

НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ОБОРУДОВАНИЕ NEW TECHNOLOGICAL PROCESSES AND EQUIPMENT

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 66 (091)
DOI: 10.18503/1995-2732-2025-23-3-151-158



ТЕХНОЛОГИЯ СИНТЕЗА БИОРАЗЛАГАЕМЫХ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ЖЕЛАТИНА

Мишурина О.А., Муллина Э.Р., Шувалова М.М., Репина А.А., Лизогуб В.А., Шибеева А.С.

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия

Аннотация. В данной работе приведены технологические решения по синтезу биоразлагаемых органических полимеров на основе желатина и глицерина. Представлен анализ существующих категорий полимерных материалов. Разработана методика синтеза биоразлагаемой композиции экополимера на основе природной матрицы. Основа матрицы синтезируемого биополимера включала два основных компонента: желатин и глицерин в различных модельных соотношениях. Представлены результаты исследования по установлению влияния компонентного состава матрицы и технологических параметров синтеза на эксплуатационные свойства готового продукта. Исследована возможность повышения эксплуатационных характеристик готового продукта за счет введения в матрицу биокомпозита моделирующих добавок, направленных на упрочнение межмолекулярных связей полимерной структуры. Дана сравнительная характеристика основных эксплуатационных свойств синтезируемых образцов природного биополимера в сравнении с аналоговыми образцами синтетических полимерных материалов на основе полиэтилена и полипропилена. По итогам полученных данных сформулированы основные преимущества биоразлагаемых природных композитов и синтетических материалов. Отмечено что, синтетические полимерные композиции на основе полиэтилена и полипропилена по основным прочностным показателям в большей или меньшей степени превосходят природные экокомпозиты на основе желатина и глицерина, однако экологичность и безопасность эксплуатации разработанной матрицы экополимера является перспективным базисом для дальнейших исследований. Представлены результаты кинетики процесса биоразложения синтезированных образцов экополимера в почве. Сформулированы выводы о возможности эффективного применения синтезированных образцов экополимера в различных отраслях промышленности.

Ключевые слова: биоразлагаемые экополимеры, желатин, глицерин, модифицирующие добавки, прочностные свойства, деструкция

© Мишурина О.А., Муллина Э.Р., Шувалова М.М., Репина А.А., Лизогуб В.А., Шибеева А.С., 2025

Для цитирования

Технология синтеза биоразлагаемых полимерных материалов на основе желатина / Мишурина О.А., Муллина Э.Р., Шувалова М.М., Репина А.А., Лизогуб В.А., Шибеева А.С. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2025. Т. 23. №3. С. 151-158. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-3-151-158>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

TECHNOLOGY OF SYNTHESIS OF BIODEGRADABLE POLYMER MATERIALS BASED ON GELATIN

Mishurina O.A., Mullina E.R., Shuvalova M.M., Repina A.A., Lizogub V.A., Shibaeva A.S.

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Abstract. This paper presents technological solutions for the synthesis of biodegradable organic polymers based on gelatin and glycerin. An analysis of existing categories of polymeric materials is presented. A method for synthesizing a biodegradable polymer composition based on a natural matrix is developed. The matrix base of the synthesized biopolymer included two main components: gelatin and glycerin in various model ratios. The results of the study on establishing the influence of the component composition of the matrix and technological parameters of synthesis on the operational properties of the finished product are presented. The possibility of increasing the operational characteristics of the finished product by introducing modeling additives into the biocomposite matrix aimed at strengthening the intermolecular bonds of the polymer structure is investigated. A comparative characteristic of the main operational properties of the synthesized samples of natural biopolymers is given in comparison with analogous samples of synthetic polymeric materials based on polyethylene and polypropylene. Based on the results of the data obtained, the main advantages of biodegradable natural composites and synthetic materials are formulated. It is noted that synthetic polymer composites based on polyethylene and polypropylene are superior to natural eco-composites based on gelatin and glycerin to a greater or lesser extent in terms of their main strength indicators, however, the environmental friendliness and safety of operation of the developed eco-polymer matrix is a promising basis for further research. The results of the kinetics of the biodegradation process of the synthesized polymer samples in the soil are presented. Conclusions are formulated about the possibility of effective application of the synthesized copolymer samples in various industries.

