

УДК 658.567.1:678

<https://doi.org/10.62595/1819-5245-2024-4-28-42>

## ПРОБЛЕМЫ УТИЛИЗАЦИИ БЫТОВЫХ ПОЛИМЕРНЫХ ОТХОДОВ: ТЕХНОЛОГИЯ И ЭКОЛОГИЯ. ЧАСТЬ 1. РЕЦИКЛИНГ И БИОДЕГРАДАЦИЯ (ОБЗОР)

**И. Ю. УХАРЦЕВА, С. Н. БОБРЫШЕВА, И. В. СЕЛЮКОВ**

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого»,  
Республика Беларусь*

*Представлен обзор основных способов утилизации бытовых полимерных отходов. Описаны технологии переработки отработанных пластических масс и принципы их физического и химического рециклинга. Освещены вопросы рециклинга наиболее распространенных видов высокомолекулярных соединений, используемых при производстве различных изделий. Представлена информация о развивающемся направлении утилизации полимерных отходов – создании биоразлагаемых и съедобных материалов.*

**Ключевые слова:** утилизация, полимерные отходы, технологии переработки, рециклинг, биоразлагаемые материалы.

**Для цитирования.** Ухарцева, И. Ю. Проблемы утилизации бытовых полимерных отходов: технология и экология. Ч. 1. Рециклинг и биodeградация (обзор) / И. Ю. Ухарцева, С. Н. Бобрышева, И. В. Селюков // Вестник Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого. – 2024. – № 4 (99). – С. 28–42. <https://doi.org/10.62595/1819-5245-2024-4-28-42>

## PROBLEMS OF HOUSEHOLD POLYMER WASTE DISPOSAL: TECHNOLOGY AND ECOLOGY. PART 1. RECYCLING AND BIODEGRADATION (REVIEW)

**I. YU. UHARTSEVA, S. N. BOBRY SHEVA, I. V. SELIUKOV**

*Sukhoi State Technical University of Gomel,  
the Republic of Belarus*

*Article presents an overview of the main methods of recycling household polymer waste. The technologies for processing plastics waste and the principles of their physical and chemical recycling are described. The issues of recycling the most common types of high-molecular compounds used in the production of various products are covered. Presented information describes the developing direction of recycling polymer waste – the creation of biodegradable and edible materials.*

**Keywords:** disposal, polymer waste, processing technologies, recycling, biodegradable materials.

**For citation.** Uhartseva I. Yu., Bobrysheva S. N., Seliukov I. V. Problems of household polymer waste disposal: technology and ecology. Part 1. Recycling and biodegradation (review). *Vestnik Gomel'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni P. O. Sukhogo*, 2024, no. 4 (99), pp. 28–42 (in Russian). <https://doi.org/10.62595/1819-5245-2024-4-28-42>

### Введение

Практически нет ни одной отрасли экономики, где бы ни использовались полимерные материалы, которые находят широкое применение, в первую очередь, в качестве конструкционных и упаковочных материалов. С каждым годом объемы их производства и потребления увеличиваются, а значит, постоянно увеличивается количество образующихся при этом отходов. Переработка таких отходов актуальна, с одной стороны, из-за

необходимости защиты окружающей среды, а с другой стороны, из-за возможности снижения себестоимости производства новых материалов и изделий за счет экономии такого ценного первичного сырья, как нефть [1].

На современном этапе развития производство пластических масс ежегодно возрастает в среднем на 5–6 %, а потребление на душу населения в индустриально развитых странах за последние 20 лет удвоилось, достигнув 85–90 кг/год, и эта цифра может увеличиться еще на 45–50 % [2].

Известно более 150 видов пластических масс, 30 % из них – это смеси различных полимеров. Для достижения определенных свойств, лучшей переработки в полимеры вводят различные химические добавки, ряд из них относится к токсичным материалам. Со временем эти добавки в составе потребляемых пластиков неизбежно переходят в отходы. Из всех выпускаемых полимерных материалов 41 % используется в упаковке, из этого количества 47 % расходуется на упаковку пищевых продуктов. Как компонент бытовых отходов полимеры впервые появляются в конце 60-х гг., составляя первоначально около 1 %. Сейчас упаковка из синтетических полимеров составляет 40 % бытового мусора и ее использование сопряжено с образованием отходов в размере 40–50 кг/год в расчете на одного человека. Отходы упаковки составляют более 140,5 тыс. т, из них 32 % изготовлены из неперерабатываемых и трудноперерабатываемых материалов.

Цель исследования – анализ мировых разработок в области технологии утилизации полимерных бытовых отходов и создания новых перспективных экологически безопасных материалов.

#### **Технологии переработки полимерных отходов**

Основной путь использования отходов пластмасс – это их утилизация, в процессе которой капитальные и эксплуатационные затраты по основным способам утилизации отходов не превышают, а в ряде случаев даже ниже затрат на их уничтожение. В процессе утилизации получается дополнительное количество полезных продуктов для различных отраслей народного хозяйства и не происходит повторного загрязнения окружающей среды. По этим причинам утилизация является не только экономически целесообразным, но и экологически предпочтительным решением проблемы использования полимерных отходов [2].

До недавнего времени важнейшим способом решения проблемы полимерных отходов было их захоронение, заключающееся в вывозе на специально оборудованные, а чаще всего «дикие» свалки отходов полимеров или сброс их в море.

Во-первых, постоянно возрастающий объем производства пластмасс приводит к необходимости утилизации все большего количества отходов, а значит, требуется отчуждать все большие площади под свалки.

Во-вторых, крупнотоннажные полимеры практически не разлагаются микроорганизмами и обладают высокой стойкостью к воздействию окружающей среды (влаги, колебания температур, солнечная радиация), т. е. период их разложения в естественных условиях необычайно велик.

В-третьих, в условиях длительного хранения из полимеров могут мигрировать в окружающую среду различные токсичные вещества – продукты распада, мономеры, пластификаторы и т. д. (табл. 1).

