



Биоразлагаемые полимерные материалы и модифицирующие добавки: современное состояние. Часть II

А.К. Мазитова , Г.К. Аминова, И.И. Зарипов , И.Н. Вихарева* 

Уфимский государственный нефтяной технический университет, г. Уфа, Республика Башкортостан, Россия

*Контакты: e-mail: irina.vikhareva2009@yandex.ru

РЕЗЮМЕ: Один из самых востребованных материалов на планете – пластик, отличные эксплуатационные характеристики которого способствуют накоплению значительного количества отходов на его основе. В связи с этим в научных кругах сформировался новый подход к разработке данных материалов: получение полимерных композитов с постоянными эксплуатационными характеристиками в течение определенного срока и способных затем к деструкции под действием факторов окружающей среды. Анализ современного состояния отрасли полимерных материалов показывает, что наиболее актуальным остается применение таких классических полимеров, как полиолефины и поливинилхлорид. В первую очередь оптимальным решением данной проблемы в связи с отсутствием подходящей замены традиционным полимерам является разработка композитов на их основе с привлечением биоразлагающих аддитивов. В таком случае решается комплекс проблем, связанных с утилизацией отходов: значительно сокращается период разложения утилизируемых отходов, сокращаются территории, необходимые для пластиковых отходов.

В работе изложены предпосылки возникновения и дальнейшего развития области биоразлагаемых полимеров. Приведены основные количественные характеристики производственных мощностей выпускаемых биопластиков по типам, регионам и отраслям применения. Представлены современные способы снижения и регламентации времени деградации полимерных материалов. Перечислены основные мировые и отечественные производители биоразлагаемых полимеров и выпускаемая ими продукция, а также список основных производителей биоразлагающих добавок для полимерных материалов. Перечислены современные виды биопластиков на основе возобновляемого сырья, композитов с их применением, а также модифицированных материалов из природных и синтетических полимеров. Описаны основные методы определения биоразлагаемости существующих биопластиков.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: биодеградация, биоразлагаемые добавки, нефтехимическое сырье, полимеры, пластификаторы, растительные источники.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Мазитова А.К., Аминова Г.К., Зарипов И.И., Вихарева И.Н. Биоразлагаемые полимерные материалы и модифицирующие добавки: современное состояние. Часть II // Нанотехнологии в строительстве. – 2021. – Том 13, № 1. – С. 32–38. – DOI: 10.15828/2075-8545-2021-13-1-32-38.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Общие сведения о биоразлагаемых полимерах

Биоразлагаемые полимеры – полимеры, которые в окружающей среде под действием микроорганизмов (бактерий или грибов) и физических факторов (УФ-излучение, температура, кислород) разлагаются [25].

Биоразложение – это вызванный биологической деятельностью процесс изменения химической структуры материала, приводящий к получению натуральных конечных продуктов обмена веществ.

Различают два вида биоразложения материалов: аэробное и анаэробное [25].

Аэробное разложение (компостирование) – биологическое разложение органических веществ ПМ с потреблением свободного кислорода или воздуха

в процессе жизнедеятельности микроорганизмов. Продуктами в данном случае являются углекислый газ, вода, минеральные вещества и биомасса.

Анаэробное разложение (биогазификация) – биологическое разложение органических веществ ПМ при отсутствии потребления свободного кислорода или воздуха в процессе жизнедеятельности микроорганизмов. Продуктами в данном случае являются метан, вода, минеральные вещества и биомасса.

Классификация биопластиков по типу сырья, из которого изготавливается полимер:

- возобновляемое сырье;
- невозобновляемое (ископаемое).

Другим критерием для классификации является способность ПМ к самопроизвольному распаду в природной среде, то есть биоразложение:

- биоразлагаемые;
- небiorазлагаемые.

Согласно этим характеристикам все пластики можно разделить на четыре группы [26].

