

Синтез и переработка полимеров и композитов на их основе  
Synthesis and processing of polymers and polymeric composites

УДК 617-089.844+544.03

<https://doi.org/10.32362/2410-6593-2024-19-6-517-527>

EDN ZWXRLX



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

## Влияние модифицирующих добавок на структуру и свойства биоразлагаемых смесей на основе поли-3-гидроксibuтирата и бутадиен-нитрильного каучука

П.А. Повернов<sup>1</sup>, Л.С. Шибряева<sup>1,2,✉</sup>, С.М. Аншин<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Институт биохимической физики им. Н.М. Эмануэля, Российская академия наук, Москва, 119334 Россия

<sup>2</sup> МИРЭА — Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

<sup>3</sup> Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова, Москва, 117997 Россия

✉ Автор для переписки, e-mail: [lyudmila.shibryaeva@yandex.ru](mailto:lyudmila.shibryaeva@yandex.ru)

### Аннотация

**Цели.** Изготовить и исследовать полимерные смешевые материалы на основе поли-3-гидроксibuтирата (ПГБ) микробиологического происхождения и синтетического бутадиен-нитрильного каучука (БНКС) марки БНКС-28. Биоразлагаемость ПГБ предполагает возможность его применения в инвазивных медицинских целях, однако это в значительной степени ограничивается его хрупкостью. В связи с этим, целью данной работы являлось нахождение способов изменения молекулярной структуры композитов на основе ПГБ для придания им достаточных физико-механических характеристик и увеличения их совместимости без нарушения биоразлагаемости.

**Методы.** В работе использовался эластичный материал БНКС-28, а также различные модификаторы (сорбитан олеат, эпоксицированное соевое масло, силоксановый каучук) и дополнительные полимерные компоненты: сополимер этилена и винилацетата и полибутиленадипинаттерефталат. Смеси были получены в пластикордере PL 2200-3 (Брабандер, Россия). Пленки смесей готовили прессованием, выдерживая материал при 180°C под давлением в течение 3 мин с последующей закалкой в холодной воде. Поверхности пленок и пластин смесей изучали с помощью оптического микроскопа Axio Imager Z2m (Carl Zeiss, Германия) с программным обеспечением Axio Vision при увеличении 50× и 200× в отраженном свете. Упруго-прочностные свойства материалов при растяжении измерялись на универсальной разрывной машине Instron 3365 (Instron, Великобритания).

**Результаты.** Установлена роль модификаторов и полимерных добавок в композиции ПГБ–БНКС и их влияние на морфологию, кристалличность и механические характеристики смесей. Введение модификаторов позволило снизить средний размер частиц фазы БНКС в матрице ПГБ на 30–50%, а также изменило их морфологию. Равномерность распределения частиц при этом увеличилась, что позитивно повлияло на механические характеристики систем.

**Выводы.** Показано, что модификаторы меняют морфологию смесей, уменьшают средний размер частиц фазы БНКС на 30–50% и положительно влияют на прочность систем. Полученные композиции ввиду изменения структуры их межфазных слоев и, как следствие, физико-механических характеристик пригодны для применения в репаративной костной и зубной хирургии, а также для создания ранозаживляющих материалов.

### Ключевые слова

полигидроксиалканоаты, костные имплантаты, остеогенез, биodeградируемые полимерные композиционные материалы, остеопластические материалы

Поступила: 06.04.2023

Доработана: 17.09.2024

Принята в печать: 16.10.2024

## Для цитирования

Повернов П.А., Шибряева Л.С., Аншин С.М. Влияние модифицирующих добавок на структуру и свойства биоразлагаемых смесей на основе поли-3-гидроксибутирата и бутадиен-нитрильного каучука. *Тонкие химические технологии*. 2024;19(6):517–527. <https://doi.org/10.32362/2410-6593-2024-19-6-517-527>

## RESEARCH ARTICLE

# Influence of modifying additives on the structure and properties of biodegradable mixtures based on poly-3-hydroxybutyrate and nitrile butadiene rubber

Pavel A. Povernov<sup>1</sup>, Lyudmila S. Shibryaeva<sup>1, 2, ✉</sup>, Sergei M. Anshin<sup>3</sup>

