

## Место биodeградируемых полимеров в общем объёме производства и использования пластиков

© 2020. Г. К. Бозарова, аспирант,

А. Е. Хачатуров, д. э. н, профессор,

Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева,  
125047, Россия, г. Москва, Миусская площадь, д. 9,  
e-mail: gulnozakarimovna@yandex.ru

Статья раскрывает понятие, свойства биodeградируемых полимеров и их использование в различных отраслях промышленности. Рассмотрены различные аспекты, связанные с получением, свойствами и применением полимеров, на основе которых создаются изделия, подвергающиеся распаду под действием биологических сред. Эти полимеры находят применение в медицине в качестве имплантатов и компонентов лекарственных систем; в пищевой промышленности в качестве упаковочных материалов, отходы которых распадаются в окружающей среде. Рассмотрены механизмы биodeградации, особенности взаимодействия биodeградируемых изделий и полимеров, из которых они изготовлены, с различными биологическими средами. Рассмотрены факторы, влияющие на биodeградацию полимеров, и определены наиболее перспективные полимерные материалы, пригодные для создания биodeградируемых полимеров и использования их в медицине и пищевой промышленности.

**Ключевые слова:** биodeградируемые полимеры, полигидроксиалканоат, биосовместимость, полигидроксибутират.

## The place of biodegradable polymers in the total volume of plastics production

© 2020. G. K. Bozarova ORCID: 0000-0002-9787-5887

A. E. Khachaturov ORCID: 0000-0003-4934-6451

D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia,  
9, Miusskaya Ploshchad, Moscow, Russia, 125047,  
e-mail: gulnozakarimovna@yandex.ru

The article reveals the concept, properties of biodegradable polymers and their use in various industries. Various aspects related to the production, properties and use of polymers, on the basis of which products are created, which undergo degradation under the action of biological media, are considered. These polymers are used in medicine as implants and components of drug systems; in the food industry as packaging materials whose waste is degraded in the environment. The mechanisms of biodegradation, features of the interaction of biodegradable products and polymers from which they are made, with various biological media are considered. The factors influencing the biodegradation of polymers are considered, and the most promising polymeric materials suitable for the creation of biodegradable polymers and their use in medicine and the food industry are determined. As petrochemical plastics have been causing environmental pollution for decades, environmentally friendly alternative plastics are being considered. Polyhydroxyalkanoate (PHA) produced by microbial cells has characteristics (biocompatibility, biodegradability, non-toxicity) that make it suitable as a biodegradable plastic substance. The various forms of PHA make it suitable for a wide variety of products, from packaging materials to biomedical products.

The factors that can affect the efficiency of methods for obtaining biodegradable PHA copolymers are considered. Development of new strategic parameters for better synthesis is discussed, including consumption of cheap carbon substrates, genetic modification of PHA-producing strains, and fermentation strategies. Due to the biodegradable and biocompatible properties of PHA, they are mainly used in biomedicine, for vascular transplantation, restoration of skin tissue, liver tissue, bone tissue, cartilage tissue and as a therapeutic carrier. An interesting area of research is the development of a biodegradable and biocompatible polymer that can significantly extend the life of products while being fully biodegradable in vivo to carbon dioxide and water.

**Keywords:** biodegradable polymers, polyhydroxyalkanoate, biocompatibility, polyhydroxybutyrate.

Полимеры на сегодняшний день используются во всех областях производства и будут оставаться необходимой частью производства будущего. Они представляют большой интерес благодаря своим физико-химическим и технологическим свойствам. Эти свойства дают возможность получать на их основе технологически ценные, удовлетворяющие эксплуатационным требованиям материалы.

Полимеры – высокомолекулярные соединения с большим числом мономерных звеньев. По происхождению полимеры делятся на природные (выделяют в неизменном виде из природного сырья), искусственные (получают химическим модифицированием природных полимеров) и синтетические (синтезируются в результате химических реакций) [1].

В зависимости от способа получения полимера, в процессе синтеза используются те или иные добавки (поверхностно-активные вещества, инициаторы, ускорители распада, ингибиторы роста, коагуляторы и т. д.). Помимо этого, при переработке полимера в готовое изделие используются различные добавки для изменения конечных свойств продукта, такие как мел, оксиды металлов и др. Содержание этих добавок может достигать до 90% от массы изделия. Такая многокомпонентность в процессе эксплуатации может приводить к нежелательным выделениям из материала низкомолекулярных веществ, которые способствуют ухудшению состояния окружающей среды (ОС).

