



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

А.К. Мазитова , Г.К. Аминова, Е.А. Буйлова, 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: биodeградация, биоразлагаемые добавки, нефтехимическое сырье, полимеры, пластификаторы, растительные источники.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Мазитова А.К., Аминова Г.К., Буйлова Е.А. Зарипов И.И., Вихарева И.Н. Биоразлагаемые полимерные материалы и модифицирующие добавки: современное состояние. Часть III // Нанотехнологии в строительстве. – 2021. – Том 13, № 2. – С. 73–78. – DOI: 10.15828/2075-8545-2021-13-2-73-78.

ПРИРОДНЫЕ БИОРАЗЛАГАЕМЫЕ ПОЛИМЕРЫ

Природным полимерам свойственна регулируемая биodeградация в природе, под воздействием микроорганизмов, воды и почвы данные материалы разлагаются в основном на углекислый газ и воду. Основными источниками сырья являются крахмал, производные целлюлозы, хитин, хитозан, молочная кислота, гидроксикарбоксилаты.

Высокомолекулярные углеводы. Основным способом использования данных биополимеров в практических целях является разработка биodeградируемых композитов, характеризующихся свойствами, близкими к традиционным пластикам [55–57].

Крахмал. Для создания биопластиков используют химически модифицированный крахмал, что приводит к изменению его основных свойств: гидрофильных, реологических, физико-химических.

Основным приемом является поперечное сшивание за счет гидроксильных групп [57]. В качестве термопластичных материалов используют сополимеры крахмала, композиты на основе крахмала [58]. При добавлении кремнезема получают термопластично перерабатываемый крахмал в виде нанокомпозитов с содержанием воды менее 10% [59]. Деструктурированный крахмал используют в композитах с синтетическими полимерами (полиэтиленом, поливиниловым спиртом, алифатическими полиэфирами, полиоксибутиратом) [59–62].

Для регламентации срока биоразложения используют широкий спектр комплексобразующих агентов (дезоксисукцинаты, эпоксиды, слоистые органосиликаты) [61–62].

Целлюлоза. Термопластичные и растворимые производные целлюлозы получают с помощью химической модификации. В практике чаще используют простые и сложные эфиры целлюлозы, получаемые при взаимодействии с ОН-группами (3 спиртовых гидроксила) в каждом моносахаридном звене [63–66]. Получают и другие модификации целлюлозы: щелочная (при действии раствора едкого натра), карбоксиметилцеллюлоза (простой эфир с гликолевой кислотой), метилцеллюлоза трех модификаций (простой метиловый эфир целлюлозы), моно-, ди- и триацетилцеллюлоза (триацетат целлюлозы), нитроцеллюлоза трех модификаций (нитраты целлюлозы) [67].

Нитроцеллюлоза – основа первой искусственной пластмассы (целлулоида). Ее главный недостаток – легкая воспламеняемость и выделение токсичных оксидов азота при горении [67].

На основе ацетатов, ацетопропионатов, ацетобутиратов, нитратов целлюлозы и этилцеллюлозы получают пластик этрол [67].

Хитин. Существует три кристаллографические модификации, различные по расположению молекулярных цепей в элементарной ячейке кристаллита [68]. Наиболее распространенная модификация – α -хитин – характеризуется плотной упаковкой макромолекул и обеспечивается антипараллельным расположением цепей в элементарной ячейке. β -Хитин представляет собой неустойчивые кристаллогидраты с параллельным расположением цепей. Ячейка γ -хитина имеет две параллельно расположенные цепи и одну антипараллельно по отношению к ним. Возможности химической модификации хитина способствуют получению разнообразных по строению и свойствам материалов и решают экологические проблемы путем использования в биodeградируемых полимерах [69–70].

Хитозан. В отличие от хитина хитозан имеет более широкие возможности для применения [71]. После обработки реакцией дезацетилирования, кристал-

лические области будут содержать остаточные ацетильные группы [72–73]. Распределение этих групп влияет на деформационно-прочностные свойства волокон. При ферментативном гидролизе хитозана получают низкомолекулярные соединения, обладающие биоразрушаемостью и биосовместимостью, нетоксичностью. Получаемые волокна из раствора хитозана технологией NANOSPIDER отличаются сверхразвитой поверхностью и пористостью, обладают эффективным ранозаживляющим действием и бактерицидной активностью [74].