Группа 1. Небиоразлагаемые пластики из ископаемого сырья – все «традиционные» крупнотоннажные полимеры: полиэтилены, полипропилен, ПВХ, полиэтилентерефталат, полистиролы, полибутилентерефталат, поликарбонаты, полиуретаны и т. п.

Группа 2. Биоразлагаемые пластики из ископаемого сырья – синтетические материалы, полученные традиционными методами на основе нефтехимического углеводородного сырья, но благодаря своим структурным особенностям способные к биодegradации: полибутираты (сополимеры адипиновой кислоты, диметилтерефталата и 1,4-бутандиола (PВAT), полибутиленисукцинат (PBS), поливиниловый спирт (PVAL), поликапролактоны (PCL) и полигликолевая кислота (PGA). К этому виду можно отнести традиционные пластики, модифицированные с помощью промоторов деполимеризации (группа 2а), или полученные с введением нестойких к гидролизу сополимеров (группа 2б). Это в основном модифицированный ПЭТФ, где в качестве сополимера используется, например, PВAT.

Группа 3. Небиоразлагаемые пластики на основе природного сырья – классические полимеры (био-полиэтилен, биоPВХ, терефталевые биополиэфир ПЭТФ или ПБТФ), сырьем для которых является биомасса. Это биоэтилен и получаемый из него биомоноэтиленгликоль, а также био-1,4-бутандиол и моноэтиленгликоль прямого брожения сахаров. А также полиамид-11, который производится из растительного масла.

Группа 4. Биоразлагаемые пластики из природного сырья, которые делят по способу получения полимера на подгруппы:

Группа 4а. Биоразлагаемые пластики из природного сырья, у которых полимерная цепь образуется

естественным путем. Задачи их производства сводятся к выделению их из биосырья или к модификации их структуры без синтеза полимерной цепи (биопластики на основе крахмала, модифицированной целлюлозы).

Группа 4б. Биоразлагаемые пластики из природного сырья, у которых полимерная цепь образуется благодаря жизнедеятельности микроорганизмов в определенной среде (полигидроксиалканоаты (PНA)).

Группа 4в. Биоразлагаемые пластики из природного сырья, у которых в результате биологического процесса образуется мономер, сборка самого полимера осуществляется с помощью синтеза (полимолочная кислота (PLA)).

Для биоразлагаемых композитов важно, чтобы все ингредиенты также являлись биоразлагаемыми и нетоксичными. Так, стандарты для компостируемых ПМ требуют тестирования полимеров и всех добавок, чтобы исключить их отрицательное влияние на биосферу [27–29].

В общем, биоразлагаемость ПМ не зависит от природы сырьевых источников, а напрямую связана с размером и химическим строением молекулы, наличием и природой заместителей, надмолекулярной микро- и макроструктурой [30–35]. Для активации биоразложения композит должен содержать следующие фрагменты [36]:

- 1) гетероатомы;
- 2) доступные для биодegradации связи ($R = CH_2$; $R = CH-R^1$; $R-CH_2-OH$; $R-CH(OH)-R$; $R-CO-H$; $R-CO-R^1$ и др.);
- 3) фрагменты углеродной цепи менее пяти групп CH_2 ;
- 4) объемные заместители;
- 5) в качестве наполнителей естественные продукты для питания микроорганизмов: крахмал, целлюлозу, лактозу, магний, мочевины.

Выделяют пять основных способов дegradации синтетических полимеров в зависимости от внешних факторов [37–38]:

- 1) бактериальная деструкция;
- 2) химическая деструкция;
- 3) фотодegradация в результате воздействия солнечного света;
- 4) термическая дegradация;
- 5) механическая дegradация.

Биодegradация полимеров протекает по двум механизмам: биологический гидролиз или биологическое окисление [39–40]. Биологический гидролиз происходит под действием специальных ферментов-деполимераз для каждого типа гидролизуемой связи. Биологическое окисление может протекать без ферментов. Оба деструктивных процесса работают с синергетическим эффектом.

