clinical translation review. *Journal of Biomedical Materials Research — Part A*, 110(8), 1460–1487. <https://doi.org/10.1002/jbm.a.37394>
71. Javadi, A., Kramschuster, A.J., Pilla, S., Lee, J., Gong, S., Turng, L.-S. (2010). Processing and characterization of microcellular PHBV/PBAT blends. *Polymer Engineering and Science*, 50(7), Article 1440. <https://doi.org/10.1002/pen.21661>
72. Zumstein, M. T., Schintlmeister, A., Nelson, T. F., Baumgartner, R., Woebken, D., Wagner, M. et al. (2018). Biodegradation of synthetic polymers in soils: Tracking carbon into CO₂ and microbial biomass. *Science Advances*, 4(7), Article eaas9024. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aas9024>
73. Muthuraj, R., Misra, M., Mohanty, A. K. (2018). Biodegradable compatibilized polymer blends for packaging applications: A literature review. *Journal of Applied Polymer Science*, 135(24), Article 45726. <https://doi.org/10.1002/app.45726>
74. Merchan, N., Aslim, B., Yüsekdağ, Z. N., Beyatli, Y. (2002). Production of poly-b-hydroxybutyrate (PHB) by some Rhizobium bacteria. *Turkish Journal of Biology*, 26(4), 215–219.
75. Min Song, H., Chan Joo, J., Hyun Lim, S., Jin Lim, H., Lee, S., Jae Park, S. (2022) Production of polyhydroxyalkanoates containing monomers conferring amorphous and elastomeric properties from renewable resources: Current status and future perspectives. *Bioresource Technology*, 366, Article 128114. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.128114>
76. Fabra, M. J., Lopez-Rubio, A., Lagaron, J. M. (2014). Nanostructured interlayers of zein to improve the barrier properties of high barrier polyhydroxyalkanoates and other polyesters. *Journal of Food Engineering*, 127, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2013.11.022>
77. Savenkova, L., Gercberga, Z., Nikolaeva, V., Dzene, A., Bibers, I., Kalnin, M. (2000). Mechanical properties and biodegradation characteristics of PHB-based films. *Process Biochemistry*, 35(6), 573–579. [https://doi.org/10.1016/S0032-9592\(99\)00107-7](https://doi.org/10.1016/S0032-9592(99)00107-7)
78. Kim, M.-N., Lee, A.-R., Yoon, J.-S., Chin, I.-J. (2000). Biodegradation of poly(3-hydroxybutyrate), Sky-Green and Mater-Bi by fungi isolated from soils. *European Polymer Journal*, 36(8), 1677–1685. [https://doi.org/10.1016/S0014-3057\(99\)00219-0](https://doi.org/10.1016/S0014-3057(99)00219-0)
79. Выдрина, Т. С., Артёмов, А. В., Шкуро, А. Е., Кривоногов, П. С., Савиновских, А. В. (2020). Свойства древесно-полимерных композитов на основе аграрных отходов и активатора разложения. *Вестник Технологического университета*, 23(10), 25–29.
80. Vijayakumar, C. T., Chitra, R., Surender, R., Pitchaimari, G., Rajakumar, K. (2013). Development of photodegradable environment friendly polypropylene films. *Plastic and Polymer Technology*, 2(1), 22–37.
81. Directive (EU) 2019/904 (2019) of the European Parliament and of the Council of 5 June 2019 on the reduction of the impact of certain plastic products on the environment (Text with EEA relevance) // PE/11/2019/REV/1, OJ L 155, 12.6.2019, 1–19.
82. Анисков Е. (2021). Европа запретила одноразовый пластик: чего ждать в России. Электронный ресурс: <https://trends.rbc.ru/trends/green/60e829f79a794766ad12a657>. Дата доступа: 01.08.2022.