Рост зависимости экономики от природной среды сформировал новое научное направление «зелёная» экономика. Согласно теории «зелёной» экономики невозможно требовать удовлетворения бесконечно растущих потребностей при ограниченных ресурсах. Отсюда появляется необходимость поиска альтернативных, ресурсосберегающих технологий для сохранения ограниченных планетарных ресурсов будущим поколениям [2].

Поскольку объёмы пластиковых отходов растут с каждым годом, именно проблема их утилизации послужила толчком для разработки биodeградируемых полимеров. На развитие производства и применения биоразлагаемых пластиков существенное влияние оказало принятое во многих странах законодательное ограничение на использование упаковки из «обычных» пластиков. Если меры по охране ОС будут ужесточаться, а цены на нефть и газ продолжают расти, то переход к производству биоразлагаемых пластиков из возобновляемого сырья наступит гораздо быстрее [3].

Целью работы является выявление особенностей и области использования биodeградируемых полимеров для разработки технологий их производства и методов применения для защиты окружающей среды.

### Биodeградируемые полимеры

Биodeградируемые полимеры, пригодные для изготовления различных изделий, способные самопроизвольно разрушаться в результате естественных микробиологических и химических процессов, в последние десятилетия привлекают внимание учёных. Их преимуществом является возможность полного разложения в природных условиях до углекислого газа и воды, и, как следствие, отсутствие проблем с утилизацией отходов.

К недостаткам можно отнести высокую стоимость (пока в среднем 2–5 евро за 1 кг), применяемые технологии производства таких полимеров совершенно неэкологичны и требуют модификации.

В структуре потребления биodeградируемых пластиков до 75% занимает упаковка. Другими секторами потребления являются: общественное питание и фастфуд – до 9, волокна и нити – 4, медицина – 4 и агрохимия – 2% [4].

В настоящее время разработка «зелёных» полимеров ведётся по трём основным направлениям: производство биоразлагаемых полиэфиров на основе гидроксикарбоновых кислот; придание биоразлагаемости промышленно-значимым полимерам и производство пластиковых масс на основе воспроизводимых природных компонентов [5].

### Области использования биodeградируемых полимеров

Биodeградируемые полимерные изделия, применяющиеся в медицине для изготовления шовных нитей, матриц для доставки лекарств, сердечно-сосудистых, стоматологических и ортопедических имплантируемых временных крепёжных элементов, способны разлагаться в организме человека под действием ферментов с образованием нетоксичных продуктов [6].

Фактором, влияющим на биodeградацию, служит сочетание определённых характеристик изделия. Одной из таких характеристик является наличие в полимере функциональных групп (сложная эфирная, амидная, ангидридная, уретановая и др.), способных к гидролизу, в результате которого образуются

растворимые в воде продукты; большую роль играет и способность материала к сорбции воды.

Процесс биодеградации полимера является результатом химических, физических и биохимических процессов, состоящих из:

- растворения в биологической среде химически неизменного водорастворимого полимера;
- растворения в биологической среде продуктов химических и биохимических реакций, образующихся в результате изменения химического строения материала;
- ионизации имеющихся в полимере ионогенных групп;
- разрушения полимер-полимерных комплексов;
- гидролиза полимера за счёт групп, содержащихся в цепи полимера.

Биодеградация полимерного материала может протекать:

- в поверхностном диффузионно доступном для жидкой ОС слое, что приводит к биоэрозии поверхности объекта и появлению впадин;
- в объёме полимерного изделия, когда скорость проникновения жидкой биологической среды в массу изделия превышает скорость распада полимера [7].

На биодеградацию материала (изделия), кроме химического строения полимера, влияют такие факторы, как форма изделия, размер, наличие перфорации, степень пористости, наличие наполнителя (для композитов) и т. п.

Одними из первых в тканевой инженерии стали использовать биодеградируемые полимеры на основе молочной и гликолевой кислот. Матрицы на основе органических кислот легли в основу создания таких тканей, как искусственная кожа, кости, хрящи, сухожилия и мышцы. Особое место среди материалов для биоматриц-носителей занимают такие биополимеры, как коллаген, хитозан и альгинат [8].