Натуральный каучук. Каучук выделяют из латекса коагуляцией с помощью муравьиной, щавелевой или уксусной кислоты и подвергают дальнейшей обработке. Однако получение стереорегулярных синтетических каучуков способствовало сокращению применения натурального каучука в ряде отраслей промышленности [75–76].

Полигидроксиканоаты. Наиболее перспективным является поли-3-оксипропионат или полигидроксипропионат (ПГБ), открытый микробиологами в 1925 г. Бактериальный ПГБ характеризуется хорошими упруго-прочностными свойствами, оптической активностью, термопластичностью, пьезоэлектрическими качествами [77]. Изделия из подобных полимеров получают из расплава или из его растворов в органических растворителях в чистом виде и в виде компонента смесей и сополимеров на его основе [78]. По технологическим характеристикам практически не уступает традиционным термопластам, не требует специальной утилизации, не загрязняет окружающую среду [79]. Производство ПГБ безотходное, характеризуется низкой энергоемкостью.

Совместимость данных биополимеров с промышленными синтетическими способствовала созданию новых многокомпонентных композитов, что снижает себестоимость изделий [80–82].

Белки. Применение белков для получения биоразлагаемых композиционных материалов не нашло широкого распространения. Известны блок-сополимеры для медицинских целей [76].

СИНТЕТИЧЕСКИЕ БИОРАЗЛАГАЕМЫЕ ПОЛИМЕРЫ

Традиционным полимерам свойственны повышенные физико-механические и эксплуатационные характеристики, биологическая устойчивость [10, 17]. Получение композитов на их основе является эффективным и экономически выгодным методом модификации, позволяет максимально полно использовать свойства каждого, а также способствует утилизации отходов промышленных полимеров.

Одним из методов получения биоразлагаемых синтетических пластиков является синтез полиэф-

ров и полиэфирамидов, например, сополиэфиров на основе алифатических диолов и органических дикарбоновых кислот [12, 25].

Другим методом создания биоразлагаемых ПМ является разработка композитов на основе природных полимеров, например крахмала, целлюлозы, хитозана или белков [25, 31–33]. Важно правильно подобрать соотношение компонентов, при котором эксплуатационные свойства получаемых ПМ приближаются к свойствам исходных традиционных полимеров.

Полиолефины (полиэтилен и полипропилен). Применение крахмала в серийном производстве биоразлагаемых ПМ на основе полиэтилена освоено несколькими фирмами: упаковочный материал под маркой Mater-Bi от Novamont S.p.A. (Италия); концентрат Polyclean TM для производства биоразлагаемых пленок от Archer Daniels Midland (США); концентрат Ecostar Plus от St. Lawrence Starch (США). Кроме крахмала в состав входят добавки, действующие как катализатор биодеструкции крахмала [83–85].

Наиболее известным продуктом с добавлением крахмала является материал Mater-Bi от фирмы Novamont S.p.A (Италия), который деградирует в почве за 60 суток без выделения вредных продуктов [83].

Для упаковки разрабатываются композиты на основе полиэтиленовых и полипропиленовых отходов с добавлением отходов мукомольно-крупяных, крахмалопаточных, сахарных, кондитерских предприятий [86]. Известно применение в качестве наполнителей хитина и хитозана [69–70].

Разработаны фоторазлагаемые сополимеры этилена с оксидом углерода. Фотоинициаторами разложения являются винилкетонные мономеры в количестве 2–5%, пульпа целлюлозы, алкилкетоны или фрагменты, содержащие карбонильные группы. Получаемые пленки служат в течение 8–12 недель, затем фото- и биоразлагаются. В качестве светочувствительных добавок также используют дитиокарбамат железа и никеля и их пероксиды.

Поливинилхлорид. В основном для ускорения процесса деградации композитов с ПВХ используют добавки: природные высокомолекулярные соединения, составляющие различные продукты питания, — крахмал, ржаную, кукурузную и пшеничную муку, отходы обработки зерен ячменя, проса, гречихи, продукты переработки древесины (древесную муку), целлюлозу и ее производные, лигнин, дрожжи либо сине-зеленые водоросли [85–86].