Первая стадия повреждения полимера начинается с адсорбции микроорганизмов на поверхности. Вторая стадия повреждения протекает в зависимости от химического состава мономерного звена полимера. Происходит либо утилизация полимера в качестве источника питания для микроорганизмов, либо деградация под действием продуктов жизнедеятельности микроорганизмов – метаболитов, которые разрушают образец по всему объему.

Каждому полимеру соответствуют микроорганизмы, которые способны инициировать его деполимеризацию. Образующиеся моно- и олигомеры под действием ферментов подвергаются минерализации.

Бактериальная деградация характерна природным полимерам и ПМ, содержащим в составе природные компоненты. Разработаны также способы бактериального разложения полимеров с помощью специально отобранных микроорганизмов. Данный дорогостоящий процесс позволяет разрушать пластики на нефтехимической основе.

Химическая деградация осуществляется с помощью водных растворов химических соединений и особенно ускоряется в щелочной среде. Первоначально ПМ растворяют в водном растворе, затем осуществляют полное биоразложение водного раствора за счет микробного реагента.

Фотодegradация. Под действием УФ-облучений фоторазрушаемые полимеры постепенно растрескиваются, затем рассыпаются на кусочки, которые далее превращаются в порошок. Дальнейшее разложение ПМ протекает под действием микроорганизмов. Особенно склоны к фотодegradации полиолефины. Чтобы повысить эффективность процесса, в рецептуру ПМ вносят следующие добавки [41–43]:

- сенсibiliзаторы – инициаторы фотохимических реакций (бензофенон, дифенилсульфид);
- соединения, содержащие металлы переменной валентности (Cu, Fe);
- соединения, которые в результате сополимеризации составных звеньев приводят к образованию альдегидных или кетонных групп (сомономеры винилкетоны);
- соединения, способствующие образованию большого количества карбонильных групп, поглощающих УФ-излучение.

Биодegradацию основных синтетических полимеров обычно инициируют процессами небиологического характера (термическая, фотоокислительная, механическая деградация и т. п.).

Процесс биоразложения синтетических полимеров состоит из двух этапов: деполимеризации и минерализации остатков [45]. Внеклеточные ферменты способны разрушать макроцепи, инициируя реакцию деполимеризации. Эндоферменты имеют форму полости в виде «ложбины» и беспорядочно

разрушают внутренние связи в полимерах. Активный центр экзоферментов имеет форму полости в виде «кармана» и последовательно разрушает макроцепи на моно- и олигомерные фрагменты (рис. 5) [39–40].

Их слаженные последовательно-параллельные каталитические превращения способствуют быстрому разрушению ПМ [39–40].

В настоящее время разработаны методики получения рекомбинантных ферментов от генетически модифицированных (мутантных) штаммов микроорганизмов и созданы полиферментные комплексы с желаемым набором индивидуальных компонентов.

Полученные низкомолекулярные фрагменты далее подвергаются минерализации внутриклеточными ферментами с образованием конечных продуктов (углекислый газ, вода, соли, метан).

Классификация добавок, ускоряющих разложение ПМ [46]:

- Оксо-добавки. Все токсические свойства при этом сохраняются, а полное разложение мелких кусочков не ускоряется.
- Добавки, ускоряющие распад молекулярных цепей полимера под воздействием солнечного света, определённой температуры воздуха, влаги и других активизирующих факторов.
- Добавки, вызывающие освобождение молекул углерода и водорода из пластика, которые уже свободно усваиваются бактериями и грибами.

Биоразлагаемые пластики на основе традиционных полимеров. Для создания подобных ПМ используют специальные добавки при переработке. Некоторые из них позволяют модифицировать период биоразложения ПМ до 1–3 лет в зависимости от структуры полимера. Существуют **ОХО-разлагаемые и гидроразлагаемые** ПМ.