<sup>1</sup> N.M. Emanuel Institute of Biochemical Physics, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119334 Russia

<sup>2</sup> MIREA — Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

<sup>3</sup> Plekhanov Russian University of Economics, Moscow, 117997 Russia

✉ Corresponding author, e-mail: [lyudmila.shibryaeva@yandex.ru](mailto:lyudmila.shibryaeva@yandex.ru)

## Abstract

**Objectives.** To investigate polymer composite materials based on poly-3-hydroxybutyrate (PHB) of microbiological origin and the synthetic nitrile butadiene rubber NBR-28. The biodegradability of PHB implies the possibility of its use for invasive medical purposes; however, this is significantly limited by its brittleness. The aim of this work was to search for approaches to altering the molecular structure of PHB-based composites, in order to impart them with sufficient physical and mechanical characteristics and increase their compatibility without violating biodegradability.

**Methods.** Reaction mixtures contained the elastic material NBR-28, various modifiers (sorbitan oleate, epoxidized soybean oil, siloxane rubber), and additional polymer components (ethylene–vinyl acetate copolymer and polybutylene adipate terephthalate). The mixtures were prepared in a PL 2200-3 plasticorder (*Brabender*, Russia) by pressing, holding the material at 180°C under pressure for 3 min followed by quenching in cold water. The surfaces of the films and plates of the mixtures were studied using an Axio Imager Z2m optical microscope (*Carl Zeiss*, Germany) with the Axio Vision software at 50× and 200× magnification in reflected light. The mechanical properties of materials under tension were measured using an Instron 3365 universal tensile testing machine (*Instron*, United Kingdom).

**Results.** The role of modifiers and polymer additives in the PHB–NBR-28 composites and their influence on the morphology of mixtures, crystallinity, and mechanical characteristics were established. The introduction of modifiers made it possible to reduce the average particle size of the NBR-28 phase in the PHB matrix by 30–50%, additionally changing their morphology. In this case, the uniformity of particle distribution increased, having a positive effect on the mechanical characteristics of the systems.

**Conclusions.** It was shown that the modifiers change the morphology of mixtures, reduce the average particle size of the NBR phase by 30–50%, and positively affect the strength of the systems. Owing to changes in the structure of their interfacial layers and, as a consequence, physical and mechanical characteristics, the resulting composites render suitable for use in reparative bone and dental surgery, as well as for creating wound healing materials.

## Keywords

polyhydroxyalkanoates, bone implants, osteogenesis, biodegradable polymer composite materials, osteoplastic materials

Submitted: 06.04.2023

Revised: 17.09.2024

Accepted: 16.10.2024

## For citation

Povernov P.A., Shibryaeva L.S., Anshin S.M. Influence of modifying additives on the structure and properties of biodegradable mixtures based on poly-3-hydroxybutyrate and nitrile butadiene rubber. *Tonk. Khim. Tekhnol. = Fine Chem. Technol.* 2024;19(6):517–527. <https://doi.org/10.32362/2410-6593-2024-19-6-517-527>

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время большое значение придается исследованиям и разработке материалов, имеющих прикладное применение в медицине, в частности в сфере остеопластики и зубной имплантационной хирургии [1–5]. Активно ведется поиск материалов и композиций, которые обладали бы остеопластическим действием и при этом являлись устойчивыми к бактериальным воздействиям [6–8]. Однако полимерные материалы, пригодные для использования в данной сфере ввиду их высокой степени биоразлагаемости, обладают рядом недостатков, связанных с физико-механическими характеристиками, что требует их модификации.

В литературе описаны некоторые возможные варианты модификации полимеров, такие как гидрофиллизация поверхности полимера с помощью плазмохимической обработки для увеличения адгезионных свойств [9] или модификация путем введения минерального компонента — наноразмерного гидроксиапатита для формирования пористых кальций-фосфатных композитов с регулируемой структурой [10]. Помимо этого, ведутся исследования по синтезу модификаторов специально для биоразлагаемых полимеров на основе полиэфирполиолов — поверхностно активных веществ со сверхразветвленной структурой [11, 12]. Кроме этого, проводятся исследования по созданию волокнистых материалов из поли-3-гидроксibuтирата (ПГБ) с модификаторами на основе металлокомплексов с тетрафенилпорфирином [13, 14].