Введение наполнителей ослабляет полимерную цепь молекул ПВХ. При попадании в почву образованные мономерные фрагменты являются питательной средой для микроорганизмов, срок их биоразложения — от 6 до 36 месяцев [87].

Природа пластификатора в ПВХ-композиции также значительно влияет на биodeградацию. ПВХ-материалы, пластифицированные фталатами высших спиртов, наиболее устойчивы к действию микроорганизмов, наименее биостойкими являются композиции с содержанием себацатов [87–88]. Авторами статьи получен класс нетоксичных биоразлагаемых пластификаторов адипинов оксидов алкилированных спиртов алифатического и ароматического ряда. Использование подобных спиртов способствует увеличению степени разложения материала. В работах исследуется биodeградация ПВХ-пластиков с использованием разработанных пластификаторов, изучается экотоксичность их продуктов распада [89–92].

Полистирол. В качестве биоразлагающей добавки для создания биоразлагаемых композитов на основе полистирола в основном используют крахмал [93–94]. Для улучшения совместимости полимерных компонентов были предложены сополимеры полистирола и малеинового ангидрида [95]. Известно получение фоторазлагаемых полимеров на основе ПС путем синтеза сополимеров стирола с оксидом углерода [96]. Введение винилкетонных мономеров в количестве 2–5% в качестве сополимера к стиролу позволяет получать фоторазлагаемые полимеры. Интерес представляют разработанные функционализированные полимеры и сополимеры стирола в качестве полимерных связующих в биоразлагаемых пластиках. Ассортимент таких биопластиков небольшой, а стоимость их в 2–3 раза превышает стоимость крупнотоннажных, неспособных к биоразложению полимеров [97].

Полиэфиры и полиэфирамиды. Полиэтилентерефталат (ПЭТФ) и полибутилентерефталат (ПБТ) характеризуются высокой биостойкостью [98–101]. Однако, если полимер хорошо обволакивает наполнитель, то грибоустойчивость получаемой композиции высока.

Для создания БПМ на основе полиэфиров возможно использование оксикислот в качестве модифицирующих компонентов. Также ожидаемым приемом увеличения биоразлагаемости ПЭТФ является компаундирование его с биodeградируемым компонентом, например, с крахмалом. Однако в процессе компостирования наблюдается быстрое разложение только крахмала, а ПЭТФ в основном не биodeградирует [98–101].

Полилактиды. Промышленный синтез полилактида осуществляется полимеризацией лактида [102–104] либо азеотропной поликонденсацией молочной кислоты [103]. На сегодняшний день полилактид — один из самых дешевых биоразлагаемых пластиков, но значительно дороже таких, как полиэтилен и полистирол. Однако продолжаются разработки менее энергоемкого промышленного способа получения

полилактида. С этой целью для повышения стереоспецифичности процесса в качестве катализаторов используют соединения циркония, гафния, золота, платины [104–106].

Известно получение полилактида с молекулярной массой 102000 и крайне высокой температурой плавления (210–218°C) за счет формирования особой надмолекулярной структуры [104–106].

Несмотря на достоинства полилактида скорость его биоразложения (период полураспада составляет 168 дней) достаточно велика. По этой причине ведутся исследования по получению биоразлагаемых сополимеров молочной кислоты с регулируемой скоростью биоразложения.

Перспективным сомономером является гликоlid, полученный из гликолевой или монохлоруксусной кислот [107]. Полигликолид вследствие гидролитической нестабильности (20 суток) накладывает определенные ограничения на использование его в качестве хирургического материала.

Синтез подобных сополимеров позволяет удачно сочетать свойства полилактида и полигликолида и контролировать скорость биодеструкции [108–111].

Разработан синтез сополимеров на основе диметилтерефталата, молочной кислоты и гександиола с использованием буюксида титана в качестве катализатора [108–111].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ литературных данных показал, что в области биоразлагаемых пластиков происходит постоянное увеличение производственных мощностей уже

востребованных полимерных материалов, а также разработка и расширение ассортимента новых композиций, которые характеризуются экологичностью, возможностью модификации необходимых заданных сроков эксплуатации и способностью к биодegradации без вреда для окружающей среды. В связи с этим также расширяется ассортимент разработанных биоразлагающих добавок.