Таблица 1

## Вещества, способные мигрировать из полимеров в окружающую среду [3]

Полимер	Мигрирующие вещества
Полиэтилен низкой плотности (высокого давления)(ПЭНП)	Низкомолекулярные предельные и непредельные углеводороды
Полиэтилен высокой плотности низкого давления (ПЭВП)	Остатки комплексных металлоорганических катализаторов (соединения хрома, титана, алюминия, ванадия) и растворителя (метанол)
Полипропилен (ПП)	Непредельные углеводороды, формальдегид, метанол, остатки металлоорганических катализаторов
Полистирол (ПС)	Мономеры (стирол, а-метил-стирол), добавки (пластификаторы, смазки, наполнители, красители), побочные примеси (этилбензол, изопрропилбензол)
Поливинилхлорид (ПВХ)	Мономер (винилхлорид), стабилизаторы (оловоорганические соединения, бариево-кадмиевые и свинцовые соли жирных кислот, кальциевые, цинковые и стронциевые мыла, эфиры р-амино-кртоновой кислоты), пластификаторы (диоктиладипинат, диоктилфталат, дибутилсебацинат), продукты старения (хлороводород)
Политетрафторэтилен (ПТФЭ)	Фторорганические соединения, не вошедшие в реакцию полимеризации, продукты деструкции фторполимеров
Поливинилацетат (ПВА)	Мономер (винилацетат)
Полиамиды (ПА)	Мономер (ε-капролактam) (в значительных количествах), олигомеры (димеры и тримеры)
Полиэтилентерефталат (ПЭТФ)	Остатки катализатора переэтерификации (смесь ацетатов кальция цинка и марганца)
Полиуретаны (ПУ)	Порообразователи, активаторы, растворители, антипирены (трихлорэтилфосфат, трикрезилфосфат)

Одним из наиболее простых способов ликвидации пластмассовых отходов является их сжигание. Однако сжигание некоторых видов полимеров сопровождается образованием токсичных газов: хлорида водорода, оксидов азота, аммиака, цианистых соединений и значительным расходом кислорода воздуха. Следовательно, необходимо проводить комплекс мероприятий по защите атмосферного воздуха от выбросов токсичных газов, образующихся при сжигании полимерных отходов. Для снижения содержания вредных газов в продуктах сгорания отходов предлагается два способа: абсорбция путем растворения газообразных составляющих в жидкой фазе и сухая очистка дыма с обеспечением достаточного контакта с необходимым для горения мусора воздухом. Особое внимание уделено очистке продуктов от хлористого водорода [4].

Важной проблемой для полимерной промышленности является рециклинг бывших в употреблении пластмасс. Начиная с 2016 г. вопросы рециклинга пластмасс становятся все более актуальными. Благодаря высокой стойкости к воздействию окружающей среды данные материалы сохраняются в естественных условиях в течение длительного времени [5].

Актуальность этой темы также связана с существующими на протяжении десятилетий такими проблемами вторичной переработки, как недостаточная полнота сбора и трудности сортировки полимерных отходов, малые объемы производства стабильного

по качеству полимерного рециклята, а также высокие затраты на эти процессы. Кроме того, существует необходимость производства высококачественного рециклята. Переработчики стремятся реализовать возможности этого вторичного сырья в замкнутом цикле, а потребитель требует более экологичной продукции [6].

С точки зрения влияния на окружающую среду рециклинг полимерных отходов может рассматриваться как важный экономический фактор, поскольку энергия и материалы поступают в повторное использование. Это позволяет сократить использование естественных ресурсов, снизить выбросы в окружающую среду, уменьшить потребление энергии и, кроме того, дает экономическую выгоду, при этом необходимо, чтобы техника вторичной переработки позволяла получать чистый и дешевый продукт (энергию или материалы), ведь в 2015 г. страны-члены ООН утвердили «Повестку в области устойчивого развития на период до 2030 г.». Документ включает стратегию развития с целью повысить благосостояние людей и сберечь природные ресурсы [7].

В целом рециклинг полимерных отходов определяется тремя основными аспектами [8]:

– организационно-правовой аспект, где наиболее важным представляется организация сбора и сортировки бытовых отходов, а также законодательные акты, стимулирующие работу с утилизацией отходов, как для населения, так и для промышленных предприятий;

– технико-технологический аспект, включающий аппаратно-технологическое обеспечение процесса рециклинга и совершенствование свойств изделий на основе отходов. Это одно из основных направлений в использовании отходов полимерных материалов, в особенности разнородных, которые присущи для твердых бытовых отходов. В то же время для получения из них изделий функционального назначения с приемлемыми эксплуатационными характеристиками необходима разработка специализированных добавок, обеспечивающих совместимость компонентов смеси и формирование однородной структуры конечного продукта;

– эколого-экономический аспект – выбор ассортимента изделий из вторичного сырья для его рационального использования в различных областях народного хозяйства, снижение себестоимости вторичного сырья и обеспечение экологической безопасности.

В мире предлагаются и разрабатываются различные стратегии вторичной переработки. Наибольший прогресс достигнут в механической и химической переработке, хотя они различаются по степени распространенности, по своим достоинствам и недостаткам.

Механическая переработка с помощью соответствующих установок обеспечивает простое вторичное использование тех же самых материалов с учетом некоторых потерь в их свойствах [9]. Среди отходов, которые успешно перерабатываются термомеханическими способами, можно назвать отходы полиолефинов, полистирола, АБС-пластика, вспененного полиуретана (ПУ), полиамида (ПА), полиэтилентерефталата (ПЭТ), лавсановые пленочные отходы, отходы поливинилхлорида (ПВХ) (кроме винипласта и сополимеров ПВХ с винилацетатом). Достаточно хорошо перерабатываются и некоторые отходы полиэтилена [10].

Наиболее эффективным способом утилизации отходов полиолефинов является их повторное использование. Наиболее просто перерабатываются технологические отходы и отходы потребления из таких полимеров, поскольку, с одной стороны, изделия, изготавливаемые из этих полимеров, не претерпевают значительных воздействий вследствие своей конструкции и назначения (толстостенные детали, тара, фурнитура и т. д.), а с другой – исходные полимеры более устойчивы к воздействию атмосферных факторов. Такие отходы перед повторным использованием нуждаются только в измельчении и гранулировании [11]. Вторичное сырье из полиолефинов с целью улучшения качества и повышения срока службы изделий из него подвергают модифицированию.

Бытовые отходы полистирола включают в себя вышедшие из употребления изделия из данного полимера и его сополимеров (хлебницы, вазы, сырницы, различная посуда, решетки, банки, вешалки, облицовочные листы и т. д.). Вторичное использование полистирольных пластиков может включать их утилизацию литьем под давлением, экструзией и прессованием. Переработанные отходы можно добавлять к первичному полистиролу или использовать в качестве самостоятельного сырья при производстве различных изделий. Кроме того, возможность присоединения к бензольному кольцу полистирола ионогенных групп позволяет получать на его основе иониты.

К основным бытовым отходам из полиэтилентерефталата относятся:

- изделия для бытовых целей населения, потерявшие потребительские свойства: одежда и техника;
- использованные ПЭТ-бутылки для различных напитков;
- отходы материала для армирования автомобильных шин; транспортные ленты, шланги высокого давления, потерявшие потребительские свойства, и отходы прочих резинотехнических изделий; отходы фото-, кино- и рентгеновских пленок, магнитных лент; отходы гибких – «флоппи» – дисков и др.

При этом ПЭТ является ценным вторичным сырьем в производстве упаковочной тары, текстильной промышленности [12], изготовлении строительных и декоративных материалов. Измельченная ПЭТ-тара является сырьем для современных экологически безопасных утеплителей и шумоизоляционных материалов [13].