Следует отметить, что скорость химического и ферментативного гидролиза в значительной мере зависит от строения радикалов, с которыми они связаны. Поэтому, например, изделия из полиэтилентерефталата, сложная эфирная группа которого образована алифатическим спиртом (этиленгликоль) и ароматической кислотой (терефталевая кислота), деградируют в организме медленно, и этот полимер широко используется для изготовления имплантатов, предназначенных для длительного функционирования в организме (эндопротезы сосудов, компоненты конструкции эндопротезов сердечных клапанов и др.).

С другой стороны, полимеры гидроксикарбоновых кислот (полигликолиды, полилактиды, поли-3-гидроксibuтират), сложная эфирная группа которых расположена между алифатическими фрагментами полимерной цепи, распадаются с участием химического и ферментативного гидролиза [9].

Водорастворимые изделия могут быть получены при использовании в качестве материалов для их изготовления также природных полимеров – глобулярных белков (альбумины), низкомолекулярных фракций фибриллярных белков (желатины), а также некоторых полисахаридов (декстран, соли альгиновой кислоты и карбоксиметилцеллюлозы, крахмал, мукополисахариды). В большинстве случаев водорастворимые полимеры используются для создания биодеградируемых лекарственных форм, распадающихся в организме [10].

Для крепления костных отломов широко используются клеи на основе полигликолида, полилактида, полицианокрилата. Для мягких тканей и органов используются биодеградируемые нити на основе кетгута, полигликолевой кислоты, сополимеры гликолевой и молочной кислоты, сополимер гликолида и триметилкарбоната [11, 12].

В настоящее время, помимо полилактидов, перспективными разрушаемыми биопластиками являются полиэферы алкановых кислот, так называемые полигидроксиалканоаты (ПГА) – термопластичные разрушаемые линейные полиэферы микробиологического происхождения [13]. В 1925 г. французский микробиолог Maurice Lemoigne впервые идентифицировал ПГА.

По сравнению с полилактидами, ПГА имеют ряд весьма существенных преимуществ:

1. Их производство не требует большой серии технологических этапов, а осуществляется методом прямой ферментации.
2. В качестве сырья для синтеза ПГА могут быть использованы сахара, органические кислоты, спирты, смеси  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2$ , продукты гидролиза растительного сырья, промышленные отходы производства сахара, пальмового масла.
3. Свойствами ПГА, такими как кристалличность, механическая прочность, скорость биораспада, можно управлять в процессе ферментации, меняя состав среды.
4. Полигидроксиалканоаты подвергаются переработке из различных фазовых состояний (порошки, растворы, гели, расплавы) общепринятыми методами [14].

Полигидроксиалканоаты – это полностью биodeградируемые пластики, алифатические полиэфиры, устойчивые к ультрафиолетовому облучению. Хотя эти полимеры стабильны в водной среде, они поддаются биологическому разложению в морской воде, почве, в средах компостирования и переработки отходов. В компосте при влажности 85% и температуре 20–60 °С они разлагаются на воду и углекислый газ за 7–10 недель [15].

Возможные области применения ПГА – это изготовление биоразлагаемых упаковочных материалов и формованных товаров, нетканых материалов, одноразовых салфеток, предметов личной гигиены, плёнок и волокон, водоотталкивающих покрытий для бумаги и картона [16].

После выявления у ПГА ряда полезных свойств, таких, как биodeградируемость, биосовместимость и пьезоэлектрические свойства, интерес к его получению усилился. Важнейшими соединениями ПГА являются полигидроксибутират, полигидроксивалерат и полибутилен сукцинат (PBS). Полибутилен сукцинат – это довольно новый, но многообещающий биополимер. Он синтезируется из янтарной кислоты и 1,4-бутандиола.

В 2002 г. путём реакции бутандиола и дикарбоновых кислот в атмосфере был синтезирован сополимер полибутиленсукцинат/адипат (PBSA) [17]. Реакция этерификации протекала в течение 2 ч при 190 °С, а затем добавляли активный катализатор изопропоксид титана перед реакцией дегликолизации, который проходил при температуре 220 °С.