83. Ромашков, А. (2021). Россия без пластика: названы сроки полного запрета одноразовых изделий. Электронный ресурс: <https://www.bfm.ru/news/480489> Дата доступа: 01.08.2022. (In Russian)

REFERENCE

1. Boyko, A. G. (2014). RosUpack — 2014. Trends in the Russian market of flexible packaging materials. Retrieved from <https://plastinfo.ru/information/articles/473>. Accessed: August 1, 2022. (In Russian)
2. RUSTARA.RU (2015). History of plastic containers Retrieved from: <https://www.rustara.ru/articles/Istoriya-plastikovo-j-tary>. Accessed: August 1, 2022. (In Russian)
3. Beloborodova T. G. (February 09, 2017). *Actual directions of processing secondary polymeric materials into products*. Problems and prospects for the development of science and education. XXI century Proceedings of the International (correspondence) scientific and practical conference. Sofia, Bulgaria, 2017. (In Russian)
4. Decision of the Council of the Eurasian economic Commission of August 16, 2011 № 769 “On amendments to the technical regulations of the Customs Union “On the safety of packaging” (TR CU005/2011)” (as amended on October 18, 2016). Moscow, 2011. (In Russian)
5. Bioplastics Europe. (2018). Global production capacities of bioplastics 2018–2023 Retrieved from <http://www.european-bioplastics.org/news/publications> Accessed: August 1, 2022.
6. Lebreton, L., Andrady, A. (2019). Future scenarios of global plastic waste generation and disposal. *Palgrave Communications*, 1(5), Article 6. <https://doi.org/10.1057/s41599-018-0212-7>
7. Plyaskina, N. I., Kharitonova, V. N. (2016). Management in the field of solid municipal waste management: current state. *EKO*, 12, 7–21. (In Russian)
8. REO (2021). REO summed up the results of the year. Retrieved from <https://reo.ru/tpost/o5xr9caev1-reo-podvel-itogi-goda> Accessed: August 01, 2022. (In Russian)
9. Market data Archives Plastics Europe (2022). Quarterly Report Q1/2022 European plastics manufacturers (EU27) Retrieved from <https://plasticseurope.org/knowledge-hub/quarterly-report-q1-2022>. Accessed: August 01, 2022.
10. Dubrovin, N. N., Kondrat'yev, D. A., Nefedova, T. O. (December 27, 2021) *International experience in stimulating the separate collection of household waste*. Theories, schools and concepts of sustainable development of science in modern conditions. International Scientific and Practical Conference. Ufa: OMEGA SCIENCE, 2021. (In Russian)
11. Ray, S. S., Lee, H. K., Huyen, D. T. T., Chen, S.-S., Kwon, Y.-N. (2022). Microplastics waste in environment: A perspective on recycling issues from PPE kits and face masks during the COVID-19 pandemic. *Environmental Technology and Innovation*, 26, Article 102290. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.102290>
12. Prata, J. C., Silva, A. L. P., Duarte, A. C., Rocha-Santos, T. (2021). Disposable over reusable face masks: Public safety or environmental disaster? *Environments-MDPI*, 8(4), Article 31. <https://doi.org/10.3390/environments8040031>
13. Kvasninin, A. B. (2021). Features of the disposal of personal protective equipment in the conditions of the spread of COVID-19. *Innovative Science*, 10–2, 22–25. (In Russian)
14. Panfilov, B. V. (2019). World market of biopolymers. *Polymeric Materials. Products, Equipment, Technologies*, 7, 53. (In Russian)
15. Hobbs, C. E. (2019). Recent advances in bio-based flame retardant additives for synthetic polymeric materials. *Polymers*, 11(2), Article 224. <https://doi.org/10.3390/polym11020224>
16. Maraveas, C. (2020). Production of sustainable and biodegradable polymers from agricultural waste. *Polymers*, 12(5), Article 1127. <https://doi.org/10.3390/polym12051127>
17. Qu, H., Fu, H., Han, Z., Sun, Y. (2019). Biomaterials for bone tissue engineering scaffolds: A review. *RSC Advances*, 9(45), 26252–26262. <https://doi.org/10.1039/c9ra05214c>
18. Mochane, M. J., Motsoeneng, T. S., Sadiku, E. R., Mokheba, T. C., Sefadi, J. S. (2019). Morphology and properties of electrospun PCL and its composites for medical applications: A mini review. *Applied Sciences (Switzerland)*, 9(11), Article 2205. <https://doi.org/10.3390/app9112205>
19. Zabihzadeh Khajavi, M., Ebrahimi, A., Yousefi, M., Ahmadi, S., Farhoodi, M., Mirza Alizadeh, A. et al. (2020). Strategies for producing improved oxygen barrier materials appropriate for the food packaging sector. *Food Engineering Reviews*, 12(3), 346–363 <https://doi.org/10.1007/s12393-020-09235-y>