Keywords: biodegradable polymers, gelatin, glycerin, modifying additives, strength properties, destructio

For citation

Mishurina O.A., Mullina E.R., Shuvalova M.M., Repina A.A., Lizogub V.A., Shibaeva A.S. Technology of Synthesis of Biodegradable Polymer Materials Based on Gelatin. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2025, vol. 23, no. 3, pp. 151-158. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-3-151-158>

Введение

В настоящее время трудно представить себе привычный образ жизни современного человека без использования различных полимерных материалов. При этом следует отметить ярко выраженную тенденцию неуклонного роста их производства, что связано с высокими темпами их всеобщего потребления. Так, мировое производство синтетических пластмасс в настоящее время уже достигло 150 млн т в год и продолжает расти [1].

По классическим технологическим схемам современные пластики синтезируются преимущественно из искусственных полимерных материалов, структурные элементы которых не встречаются в природной экосистеме, следовательно, в условиях окружающей среды они не могут самопроизвольно подвергаться биодеструкции. Как следствие, основной нарастающей проблемой гиперпотребления синтетических материалов является их химическая устойчивость к различным факторам окружающей среды (температура, свет, влажность, наличие окислителей и др.), позволяющая оставаться нетронутыми в течение многих десятилетий [2]. Только в России объемы полимерных отходов уже составляют около

75 тыс. т в год, и при этом только от 3 до 10% подвергаются вторичной переработке [3].

Данные аспекты указывают на актуальность проведения исследований в области разработки инновационных экополимерных композитов, включающих в базисной матрице природные полимеры, позволяющие встраиваться в экосистему без урона окружающей среде и при этом по своим потребительским свойствам не уступающие обычным пластикам и пленкам. К данной категории полимерных материалов относятся биоразлагаемые полимеры. Биополимеры – это полимеры, которые могут самопроизвольно разрушаться под действием факторов внешней среды, при этом не нанося вред экосистеме.

В условиях эксперимента структура матрицы композита биополимера разрабатывалась на основании взаимосвязи между физико-химическими особенностями молекулярной структуры биополимера, а также его химическими свойствами и естественными процессами окружающей экосистемы.

Процессы природной биодеструкции синтезируемого экополимера обусловлены, прежде всего, действием микроорганизмов в аэробных и анаэробных условиях, конечными продуктами распада которых являются диоксид углерода, метан, вода и различные

неорганические соединения. Конечные продукты биораспада исследуемых полимерных композитов являются питательной средой для микроорганизмов. Под действием ферментативного катализа протекают химические процессы, в результате которых структурированные полимерные цепи расщепляются на продукты биотического разложения, и в большинстве случаев являются экзотермическими. Суммарно образующиеся в результате биодеструкции биохимические продукты нетоксичны и являются составной частью окружающей биосистемы [4-6].

На кинетику процесса биодеструкции экополимера в условиях окружающей среды оказывают влияние следующие параметры системы: базовая матрица полимера, ферменты, участвующие в химических реакциях, и условия протекания биохимических процессов. В итоге суммарно все реакции природной биодеструкции полимера можно разделить на два основных типа: реакции, основанные на окислительно-восстановительных процессах, и реакции, основывающиеся на процессах гидролиза (в различных средах). Оба процесса могут протекать как одновременно, так и последовательно, поэтапно.

Признаки биодеструкции полимерных материалов отмечаются, прежде всего, по ухудшению основных характеристик эксплуатационных свойств полимера. Такие процессы могут объясняться частичным разрушением длины полимерных цепочек, которые напрямую определяют прочностные характеристики полимера. Укорачивание полимерных звеньев приводит к потере физико-механических характеристик (прочности, предела прочности при разрыве, предела прочности при изгибе и др.).