Проведены двухстадийные реакции переэтерификации в расплаве для производства PBSA [18]. Для синтеза были использованы бутандиол, диметиладипат и диметилсукцинат с использованием  $Ti(OBu)_4$  в качестве катализатора. Был получен сополимер с молекулярной массой 73000.

Биоразлагаемые сополимеры PBSA с высокой молекулярной массой также получали из бутандиола, диметилового эфира янтарной и адипиновой кислот с включением гексаметилендиизоцианата. Реакция протекала при 140 °С в течение 1 ч в атмосфере азота [19]. Полибутилен сукцинат – это полиэстер с высокой прочностью на разрыв, в случае PBSA предел прочности на разрыв уменьшается с введением вторичного компонента (адипат).

В 2004 г. Министерство энергетики США [20] выпустило отчёт, где были приведены вещества, которые могут быть преобразованы в различные «ценные» биodeградируемые

материалы. Во главе списка стояла янтарная кислота (ЯК). Янтарная кислота является важным мономером нефтехимического или биологического сырья и может быть преобразована в широкий спектр химических веществ и полимеров.

Янтарная кислота на нефтяной или угольной основе дешевле, чем на биологической. Различие между химическим и естественным способами получения влияет не только на стоимость продукта, но и на область применения ЯК. Такие отрасли, как пищевая и фармацевтическая, предпочитают использовать ЯК, произведённую из возобновляемых источников, чтобы исключить всевозможные риски для здоровья от производственных остатков нефтехимического синтеза [21].

Янтарная кислота содержится в тканях растений и животных и играет значительную роль в дыхании (цикл Кребса). Традиционно ЯК используется как поверхностно-активное вещество, наполнитель и пенообразователь, для предотвращения коррозии и точечной коррозии металла в гальванической промышленности, как подкислитель, регулятор рН, ароматизатор в производстве продуктов питания и напитков, а также применяется в производстве фармацевтических продуктов, включая антибиотики, аминокислоты и витамины.

Распространённым методом синтеза нефтехимической ЯК является каталитическое гидрирование малеиновой кислоты или её ангидрида. Отсутствие возобновляемости и рост цен на ископаемые ресурсы ограничили использование ЯК на основе нефтехимического синтеза. Следовательно, растёт интерес к ферментативному способу её получения. В идеале ферментация должна проводиться при низком значении рН и без последующей нейтрализации, так как это увеличивает стоимость продукта.

По сравнению с химическим процессом, процесс ферментации имеет некоторые преимущества. Теоретически при ферментации сукцината расходуется 1 моль глюкозы и 2 моль  $CO_2$  превращаются в 2 моль произведённого сукцината. В процессе ферментации в результате получают те же химические вещества, что и в нефтехимическом производстве, но образуются менее токсичные отходы [22].

С другой стороны, процедуры ферментации требуют больших производственных площадей, и более длительное время идёт брожение. Кроме того, сложные этапы разделения и очистки конечного продукта приводят

к высокой стоимости производства. Чувствительность микроорганизмов и потребность в дорогих питательных веществах являются недостатками ферментативного процесса [23].

Бактерии *Escherichia coli* AFP111 используются для ферментации сахаров, полученных из древесных отходов и растений. Новый штамм *E. coli* был запатентован для производства ЯК из кукурузы [24].

Компания BioAmber разработала метод ферментации для производства ЯК, используя сырьё сельского или лесного хозяйства в качестве альтернативы нефтепродуктам [25].

### Применение крахмала как компонента биоразлагаемых полимерных материалов

Рисовая шелуха, древесная мука и крахмал являются агроматериалами, которые можно использовать в качестве наполнителей в биоразлагаемых полимерных биокомпозитах. Крахмал – это полностью биоразлагаемый, экологически чистый и недорогой материал.

Много исследовательских работ посвящено разработке смесей крахмала с синтетическими биоразлагаемыми полимерами. Эти смеси обладают рядом преимуществ [26]. Стоимость процесса смешения ниже по сравнению со стоимостью разработки новых синтетических материалов, добавление крахмальных наполнителей значительно уменьшает скорость деградации. Однако повышение содержания крахмала отрицательно влияет на прочность полимера [27].

Для получения разрушаемой бактериями водорастворимой плёнки из смеси крахмала и пектина в состав композиции вводят пластификаторы – глицерин или полиоксиэтиленгликоль. Получаемые биоразлагаемые плёнки используют в сельском хозяйстве и для упаковки.