20. Quecholac-Piña, X., Hernández-Berriel, M. C., Mañón-Salas, M. C., Espinosa-Valdemar, R. M., Vázquez-Morillas, A. (2020). Degradation of plastics under anaerobic conditions: A short review. *Polymers*, 12(1), Article 109. <https://doi.org/10.3390/polym12010109>
21. Reichert, C. L., Bugnicourt, E., Coltelli, M.-B., Cinelli, P., Lazzeri, A., Camesi, I. et al. (2020). Bio-based packaging: Materials, modifications, industrial applications and sustainability. *Polymers*, 12(7), Article 1558. <https://doi.org/10.3390/polym12071558>
22. Jian, J., Xiangbin, Z., Xianbo, H. (2020). An overview on synthesis, properties and applications of poly (butylene-adipate-co-terephthalate)-PBAT. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, 3(1), 19–26. <https://doi.org/10.1016/j.aiepr.2020.01.001>
23. Garifullina, L. I., Li, N. I., Garipov, R. M., Minnakmetova, A. K. (2019). Biodegradation of polymer film materials (Review). *Herald of Technological University*, 22(1), 47–53. (In Russian)
24. Van den Oever, M., Molenveld, K. (2017). Replacing fossil based plastic performance products by bio-based plastic products — Technical feasibility. *New Biotechnology*, 37, 48–59. <https://doi.org/10.1016/j.nbt.2016.07.007>
25. Iles, A., Martin, A. N. (2013). Expanding bioplastics production: sustainable business innovation in the chemical industry. *Journal of Cleaner Production*, 45, 38–49. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.05.008>
26. Van Der Zee, M. (2020). Methods for evaluating the biodegradability of environmentally degradable polymers. Chapter in a book: Handbook of biodegradable polymers. Smither Rapra, Shawbury, 2020. <https://doi.org/10.1515/9781501511967-001>
27. United Nations Sustainable Development. (2020). Take Action for the Sustainable Development Goals — United Nations Sustainable Development. Retrieved from <https://www.un.org/sustainabledevelopment/sustainable-development-goals>. Accessed: May 11, 2022.
28. Loong-So, L. (2011). Biodegradable food packaging *Milk processing*. 6(140), 61–67. (In Russian)
29. Kirsh, I., Frolova, Y., Bannikova, O., Beznaeva, O., Tveritnikova, I., Myalenko, D. et al. (2020). Research of the influence of the ultrasonic treatment on the melts of the polymeric compositions for the creation of packaging materials with antimicrobial properties and biodegradability. *Polymers*, 12(2), Article 275. <https://doi.org/10.3390/polym12020275>
30. Prudnikova, S. V., Volova, T. G. (2012). Ecological role of polyhydroxyalkanoates — analogue of synthetic plastics: patterns of biodegradation in the natural environment and interaction with microorganisms. Krasnoyarsk: Krasnoyarsk writer, 2012.
31. Radaeva, I. A., Ilarionova, E. E., Turovskaya, S. N., Ryabova, A. E., Galstyan, A. G. (2019). Principles of domestic dry milk quality assurance. *Food Industry*, 9, 54–57. <https://doi.org/10.24411/0235-2486-2019-10145>. (In Russian)

32. Illarionova, E. E., Turovskaya, S. N., Radaeva, I. A. (2020). To the question of increasing of canned milk storage life. *Relevant Issues of the Dairy Industry, Intersectoral Technologies, and Quality Management Systems*, 1(1), 225–230. <https://doi.org/10.37442/978-5-6043854-1-8-2020-1-225-230> (In Russian)
33. Harshudyan, S. A., Pryanichnikova, N. S., Ryabova, A. E. (2022). Food quality and safety. Transformation of concepts. *Food Industry*, 3, 8–10. <https://doi.org/10.52653/PPI.2022.3.3.001> (In Russian)
34. Fedotova, O. B. (2008). Packaging for milk and dairy products. Quality and safety. Moscow: Russian Agricultural Academy, 2008. (In Russian)
35. Yurova, E. A. (2020). Quality control and safety of milk-based functional products. *Dairy Industry*, 6, 12–15. <https://doi.org/10.31515/1019-8946-2020-06-12-15> (In Russian)
36. Yurova, E. A., Filchakov, S. A. (2019). Evaluation of the quality and storage capacity of functional dairy products. *Milk Processing*, 10(240), 6–11. <https://doi.org/10.33465/2222-5455-2019-10-6-10>. (In Russian)
37. Kobzeva, T. V., Yurova, E. A. (2016). Evaluation of quality indicators and identification characteristics of milk powder. *Dairy Industry*, 3, 32–35. (In Russian)
38. Mukatova, M. D., Skolkov, S. A., Moiseenko, M. S., Kirichko, N. A. (2018). Food biodegradable film containing chitosan. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Fishing Industry*, 3, 124–131. <https://doi.org/10.24143/2073-5529-2018-3-124-131> (In Russian)