Добавка d2w – катализатор реакции окисления углеродных связей в молекуле полимера под действием ультрафиолетового света, кислорода воздуха через определенный период времени. Получаемые ПМ называют ОХО-разлагаемыми. При этом после процесса окисления наблюдается рост микроорганизмов на поверхности полимера.

Гидроразлагаемые ПМ – материалы на основе возобновляемых источников растительного сырья либо

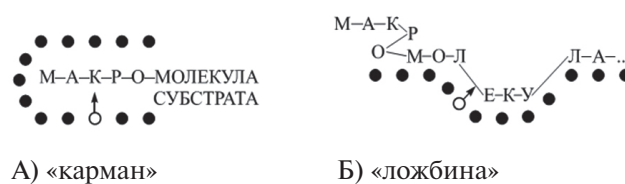


Рис. 5. Схемы взаимодействия активного центра ферментов с определенными участками макромолекулы полимера

РАЗРАБОТКА НОВЫХ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

синтетические пластики, которые содержат специальные добавки(крахмал), разлагаемые реакцией гидролиза без доступа кислорода. По этой причине в процессе биоразложения таких пластиков выделяется метан. Конечные продукты разложения аналогичны ОХО-разлагаемым ПМ [37]. Поверхность окисленного полимера в обоих случаях обладает гидрофильными свойствами в отличие от первоначального ПМ и поэтому легко подвержена действию воды и бактерий. Общая схема деструкции приведена на рис. 6 [24].

Биоразлагаемые ПМ на основе природных полимеров

В производстве биоразлагаемой упаковки наибольшее распространение получили полисахариды (крахмал, декстрины, хитозан, целлюлоза, отходы деревопереработки) [47–48].

Обычно крахмал содержит 30–40% связанной влаги, которую используют как наиболее доступный пластификатор при производстве ПМ на основе крахмала. В качестве пластификаторов также известно применение мочевины, моно-, ди- и полиэтиленгликолей. Вспененные ПМ на основе крахмала применяют в качестве звукоизолирующей упаковки. Экструзией смесей кукурузного крахмала и микрокристаллов целлюлозы и метилцеллюлозы получают ПМ для защиты пищевых продуктов от потери массы и порчи.

Возрастающее значение в качестве основы для производства биоразлагаемых упаковочных пленок и текстильных волокон приобретают смеси хитина и хитозана. Пленки на основе хитозана формуют из уксуснокислых растворов, регулируя растворимость и набухаемость пленок сшивкой хитозана глутаровым альдегидом или олигомерным диэпоксидом.

Композиционные биоразлагаемые полимеры

При создании биоразлагаемых полимерных композиций, как правило, применяют следующий прин-

цип: к синтетическому полимерному связующему добавляют биоразлагаемые природные полимерные смеси (крахмал, целлюлозу, хитин) или синтетические [37]. Биоразложение полиолефинов в присутствии крахмала является очень сложным процессом, большую роль в котором играют различные факторы, в том числе реакции окисления карбоцепных макромолекул [49–50].

Например, комплекс ценных характеристик, присущих полисахариду хитина: низкая плотность, слоистая структура, способность к пленкообразованию, склонность к избирательному взаимодействию с микроорганизмами, радиопоглощение и радиопротекторные свойства – предполагает возможность разработки биоразлагаемых электромагнитных экранов на основе его смесей с полиэтиленом [51–52].

Другой пример, методами привитой сополимеризации изготовлены биоразлагаемые сополимеры продукта совместной полимеризации этилена с капролактоном [53].