В современных исследованиях с нашей точки зрения важной проблемой является придание свойств биоразлагаемости крупнотоннажным традиционным полимерам (полиэтилен, полипропилен, поливинилхлорид и др.), производство которых на данный момент является более экологичным, энерго- и ресурсосберегающим и обеспечивает им неоспоримые преимущества.

Однако в связи с истощением нефтехимических источников сырья для производства традиционных синтетических полимеров необходимо разрабатывать дополнительные возможности и перспективные направления создания аналогов данных полимеров из растительного сырья.

В настоящее время перспективные биоразлагаемые пластики на биооснове, например полилактиды, полиэферы и полигидроксоалканоаты, отличаются широкими возможностями моделирования структуры и свойств получаемых материалов и приближаются по основным показателям к традиционным синтетическим полимерным материалам. Но их серийное производство не организовано, что в первую очередь связано с доступностью сырья и его высокой себестоимостью, а также не полностью обосновано снижение опасности негативного воздействия продуктов распада биопластиков на природу и животный мир.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

55. Yu L., Dean K., Li L. Polymer blends and composites from renewable resources. *Progress in Polymer Science*. 2006; 3: 576–602.
56. Клинов А.С. и др. Утилизация полимерной тары и упаковки. — Тамбов: ТГТУ, 2008. — 64 с.
57. Jiménez A., Fabra M.J., Talens P. et al. Edible and Biodegradable Starch membranes: A Review. *Food Bioprocess Technol*. 2012; 5: 2058–2076. Available from: [doi: 10.1007/s11947-012-0835-4](https://doi.org/10.1007/s11947-012-0835-4).
58. Легонькова О.А. Упаковочные материалы из биоразлагаемых материалов на основе полилактида и крахмала // Пищевая промышленность. — 2009. — № 6. — С. 12–13.
59. Рыбкина С.П. Биоразлагаемые упаковочные материалы на основе полисахаридов (крахмала) // Пластические массы. — 2012. — № 2. — С. 61–64.
60. Arifa S., Arifa T., Adeel M., Amtul Bari T., Abdullah Y., Pugazhendhi A. A review on environmental significance carbon foot prints of starch based bio-plastic: A substitute of conventional plastics. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*. 2020; 2. Available from: [doi: 10.1016/j.bcab.2020.101540](https://doi.org/10.1016/j.bcab.2020.101540).
61. Ермолович О.А. Влияние добавок компатибилизатора на технологические и эксплуатационные характеристики биоразлагаемых материалов на основе крахмалонаполненного полиэтилена // Журнал прикладной химии. — 2006. — Т. 79, № 9. — С. 1542–1547.
62. Винидиктова Н.С. и др. Экологически безопасные ориентированные пленки на основе полипропилена // Материалы. Технологии. Инструменты. — 2008. — Т. 13, № 4. — С. 14–19.
63. Dauenhauer P., Krumm C., Pfandner J. Millisecond Pulsed Films Unify the Mechanisms of Cellulose Fragmentation. *Chemistry of Materials: journal*. 2016; 28(1): 0001. Available from: [doi: 10.1021/acs.chemmater.6b00580](https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.6b00580).