Следующим этапом процесса биодеструкции экополимера является аккумуляция продуктов расщепления полимера микроорганизмами. Данная стадия биораспада является лимитирующей, так как фрагменты деструкции полимера синтезируются в конечные минеральные продукты под действием микроорганизмов [7]. Таким образом, суммарные процессы биодеструкции природного полимера абсолютно безвредны для окружающей среды.

Синтезируемая из биопластика одноразовая посуда и другая потребительская продукция полностью безопасна для здоровья человека. Для данной категории материалов характерна прежде всего высокая биологическая совместимость с организмом человека, благодаря чему они наиболее востребованы в косметологии, медицине и пищевой промышленности [8]. Актуальность использования биопластика обусловлена также тем, что он может изготавливаться не только из ископаемого сырья, запасы которого ограничены, но и из возобновляемых материалов (например, из полимолочной кислоты, капролактона, модифицированного крахмала, целлюлозы, хитина, хитозана и других углеводов) [9]. В связи с этим необходимо разрабатывать и внедрять экологически безопасные материалы, кото-

рые смогут заменить доминирующую долю синтетического пластика.

Биоразлагаемые полимеры изготавливались из растительных материалов, таких как кукуруза, картофельный крахмал, пшеница и сахарный тростник, начиная с 1960-х годов. Однако затраты на производство были слишком высокими, тогда как качество полимера – далеко неудовлетворительным. В 1980-х годах в США, Италии и Германии на рынке упаковки появились первые биоразлагаемые полимеры, сочетающие крахмал и различные синтетические смолы. Они сохранили характеристики синтетических материалов, но приобрели способность разлагаться естественным образом под воздействием природных компонентов. Толчком к развитию этого материала послужили нефтяные потрясения 1970-х годов, которые привели к росту цен на традиционное полимерное сырье [10]. Актуальность и востребованность биоразлагаемых материалов также обусловлены ресурсо-воспроизводящим аспектом, а именно данная категория полимеров синтезируется преимущественно из природных, а следовательно, возобновляемых ресурсов, таких как модифицированные формы крахмала, целлюлоза, хитин, хитозан, желатин и другие органические соединения. Современные тенденции указывают на значительное увеличение объемов производства биополимеров, что позволяет сделать вывод – данный сегмент производства полимерных материалов имеет значительный потенциал для освоения и коммерциализации.

Цель представленной работы состояла в разработке технологии синтеза биоразлагаемой композиции экополимера со стабильными эксплуатационными качествами.

Для достижения поставленной цели были поставлены следующие задачи:

1. Рассмотреть существующие категории полимерных материалов.
2. Разработать методику синтеза биоразлагаемой композиции экополимера на основе природной матрицы.
3. Исследовать влияние компонентного состава матрицы полимера и технологических параметров синтеза на эксплуатационные свойства готового продукта.
4. Оценить параметр биоразлагаемости синтезированных образцов биополимера в почвенной среде.

Основа матрицы синтезируемого биополимера включала два основных компонента: желатин и глицерин в различных модельных соотношениях.

Использование желатина в базисной матрице синтезируемого биополимера обусловлено его высокой способностью к образованию устойчивой лиофильной коллоидной системы при стандартных условиях, что обеспечивает высокую связывающую и упрочняющую составляющую в структуре полимера. Данные параметры компонента напрямую обусловлены особенностями строения и химической природы

желатина. Желатин является основным продуктом переработки коллагена, поэтому по аминокислотному и элементарному составу желатин очень близок к коллагену [11]. Основными потребительскими свойствами желатина является высокая вязкость диспергированных растворов, стабильность гелеобразной структуры коллоида, температура плавления и застудневания, измеренные при стандартных условиях. Актуальность его эффективного использования в базисной структуре биополимера обусловлена прежде всего его устойчивыми гелеобразующими свойствами. Оптимальная пропорция растворения желатина в воде в заявляемом решении равна 1:10.