Для защиты ПМ от воздействия микроорганизмов модификацию свойств ПМ регулируют с помощью следующих факторов [25, 43]:

- варьированием структуры материала: увеличением степени кристалличности и ориентации полимеров, сшиванием макромолекул с образованием сетчатых структур (кристаллическая надмолекулярная структура полимера обеспечивает большую стойкость к биодеструкции, поскольку компактное расположение структурных фрагментов подобных полимеров препятствует набуханию в воде и проникновению ферментов в полимерную матрицу);
- варьированием химического строения: введением в макромолекулы полимеров заместителей, стерически затрудняющих подход агрессивных метаболитов к химически нестойким связям;
- варьированием состава материала: введением минеральных наполнителей, способных диффундировать к поверхности и создавать на границе раздела защитный слой;
- модификацией поверхности материала: формированием на ней изолирующего слоя с другими физико-химическими свойствами, стойкого к метаболитам;
- модификацией характера напряженного состояния поверхностных слоев материала, деталей, изделия: созданием остаточных напряжений сжатия, препятствующих облегчению растрескивания материала в присутствии метаболитов;



Рис. 6. Общая схема биодegradации полимерных материалов

РАЗРАБОТКА НОВЫХ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

– модификацией условий внешней среды в целях минимизации скоростей протекания сорбционных, химических, электрохимических процессов.

Для защиты ПМ от биологического разложения используют соединения с биоцидными свойствами: производные фенолов, четвертичные аммониевые соединения, салициланилиды, 8-оксихинолят меди, трилан, трихлорэтилфосфат, 1-фтор-3-бром-4,6-динитробензол, салицилат фенол ртути, фталат фенолртути, пентахлорфенол [25]. В качестве биоцидов используют также металлоорганические, хлороорганические, четвертичные аммониевые и неорганические соединения. Биоциды можно разделить на четыре группы:

- неорганические (ZnO , $CuSO_4$, NaF , NH_4BF_4 , $Ca(CN)_2$);
- органические (производные фенола, фосфорсодержащие соединения, амины и др.);
- металлоорганические (содержащие ртуть, свинец, олово, натрий, серебро);
- полифункциональные (синтетические биологически активные соединения).

Установлено, что карбонат кальция в качестве наполнителя уменьшает, а асбест и тальк увеличивает интенсивность роста микроорганизмов; оксид цинка в составе полимерных композитов ингибирует рост микроорганизмов, диоксид титана инертен, а оксиды железа и магния стимулируют его [25].

Однако абсолютно устойчивых к действию живых организмов ПМ не существует [25]. Исследования показали, что такие материалы, как неопрен и нейлон, поражаются под действием грибов *A. niger*, *A. Flavus* и заметно ухудшают свои свойства. Однозначного мнения нет и в отношении ряда других полимеров: капрон, полиуретан, ацетат целлюлозы, ацетобутират целлюлозы, фенолоанилиноформальдегидная смола, меламиноформальдегидная смола.

Установлено, что продуктами жизнедеятельности грибов являются уксусная, пропионовая, масляная, фумаровая, янтарная, яблочная, лимонная, винная, глюконовая и щавелевая кислоты [25]. Образующиеся кислоты в силу агрессивности приводят к изменению физико-механических характеристик ПМ и являются пищей для развития грибов.

Однако грибостойкость ПМ не означает их бактериостойкость [25, 45]. Так, например, сланцевый ПВХ грибостоек, но разрушается динитрофилирующими и углеводородокисляющими бактериями.

Основные производители биоразлагающих добавок

Symphony Environmental (Великобритания) выпускает добавки для производства обычных пластмасс, биоразлагаемых пластмассовых изделий. Основной продукт – d2w (degradable to water), используется более чем в 60 странах [25].

Environmental Products Inc. (EPI, Канада) выпускает оксобиоразлагаемые пластики, разработчик полностью разлагаемых пластиковых добавок TDPA (Totally Degradable Plastic Additives). Добавка вводится в соотношении 2–3% к общему объему основного пластика (полиэтилен, полипропилен, полистирол). Нетоксична и безопасна для применения в контактах с пищей [25].

Willow Ridge Plastics (WRP, США) – производитель оксобиоразлагаемых добавок для пластиков. Добавки фирмы нетоксичны, безопасны для использования в пищевой отрасли [58].

Bio-Tec Environmental (США) выпускает оксо добавки EcoPure, которые применяют более чем для 15 полимеров, они разлагаются микроорганизмами [25].