64. Гараева М.Р., Готлиб Е.М., Никитина Н.Н., Косточко А.В. Влияние пластификаторов на кристаллическую структуру ацетатов целлюлозы // Пластические массы. — 2007. — № 3. — С. 50–52.
65. Роговин З.А., Гальбрайт Л.С. Химические превращения и модификация целлюлозы. — М.: Химия, 1979. — 208 с.
66. Belokurova A.P. Diffusion and dissolution of water vapor in plasticized cellulose acetates. *Plastic mass*. 2007; 8: 24–26.
67. Белокурова А.П. и др. Диффузия и растворение паров воды в пластифицированных ацетатах целлюлозы // Пластические массы. — 2007. — № 8. — С. 24–26.
68. Varlamov V.P., Ilyina A.V., Shagdarova B.T., Lunkov A.P., Mysyakina I.S. Chitin / chitosan and its derivatives: fundamental and applied aspects. *Advances in biological chemistry*. 2020; 60: 317–368.
69. Shamshina J.L., Kelly A., Oldham T. et al. Agricultural uses of chitin polymers. *Environ Chem Lett*. 2020; 18: 53–60. Available from: [doi: 10.1007/s10311-019-00934-5](https://doi.org/10.1007/s10311-019-00934-5).
70. Barikani M., Oliaei E., Seddiqi H., Honarkar H. Preparation and application of chitin and its derivatives: a review. *Iran Polym J*. 2014; 23: 307–326. Available from: [doi: 10.1007/s13726-014-0225-z](https://doi.org/10.1007/s13726-014-0225-z).
71. Cho Y.I., No H.K., Meyers S.P. Physico-chemical characteristics and functional properties of various commercial chitin and chitosan products. *J. Agric Food Chem*. 1998; 46: 3839–3843. Available from: [doi: 10.1021/jf971047f](https://doi.org/10.1021/jf971047f).
72. Klemm D. Cellulose. In: Biopolymers. *Polysaccharides II: polysaccharides from eukaryotes*. Weinheim: Wiley-VCH; 2005. 275–287 p.
73. Leuba J.L., Stossel P. Chitosan and other polyamines: antifungal activity and interaction with biological membranes. In: Muzzarelli R., Jeuniaux C., Gooday G.W. (eds) Chitin in nature and technology. Springer: Boston; 1986. 215–222 p.
74. Danilevsky A.Ya. Biological and chemical reports on protein substances (materials for their chemical constitution and biogenesis). *Physiological collection*. 1988; 1: 289.
75. Pain R.H. Mechanisms of Protein Folding. 2nd Edition, New York: Oxford University Press; 2000.
76. Rabotyagova O.S., Cebe P., Kaplan D. Protein-Based Block Copolymers. *Biomacromolecules*. 2011; 269–289. Available from: [doi: 10.1021/bm100928x](https://doi.org/10.1021/bm100928x).
77. Antipov E.M. et al. Highly oriented fibers of biodegradable polyhydroxyalkanoates. *Ecology and Industry of Russia*. 2010; 5: 30–36.
78. Andreeva T.I. et al. Isolation and purification of biodegradable polyhydroxybutyrate for medical products. *Ecology and Industry of Russia*. 2010; 5: 72–77.
79. Hatti-Kaul R., Nilsson L., Zhang B., Rehnberg N., Lundmark S. Designing Biobased Recyclable Polymers for Plastics. *Trends in biotechnology*. 2020; 38(1): 50–67. Available from: [doi: 10.1016/j.tibtech.2019.04.011](https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2019.04.011).
80. Koller M. Switching from petro-plastics to microbial polyhydroxyalkanoates (PHA): the biotechnological escape route of choice out of the plastic predicament? *The EuroBiotech Journal*. 2019; 3(1): 32–44. Available from: [doi: 10.2478/ebtj-2019-0004](https://doi.org/10.2478/ebtj-2019-0004).
81. Vu D.H., Akesson D., Taherzadeh M.J., Ferreira J.A. Recycling strategies for polyhydroxyalkanoate-based waste materials: An overview. *Bioresource Technology*. 2020; 298. Available from: [doi: 10.1016/j.biortech.2019.122393](https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122393).
82. *Encyclopedia of Polymer Science and Technology*. John Wiley & Sons, Inc., 2005.
83. Chen G. Plastics derived from biological sources: Present and future: P technical and environmental review. *Chemical Reviews*. 2012; 112(4): 2082–2099. Available from: [doi: 10.1021/cr200162d](https://doi.org/10.1021/cr200162d).