Глицерин в составе базисной матрицы полимера использовался в качестве пластифицирующего агента пленки полимера. Его процентный состав в основе биополимера напрямую определял пластичность и гибкость синтезируемых пленок. В процессе исследований было отмечено, что при его недостатке в образцах пленки наблюдается значительное снижение параметров ее растяжимости, а при сгибах отмечается растрескивание по линии перегиба. Однако при избытке глицерина пленки плохо подвергаются процессу отвердевания, что не дает возможности формирования устойчивой гидрофобной поверхности материала.

Для «прошивки» пленочной структуры базисной матрицы полимера в работе использовали фермент транскляминазы в сочетании с молочной сывороткой. Данный модификатор характеризуется уникальными свойствами, направленными на эффективное «сшивание» пленок на основе природных компонентов, таких как хитозан, хитин, глицерин и желатин. Такая химическая особенность фермента транскляминазы обусловлена, прежде всего, образованием прочных ковалентных связей между свободными аминокислотными и гамма-карбоксамидными группами, способствуя внутри- и межмолекулярному перекрестному «сшиванию» белковых молекул [9, 12]. Установлено, что оптимальные упрочняющие свойства фермента транскляминазы достигаются при условии сочетания его с молочной сывороткой в соотношении 1:4. Отмечено, что при увеличении концентрации фермента транскляминазы по отношению к спутниковому компоненту – молочной сыво-

ротке отмечается увеличение прочностных показателей пленок, однако усиливается ломкость материала при перегибах, даже при увеличении количества пластификатора (глицерина). Кроме того, известно, что пленки, в состав которых входит фермент транскляминазы, характеризуются высокими антибактериальными свойствами [13, 14].

Методика синтеза

Желатин растворяют в воде в порционном соотношении 1:10 при температуре не выше 60°C. Образовавшуюся дисперсную систему оставляют набухать в течение 40 мин. Затем полученный однородный коллоидный раствор при интенсивном перемешивании смешивают с глицерином и далее вводят фермент транскляминазы с молочной сывороткой (взятой в исходном соотношении 1:4).

При роспуске желатина необходимо особо тщательно контролировать рабочий температурный режим коллоидной суспензии – смесь не должна закипеть или образоваться густая белая пена. В случае отклонения от заданных температурных параметров наблюдается стойкое формирование дефектов на готовой пленке в виде пузырей (рис. 1).

Процесс ферментативного «сшивания» основных компонентов базисной матрицы полимера протекает с очень высокой скоростью, поэтому после введения транскляминазы в суспендированную массу полимерного композита необходимо тщательное перемешивание формирующегося состава в течение 2 мин при температуре не менее 45°C и не более 50°C – данный диапазон является оптимальным для упрочняющего действия транскляминазы.

Формируем образцы полимерной пленки. Для этого готовую суспендированную массу полимера переносили в плоскодонные заготовки. Количество композита для каждого образца отливки варьировалось в зависимости от заданного параметра толщины пленки полимера.

Процесс отверждения пленкообразующего композита при 20–25°C протекал в течение 8–9 ч (в зависимости от формируемой толщины пленки). При увеличении температурного режима до 30°C – в течение 4–5 ч.

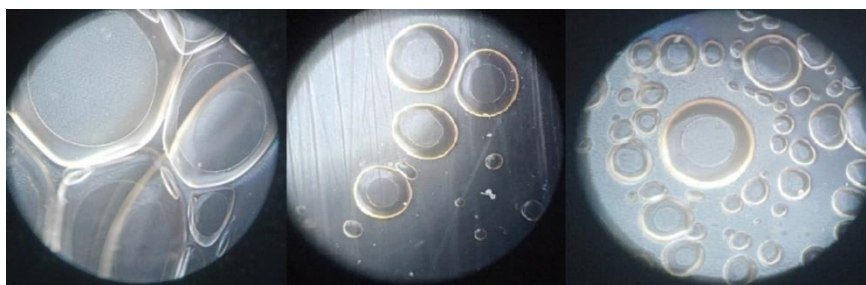


Рис. 1. Возможные дефекты на готовой пленке при нарушении температурного режима
Fig. 1. Possible defects on the finished film in case of violation of the temperature regime

По результатам эксперимента были получены однородные прозрачные образцы пленки, характеризующиеся хорошей гибкостью и прочностью. Кроме того, следует отметить что, базовый композиционный состав полимера не имеет запаха, а также может принимать различные формы в зависимости от формы сосуда, в который заливают раствор.