С целью снижения себестоимости биоразлагаемых материалов бытового назначения (упаковки, плёнки для мульчирования в агротехнике, пакеты для мусора) рекомендуется использовать неочищенный крахмал, смешанный с поливиниловым спиртом (ПВС), тальком и другими веществами.

Вспененные листы, одноразовую посуду получают из композиции, содержащей гранулированный крахмал и водный раствор ПВС. Лучшие показатели: прочность, гибкость и водостойкость получены на композициях, содержащих 10–30% ПВС. Респирометрическое изучение поведения композиции

в почве показало, что смесь быстро разлагается (за одну неделю). Несмотря на то, что сам крахмал биоразлагаем, всё же для ускорения биодеградации и получения изделий с заданными свойствами в композицию наряду с крахмалом вводят и полимеры на основе полиэфира. Например, плёнка, полученная из смеси крахмала и полилактида, разлагается в компосте при 40 °С в течение семи суток [28].

Водостойкие композиции без ухудшения биоразлагаемости получают из смеси эфиров крахмала и полиоксиалкиленгликоля, в которой часть полиэтиленгликоля заменяют полиоксибутиратом с молекулярной массой 1000–10000. Биоразлагаемые подгузники, гигиенические подушечки, хорошо впитывающие жидкость, получают на основе гидрофильной композиции, содержащей деструктурированный крахмал, пропитанный сополимером этилена с виниловым спиртом и алифатическими полиэфирами. Плёнка на основе такого материала обладает высокой прочностью, сохраняет свойства при температуре 50 °С в течение 3 месяцев. Такая плёнка используется в сельском хозяйстве для мульчирования и при упаковке пищевых продуктов. Наряду с проведением научно-исследовательских работ по созданию композиций и применению крахмалосодержащих биоразлагаемых пластиков в быту, отдельные фирмы перешли к практическому использованию таких материалов. На основе крахмала фирма Biotec GmbH производит компостируемые пластиковые массы для различных областей применения:

- литевой биопласт в виде гранул для литья изделий разового назначения;
- пеноматериалы для упаковки пищевых продуктов;
- гранулы для получения компостируемых раздувных и плоских плёнок.

Высокая экологичность и способность разлагаться в компосте при 30 °С в течение 2 месяцев с образованием благоприятных для растений продуктов распада делает перспективным применение таких материалов в быту [29, 30].

В рамках программы по охране ОС чешская фирма Fatra совместно с производителями крахмала и Институтом полимеров разработала разлагающуюся при компостировании упаковочную плёнку марки Eco-fo1 на основе крахмала с полиолефином. Такая плёнка в условиях компостирования разлагается за 3–4 месяца [31].

В Томском политехническом университете учёные Научно-исследовательского центра «Физическое материаловедение и композитные материалы» получили гибридный биодеградируемый сополимер из полигидроксибутирата и полианилина для регенеративной медицины. Биодеградируемый полигидроксибутират со временем растворяется в организме и пьезоэлектрик полианилин, способный при механическом воздействии производить электрический заряд, помогает активизировать функциональные особенности клетки, стимулируя регенерацию тканей [32].

### Заключение

Анализ литературных источников по разработке биоразлагаемых полимеров за последние годы указывает на активное развитие направления производства полимеров на основе гидроксикарбоновых кислот. Наряду с полимерами, полученными на основе индивидуальных гидроксикарбоновых кислот, либо их сополимеров, обладающих гарантированной биоразлагаемостью, ведутся активные работы по использованию полиоксикарбоновых кислот в сочетании с различными синтетическими продуктами и природными полимерами в качестве инициаторов биоразлагаемости всей композиции. Последнее позволяет придать изделию свойства биодеградации, понизить его стоимость и обеспечить высокие физико-механические свойства.

Уже сегодня можно сказать, что полиэфиры на основе указанных кислот, благодаря своей способности биодеградировать, обладают огромными потенциальными возможностями в завоевании рынка тары, упаковки, разовой посуды, санитарно-гигиенических изделий, в области сельского хозяйства.