Отходы ПА образуются в основном при производстве и переработке в изделия волокон (капрон и амид), а также вышедших из употребления изделий из данного полимера. Так как ПА – дорогостоящий материал, обладающий рядом ценных химических и физико-механических свойств, рациональное использование его отходов приобретает особую важность.

Механические способы переработки отходов ПА – включают измельчение и различные приемы и методы, используемые в текстильной промышленности для получения изделий с волокнистой структурой. При измельчении слитков ленты и щетины получают порошкообразные материалы и крошку для литья под давлением. Отходы волокон и щетины используют для производства рыболовной лесы, мочалок, сумочек и др., однако при этом требуются значительные затраты ручного труда.

Наиболее перспективным из механических методов переработки отходов ПА является производство нетканых материалов, напольных покрытий и штапельных тканей [2].

Хотя механические методы отличаются высокой производительностью и низкой стоимостью разделения, к их недостаткам следует отнести невозможность разделения полимеров с одинаковой или близкой плотностью, недостаточную селективность, необходимость очистки больших количеств воды.

Сущность химического рециклинга состоит в разрушении макромолекул полимера под действием различных реагентов. Первую группу методов химического рециклинга составляют так называемые процессы сольволиза под действием спиртов, щелочей, кислот или аминов, которые обратны реакции поликонденсации таких полимеров, как ПЭТ, ПА, поликарбонат (ПК) и ПУ. В результате такого процесса образуются мономеры, которые можно использовать в качестве сырья для синтеза исходного полимера. Эти методы химического рециклинга в настоящее время становятся все более актуальными и востребованными в связи с увеличением спроса на высококачественные полимерные рецикляты. Так, компания Aquafil S.p.A. (Италия) в 2019 г. сдала в эксплуатацию в США установку по химическому рециклингу полиамида ПА 6 из старых ковровых покрытий. Консорциум Demeto разрабатывает масштабное производство этиленгликоля и терефталата на основе гидролиза отходов ПЭТ с использованием нагрева в микроволновой печи.

Технологии и услуги для химической переработки отходов пенополиуретана (ППУ) предлагает, например, фирма Rampf Eco Solutions GmbH & Co. KG [ 6].

Вторая группа методов химического рециклинга основана на термолитических процессах (пиролиз, термокатализ, гидрокатализ и газифицирование), которые протекают при температурах выше 300 °С и являются предпочтительными для переработки богатых полиолефинами отходов и углеводородных смесей. Пиролизные и термокаталитические процессы протекают в среде инертного газа, причем использование специальных катализаторов позволяет сузить сложный спектр продуктов пиролиза.

В зависимости от особенностей протекания термической деструкции существуют три направления использования пиролиза для утилизации полимерных отходов:

- с целью получения исходных мономеров (к таким полиимерам относятся полиметилметакрилат, политетрафторэтилен, полистирол, поли-*о*-метилстирол и др.);
- с целью получения топлива для получения рабочего водяного пара (к таким полимерам относятся полиолефины, эластомеры и др., а также смеси полимеров);
- с целью получения специфических продуктов (из продуктов пиролиза полиэтилена получают низкомолекулярные воски, жирные кислоты и спирты и т. д., из продуктов пиролиза ПВХ – соляную кислоту и соединения ароматического ряда, из продуктов пиролиза поливинилацетата (ПВА) и поливинилового спирта (ПВС) – высокоактивный углерод и т. д.

Жидкие продукты используются для получения теплоносителей, воскообразные продукты – для получения компонентов различного рода защитных составов, смазок, эмульсий, пропиточных материалов и др. [14].

Фирма Ineos Styrolution Köln GmbH (Германия) разработала пиролиз полистирола (ПС) с получением в специальных условиях мономеров стирола с мощностью до 100 т отходов ПС в сутки.

При химическом рециклинге ПЭТ методами гликолиза и аминлиза возможно получать полезные продукты, которые могут быть использованы как в качестве самостоятельных связующих (ненасыщенные полиэфирные смолы), так и в качестве эффективных модификаторов, повышающих физико-механические и эксплуатационные свойства уже хорошо зарекомендовавших себя полимерных материалов. Модифицирование полимерных материалов продуктами химического рециклинга ПЭТ может привести к росту их эксплуатационных характеристик до пяти раз [15, 16].

Физико-химические методы переработки отходов ПА заключаются в использовании деполимеризации:

- с целью получения мономеров, пригодных для производства волокна и олигомеров с последующим их использованием в производстве клеев, лаков и других продуктов;
- для повторного плавления отходов с целью получения гранулята и изделий экструзией и литьем под давлением;
- для переосаждения из растворов с получением порошков для нанесения покрытий;
- для химической модификации в производстве материалов с новыми свойствами (получение лаков, клеев и т. д.);
- при получении композиционных материалов [2].

Разработка и промышленное внедрение процессов переработки изношенных изделий из капронового волокна (чулочно-носочных, сетчатых материалов и др.) во вторичные материалы позволит достичь экономии значительного количества исходного сырья и направить его в наиболее эффективные области применения.

Важным подходом к рециклингу является разработка методов вторичной переработки смесей полимеров без их разделения на индивидуальные типы или отходы многослойных упаковочных материалов. Одна из таких технологий основана на способности

полиэтилена переходить в жидкое состояние при более низких температурах, чем остальные пластмассы. Однако материалы, полученные таким образом, могут использоваться только для производства изделий, к эксплуатационным свойствам которых не предъявляются строгие требования (упаковка для мебели, материал для полов в нежилых помещениях и т. д.).

При рециклинге таких материалов возникает ряд проблем:

– при большом числе способов соединения слоев невозможно переработать такие материалы по одинаковой технологии, так как для каждого типа упаковки необходим отдельный метод переработки, позволяющий разделить слои или хотя бы сепарировать по типам;

– наличие большого количества типов пленок, которые имеют разную толщину, плотность, наполнение и существенно отличаются по своим физико-химическим свойствам.

С экономической точки зрения разделение многослойных материалов очень дорогой процесс, а надежность получения их составляющих стопроцентной чистоты практически невозможна [17].

Способы переработки многослойных упаковочных материалов заключаются в следующем [10]:

1. *Расслоение многослойной упаковки и сепарация полученных полимеров.* Наиболее приемлемым способом, позволяющим разделить полимеры, является химическое взаимодействие на многослойную композицию подбором органического растворителя с определенными требованиями (не должен растворять сепарируемые полимеры, быть доступным и нетоксичным, растворять клеи, используемые для соединения слоев полимера и т. д.).

2. *Прессование под давлением.* Поскольку расслоение и сепарация многослойных полимерных отходов не является высокорентабельной технологией, целесообразно использовать их в смеси с другими полимерами, что дает возможность получения материалов с широким диапазоном свойств методом прессования.