В данной работе рассматривается модификация ПГБ путем введения в него бутадиен-нитрильного каучука и различных компатибилизаторов и эластификаторов для повышения совместимости композиции, повышения адгезии материала и увеличения его прочности при сохранении требуемой степени биоразлагаемости.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве основного исследуемого полимера был взят ПГБ, синтезированный микробиологическим методом (*Biomer*, Германия) с молекулярной массой  $2.1 \cdot 10^5$  и степенью кристалличности 65%. Для придания эластичности композиции использовался бутадиен-нитрильный каучук марки БНКС-28 АМН (*СК Сибур*, Россия) — синтетический полимер, являющийся продуктом радикальной сополимеризации бутадиена с акрилонитрилом в водной эмульсии.

Далее перечислены компоненты, используемые в качестве модификаторов и компатибилизаторов.

1. Эпоксидированное соевое масло (epoxidized soybean oil, ESO) (*Новохим*, Россия) — выполняет роль пластификатора и термо- и светостабилизатора. ESO позволяет увеличить гибкость готового изделия, не меняя химических свойств, снизить температуру плавления, улучшить его термо- и светостабильность [15].
2. Соплимер этилена и винилацетата (ethylene and vinyl acetate, EVA) (*Руспласт*, Россия). Добавка EVA увеличивает эластичность ПКМ до 15–25% и улучшает физико-механические характеристики. EVA способствует снижению межфазного натяжения между компонентами и увеличению термодинамической совместимости полимера и каучука [16]. Вероятно, введение функционализированного гидроксогруппами сополимера EVA (EVA-F) может дополнительно улучшить взаимодействие компонентов благодаря водородным связям между концевыми гидроксогруппами ПГБ и EVA-F. Функционализацию возможно провести методом щелочного алкоголиза EVA-F в 30% растворе КОН [17, 18].
3. Силиконовый каучук (*Экотек*, Россия) — инертный эластомер, не влияющий на биологические процессы, пригодный для использования в медицинских имплантатах, биосовместимый, гипоаллергенный, химический стабильный компонент, компатибилизатор для смеси в момент пластикации.
4. Полибутиленадипинаттерефталат (ПБАТ, англ. polybutylene adipinate terephthalate, ПБАТ) (*Anhui Juhong Trading Co.*, Китай) — статистический полимер, обладающий неупорядоченной структурой, который не может кристаллизоваться; следовательно, он может придать композиции такие характеристики как высокая гибкость и ударная вязкость, низкая жесткость и модуль упругости, а также широкий диапазон температур плавления. Важно отметить, что это полностью биоразлагаемый полимер [19].
5. Этиленгликолевый эфир олеиновой кислоты PEG-7 (*PCC Exol SA*, Польша) — может послужить в качестве компатибилизатора для ПГБ и БНКС-28 благодаря хорошей совместимости с обоими компонентами согласно литературным данным [20]. При этом PEG-7 является биологически разлагаемым веществом, растворим как в воде, так и в большинстве органических растворителей, что позволяет использовать его при приготовлении композиционных материалов как по высокотемпературной, так и по растворной технологиям. PEG-7 является безопасным и допущен для косвенного контакта с пищевыми продуктами и медикаментами.

В работе изучали образцы исходных полимеров и смесей, содержащих: 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 и 90 мас. % БНКС-28 АМН в ПГБ. Кроме этого, были изучены трехкомпонентные смеси на основе ПГБ и БНКС-28 с добавлением модификаторов (ESO, EVA, силиконового каучука, эфира олеиновой кислоты) или дополнительных полимеров (EVA и ПБАТ).

Композиты были изготовлены в пластикордере PL 2200-3 (*Брабендер*, Россия), моделирующем резиносмеситель закрытого типа. Данный прибор имеет широкую вариацию температур и скоростей работы, что позволяет исследовать композиции в широком диапазоне скоростей сдвига. Смешивание композитов для данной работы происходило в течение 5 мин при температуре от 160 до 180°C в зависимости от соотношения компонентов и типа модификатора.