39. Pryanichnikova, N. S. (2020). *Protective coatings for food products*. In the collection: Modern achievements of biotechnology. Equipment, technologies and packaging for the implementation of innovative projects at the enterprises of the food and biotechnological industry. materials of the VII International Scientific and Practical Conference. Pyatigorsk, 2020. (In Russian)
40. Fedotova, O. B., Pryanichnikova, N. S. (2021). Research of the polyethylene packaging layer structure change in contact with a food product at exposure to ultraviolet radiation. *Food Systems*, 4(1), 56–61. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2021-4-1-56-61> (In Russian)
41. Pryanichnikova, N. S., Fedotova, O. B. (October 21, 2020). *Using qualimetric design techniques to create functional coatings on food product*. Collection of abstracts of the All-Russian online conference with international participation: Modern biotechnology: topical issues, innovations and achievements, Keverovo, 2020. (In Russian)
42. Kubenko, E. G. (2014). Development of technology for obtaining chitosan from Gammarus of Azov and its use in the production of vegetable and fish food products. Author's abstract of the dissertation for the scientific degree of Candidate of Technical Sciences. Krasnodar: Kuban State Technical University, 2014. (In Russian)
43. Angellier, H., Molina-Boisseau, S., Dole, P., Dufresne, A. (2006). Thermoplastic starch – waxy maize starch nanocrystals nanocomposites. *Biomacromolecules*, 7(2), 531–539. <https://doi.org/10.1021/bm050797s>
44. 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)
45. Fedotova, O. B. (2020). About biodegradable package and possibilities of its application. *Dairy Industry*, 1, 10–12. <https://doi.org/10.31515/1019-8946-2020-01-10-12> (In Russian)
46. Pryanichnikova, N., Fedotova, O. (November 18–20, 2020). *Some aspects of creating functional coatings on dairy products*. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Krasnoyarsk, Russia. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/677/3/032031>
47. Pryanichnikova, N. S. (2020). Edible packaging: transport for functional and bioactive compounds. *Milk River*, 4(80), 32–34. (In Russian)
48. Klemm, D., Schmauder, H. P., Heinze, T. (2001). Cellulose. Chapter in a book: Biopolymers, 6. Wiley-VCH, Weinheim, 2001.
49. Gelse, K., Pöschl, E., Aigner, T. (2003). Collagens – Structure, function, and biosynthesis. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 55(12), 1531–1546. <https://doi.org/10.1016/j.addr.2003.08.002>
50. Yoshioka, N. K., Young, G. M., Khajuria, D. K., Karuppagounder, V., Pina-mont, W., Fanburg-Smith, J. C. et al. (2022). Structural changes in the collagen network of joint tissues in late stages of murine OA. *Scientific Reports*, 12(1), Article 9159. <https://doi.org/10.1016/10.1038/s41598-022-13062-y>
51. Singla, R., Mehta, R. (2012). Preparation and characterization of polylactic acid-based biodegradable blends processed under microwave radiation. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 51(10), 1014–1017. <https://doi.org/10.1080/03602559.2012.680562>
52. Briassoulis, D. (2004). An overview on the mechanical behaviour of biodegradable agricultural films. *Journal of Polymers and the Environment*, 12(2), 65–81. <https://doi.org/10.1023/B:JOEE.0000010052.86786.ef>
53. Kale, G., Auras, R., Singh, S. P. (2006). Degradation of commercial biodegradable packages under real composting and ambient exposure conditions. *Journal of Polymers and the Environment*, 14(3), 317–334. <https://doi.org/10.1007/s10924-006-0015-6>
54. Wikipedia (2021). Polylactide. Retrieved from <https://ru.wikipedia.org/wiki/Полилактид>. Accessed: August 01, 2022. (In Russian)
55. Tsuji, H., Ishizaka, T. (2001). Blends of aliphatic polyesters. VI. Lipase-catalyzed hydrolysis and visualized phase structure of biodegradable blends from poly(ϵ -caprolactone) and poly(L-lactide). *International Journal of Biological Macromolecules*, 29(2), 83–89. [https://doi.org/10.1016/S0141-8130\(01\)00158-1](https://doi.org/10.1016/S0141-8130(01)00158-1)
56. Woodruff, M. A., Hutmacher, D. W. (2010). The return of a forgotten polymer – Polycaprolactone in the 21st century. *Progress in Polymer Science (Oxford)*, 35(10), 1217–1256. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2010.04.002>