3. *Сжигание многослойных полимерных отходов.* Для выделения основной массы пленочных отходов из общего объема отходов применяют воздушную сепарацию. Под действием воздуха полимерные материалы выдуваются как наиболее легкие и обладающие хорошей парусностью. Вместе с ними также происходит отделение некоторого количества бумаги. Собранная полимерная фракция сжигается в специальной печи, что способствует решению проблемы уменьшения объема отходов и ликвидации полимерной пленочной составляющей [2, 10].

4. *Биодеградация.* Изготовление био- и фотодеструктурируемых многослойных упаковочных материалов является наиболее перспективным решением проблемы их переработки в плане сокращения длительного воздействия на окружающую среду. Переработка отходов такой упаковки предусмотрена на стадии изготовления исходного материала.

На всех видах полимерных материалов ставится знак рециклирования (табл. 2). Наиболее часто используемым видам пластмасс были присвоены числа 1–6. Код 7 – прочие пластмассы – был введен для США, в которых законодательство требовало обязательной маркировки. В 2010 г. эти коды стали стандартом *ASTMD7611/D7-611M, Standard Practice for Coding Plastic Manufactured Articles for Resin Identification* [18].

Быстрым способом уничтожения полимерных отходов может быть их радиационная обработка с применением гамма-излучения, нейтронов и бета-частиц, энергия которых в значительной степени превышает энергию химических связей в макромолекулах. При радиодеструкции полимеров образуются низкомолекулярные и олигомерные свободные радикалы, которые легко взаимодействуют с кислородом воздуха, инициируя цепные реакции, приводящие к фото- и термоокислительной деструкции полимера [19].

Таблица 2

## Знаки рециклирования упаковочных материалов из полимеров [18]

Обозначение знака	Содержание знака
	PETE или ПЭТ – полиэтилентерефталат очень хорошо поддается переработке и вторичному использованию. Переработка: осуществляется механическими (измельчение) и физико-химическими методами. Из продуктов вторичной переработки можно производить самую различную продукцию, в том числе выработать бутылки из переработанного ПЭТ
	HDPE или ПЭВП – полиэтилен высокой плотности (низкого давления). ПЭВП очень хорошо поддается переработке и вторичному использованию. Переработка: HDPE-мусор измельчают в специальных дробилках, гранулируют, после чего гранулы снова переплавляют в различные изделия
	PVC или ПВХ – поливинилхлорид, винил. Переработка: литье под давлением, прессование, экструзия, каландрование
	LDPE или ПЭНП – полиэтилен низкой плотности (высокого давления). Переработка: измельчение LDPE-изделий и с последующим гранулированием
	PP или ПП – полипропилен. Переработка: литье под давлением, прессование, экструзия
	PS или ПС – полистирол. Переработка: экструдирование с последующим дроблением и гранулированием
	OTHER или ДРУГИЕ. Смесь различных пластиков или полимеры, не указанных выше. Упаковка, промаркированная этим цифровым кодом, не поддается вторичной переработке и отправляется после использования на свалку или в печь мусоросжигательного завода

В последние десятилетия во всем мире активно развиваются технологии синтеза биоразлагаемых полимеров [20–22]. Биоразлагаемый пластик имеет ряд преимуществ перед обычным пластиком. Он может снизить объем отходов на свалках, уменьшить выбросы парниковых газов и сэкономить энергию при производстве. Он также может быть использован для создания упаковки, одежды, игрушек, медицинских имплантатов и даже 3D-печати [23]. Крупнейшими мировыми фирмами-производителями биоразлагаемых полимеров являются: *Novamont (MaterBi)* (Италия), *Biologische Verpackungs systeme* (Германия), *Fatra (Ecofol)* (Чехия), *Research Development* (Япония), *Tubize Plastics (Bioceta)* (Франция), *CargillInc* (США) и др. [24].

Биопластики составляют примерно 1 % от 335 млн тонн полимеров, производимых ежегодно, а глобальные производственные мощности по выпуску биопластиков в 2023 г. увеличились до 2,62 млн т (рис. 1) [25]. Стремительно наращивают производственные мощности по производству биоразлагаемых полимеров и страны Азиатско-Тихоокеанского региона. На долю этих стран приходится 37 % рынка таких материалов. Например, Китай к 2030 г. планирует произвести 1 млн т биоразлагаемого пластика и еще



1 млн т переработанного пластика, а также переработать 1 млн т пластиковых отходов [26]. В Республике Беларусь разработка технологий таких полимеров находится в начале становления.

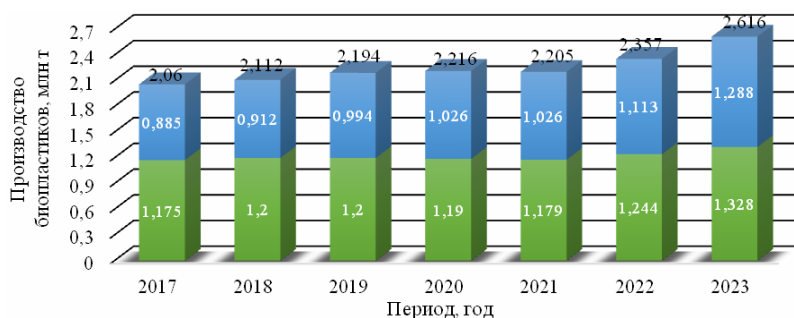


Рис. 1. Глобальные производственные мощности биопластиков в 2017–2023 гг. [25]:  
■ – на основе биосырья/не биоразлагаемые; ■ – биоразлагаемые

Основой для изготовления биоразлагаемых полимерных материалов, например, упаковки может служить различное сырье (рис. 2).

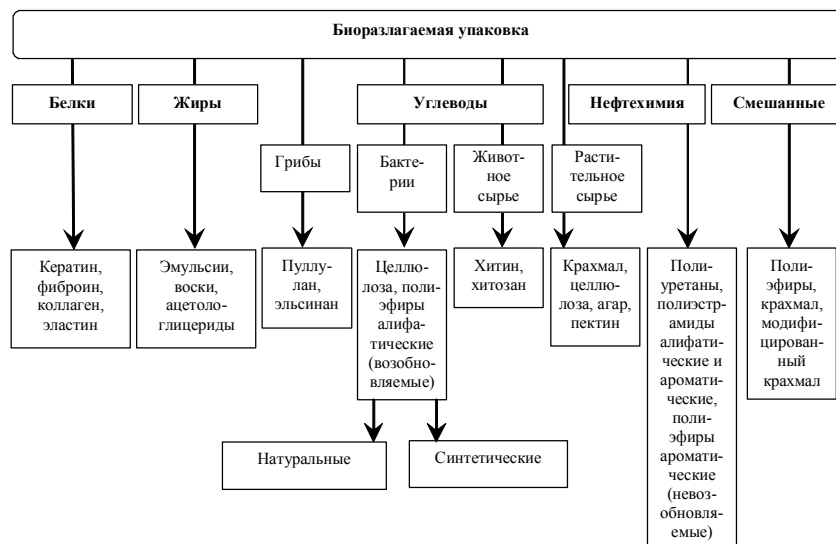


Рис. 2. Классификация биоразлагаемых упаковочных материалов [27]

Преимущество биоразлагаемых полимеров заключается в том, что они разлагаются на натуральные компоненты и поэтому многие из них не требуют отдельного сбора, сортировки. Полностью натуральное разложение позволяет материалам-биопластикам участвовать в природном цикле [5, 25, 27].