Для образцов с повышенным содержанием каучука смешивание ПГБ и БНКС-28 АМН также проводили на лабораторных вальцах ПД-240 (*GDW*, Германия) с нагревом до 60°C, предварительной пластикацией каучука в течение 10 мин и с последующим введением порошка ПГБ.

Пленки смесей готовили прессованием на лабораторном прессе, выдерживая материал при 180°C под давлением в течение 3 мин с последующей закалкой в холодной воде. Поверхности пленок и пластин смесей изучали с помощью оптического микроскопа Axio Imager Z2m (*Carl Zeiss*, Германия) с программным обеспечением Axio Vision при увеличении 50× и 200× в отраженном свете.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1–6 представлены макрофотографии различных 3х-компонентных смесей с использованием модификаторов при увеличении 50× и 200×.

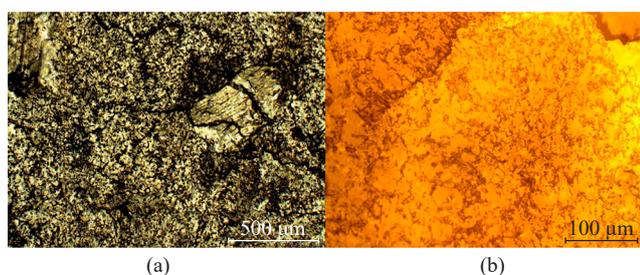
Анализ макрофотографий данных образцов установил, что силиконовый каучук (рис. 1) значительно повлиял на дисперсность частиц БНКС-28, распределенных в фазе ПГБ. Большой размер частиц

негативно влиял на равномерность распределения частиц и мог вносить дифференциацию свойств образца в зависимости от толщины изделия и степени его неровности, а также увеличивать хрупкость состава в связи с нахождением крупных инородных частиц в матрице, служащих центрами роста дефектов и трещин в образце.

Микрофотографии с увеличением 200× показывают, что морфология данных смесей хоть и является гетерогенной, но частицы БНКС-28 (темные вкрапления в матрице) представляют собой мелкодисперсные волокнистые агрегаты, образующие «пучки» и «ленты», в отличие от сферических агрегатов в случае смеси ПГБ–БНКС-28 без использования компатибилизатора [21]. При этом размер частиц в случае двухкомпонентной смеси составляет 60–100 мкм, тогда как длина «пучков» БНКС-28 с использованием совмещающего агента достигает 20–40 мкм.

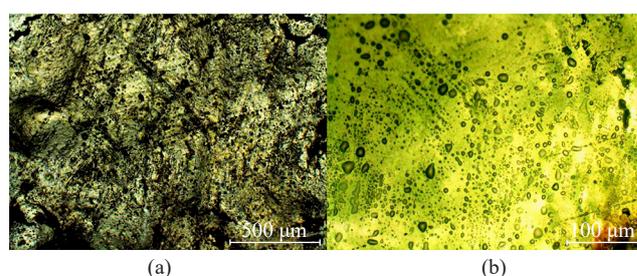
Для увеличения эластичности и биоразлагаемости смесей была изучена возможность использования ПБАТ в качестве компонента на замену каучуку. При смешении ПБАТ с ПГБ в присутствии малых количеств ESO, согласно рис. 2, возможно получить равномерно распределенные диспергированные частицы ПБАТ в матрице ПГБ. В данном случае были получены каплевидные вкрапления ПБАТ размерами от 10 до 30 мкм. При этом, в связи с высокой биоразлагаемостью обоих компонентов [19, 22] можно изменять соотношения компонентов в широком диапазоне, что позволит варьировать параметры скорости разложения и механические характеристики ПКМ под требуемый медицинский случай (зубной имплантат, костный имплантат с малой или большой механической нагрузкой, шовный биоразлагаемый материал и так далее).