57. Sailema-Palate, G. P., Vidaurre, A., Campillo, A. F., Castilla-Cortázar, I. (2016). A comparative study on Poly(ϵ -caprolactone) film degradation at extreme pH values. *Polymer Degradation and Stability*, 130, 118–125. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2016.06.005>
58. Malinová, L., Brožek, J. (2014). Ethyl magnesium bromide as an efficient anionic initiator for controlled polymerization of ϵ -caprolactone. *Polymer Bulletin*, 71(1), 111–123. <https://doi.org/10.1007/s00289-013-1048-3>
59. Limwanich, W., Meepowpan, P., Nalampang, K., Kungwan, N., Molloy, R., Punyodom, W. (2015). Kinetics and thermodynamics analysis for ring-opening polymerization of ϵ -caprolactone initiated by tributyltin n-butoxide using differential scanning calorimetry. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 119(1), 567–579. <https://doi.org/10.1007/S10973-014-4111-x>
60. Kricheldorf, H. R., Berl, M., Scharnagl, N. (1988). Poly (lactones). 9. Polymerization mechanism of metal alkoxide initiated polymerizations of lactide and various lactones. *Macromolecules*, 21(2), 286–293. <https://doi.org/10.1021/ma00180a002>
61. Storey, R. F., Sherman, J. W. (2002). Kinetics and mechanism of the stannous octoate-catalyzed bulk polymerization of ϵ -caprolactone. *Macromolecules*, 35(5), 1504–1512. <https://doi.org/10.1021/ma010986c>
62. Agarwal, S. (2010). Chemistry, chances and limitations of the radical ring-opening polymerization of cyclic ketene acetals for the synthesis of degradable polyesters. *Polymer Chemistry*, 1(7), 953–964. <https://doi.org/10.1039/c0py00040j>
63. Labet, M., Thielemans, W. (2009). Synthesis of polycaprolactone: A review. *Chemical Society Reviews*, 38(12), 3484–3504. <https://doi.org/10.1039/b820162p>
64. Sarasam, A. R., Krishnaswamy, R. K., Madihally, S. V. (2006). Blending chitosan with polycaprolactone: Effects on physicochemical and antibacterial properties. *Biomacromolecules*, 7(4), 1131–1138. <https://doi.org/10.1021/bm050935d>
65. Wang, X., Zhou, J., Li, L. (2007). Multiple melting behavior of poly (butylene succinate). *European Polymer Journal*, 43(8), 3163–3170. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2007.05.013>
66. Tserki, V., Matzinos, P., Pavlidou, E., Vachliotis, D., Panayiotou, C. (2006). Biodegradable aliphatic polyesters. Part I. Properties and biodegradation of poly (butylene succinate-co-butylene adipate). *Polymer Degradation and Stability*, 91(2), 367–376. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2005.04.035>
67. Nikolic, M. S., Djonlagic, J. (2001). Synthesis and characterization of biodegradable poly (butylene succinate-co-butylene adipate) s. *Polymer Degradation and Stability*, 74(2), 263–270. [https://doi.org/10.1016/S0141-3910\(01\)00156-2](https://doi.org/10.1016/S0141-3910(01)00156-2)
68. Wikipedia (2020) Polybutylene succinate. Retrieved from https://wiki5.ru/wiki/Polybutylene_succinate. Accessed: August 01, 2022.
69. Siracusa, V., Rocculi, P., Romani, S., Rosa, M. D. (2008). Biodegradable polymers for food packaging: a review. *Trends in Food Science and Technology*, 19(12), 634–643. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2008.07.003>
70. Pedersen, D. D., Kim, S., Wagner, W. R. (2022). Biodegradable polyurethane scaffolds in regenerative medicine: Clinical translation review. *Journal of Biomedical Materials Research – Part A*, 110(8), 1460–1487. <https://doi.org/10.1002/jbm.a.37394>
71. Javadi, A., Kramschuster, A. J., Pilla, S., Lee, J., Gong, S., Turng, L.-S. (2010). Processing and characterization of microcellular PHBV/PBAT blends. *Polymer Engineering and Science*, 50(7), Article 1440. <https://doi.org/10.1002/pen.21661>
72. Zumstein, M. T., Schintmeister, A., Nelson, T. F., Baumgartner, R., Woebken, D., Wagner, M. et al. (2018). Biodegradation of synthetic polymers in soils: Tracking carbon into CO₂ and microbial biomass. *Science Advances*, 4(7), Article eaas9024. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aas9024>
73. Muthuraj, R., Misra, M., Mohanty, A. K. (2018). Biodegradable compatibilized polymer blends for packaging applications: A literature review. *Journal of Applied Polymer Science*, 135(24), Article 45726. <https://doi.org/10.1002/app.45726>
74. Merchan, N., Aslim, B., Yükekdağ, Z. N., Beyatli, Y. (2002). Production of poly-b-hydroxybutyrate (PHB) by some Rhizobium bacteria. *Turkish Journal of Biology*, 26(4), 215–219.