Однако некоторые из них требуют в отличие от других полимерных изделий отдельного сбора и сортировки, так как перерабатываются на специализированных предприятиях – компостных фабриках и полигонах. Например, для биоразложения полилактида требуется компост с температурой 60 °С и влажностью 60 %. В связи с тем, что биопластики внешне зачастую не отличимы от традиционных, они могут загрязнять их при вторичной переработке и необратимо менять их характеристики в худшую сторону. На полигонах и на поверхности почвы они тоже плохо деградируют и к тому же под горами бытовых отходов на свалках в отсутствие доступа кислорода выделяют вредный и опасный метан. В связи с этим в ряде стран уже установлены отдельные контейнеры для сбора использованных изделий из биоразлагаемых полимеров [23].

В последние десятилетия в качестве упаковочных материалов используют оксоразлагаемые пластики, содержащие специальные добавки, ускоряющие их распад на фрагменты под действием света и кислорода, которые в дальнейшем деструктируют под воздействием микроорганизмов. Однако нет подтверждений того, что впоследствии такой пластик полностью и в разумные сроки разложится в условиях свалок, в открытой среде или воде. По этой причине директива Европейского Парламента и Совета ЕС 2019/904 накладывает запрет на оксоразлагаемые полимеры, в составе которых есть добавки, приводящие к разрушению изделия без деструкции полимерной структуры. По мнению ряда ученых, международных и правительственных организаций, промышленных ассоциаций производителей пластика, переработчиков и других экспертов, оксоразлагаемый пластик не является решением проблемы загрязнения окружающей среды и не подходит для длительного использования и переработки [25].

На территории Республики Беларусь с 1 сентября 2019 г. действует межгосударственный стандарт ЕАЭС ГОСТ 34281 «Оксобioresлагаемая упаковка. Метод оценки оксобioresдеградации полимерных пленок» [29]. Для идентификации оксо- иioresioresлагаемых полимеров в Беларуси планируется к концу 2025 г. создать лабораторию по их испытанию.

Единственным видом бытовых отходов, которые не нуждаются в индивидуальном сборе и особых условиях утилизации, являетсяioresioresлагаемая съедобная упаковка. В качестве такой используют пленки покрытия и листы толщиной около 250 мкм, а также пакеты, мягкие гелевые капсулы и твердые покрытия на таблетках, которые изготавливают из пищевых полимеров [30–35].

В качестве пленкообразующей основы съедобных покрытий используют природные полимеры: производные крахмала, желатина и целлюлозы, альгинаты натрия и кальция, выделенные из бурых морских водорослей. Такие покрытия предотвращают потерю влаги, контролируют обмен кислорода и углекислого газа, придают упакованному продукту формоустойчивость, обеспечивают его качество и сохранение важных компонентов [36].

Съедобные пленки на основе природных полимеров обладают высокой сорбционной способностью и при попадании в организм способны выводить ионы металлов, радионуклиды и другие вредные соединения, выступая в роли детоксиканта. При введении в съедобную полимерную оболочку ароматизаторов и красителей такие материалы могут регулировать вкусо-ароматические свойства собственно пищевого продукта, изменять сенсорное его восприятие потребителем. Это особенно важно при приеме продуктов, например, с пониженным содержанием жира, сахара или с добавлением растительного белка. Съедобная пленка способна удерживать различные соединения и обогащать продукты питания необходимыми минеральными веществами и микроэлементами, витаминами и другими полезными для организма человека компонентами. Кроме того, съедобные упаковки упрощают процесс питания, так как не надо открывать упаковку, что уменьшает потери содержимого [36, 37].

Съедобные пленки активно разрабатываются и белорусскими учеными. Так, сотрудники ОАО «Борисовский завод полимерной тары «Полимиз» совместно с учеными БГУ предложили съедобную пленку из крахмала и пищевых полимеров на основе воды. Она не только увеличивает срок хранения продуктов и улучшает их потребительские свойства, но и отлично усваивается организмом и даже способна предупреждать ряд заболеваний [38]. Такая инициатива белорусских ученых не только позволяет экономно распоряжаться ресурсами страны, но и решает проблему сокращения количества бытовых отходов [39].

### **Заключение**

Анализ применяемых в разных странах способов утилизации полимерного мусора свидетельствует, что в технологиях обращения с отходами полимеров преобладают два

направления. Первое – утилизация использованных полимерных материалов: по возможности многоразовое применение упаковки, сжигание, пиролиз, рециклинг с получением тепловой энергии и полезных продуктов. Однако эти методы технологически сложны и дорогостоящи. Второе направление – захоронение отходов на специальных полигонах, которое приводит к значительному загрязнению окружающей среды и нанесению вреда здоровью человека. В связи с этим получила распространение инициатива полного отказа от захоронения отходов *zero-landfill*, к которой призывает и ассоциация европейских производителей пластмасс *Plastics Europe*.

Высокие требования экологической безопасности, предъявляемые к материалам, изготавливаемым из высокомолекулярных соединений, позволили предложить новые виды утилизации полимерных отходов путем их самодеструкции под действием факторов окружающей среды био-, фото- и гидродеградацией. Перспективы использования таких экологически безопасных материалов направлены на рациональное использование и сохранение природных ресурсов.