Интересной для изучения композицией оказалась трехкомпонентная смесь ПГБ–БНКС-28–ПБАТ с малым содержанием каучука и ПГБ в качестве основного матрицеобразующего компонента (рис. 3). В данном случае, ПБАТ послужил совместителем



**Рис. 1.** ПГБ–БНКС-28 + Si-каучук (90/10% + 3%) с увеличением (а) 50×, (б) 200×

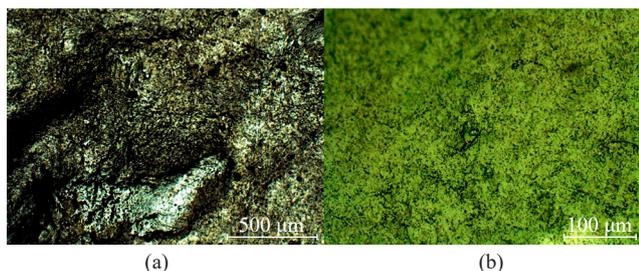
**Fig. 1.** PHB–NBR-28 + siloxane rubber (90/10% + 3%) at (a) 50× and (b) 200× magnification



**Рис. 2.** ПГБ–ПБАТ + ESO (70/30% + 3%) с увеличением (а) 50×, (б) 200×

**Fig. 2.** PHB–PBAT + ESO (70/30% + 3%) at (a) 50× and (b) 200× magnification

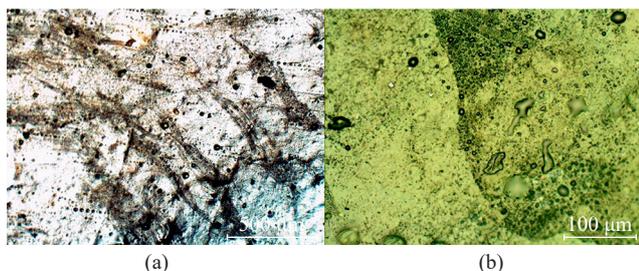
для двух других компонентов, т.к. компатибилизация как ПГБ с ПБАТ, так и БНКС с ПБАТ протекала вполне успешно. Исходя из микрофотографий, в случае с тремя компонентами и ПБАТ, и БНКС оказались равномерно распределены как в матрице ПГБ в целом, так и относительно друг друга. Дисперсность частиц БНКС и ПБАТ в матрице оказалась еще более высокой, чем в случае с Si-каучуком и ESO. Толщина агрегатов не превышала 20 мкм, а длина <40 мкм. Средний расчетный эквивалентный диаметр таких частиц составлял 125 мкм.



**Рис. 3.** ПГБ–БНКС–28–ПБАТ (60/10/30%) с увеличением (a) 50×, (b) 200×

**Fig. 3.** PHB–BNKC–28–PBAT (60/10/30%) at (a) 50× and (b) 200× magnification

Совмещение ПГБ и БНКС-28 с EVA также оказалось относительно успешным (рис. 4), однако остался открытым вопрос биodeградации данных композитов в динамике.

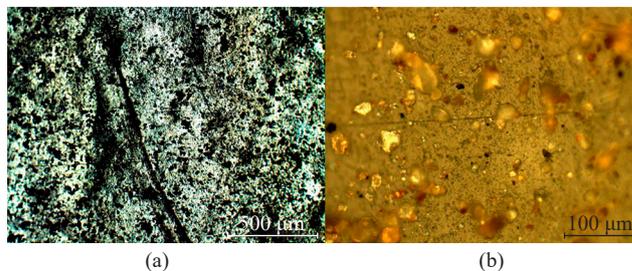


**Рис. 4.** ПГБ–БНКС–28–EVA (60/10/30%) с увеличением (a) 50×, (b) 200×

**Fig. 4.** PHB–BNKC–28–EVA (60/10/30%) at (a) 50× and (b) 200× magnification

Микрофотографии образца с 30 мас. % EVA после биоразложения в почве в течение 1 месяца представлены на рис. 5. Видно, что за данный временной отрезок произошло образование объемных дефектов и полостей в структуре материала, однако на данный момент неизвестно, происходит ли в этой смеси разложение всех компонентов, или основная потеря массы происходит за счет разрушения ПГБ. В данный момент проводятся исследования биodeградации

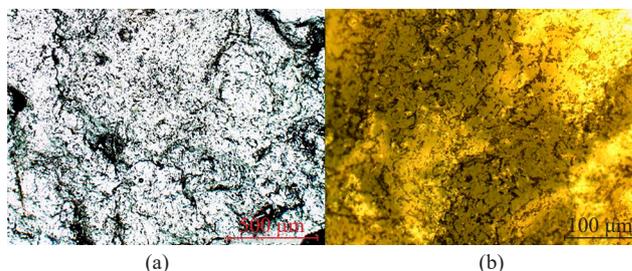
композитов с EVA, на основе которых предварительно можно сделать вывод, что при достаточной степени биоразлагаемости данных композитов использование EVA позволяет улучшить термодинамическую совместимость полимерной матрицы и каучука и снижает межфазное натяжение между ними.