Материалы и оборудование

Для диспергирования суспендированных растворов использовали электромешалку VEB MLW ER-10 с различным диапазоном скоростей (в зависимости от вязкости растворов). Для нагревания и поддержания стабильной температуры дисперсной системы базисной матрицы полимера использовалась водяная баня БКЛИМ.

Для повышения температуры дисперсии устанавливали температурный режим III, после доведения реакционной системы до заданного температурного интервала температуры 50–60°C переключали водяную баню на температурный режим I и далее поддерживали постоянную температуру.

Для определения прочностных свойств уже готовой биоразлагаемой полимерной пленки использовали испытательную машину ИП 5158 – 0,5, которая определяет деформационные и прочностные характеристики полимерных материалов. Оборудование может определить прочность при растяжении и разрыве полимерной пленки, а также относительное удлинение при максимальной нагрузке и разрыве.

Полученные результаты и их обсуждение

Экспериментальные исследования по установлению оптимального количественного соотношения основных компонентов базисного состава биополимера проводили на различных модельных составах. Основные соотношения базисных компонентов, используемые при отработке основных технологических параметров синтеза, приведены в **таблице**.

Полученные результаты влияния различных модификаций базисного состава матрицы биополимера на прочностные характеристики готовых образцов пленки представлены на **рис. 2**.

Кроме того, представлен сравнительный анализ эксплуатационных характеристик синтезируемых образцов биополимера с основными эксплуатационными параметрами синтетических полимеров – полиэтилена и полипропилена.

Сравнительный анализ полученных данных (см. **рис. 2**) показал, что образцы № 1 и 8 характеризуются максимальными прочностными показателями, однако визуальный анализ полученных образцов пленки показал, что при сгибе пленки четко фиксируется частичное разрушение материала по месту перегиба.

Данный факт указывает на ограниченную возможность применения данных образцов пленки в качестве гибкого эластичного упаковочного материала. И наоборот, данный композит может широко применяться для получения жестких конструкционных изделий – стаканчики, подложки и т.д.

Таблица. Исследуемые образцы компонентного состава базисной матрицы синтезируемого биополимера

Table. The studied samples of the component composition of the basic matrix of the synthesized biopolymer

Варианты количественного (%) соотношения основных компонентов биополимера (в пересчете на массу сухого вещества) Желатин / Глицерин			
Образец № 1	Образец № 2	Образец № 3	Образец № 4
95% / 5%	75% / 25%	60% / 40%	50% / 50%
Образец № 5	Образец № 6	Образец № 7	Образец № 8
95% / 5%	75% / 25%	60% / 40%	50% / 50%

*Во всех вариантах матрицы использовали постоянный объем моделирующей добавки – фермент транслглютаминазы с молочной сывороткой (в исходном соотношении 1:4).

Хорошие эксплуатационные характеристики показал образец биополимера № 7 – отмечается образование прочной эластичной пленки, при сгибании которой не фиксируется никаких признаков деструкции материала в месте перегиба.

Сравнительный анализ эксплуатационных параметров полученных образцов биопленки в сравнении с аналогичными параметрами, полученными для образцов полиэтилена и полипропилена, показал, что последние имеют более высокие значения. Однако синтезируемые образцы биокompозита могут быть вполне конкурентноспособны в определенных областях потребления.

Оценка биоразлагаемости полученных образцов пленочных материалов была проведена в почвенной среде при комнатной температуре (около 25°C). Результаты процесса деструкции фиксировали визуально.

Полная деструкция непосредственно синтезируемых образцов пленки отмечалась по истечении 6 сут с момента погружения в почву. Признаки полной деструкции в почве у образцов пленки после месячного хранения при нормальных условиях были отмечены по истечении 14 сут. Для образцов пленки, выдержанных при комнатной температуре в течение трех месяцев, полное разложение в почве отмечено после 18 сут.