### Литература

1. Современные технологии переработки полимерных отходов и проблемы их использования / В. Н. Шахова, А. А. Воробьева, И. А. Виткалова [и др.] // Современные наукоемкие технологии. – 2016. – № 11-2. – С. 320–325. – URL: <https://top-technologies.ru/ru/article/view?id=36408> (дата доступа: 21.08.2024).
2. Утилизация и вторичная переработка тары и упаковки из полимерных материалов : учеб. пособие / А. С. Клинков, П. С. Беляев, М. В. Соколов, И. В. Шашков. – Тамбов : Тамб. гос. техн. ун-т, 2010. – 100 с.
3. Халецкий, В. А. Вопросы утилизации полимерных отходов — необходимый компонент экологического образования школьников / В. А. Халецкий // Хімія: проблеми викладання. – 1998. – № 4. – С. 14–31.
4. Базунова, М. В. Способы утилизации отходов полимеров / М. В. Базунова, Ю. А. Прочухан // Вестник Башкирского университета. – 2008. – Т. 13, № 4. – С. 875–885.
5. Утилизация упаковочных материалов как основа экологической безопасности: традиционные материалы / И. Ю. Ухарцева, Е. А. Цветкова, В. А. Гольдаде, В. М. Шаповалов // Веснік Гродзенскага дзяржаўнага ўніверсітэта імя Янкі Купалы. Серыя 6. Тэхніка. – 2022. – Т. 11, № 2. – С. 60–71.
6. Физический и химический рециклинг пластмасс в сравнении / Мартин Шлуммер, Тания Фелл, Андреас Мейерер, Геральд Альтнау // Полимерные материалы: изделия, оборудование, технологии. – URL: <https://polymerb-ranch.com/articles/fizicheskiy-i-himicheskiy-retsikling-plastmass-v-sravnenii> (дата доступа: 02.09.2024).
7. Утилизация отходов или гибель планеты? – URL: <https://p-z-o.com/statiy/-utilizaciya-othodov-ili-gibel-planety/> (дата доступа: 05.09.2024).
8. Шаповалов, В. М. Рециклинг и утилизация многокомпонентных полимерных систем на основе вторичных термопластов / В. М. Шаповалов, А. Я. Григорьев // Полимерные материалы и технологии. – 2021. – Т. 7, № 3. – С. 59–63.
9. Мантия, Ф. Ла. Вторичная переработка пластмасс / Ф. Ла Мантия (ред.) ; пер. с англ. под. ред. Г. Е. Заикова. – СПб. : Профессия, 2006. – 400 с.
10. Липик, В. Т. Рециклинг и утилизация полимерных отходов / В. Т. Липик, Н. Р. Прокопчук. – Минск : БГТУ, 2008. – 290 с.
11. Рахимов, М. А. Проблемы утилизации полимерных отходов / М. А. Рахимов, Г. М. Рахимова, Е. М. Иманов // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 8-2. – С. 331–334. – URL: <https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=34554> (дата доступа: 02.09.2024).
12. Гришанова, И. А. Исследование свойств модифицированных полимерных текстильных материалов / И. А. Гришанова, А. А. Азанова // Кирпичниковские чтения по химии

- и технологии высокомолекулярных соединений : сб. материалов юбилей. науч. шк.-конф. – Казань : Изд-во КНИТУ, 2013 – С. 22–23.
13. Анализ существующих способов утилизации и переработки отходов полимеров / Э. В. Гоголь, И. Х. Минхазетдинов, Г. И. Гумерова [и др.] // Вестник Казанского технологического университета. – 2013. – № 10. – С. 163–167. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/-n/analiz-suschestvuyuschih-sposobov-utilizatsii-i-pererabotki-othodov-polimerov> (дата доступа: 05.09.2024).
  14. Карпунин, И. И. Технология утилизации упаковки : учеб.-метод. пособие для студентов специальности 1-36 20 02 «Упаковочное производство» / И. И. Карпунин. – Минск : БНТУ, 2021. – 64 с.
  15. Панфилов, Д. А. Химический рециклинг полиэтилентерефталата как метод получения эффективных модификаторов полимерных материалов / Д. А. Панфилов // Пластические массы. – 2021. – № 7-8. – С. 25–30.
  16. Юсевич, А. И. На пути к циркулярной экономике: химический рециклинг полимерных композиционных материалов / А. И. Юсевич, Д. В. Куземкин // Нефтехимия–2019 : материалы II Междунар. науч.-техн. и инвестиц. форума по хим. технологиям и нефтегазопереработке, Минск, 16–18 сент. 2019 г. – Минск : БГТУ, 2019. – С. 36–40.
  17. Шаповалов, В. М. Многокомпонентные полимерные системы на основе вторичных материалов / В. М. Шаповалов, З. Л. Тартаковский ; под общ. ред. чл.-кор. НАН Беларуси Ю. М. Плещачевского. – Гомель : ИММС НАН Беларуси, 2003. – 262 с.
  18. Коды переработки по типам материалов. – URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/> (дата доступа: 10.09.2024).
  19. Экология и полимерная упаковка. – URL: <https://www.lenpoligraf.ru/polezno-znat/spravochnik-upakovshchika/ekologia/ekologiya-i-polimer-naaya-upakovka.php>] (дата доступа: 10.09.2024).
  20. Биоразлагаемые пластики на основе растительного сырья: разновидности, свойства, области применения (обзор) / В. М. Шаповалов, Н. С. Винидиктова., М. А. Коваленко, О. В. Конакова // Полимерные материалы и технологии. – 2024. – Т. 10, № 2. – С. 6–19. <https://doi.org/10.32864/polymmattech-2024-10-2-6-19>
  21. Воробьева, Е. В. Биоразлагаемые композиты на основе ископаемых видов сырья. Ч. I. Стратегии получения, характерные свойства и развитие рынка (обзор) / Е. В. Воробьева, А. А. Попов // Полимерные материалы и технологии. – 2022. – Т. 8, № 2. – С. 6–24. <https://doi.org/10.32864/polymmattech-2022-8-2-6-24>
  22. Воробьева, Е. В. Биоразлагаемые композиты на основе ископаемых видов сырья. Ч. II. Процесс биodeградации (обзор) / Е. В. Воробьева, А. А. Попов // Полимерные материалы и технологии. – 2023. – Т. 9, № 1. – С. 6–22. <https://doi.org/10.32864/polymmattech-2023-9-1-6-22>
  23. Биоразлагаемый пластик: решит ли он проблему мусорного загрязнения? – Режим доступа: <https://target99.by/news/ekolikbez/biorazlagaemyy-plastik-reshit-li-on-prob-lemu-musorno-go-zagryazneniya/> (дата доступа: 31.10.2024).
  24. Кржан, А. Биоразлагаемые полимеры и пластики // DocPlayer.com. – 2021. – URL: <https://docplayer.com/26988239-Biorazlagaemye-polimery-i-plastiki-andrey-krzhan.html> (дата доступа: 07.09.2024).
  25. Упаковка пищевых продуктов: материалы, технологии, экология / И. Ю. Ухарцева, В. А. Гольдаде, Е. А. Цветкова, В. М. Шаповалов ; под ред. В. А. Гольдаде. – Минск : Беларус. навука, 2023. – 286 с.
  26. В Китае увеличивается производство биоразлагаемого пластика. – URL: <https://chinaved.com/v-kitae-uvelichivaetsya-proizvodstvo-biorazlagaemogo-plastika> (дата доступа: 31.10.2024).
  27. Утилизация упаковочных материалов как основа экологической безопасности: биоразлагаемые и съедобные материалы / И. Ю. Ухарцева, Е. А. Цветкова, В. А. Гольдаде, В. М. Шаповалов // Веснік Гродзенскага дзяржаўнага ўніверсітэта імя Янкі Купалы. – Серыя 6. Тэхніка. – 2022. – Т. 12, № 1. – С. 74–89.