ECM BioFilms (США) выпускает добавки для полистирола, полиуретанов и ПЭТФ. Добавка разлагается микроорганизмами [25].

Nor-X Industry AS (Норвегия) выпускает ингредиент на основе железа Renatura, который используется для биоразложения полиолефинов [25].

Wells Plastics Ltd (Великобритания) выпускает добавки и маточные смеси, содержащие продеграданты из ионов металла, для придания основному полимеру фото- и терморазлагаемости, усилитель биоразложения второго этапа, на котором используется модификатор скорости реакции для управления иницированием и сроками оксобиоразложения [25].

P-Life Japan Inc. (Япония) выпускает смесь катализаторов на основе жирных кислот специальной собственной рецептуры компании P-Life. Содержание в основном полимере (ПЭ или ПП): от 0,3 до 1% [25].

TOSAF (Израиль). Продукт OX5854 на основе полисахаридов, вводится в соотношении 2–8% от общей массы полимера. Для разложения в течение месяца необходимо УФ облучение, высокая влажность и температура до 90°C [54].

ADD-X BIOTECH (Швейцария). Марка Addiflex HE01010 FF для ПВД. При вводе 1,5% добавки наблюдается самопроизвольное разложение пленки ПВД, нагретой до 60°C, через 140 часов. Марка Addiflex представлена в четырех классах для полимеров различного назначения: A-grade, The HES grade, The HEV grade, The BOPP grade [55].

Методы оценки биоразлагаемости ПМ

Наиболее часто применяемые на практике методы тестирования способности композиционных материалов к биоразложению приведены в табл. 2.

Наиболее продуктивным является комплексный подход к изучению биодеградации ПМ. Для опреде-

РАЗРАБОТКА НОВЫХ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

ления достоверных параметров и выяснения механизма процесса необходим сравнительный анализ результатов ряда независимых физико-химических, биохимических, микробиологических экспериментов, проводимых в лабораторных и в естественных условиях.

Таблица 2

Методы оценки биологической деструкции полимерных композиционных материалов

Метод	Сущность метода	Время эксперимента	Условия эксперимента	Применяемые культуры	Стандарт
Микологический тест	Определение устойчивости материала к воздействию культур плесневых грибов	28 суток	Температура 29±2°C Влажность более 90% Освещенность 200–300 лк	Плесневые и микроскопические грибы	ISO 846 ASTM G 21-96 ГОСТ 9.049-91
Бактериальный тест	Определение устойчивости материала к воздействию культур бактерий	–	Температура 20°C Влажность более 58% Освещенность 200–300 лк	Бактериальные клетки	ISO 846 ASTM G 22-76
Биоразлагаемость нерастворимых веществ	Определение количества O ₂ поглощенного при аэробной деградации	4 месяца	Анаэробные условия Буферная минеральная среда Твердая среда	Инокулянт из активного ила или сточной воды	ISO 10708 OECD 301 D
Тест в свободном пространстве при 25/50°C	Определение количества CO ₂ , выделившегося при инкубации материала	48 дней	Температура 25–50°C Влажность 60–70% Освещенность 200–300 лк Анаэробная среда	Смешанная популяция микроорганизмов	ASTM D5988-96 OECD 301 A
Метод Штурма	Определение выделившегося CO ₂ в процессе деградации материала	6 месяцев	Температура 20–25°C Освещенность 200–300 лк Водный раствор Аэробная среда	Грибная или бактериальная флора	ISO 9439 ISO 14852 DIN EN 29439 ASTM D 5209
Определение выделившегося CO ₂ (аэробный тест в компосте)	Определение выделившегося CO ₂ в процессе деградации материала в компосте	6 месяцев	Аэробная среда Компост на основе органической фракции твердых коммунальных отходов	Аэробные бактерии	ISO 14855 ASTM D 6400
Определение степени разложения в компосте	Определение степени разложения материала в модельном промышленном компосте	90 дней	Температура 58±2°C Воздухообмен Темнота или рассеянный свет Промышленный компост	Инокулянт, термофильные бактерии	ISO 16929 ISO 20200 BS EN 14045
Почвенный тест	Определение поглощенного O ₂ или выделившегося CO ₂ в процессе деградации материала в природной почве верхнего слоя полей	6 месяцев	Температура 28±2°C Влажность почвы 30±5% pH – 7,5 Коэффициент биологической активности почвы 0,65–1,5	Почвенные микроорганизмы	ISO 17556 DIN 53739 ГОСТ 9.060-75