84. Mishra S.B., Mishra A.K., Kaushik N.K., Khan M.A. Study of performance properties of lignin-based polyblends with polyvinyl chloride. *Journal of Materials Processing Technology*. 2007; 183(2-3): 273–276. Available from: [doi: 10.1016/j.jmatprotec.2006.10.016](https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.10.016).
85. Olekhovich R.O., Sitnikova V.E., Chereneva S.V., Volkova K.V. Belukhichev E.V. Study of the kinetics of thermal degradation of polymer composites based on polyvinylchloride film and biopolymer filler. In: International Multidisciplinary Scientific GeoConference: SGEM, Sofia, 2018; 18(4.1). Available from: [doi: 10.5593/sgem2018/4.1/S17.084](https://doi.org/10.5593/sgem2018/4.1/S17.084).
86. Piergiovanni L., Limbo S. *Plastic Packaging Materials*. In: Food Packaging Materials. Springer Briefs in Molecular Science. Springer, Cham. 2020. Available from: [doi: 10.1007/978-3-319-24732-8_5](https://doi.org/10.1007/978-3-319-24732-8_5).
87. Лирова Б.И. и др. Влияние природы пластификаторов на свойства пленочного материала на основе ВВХ // Прикладная химия. — 2007. — Т. 77, № 10. — С. 1707–1713.
88. Лирова Б.И. и др. Изучение процесса миграции из пластифицированных композиций на основе ПВХ // Прикладная химия. — 2006. — Т. 79, № 6. — С. 1017–1027.
89. Вихарева И.Н., Буйлова Е.А., Гатиятуллина Д.Р., Арсланов В.Р., Гилемьянов Д.А., Мазитова А.К. Синтез и свойства сложных эфиров адипиновой кислоты // Башхимжурнал. — 2019. — Т. 26, № 2. — С. 33–36.
90. Мазитова А.К., Вихарева И.Н., Аминова Г.К., Савичева Ю.Н., Гареева Н.Б., Шайхуллин И.Р. Влияние нанодобавок при получении экологичных полиэфирных пластификаторов // Нанотехнологии в строительстве. — 2020. — Том 12, № 1. — С. 21–26. — DOI: [10.15828/2075-8545-2020-12-1-21-26](https://doi.org/10.15828/2075-8545-2020-12-1-21-26).
91. Мазитова А.К., Вихарева И.Н., Маскова А.Р., Гареева Н.Б., Шайхуллин И.Р. Влияние добавок на биodeградацию ПВХ-материалов // Нанотехнологии в строительстве. — 2020. — Том 12, № 2. — С. 94–99. — DOI: [10.15828/2075-8545-2020-12-2-94-99](https://doi.org/10.15828/2075-8545-2020-12-2-94-99).
92. Mazitova A.K., Vikhareva I.N., Aminova G.K., Savicheva Yu.N. Application of Zinc Oxide to Obtain and Modify Properties of Adipate Plasticizer of Polyvinyl Chloride. *Polymers*. 2020; 12(8): 1728.
93. Berrueto M., Ludueña L.N., Rodriguez E., Alvarez V.A. Preparation and characterization of polystyrene / starch blends for packaging applications. *Journal of plastic films and sheeting*. 2015; 30(2): 141–161.
94. Pushpadass H.A., Weber R.W., Dumais J.J. Biodegradation characteristics of starch – polystyrene loose-fill foams in a composting medium. *Bioresource technology*. 2010; 101(19): 7258–7264.
95. Utracki L.A., Shi G.Z., Rodrigue D., Gonzalez-Núñez R. *Compounding Polymer Blends, Polymer Blends Handbook*. 2014. p. 919–1028. Available from: [doi: 10.1007/978-94-007-6064-6](https://doi.org/10.1007/978-94-007-6064-6).
96. Favis B.D. Polymer alloys and blends: Recent advances. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*. 2009; 619–625. Available from: [doi: 10.1002/cjce.5450690303](https://doi.org/10.1002/cjce.5450690303).
97. Okamoto M., Inoue T. Reactive processing of polymer blends: Analysis of the change in morphological and interfacial parameters with processing. *Polymer Engineering & Science*. 2004; 175–182. Available from: [doi: 10.1002/pen.760330308](https://doi.org/10.1002/pen.760330308).
98. Inoue T. *Morphology of Polymer Blends, Polymer Blends Handbook*. 2003. p. 547–576. Available from: [doi: 10.1007/0-306-48244-4](https://doi.org/10.1007/0-306-48244-4).