Физические свойства и скорость биоразложения материалов PBS могут варьироваться в широком диапазоне, путём сополимеризации с разными типами и различным содержанием мономеров. Дальнейшие исследования по синтезу новых биодеградируемых полимеров могут быть направлены на синтез сополимера из биодеградируемого полигидроксиалканата и термочувствительного полимера. Главное в этом вопросе – соблюдать приемлемые соотношения, обеспечивающие как потребительские свойства, так и способность к биодеградации при компостировании отслужившего изделия. Нужно подобрать такое соотношение этих полимеров, чтобы время разложения сополимера в естественных условиях уменьши-

лось, и проследить за кинетикой разложения такого полимера при разных температурах. Также можно заниматься синтезом pH чувствительного сополимера и изучить его разложение в почве при разных значениях pH.

### References

1. Kireev V.V. High molecular weight compounds. Moskva: Vysshaya shkola, 2012. P. 40–41 (in Russian).
2. Shturmin F.S., Khachaturov A.E., Bartalevich S.I. Innovative activity of modern industrial enterprises: the embodiment of approaches and axioms of the “Green” economy // *Menedzhment v Rossii i za rubezhom*. 2019. No. 5. P. 93–98 (in Russian).
3. Potapova E.V. The problem of recycling plastic waste // *Izvestiya Baykalskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2018. V. 28. No. 4. P. 535–544 (in Russian). doi: 10.17150/2500-2759.2018.28(4).535-544
4. Masanov A.Yu. Biodegradable plastics: current markets and prospects // *Vestnik khimicheskoy promyshlennosti*. 2017. No. 23. P. 63–70 (in Russian).
5. Glukhikh V.V., Shkuro A.E., Guda T.A., Stoyanov O.V. Production, properties and applications of biodegradable wood-polymer composites // *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*. 2012. No. 11. P. 75–82 (in Russian).
6. Shtilman M.I. Biodegradation of polymers // *Journal of Siberian Federal University. Biology* 2. 2015. No. 8. P. 113–130. (in Russian). doi: 10.17516/1997-1389-2015-8-2-113-130
7. Shtilman M.I. Polymers medical and biological applications. Moskva: IKTs “Akadem-kniga”, 2006. 200 p. (in Russian).
8. Volkov A.V. Synthetic biomaterials based on organic acid polymers in tissue engineering // *Kletochnaya transplantologiya i tkanevaya inzheneriya*. 2005. No. 2. P. 42–47 (in Russian).
9. Kharichkin A.S., Grekhneva E.V., Chuykova S.V. Influence of low molecular weight alcohols on the hydrolysis of polyethylene terephthalate // *Auditorium*. 2015. No. 7. P. 50–55 (in Russian).
10. Gross R.A., Kalra B. Biodegradable polymers for the environment // *Science*. 2002. V. 297 (5582). P. 803–807. doi: 10.1126/science.297.5582.803
11. Vasanthi K. Biodegradable polymers – a review // *Polymer Sciences*. 2017. No. 3. P. 1–7.
12. Nelson K.D., Romero A., Wagonner P. Technique paper for wet-spinning poly(L-lactic acid) and poly(DL-lactide-co-glycolide) monofilament fibers // *Tissue Engineering*. 2003. V. 9. No. 6. P. 1323–1330. doi: 10.1089/10763270360728233
13. Shahid S., Razzaq S., Farooq R., Nazli Z.H. Polyhydroxyalkanoates: next generation natural biomolecules and a solution for the world’s future economy // *International Journal of Biological Macromolecules*. 2020. Available online 27 October. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2020.10.187