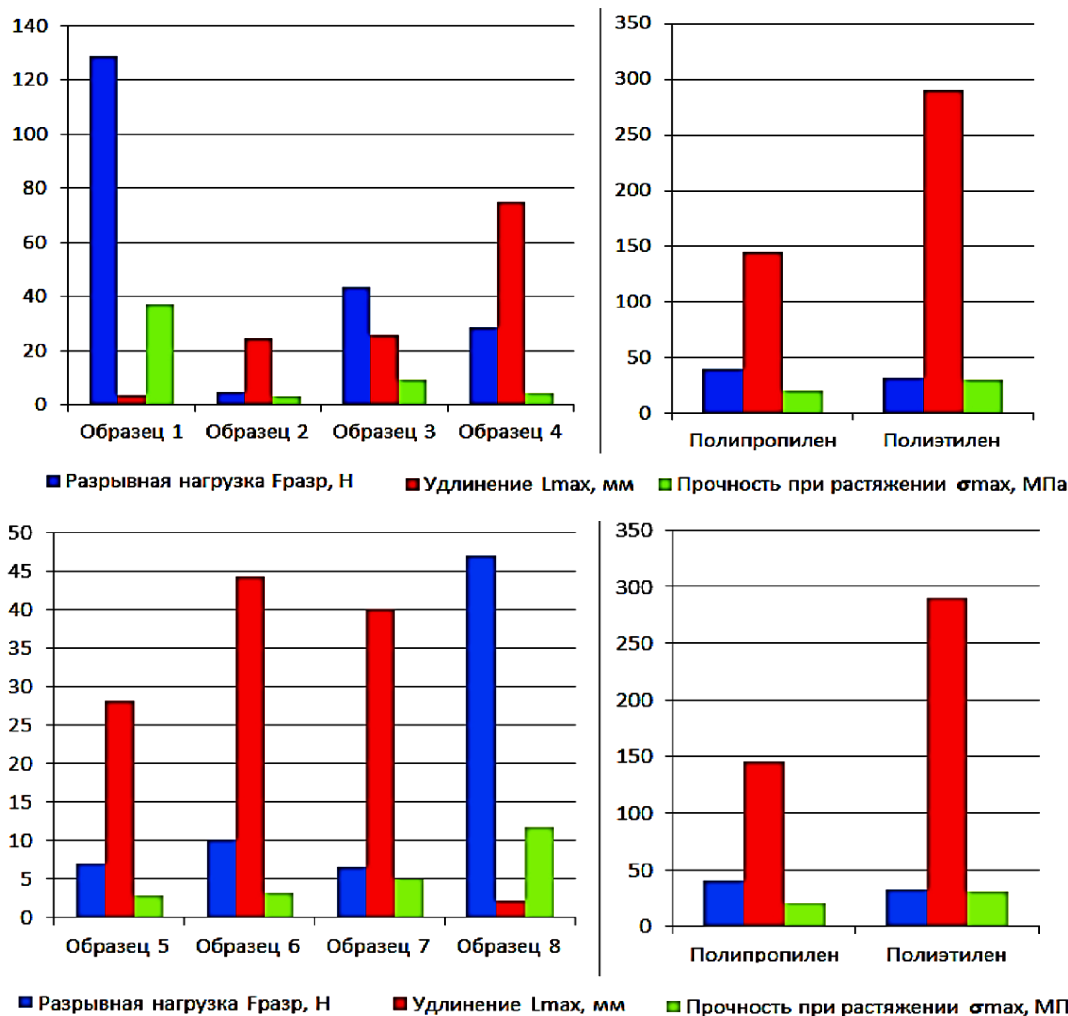


Рис. 2. Сравнительный анализ прочностных свойств готовых образцов пленки биополимера при различном соотношении основных компонентов базисной матрицы

Fig. 2. Comparative analysis of the strength properties of finished biopolymer film samples with different ratios of the main components of the basic matrix

Закключение

1. В работе разработана и апробирована методика синтеза биополимерных пленочных композитов на основе желатина и глицерина с использованием модифицирующей упрочняющей добавки – фермента транскляминазы.