99. Brown S.B. *Reactive Compatibilization of Polymer Blends*, *Polymer Blends Handbook*. 2003. p. 339–415. Available from: [doi: 10.1007/0-306-48244-4](https://doi.org/10.1007/0-306-48244-4).
100. Wang R., Wang W. Synergistic effect of dual rubber system in toughening styrene maleic anhydride copolymers. *Journal of Applied Polymer Science*. 2003; 2260–2267. Available from: [doi: 10.1002/app.12896](https://doi.org/10.1002/app.12896).
101. Yang Li-Ying, Bigio D., Smith T.G., Melt blending of linear low-density polyethylene and polystyrene in a Haake internal mixer. II. Morphology-processing relationships. *Journal of Applied Polymer Science*. 2003; 129–141. Available from: [doi: 10.1002/app.1995.070580114](https://doi.org/10.1002/app.1995.070580114).
102. Maharanaa T., Mohanty B., Negi Y.S. Melt-solid polycondensation of lactic acid and its biodegradability // *Progress in Polymer Science*. 2008, V. 34: 99–124 p.
103. Garlotta D. A literature review of poly (lactic acid). *J. Polym Environ*. 2001: 63–84.
104. Kamluk A.N., Likhmanau A.O. Experimental determination of the rational geometrical parameters of the sprinkler frame arms and deflector on the expansion rate and stability of foam. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus, Physical-Technical Series*. 2019; 64(1): 60–68. Available from: [doi: 10.29235/1561-8358-2019-64-1-60-68](https://doi.org/10.29235/1561-8358-2019-64-1-60-68).
105. Белов Д. Биоразлагаемый полимер полилактид // *Наука и инновации*. – 2013. – № 9. – С. 21–23.
106. Фомин В.А. Состояние и направления развития работ по получению биоразлагаемых полимеров из молочной кислоты // *Пластические массы*. – 2012. – № 3. – С. 56–64.
107. Ayooob M., Lee S., Kim Y.J. Well-defined high molecular weight polyglycolide-b-poly (L-) lactide-b-polyglycolide triblock copolymers: synthesis, characterization and microstructural analysis. *J. Polym Res*. 2020; 27: 109. Available from: [doi: 10.1007/s10965-019-2001-4](https://doi.org/10.1007/s10965-019-2001-4).
108. Cameron R.E., Kamvari M. A Synthetic bioresorbable polymers. In: *Durability and reliability of medical polymer*. Woodhead Publishing; 2020. p. 96–118.
109. Dobrzynski P., Kasperczyk J., Janeczek H., Bero M. Synthesis of biodegradable glycolide/l-lactide copolymers using iron compounds as initiators. *Polymer (Guildf)*. 2002; 43: 2595–2601. Available from: [doi: 10.1016/S0032-3861\(02\)00079-4](https://doi.org/10.1016/S0032-3861(02)00079-4).
110. Gorrasi G., Meduri A., Rizzarelli P. et al. Preparation of poly(glycolide-co-lactide)s through a green process: analysis of structural, thermal, and barrier properties. *React & Funct Polym*. 2016; 109: 70–78. Available from: [doi: 10.1016/j.reactfunctpolym.2016.10.002](https://doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2016.10.002).
111. Ramdhanie L.I., Aubuchon S.R., Boland E.D. et al. Thermal and mechanical characterization of electrospun blends of poly (lactic acid) and poly (glycolic acid). *Polym J*. 2006; 38: 1137–1145. Available from: [doi: 10.1295/polymj.PJ2006062](https://doi.org/10.1295/polymj.PJ2006062).

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 II» опубликована в журнале «Нанотехнологии в строительстве» № 1/2021.

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

Буйлова Евгения Андреевна, кандидат химических наук, доцент каф. «Прикладные и естественнонаучные дисциплины», ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет»; г. Уфа, Россия, e-mail: evg-builova@yandex.ru

Зарипов Ильназ Ильгизович, аспирант каф. «Прикладные и естественнонаучные дисциплины», ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет»; г. Уфа, Республика Башкортостан, Россия, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2051-831X>, e-mail: ilnaz.zaripov1996@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.