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

25. Костин А. Биопластики: перспективы в России // Пластикс. – 2015. – № 3. – С. 44–50.
26. Информационно-аналитический центр Rupec. – Режим доступа: <http://www.rupec.ru>. (дата обращения: 08.10.2020).
27. Власов С. В., Ольхов А.А. Биоразлагаемые полимерные материалы // Полимерные материалы: изделия, оборудование, технологии. – 2006. – № 7. – С. 23–26; № 8. – С. 35–36; № 10. – С. 28–33.
28. Попов А. Биоразлагаемые полимерные материалы // Тара и упаковка. – 2007. – № 3. – С. 43–47.
29. Анисимов А.А., Смирнов В.Ф., Веселов А.П. Микроорганизмы повреждают полимеры // На грани химии и биологии. – М.: Знание, 1982. – 64 с.
30. Рыбкина С.П., Пахаренко В.А., Шостак Т.С., Пахаренко В.В. Основные направления в области создания биоразлагаемых термопластов // Пластические массы. – 2008. – № 10. – С. 47–54.
31. Орехов Д.А., Власова Г.М., Макаревич А.В., Пинчук Л.С. Биоразлагаемые пленки на основе термопластов // Доклады Национальной академии наук Беларуси. – 2000. – Т. 44, № 6. – С. 100–103.
32. Легонькова О., Мелицкова Е., Пешехонова А. Будущее за биоразложением // Тара и упаковка. – 2003. – № 2. – С. 62–63.