**Рис. 5.** ПГБ–БНКС–28–EVA (60/10/30%); биodeградация в почве — 1 месяц; увеличение (a) 50×, (b) 200×

**Fig. 5.** PHB–BNKC–28–EVA (60/10/30%) after biodegradation in soil for 1 month at (a) 50× and (b) 200× magnification

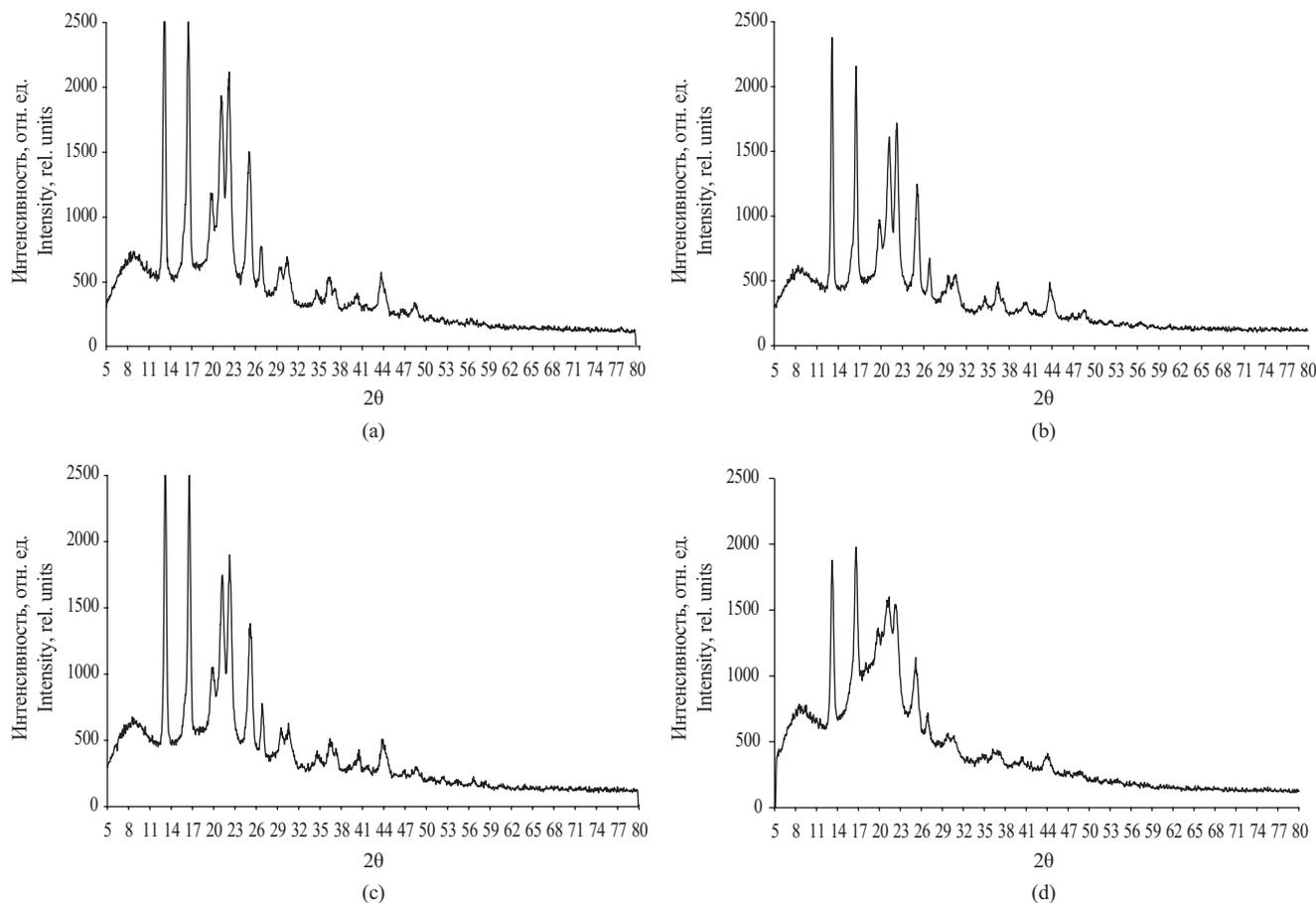
Введение в качестве компатибилизатора PEG-7 (рис. 6), как и в случае с Si-каучуком и ESO, дало ожидаемый эффект диспергирования компонентов друг в друге и облегчило переработку композиции в пластикордере.