14. Mooney B.P. The second green revolution? Production of plant-based biodegradable plastics // *Biochemical journal*. 2009. No. 5. P. 219–232. doi: 10.1042/BJ20081769
15. Prudnikova S.V., Volova T.G. The ecological role of polyhydroxyalkanoates – an analogue of synthetic plastics: patterns of biodegradation in the natural environment and interaction with microorganisms. *Krasnoyarsk: Krasnoyarskiy pisatel*, 2012. 184 p. (in Russian).
16. Voinov N.A., Volova T.G. Polyhydroxyalkanoates - biodegradable polymers of hydroxy-derived alkanolic acids: synthesis, properties, fields of application [Internet recourse] <https://medbe.ru/materials/problemy-i-metody-biotekhnologii/poligidroksialkanoaty-biorazrushaemye-polimery-gidroksiproizvodstnykh-alkanovykh-kislot-sintez-svoys/> (Accessed: 26.12.2018).
17. Ahn B.D., Kim S.Kh., Kim I.H., Yang J.S. Synthesis and characterization of biodegradable copolymers of succinic acid and adipic acid with 1,4-butanediol // *Journal of Applied Polymer Science*. 2001. V. 82. P. 2808–2826. doi: 10.1002/app.2135
18. Allsopp D., Seal K.J., Gaylarde C.C. Introduction to biodegradation. 2nd ed. Cambridge: University Press, 2004. 10 p.
19. Bastioli C. Handbook of biodegradable polymers. Italy: Rapra Technol. Limited, 2005. 552 p.
20. Top value added chemicals from biomass V. I. Results of screening for potential candidates from sugars and synthesis gas / Eds. T. Werpy, G. Petersen. Pacific Northwest National Laboratory (PNNL), National Renewable Energy Laboratory (NREL), 2004. 76 p. [Internet recourse] <https://www.nrel.gov/docs/fy04osti/35523.pdf> (Accessed: 26.09.2020).
21. Griffin G.J.L. Chemistry and technology of biodegradable polymers. New York: Chapman and Hall, 1994. 172 p.
22. Polyhydroxyalkanoates [Internet recourse] <https://ozlib.com/827452/himiya/poligidroksialkanoaty> (Accessed: 23.03.2017) (in Russian).
23. Kuznetsov A.E., Gradova N.B., Lushnikov S.V. Applied ecobiotechnology: a study guide: in 2 v. V. 1. Moskva: Binom, 2012. 629 p. (in Russian).
24. Willke T., Vorlop K.D. Industrial bioconversion of renewable resources as an alternative to conventional chemicals // *Appl Microbiol Biotechnol*. 2004. V. 66. P. 131–142. doi: 10.1007/s00253-004-1733-0
25. McKinley J.B., Vieille K., Zeikus J.G. Prospects for the production of succinate based on biological substances // *Appl. Microbiol Biotechnology*. 2007. V. 76. P. 727–740. doi: 10.1007/s00253-007-1057-y
26. Lee P.C., Lee S.Y., Hong S.H., Chang H.N. Isolation and characterization of new succinic acid producing bacterium, *Mannheimia succiniciproducens* MBEL55E from bovine rumen // *Appl Microbiol Biotechnol*. 2003. V. 58. P. 663–668. doi: 10.1007/s00253-002-0935-6
27. Du C., Lin S.K.C., Koutinas A., Wang R., Webb C. Succinic acid production from wheat using a biorefining strategy // *Appl Microbiol Biotechnol*. 2007. V. 76. P. 1263–1270. doi: 10.1007/s00253-007-1113-7
28. Velmati S., Nagahata R., Sugiyama J., Takeuchi K. A rapid eco-friendly synthesis of poly(butylene succinate) by a direct polyesterification under microwave irradiation // *Macromol. Rapid Commun*. 2005. V. 26. No. 14. P. 1163–1167. doi: 10.1002/marc.200500176
29. Xu J., Guo B.N. Microbial succinic acid, its polymeric poly (butylene succinate) and applications // *Plastics from Bacteria: Natural Functions and Applications, Microbiology, Monographs / Ed. G.-Q. Chen*. V. 14. Springer-Verlag, 2010. P. 347–388. doi: 10.1007/978-3-642-03287\_5\_14
30. Jacquel N., Freyermouth F., Fenouillot F., Rousseau A., Pascault J.P., Fuertes P., Saint-Loup R. Synthesis and properties of poly(butylene succinate): Efficiency of different transesterification catalysts // *Journal of Polymer Science. Part A: Polymer Chemistry*. 2011. V. 49. No. 24. P. 5301–5312. doi: 10.1002/pola.25009
31. Biopolymers: growth difficulties and prospects [Internet recourse] <https://www.wem.az/ru/news/v-strane-i-v-mire/7909.html> (Accessed: 27.11.2017) (in Russian).
32. Chernozem R.V., Surmeneva M.A., Surmenev R.A. Hybrid biodegradable scaffolds of piezoelectric polyhydroxybutyrate and conductive polyaniline: Piezocharge constants and electric potential study // *Materials Letters*. 2018. V. 2020. P. 257–260. doi: 10.1016/j.matlet.2018.03.022