2. Полученные результаты экспериментальных исследований позволяют утверждать, что в сравнении с существующими аналоговыми решениями разработанный композиционный состав матрицы биоразлагаемой пленки позволяет повысить показатели ее прочности на 8-12%, растяжения – на 18-27%. Кроме того, значительно сокращается временной интервал природной деструкции полученного биополимера в почвенной среде.

3. Практическая значимость полученных результатов заключается в разработке эффективных технологических параметров синтеза биополимера на основе природных материалов с возможностью повы-

шения основных эксплуатационных характеристик полимера за счет введения эффективной модифицирующей добавки.

4. Полученные образцы биополимера характеризуются высокой скоростью деструкции в естественных условиях за короткий период времени без вреда для окружающей среды, обладают высокой совместимостью с биологическими системами и имеют необходимую прочность и гибкость.

Список источников

1. Сравнительный анализ физико-механических свойств биоразлагаемых и синтетических полимеров / Ершова О.В., Медяник Н.Л., Мишурина О.А., Бессонова Ю.А., Багреева К.В. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2021. Т. 19, № 4. С. 56-63.
2. Васильева Н.Г. Биоразлагаемые полимеры // Вестник Казанского технологического университета. 2013. № 22. С. 156-157.

3. Александрова Л.В., Успенская М.В., Ишевский А.Л. Обзор: биodeградируемые упаковочные пленочные материалы // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2023. Т. 2, № 85. С. 216-225.
4. Poly(lactic Acid): Synthesis, Structures, Properties, Processing, and Applications / Auras R. A., Lim Loong Tak, Selke S. E., Tsuji H. Hoboken: John Wiley & Sons, 2011. P. 443.
5. Ершова О.В. Деструкция полимерных пленок, модифицированных оксибиоразлагаемой добавкой d2W // Успехи современного естествознания. 2016. № 11–2. С. 221–225.
6. Мухаметдинова А.А. Определение деструкции биоразлагаемых полимеров // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: тезисы докладов 78-й международной научно-технической конференции. Магнитогорск, 2020. С. 30-34.
7. Бозарова Г.К., Бозарова Г.К., Хачатуров А.Е. Место биodeградируемых полимеров в общем объеме производства и использования пластиков // Теоретическая и прикладная экология. 2020. № 2. С. 93-99.
8. Бурак Л.Ч. Обзор разработок биоразлагаемых упаковочных материалов для пищевой промышленности // Ползуновский вестник. 2023. № 1. С. 91-105.
9. Биodeградируемые пленочные материалы на основе природных, искусственных и химически модифицированных полимеров / Закирова А.Ш., Канарская З.А., Михайлова О.С., Василенко С.В. // Вестник Казанского технологического университета. 2014. № 10. С. 114-121.
10. Ren J. Biodegradable Poly (Lactic Acid): Synthesis, Modification, Processing and Applications. Berlin: Springer Verlag, 2011. P. 208.
11. Исследование свойств синтетических и биоразлагаемых полимеров с целью возможности их использования в пищевой отрасли / Ершова О.В., Муллина Э.Р., Бессонова Ю.А., Багреева К.В. // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2022. № 1 (91). С. 245-251.
12. Bastioli C. Handbook of biodegradable polymers. Shawbury, United Kingdom: Rapra Technology Limited, 2005. P. 271.
13. Platt D.K. Biodegradable polymers: market report. Shawbury, United Kingdom: Rapra Technology Limited, 2006. P. 2002.
14. Ершова О.В., Чупрова Л.В. Решение проблемы утилизации отходов полимерных материалов // Фундаментальные исследования. 2016. № 11–2. С. 271–275.
- Kazan Technological University], 2013;(22):156-157. (In Russ.)
3. Aleksandrova L.V., Uspenskaya M.V., Ishevsky A.L. Review: biodegradable packaging film materials. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta inzhenernykh tekhnologiy* [Bulletin of the Voronezh State University of Engineering Technologies]. 2023;2(85):216-225. (In Russ.)
4. Auras R.A., Lim Loong Tak, Selke S.E., Tsuji H. Poly(lactic Acid): Synthesis, Structures, Properties, Processing, and Applications. Hoboken: John Wiley & Sons, 2011:443.
5. Ershova O.V. Destruction of polymer films modified with oxybiodegradable additive d2W. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya* [Advances in modern natural science], 2016;(11-2):221-225. (In Russ.)
6. Mukhametdinova A.A. Determination of the destruction of biodegradable polymers. *Aktualnye problemy sovremennoy nauki, tekhniki i obrazovaniya: tezisy dokladov 78-y mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Current issues of modern science, technology and education. Proceedings of the 78th international scientific and technical conference]. Magnitogorsk, 2020, pp. 30-34. (In Russ.)
7. Bozarova G.K., Bozarova G.K., Khachaturov A.E. The place of biodegradable polymers in the total volume of production and use of plastics. *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya* [Theoretical and Applied Ecology], 2020;(2):93-99. (In Russ.)
8. Burak L.Ch. Review of developments of biodegradable packaging materials for the food industry. *Polzunovskiy vestnik* [Polzunovskiy Vestnik], 2023;(1):91-105. (In Russ.)
9. Zakirova A.Sh., Kanarskaya Z.A., Mikhailova O.S., Vasilenko S.V. Biodegradable film materials based on natural, artificial and chemically modified polymers. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of the Kazan Technological University], 2014;(10):114-121. (In Russ.)
10. Ren J. Biodegradable Poly (Lactic Acid): Synthesis, Modification, Processing and Applications. Berlin: SpringerVerlag, 2011, p. 208.
11. Ershova O.V., Mullina E.R., Bessonova Yu.A., Bagreeva K.V. Study of the properties of synthetic and biodegradable polymers for the purpose of their possible use in the food industry. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta inzhenernykh tekhnologiy* [Bulletin of the Voronezh State University of Engineering Technologies], 2022;(1(91)):245-251. (In Russ.)
12. Bastioli C. Handbook of biodegradable polymers. Shawbury, United Kingdom: Rapra Technology Limited, 2005, p. 271.
13. Platt D.K. Biodegradable polymers: market report. Shawbury, United Kingdom: Rapra Technology Limited, 2006, p. 2002.
14. Ershova O.V., Chuprova L.V. Solution to the problem of recycling polymeric materials. *Fundamentalnye issledovaniya* [Fundamental research], 2016;(11-2):271-275. (In Russ.)