**Рис. 6.** ПГБ–БНКС–28 + PEG-7 (90/10% + 3%) с увеличением: (a) 50×, (b) 200×

**Fig. 6.** PHB–BNKC–28 + PEG-7 (90/10% + 3%) at (a) 50× and (b) 200× magnification

Для выявления влияния добавок, взятых в малых количествах (до 3%), на кристаллические и аморфные области и степень кристалличности композиции был проведен рентгенофлуоресцентный анализ образцов (рис. 7а–с) с одинаковым содержанием БНКС-28. При этом статистически было обнаружено, что рассчитанная средняя степень кристалличности для образцов с добавками Si-каучука и PEG-7 составила соответственно 54% и 56%, в то время как для состава без модификатора степень кристалличности была равна 61%. Мы считаем, что уменьшение



**Рис. 7.** РФА-спектры композиции 90% ПГБ–10% БНКС-28: (а) без добавления компатибилизатора; (б) с введением 3% Si-каучука; (с) с введением 3% PEG-7; (d) РФА-спектр композиции 50% ПГБ–50% БНКС-28 без модификатора

**Fig. 7.** X-ray fluorescence spectra of the 90% PHB–10% NBR-28 composite (a) without the addition of a compatibilizer, (b) with the addition of 3% siloxane rubber, and (c) with the addition of 3% PEG-7; (d) X-ray fluorescence spectrum of the 50% PHB–50% NBR-28 composite without a modifier

размеров включений фазы БНКС-28 при введении модификатора приводит к появлению сильных межфазных взаимодействий. Модификаторы ведут себя как зародыши кристаллизации. Рост мелких кристаллитов увеличивает сегментальную подвижность, что приводит к увеличению свободного объема, увеличению пористости и увеличению количества физических зацеплений.

При этом в чистом ПГБ без добавок и каучука степень кристалличности составляла 70%, а наименьшая степень кристалличности для состава ПГБ–БНКС-28 наблюдалась при эквимассовом соотношении компонентов и составила 36% (рис. 7d), что свидетельствует о том, что при введении БНКС-28 в ПГБ происходит изменение фазовой и молекулярной структуры за счет межмолекулярного взаимодействия компонентов. При дальнейшем изучении данных композиций целесообразно применить методы изучения свободной поверхностной энергии и других поверхностных свойств ПКМ согласно методам,

применяющимся для изучения влияния добавок на поверхностные свойства композиций на основе БНКС, описанных в работах [23, 24].

Как известно, основной проблемой биополимера ПГБ является его высокая хрупкость, что делает невозможным его применение в чистом виде для любых биомедицинских целей [25]. В случае с двухкомпонентной системой ПГБ–БНКС большое количество каучука в системе (от 30%) значительно увеличивает эластичность системы, однако резко снижает ее способность к биодegradации и скорость разложения. Предыдущие исследования подтвердили, что содержание БНКС-28 в матрице полимера до 20% оставляет возможность для биодegradации полимера в биологических средах с достаточной скоростью для прорастания клеток и сосудов в матрице полимера и полного разложения до наступления осложнений, связанных с отторжением инородного тела организмом [26]. Поэтому композиции с содержанием БНКС-28 до 20% будут удовлетворять

набору требований для биоразлагаемых изделий медицинского назначения при условии их достаточной эластичности. Введение модификаторов в данном случае помогает увеличить прочностные характеристики за счет лучшего совмещения компонентов и диспергирования частиц фазы в матрице. Кроме того, модификаторы изменяют микроструктуру композиций и могут ускорять процессы биодеградации полимера.