28. Касьянов, Г. И. Биоразрушаемая упаковка для пищевых продуктов / Г. И. Касьянов // Вестник науки и образования Северо-Запада России. – 2015. – Т. 1, № 1. – С. 112–119.
29. Попов, А. А. О стандартизации оксо-биоразлагаемости пластиков / А. А. Попов, Е. В. Воробьева // Полимерные материалы и технологии. – 2020. – Т. 60, № 3. – С. 5.
30. Съедобная упаковка – уже реальность, Продукт ВУ // Продукт. ВУ. – 2007–2021. – URL: <https://produkt.by/news/sedobnaya-upakovka-uzhe-realnost> (дата доступа: 14.05.2021).
31. Ухарцева, И. Ю. К вопросу об экологической безопасности упаковочных материалов для пищевых продуктов / И. Ю. Ухарцева, Ж. В. Кадолич // Гермес. – 2013. – № 5. – С. 67–70.
32. Гольдаде, В. А. Современные тенденции развития полимерной пленочной упаковки / В. А. Гольдаде // Полимерные материалы и технологии. – 2015. – Т. 1, № 1. – С. 65–70.
33. Съедобная упаковка – шаг в будущее. – URL: <https://flex-n-roll.ru/blog/eating/> (дата доступа: 11.09.2024).
34. Савицкая, Т. А. Съедобные полимерные пленки и покрытия: история вопроса и современное состояние (обзор) / Т. А. Савицкая // Полимерные материалы и технологии. – 2016. – Т. 2, № 2. – С. 6–36.
35. Ухарцева, И. Ю. Современные тенденции применения высокомолекулярных соединений в создании упаковочных материалов для пищевых продуктов (обзор) / И. Ю. Ухарцева // Пластические массы. – 2014. – № 9–10. – С. 57–62.
36. Ухарцева, И. Современная упаковка для пищевых продуктов / И. Ухарцева, Ж. Кадолич, Е. Цветкова // Тара и упаковка. – 2016. – № 2. – С. 18–23.
37. Шульга, О. С. Влияние желатина на свойства съедобных пленок и покрытий из картофельного крахмала / О. С. Шульга, О. А. Петруша // Полимерные материалы и технологии. – 2017. – Т. 3, № 3. – С. 64–70.
38. Ухарцева, И. Упаковка продуктов питания; тенденции и перспективы / И. Ухарцева, В. Гольдаде, Е. Цветкова. – Deutschland: LAP Lambert Academic Publishing. Omni Scriptum GmbH&Co. KG, 2019. – 251 p.
39. Биodeградируемые съедобные пищевые пленки и покрытия. – URL: <https://export.by/product/26273> (дата доступа: 12.09.2024).

## References

1. Shahova V. N., Vorobyova A. A., Vitkalova I. A., Torlova A. S., Pikalov E. S. Modern technologies of polymer waste processing and problems of their use. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii = Modern high-tech technologies*, 2016, no. 11-2, pp. 320–325. Available at: <https://top-technologies.ru/ru/article/view?id=36408> (accessed 21 August 2024) (in Russian).
2. Klinkov A. S., Belyaev P. S., Sokolov M. V., Shashkov I. V. *Recycling and recycling of containers and packaging made of polymer materials*. Tambov, Tambovskij gosudarstvennyj tehnikeskij universitet, 2010. 100 p. (in Russian).
3. Haleckij V. A. Issues of polymer waste disposal – a necessary component of environmental education of schoolchildren. *Himiya: prablemy vykladannya = Khimiya: problems laid out*, 1998, no. 4, pp. 14–31 (in Russian).
4. Bazunova M. V., Prochuhan Yu. A. Methods of recycling polymer waste. *Vestnik Bashkirskogo universiteta = Bulletin of Bashkir University*, 2008, vol. 13, no. 4, pp. 875–885 (in Russian).
5. Uhartseva I. Yu., Tsvetkova E. A., Goldade V. A., Shapovalov V. M. Disposal of packaging materials as a basis for environmental safety: traditional materials. *Vestnik Grodnenskogo gosudarstvennogo universiteta imeni Janki Kupala. Seryja 6. Tjehnika = Vestnik of Yanka Kupala State University of Grodno. Gray 6. Tehnika*, 2022, vol. 11, no. 2, pp. 60–71 (in Russian).
6. Shlummer Martin, Fell Tanya, Meyer Andreas, Gerald Altnau. Physical and chemical recycling of plastics in comparison. *Polymer materials: products, equipment, technologies*. Available at: <https://polymerbranch.com/articles/fizicheskij-i-himicheskij-retsikling-plastmass-v-sravnenii> (accessed 2 September 2024) (in Russian).