References

Поступила 09.01.2025; принята к публикации 26.03.2025; опубликована 30.09.2025
Submitted 09/01/2025; revised 26/03/2025; published 30/09/2025

Мишурина Ольга Алексеевна – кандидат технических наук, доцент кафедры химии,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: olegro74@mail.ru. ORCID 0000-0003-3412-8902

Муллина Эльвира Ринатовна – кандидат технических наук, доцент кафедры химии,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: e.mullina@inbox.ru. ORCID 0000-0002-4254-3260

Шувалова Мария Михайловна – студент,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: mariashuvalova81@gmail.com.

Репина Анна Андреевна – студент,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: repinaana123@gmail.com.

Лизогуб Виктория Андреевна – студент,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: vikulya.lizogub@mail.ru.

Шибеева Анастасия Сергеевна, – студент,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email a_shibaeva03@mail.ru.

Olga A. Mishurina – PhD(Eng.), Associate Professor of the Department of Chemistry,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: olegro74@mail.ru. ORCID 0000-0003-3412-8902

Elvira R. Mullina – PhD(Eng.), Associate Professor of the Department of Chemistry,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: e.mullina@inbox.ru. ORCID 0000-0002-4254-3260

Maria M. Shuvalova – Student,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: mariashuvalova81@gmail.com.

Anna A. Repina – Student,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: repinaana123@gmail.com.

Victoria A. Lizogub – Student,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: vikulya.lizogub@mail.ru.

Anastasia S. Shibaeva – Student,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: a_shibaeva03@mail.ru.