75. Min Song, H., Chan Joo, J., Hyun Lim, S., Jin Lim, H., Lee, S., Jae Park, S. (2022) Production of polyhydroxyalkanoates containing monomers conferring amorphous and elastomeric properties from renewable resources: Current status and future perspectives. *Bioresource Technology*, 366, Article 128114. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.128114>
76. Fabra, M. J., Lopez-Rubio, A., Lagaron, J. M. (2014). Nanostructured interlayers of zein to improve the barrier properties of high barrier polyhydroxyalkanoates and other polyesters. *Journal of Food Engineering*, 127, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2013.11.022>
77. Savenkova, L., Gercberga, Z., Nikolaeva, V., Dzene, A., Bibers, I., Kalnin, M. (2000). Mechanical properties and biodegradation characteristics of PHB-based films. *Process Biochemistry*, 35(6), 573–579. [https://doi.org/10.1016/S0032-9592\(99\)00107-7](https://doi.org/10.1016/S0032-9592(99)00107-7)
78. Kim, M.-N., Lee, A.-R., Yoon, J.-S., Chin, I.-J. (2000). Biodegradation of poly(3-hydroxybutyrate), Sky-Green and Mater-Bi by fungi isolated from soils. *European Polymer Journal*, 36(8), 1677–1685. [https://doi.org/10.1016/S0014-3057\(99\)00219-0](https://doi.org/10.1016/S0014-3057(99)00219-0)

79. Vydrina, T. S., Shkuro, A. Ye., Artemov, A. V., Krivonogov P. S., Savinovskikh, A. V. Properties of wood-polymer composites based on agricultural waste and decomposition activator. *Herald of the Technological University*, 23(10), 25–29. (In Russian)
80. Vijayakumar, C. T., Chitra, R., Surender, R., Pitchaimari, G., Rajakumar, K. (2013). Development of photodegradable environment friendly polypropylene films. *Plastic and Polymer Technology*, 2(1), 22–37.
81. Directive (EU) 2019/904 (2019) of the European Parliament and of the Council of 5 June 2019 on the reduction of the impact of certain plastic products on the environment (Text with EEA relevance) // PE/11/2019/REV/1, OJ L 155, 12.6.2019, 1–19.
82. Aniskov, E. (2021). Europe has banned single-use plastic: what to expect in Russia. Retrieved from: <https://trends.rbc.ru/trends/green/60e829f79a794766ad12a657> Accessed: August 01, 2022. (In Russian)
83. Romashkov, A. (2021). Russia without plastic: terms for a complete ban on disposable products announced. Retrieved from: <https://www.bfm.ru/news/480489> Accessed: August 01, 2022. (In Russian)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ	AUTHOR INFORMATION
Принадлежность к организации	Affiliation
Мяленко Дмитрий Михайлович — кандидат технических наук, заведующий сектором упаковки, Всероссийский научно-исследовательский институт молочной промышленности 115093, Москва, Люсиновская, 35/7 Тел.: +7–916–854–18–24 E-mail: d_myalenko@vnimi.org ORCID: http://orcid.org/0000-0002-6342-7218	Dmitry M. Myalenko, Candidate of Technical Sciences, Head of Packaging Sector, All-Russian Research Institute of Dairy Industry 35/7, Lucinovskaya str., Moscow, Russia Tel.: +7–916–854–18–24 E-mail: d_myalenko@vnimi.org ORCID: http://orcid.org/0000-0002-6342-7218
Критерии авторства	Contribution
Автор имеет единоличное отношение к написанию рукописи и несет ответственность за плагиат.	The author has the sole responsibility for writing the manuscript and is responsible for plagiarism.
Конфликт интересов	Conflict of interest
Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.	The author declare no conflict of interest.