7. Waste disposal or the death of the planet? Available at: <https://p-z-o.com/statiy/utilizaciya-othodov-ili-gibel-planety/> (accessed 5 September 2024) (in Russian).
8. Shapovalov V. M., Grigor'ev A. Ya. Recycling and utilization of multicomponent polymer systems based on secondary thermoplastics. *Polimernye materialy i tekhnologii = Polymer materials and technologies*, 2021, vol. 7, no. 3, pp. 59–63 (in Russian).
9. Mantiya F. La. *Recycling of plastics*. Saint-Petersburg. Professiya Publ., 2006. 400 p. (in Russian).
10. Lipik V. T., Prokopchuk N. R. *Recycling and utilization of polymer waste*. Minsk, Belorusskij gosudarstvennyj tehnologicheskij universitet, 2008. 290 p. (in Russian).
11. Rahimov M. A., Rahimova G. M., Imanov E. M. Problems of polymer waste disposal. *Fundamental'nye issledovaniya = Fundamental research*, 2014, no. 8-2, pp. 331–334. Available at: <https://fundamental-esearch.ru/ru/article/-view?id=34554> (accessed 2 September 2024) (in Russian).
12. Grishanova I. A., Azanova A. A. Investigation of the properties of modified polymer textile materials. *Kirpichnikovskie chtenija po himii i tekhnologii vysokomolekuljarnyh soedinenij. Sbornik materialov jubilejnoj nauchnoj shkoly-konferencii* [Kirpichnikov readings on chemistry and technology of high-molecular compounds. Collection of materials of the jubilee scientific school-conference], Kazan', Kazanskij nacional'nyj issledovatel'skij tehnologicheskij universitet Publ., 2013, pp. 22–23 (in Russian).
13. Gogol' E. V., Mingazetdinov I. H., Gumerova G. I., Egorova O. S., Maltseva S. A., Grigorieva I. G., Tunakova Yu. A. Analysis of existing methods of recycling and recycling polymer waste *Vestnik Kazanskogo tehnologicheskogo universiteta = Bulletin of Kazan Technological University*, 2013, pp. 163–167. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-suschestvuyuschih-sposobov-utilizatsii-i-pererabotki-othodov-polimerov> (accessed 5 September 2024) (in Russian).
14. Karpunin I. I. *Packaging recycling technology*. Minsk, Belorusskij nacional'nyj tehnicheskij universitet, 2021. 64 p. (in Russian).
15. Panfilov D. A. Chemical recycling of polyethylene terephthalate as a method for obtaining effective modifiers of polymer materials. *Plasticheskie massy = Plastic masses*, 2021, no. 7-8, pp. 25–30 (in Russian).
16. Yusevich A. I., Kuzemkin D. V. On the way to a circular economy: chemical recycling of polymer composite materials. *Neftekhimiya – 2019: materialy II Mezhdunarodnogo nauchno-tehnicheskogo i investicionnogo foruma po himicheskim tekhnologiyam i neftegazopererabotke, Minsk, 16–18 sentyabrya 2019 g.* [Petrochemistry – 2019: materials of the II International Scientific, Technical and Investment Forum on Chemical Technologies and Oil and Gas Processing, Minsk, September 16–18, 2019]. Minsk, Belorusskij gosudarstvennyj tehnologicheskij universitet, 2019, pp. 36–40 (in Russian).
17. Shapovalov V. M., Tartakovskij Z. L. *Multicomponent polymer systems based on secondary materials*. Ed. Pleskachevskij Ju. M. Goiel', Institut mehaniki metallopolimernyh sistem NAN Belarusi, 2003. 262 p. (in Russian).
18. Codes of processing by types of materials. Available at: <https://ru.wikipedia.org/wiki/> (accessed 10 September 2024) (in Russian).
19. Ecology and polymer packaging. Available at: <https://www.lenpoligraf.ru/polezno-znat/spravochnik-upakovshchika/ekologia/ekologiya-i-polimernaya-upakovka.php> (accessed 10 October 2024) (in Russian).
20. Shapovalov V. M., Vinidiktova N. S., Kovalenko M. S., Konakova O. V. Biodegradable plastics based on plant raw materials: varieties, properties, areas of application. *Polimernye materialy i tekhnologii = Polymer materials and technologies*, 2024, vol. 10, no. 2, pp. 6–19 (in Russian). <https://doi.org/10.32864/polymmattech-2024-10-2-6-19>
21. Vorob'eva E. V., Popov A. A. Biodegradable composites based on fossil raw materials. Part I. Learning strategies, analytical communications and market development. *Polimernye materialy i tekhnologii = Polymer materials and technologies*, 2022, vol. 8, no. 2, pp. 6–24 (in Russian). <https://doi.org/10.32864/polymertech-2022-8-2-6-24>

22. Vorob'eva E. V., Popov A. A. Biodegradable composites based on fossil raw materials. Part II Breakthrough of biogradya. *Polimernye materialy i tekhnologii = Polymer materials and technologies*, 2023, vol. 9, no. 1, pp. 6–22 (in Russian) <https://doi.org/10.32864/polymer-technology-2023-9-1-6-22>
23. Biodegradable plastic: will it solve the problem of garbage pollution? Available at: <https://target99.by/news/ekolikbez/biorazlagaemyy-plastik-reshit-li-on-problemu-musornogo-zagrya-zneniya> (accessed 31 October 2024) (in Russian).
24. Krzhan A. Biodegradable polymers and plastics. *DocPlayer. com*. 2021. Available at: <https://docplayer.com/26988239-Biorazlagaemye-polimery-i-plastiki-andrey-krzhan.html> (accessed 7 September 2024) (in Russian).
25. Uhartseva I. Yu., Gol'dade V. A., Tsvetkova E. A., Shapovalov V. M. Food packaging: materials, technologies, ecology. Ed. Gol'dade V. A. Minsk, Belorusskaya navuka Publ., 2023. 286 p. (in Russian).
26. The production of biodegradable plastic is increasing in China. Available at: <https://chinaved.com/v-kitae-velichivaetsya-proizvodstvo-biorazlagaemogo-plastika> (accessed 31 October 2024) (in Russian).
27. Uhartseva I. Yu., Tsvetkova E. A., Goldade V. A., Shapovalov V. M. Utilization of packaging materials as the basis of environmental safety: biodegradable and edible materials. *Vestnik Grodnenskogo gosudarstvennogo universiteta imeni Janki Kupala. Seryja 6. Tjehnika = Vestnik of Yanka Kupala State University of Grodno. Gray 6. Tehika*, 2022, vol. 12, no. 1, pp. 74–89 (in Russian).
28. Kas'yanov G. I. Biodegradable packaging for food products. *Vestnik nauki i obrazovaniya Severo-Zapada Rossii = Bulletin of science and education of the North-West of Russia*, 2015, vol. 1, no. 1, pp. 112–119 (in Russian).
29. Popov A. A., Vorob'eva E. V. On standardization of oxo-biodegradability of plastics. *Polimernye materialy i tekhnologii = Polymer materials and technologies*, 2020, vol. 6, no. 3, p. 5 (in Russian).
30. Edible packaging is already a reality, Product BY. 2007–2021. Available at: <https://produkt.by/news/sedobnaya-upakovka-uzhe-realnost> (accessed 7 September 2024) (in Russian).
31. Uhartseva I. Yu., Kadolich Zh. V. On the issue of environmental safety of packaging materials for food. *Germes = Hermes*, 2013, no. 5, pp. 67–70 (in Russian).
32. Gol'dade V. A. Modern trends in the development of polymer film packaging. *Polimernye materialy i tekhnologii = Polymer materials and technologies*, 2015, vol. 1, no. 1, pp. 65–70 (in Russian).
33. Edible packaging is a step into the future. Available at: <https://flex-n-roll.ru/blog/eating/> (accessed 9 October 2024) (in Russian).
34. T. A. Savickaya, S"edobnye polimernye plenki i pokrytiya: istoriya voprosa i sovremennoe sostoyanie (obzor). *Polimernye materialy i tekhnologii = Polymer materials and technologies*, 2016, vol. 2, no. 2, pp. 6–36 (in Russian).
35. Uhartseva I. Yu. Modern trends in the use of high-molecular compounds in the creation of packaging materials for food. *Plasticheskie massy = Plastic masses*, 2014, no. 9-10, pp. 57–62 (in Russian).
36. Uhartseva I., Kadolich Zh., Tsvetkova E. Modern packaging for food products. *Tara i upakovka = Packaging and packaging*, 2016, no. 2, pp. 18–23 (in Russian).
37. Shul'ga O. S., Petrusha O. A. The effect of gelatin on the properties of edible films and coatings from potato starch. *Polimernye materialy i tekhnologii = Polymer materials and technologies*, 2017, vol. 3, no. 3, pp. 64–70 (in Russian).
38. Uhartseva I., Gol'dade V., Tsvetkova E. *Food packaging: trends and prospects*. Deutschland, LAP Lambert Academic Publ. Omni Scriptum GmbH&Co. KG, 2019. 251 p. (in Russian).
39. Biodegradable edible food films and coatings. Available at: <https://export.by/product/26273> (accessed 12 September 2024) (in Russian).