РАЗРАБОТКА НОВЫХ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

33. Легонькова О.А., Сдобникова О.А., Бокарев А.А. Биоразлагаемые материалы в технологии упаковки // Тара и упаковка. – 2003. – № 6. – С. 58–66.
34. Шериева М.Л., Шустов Г.Б., Шетов Р.А. Биоразлагаемые композиции на основе крахмала // Пластические массы. – 2004. – № 10. – С. 29–31.
35. Богатова И.Б. Полимеры и полимерные материалы в пищевой промышленности: Учебное пособие. – Тольятти: Кассандра, 2010. – 93 с.
36. Легонькова О. Еще раз о биоразложении полимерных материалов // Тара и упаковка. – 2006. – № 2. – С. 57–58.
37. Буряк В.П. Биополимеры – настоящее и будущее // Полимерные материалы. – 2005. – № 12. – С. 22–27.
38. Клесов А.А. Ферментативный катализ. – М.: Изд-во МГУ, 1977. – 156 с.
39. Степаненко Б.Н. Химия и биохимия углеводов. М.: Изд-во Высшая школа, 1984. – 204 с.
40. Rabek J.F. Photosensitized Degradation of Polymers // Ultraviolet Light Induced Reactions in Polymers. – 1976. – Т. 18. – P. 255–271. DOI: 10.1021/bk-1976-0025.ch018.
41. Yousif E., Haddad R. Photodegradation and photostabilization of polymers, especially polystyrene: review. – 2013. – No. 2. –P. 398. DOI: 10.1186/2193-1801-2-398.
42. Daglen B.C., Tyler D.R. Photodegradable plastics: end-of-life design principles // Green Chemistry Letters and Reviews. – 2010. – Vol. 3, No. 2. – P. 69–82. DOI: 10.1080/17518250903506723.
43. Berezov T.T., Korovkin B.F. Biological chemistry: Textbook. – М.: Medicine, 1990. – 528 p.
44. Замыслов Э. ОХО-биоразлагаемые полимерные материалы // Международные новости мира пластмасс. – 2008. – № 7/8. – С. 10–14.
45. Legonkova O.A. Analysis of modern ideas about biodegradable polymeric materials // Paints and varnishes and their application. – 2006. – No. 4. – 43–45 p.
46. Легонькова О.А. Анализ существующих представлений о биоразлагаемых полимерных материалах // Лакокрасочные материалы и их применение. – 2006. – № 6. – С. 37–43.
47. Прочность биоразлагаемых полипропиленовых плоских лент, наполненных модифицированным крахмалом // Механика композитных материалов. – 2006. – Т. 42, № 3. – С. 389–400.
48. Шериева М.Л., Шустов Г.Б., Беспланеева З.Л. Биоразлагаемые композиции на основе полиэтилена высокой плотности и крахмала // Пластические массы. – 2007. – № 8. – С. 46–48.
49. Роговина С.З., Алексанян К.В., Прут Э.В. Биоразлагаемые смеси хитина и хитозана с синтетическими полимерами // Энциклопедия инженера-химика. – 2011. – № 6. – С. 32–38.
50. Никитенко П. Хитозан – полимер будущего // Наука и инновации. – 2013. – № 9. – С. 14–17.
51. Васнев В.А. Биоразлагаемые полимеры // Высокомолекулярные соединения. – Серия Б. – 1997. – Том 39, № 12. – С. 2073–2086.
52. Леонтьева О.А., Сухарева Л.А. Тысяча и один полимер от биостойких до биоразлагаемых. – М.: Радиософт, 2007. – 176 с.
53. Штильман М.И., Tzatzarakis M., Лотгер М.М., Tsatsakis A.M. Полимерные фунгициды // Высокомолекулярные соединения. – Серия Б. – 1999. – Том 41, № 8. – С. 1363–1376.
54. Rogovina S., Aleksanyan K., Vladimirov L. et al. Development of Novel Biodegradable Polysaccharide-Based Composites and Investigation of Their Structure and Properties // J Polym Environ. – 2018. – No. 26. – P. 1727–1736. DOI: 10.1007/s10924-017-1069-3.
55. Yu L., Dean K., Li L. Polymer blends and composites from renewable resources // Progress in Polymer Science. – 2006. – Vol. 3, 6. – P. 576–602.

Статья «Биоразлагаемые полимерные материалы и модифицирующие добавки: современное состояние. Часть I» опубликована в журнале «Нанотехнологии в строительстве» № 6/2020.

Статья «Биоразлагаемые полимерные материалы и модифицирующие добавки: современное состояние. Часть III» будет опубликована в журнале «Нанотехнологии в строительстве» № 2/2021

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Мазитова Алия Карамовна, доктор химических наук, профессор, заведующий каф. «Прикладные и естественнонаучные дисциплины», ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет»; г. Уфа, Россия, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2304-1692>, e-mail: elenaasf@yandex.ru

Аминова Гулия Карамовна, доктор технических наук, профессор каф. «Прикладные и естественнонаучные дисциплины», ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет»; г. Уфа, Россия, e-mail: aminovagk@inbox.ru

Зарипов Ильнар Ильгизович, магистрант каф. «Прикладные и естественнонаучные дисциплины», ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет»; г. Уфа, Россия, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2594-3753>, e-mail: ilnar.zaripov1998@mail.ru

Вихарева Ирина Николаевна, ассистент каф. «Прикладные и естественнонаучные дисциплины», ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет»; г. Уфа, Россия, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5681-2767>, e-mail: irina.vikhareva2009@yandex.ru

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию: 15.10.2020.

Статья поступила в редакцию после рецензирования: 26.11.2020.

Статья принята к публикации: 29.11.2020.