Испытания по определению упругопрочностных свойств при растяжении (ГОСТ 270-75<sup>1</sup>) проведены на универсальной разрывной машине Instron 3365 (*Instron*, Великобритания). Из исследованных композиций выраженными эластическими свойствами обладают все двухкомпонентные составы ПГБ–БНКС-28 с содержанием каучука от 30% и выше, состав ПГБ–БНКС-28–EVA (60/10/30%) и в меньшей мере состав ПГБ–БНКС-28–ПБАТ (60/10/30%). Часть образцов, модифицированных только компатибилизаторами (ESO, Si-каучук) и содержащими 90% ПГБ и до 10% БНКС-28 оказались хрупкими для проведения испытаний такого рода. По всей видимости упрочнение композиции, как и предполагалось, можно провести двумя путями — увеличением содержания БНКС-28 до более, чем 20% при наличии компатибилизатора или введением эластичного полимера в качестве дополнительного компонента, как в случае с системами ПГБ–БНКС-28–ПБАТ

и ПГБ–БНКС-28–EVA. Полученные механические характеристики для данных композиций приведены в таблице.

Заметим, что композиция № 6 (ПГБ–БНКС-28, 10/90%) не является биodeградируемой в достаточной степени и служит лишь для сравнительного анализа, как и композиция № 5 с содержанием БНКС-28 50%. В свою очередь образец № 4 с 30%-ным содержанием БНКС-28 является погранично пригодным для некоторых изделий медицинского назначения, однако степень его биоразлагаемости и возможность усиления деградации с помощью добавок еще предстоит изучить.

Композиции с введенным EVA и ПБАТ показали прочность при разрыве, превышающую прочность композиций № 3 и № 4 с высоким содержанием каучука без дополнительных добавок. При этом, опираясь на данные обзоров [25, 27] по методам упрочнения композиций с ПГБ, сравнительная прочность композиций ПГБ–БНКС-28 и ПГБ–БНКС-28–EVA несколько превышает аналогичные показатели композиций ПГБ с крахмалом, целлюлозой, полимерными наполнителями (сополимером этилена и винилацетата, полилактидом), но ниже показателей волокон, полученных из смесей ПГБ и сверхвысокомолекулярного ПГБ методом холодной вытяжки [28] или волокон из сополимера ПГБ с поли-3-гидроксигексаноатом [29].

**Таблица.** Механические характеристики полимерных композиций

**Table.** Mechanical characteristics of polymer compositions

№	Смесь Composite	Относительное удлинение, % Elongation at break, %	Прочность при растяжении, МПа Tensile strength, MPa
1	ПГБ–БНКС-28 (90/10%) РНВ–NBR-28 (90/10%)	0–2 (хрупкое разрушение) 0–2 (brittle fracture)	16 ± 1
2	ПГБ–БНКС-28–ПБАТ (60/10/30%) РНВ–NBR-28–PBAT (60/10/30%)	21 ± 1	32 ± 1.5
3	ПГБ–БНКС-28–EVA (60/10/30%) РНВ–NBR-28–EVA (60/10/30%)	26 ± 1.5	37 ± 2
4	ПГБ–БНКС-28 (70/30%) РНВ–NBR-28 (70/30%)	33 ± 2	33 ± 1.5
5	ПГБ–БНКС-28 (50/50%) РНВ–NBR-28 (50/50%)	58 ± 3	48 ± 2.5
6	ПГБ–БНКС-28 (10/90%) РНВ–NBR-28 (10/90%)	85 ± 4	61.5 ± 3

<sup>1</sup> ГОСТ 270-75. Межгосударственный стандарт. Резина. Метод определения упругопрочностных свойств при растяжении. М.: Стандартинформ; 2008 г. [GOST 270-75. Interstate Standard. Rubber. Method of the determination elastic and tensile stress-strain properties. Moscow: Standartinform; 2008.]

В настоящее время изучается процесс полной деградации трехкомпонентных составов с EVA и ПБАТ. Согласно результатам биodeградации в течение 100 дней в почве, можно сделать предварительные выводы о постепенном снижении массы образцов и значительной степени прорастания трещин толщиной до 40 и 70 нм в случае EVA и ПБАТ соответственно, а также предположить, что динамика потери массы композиции с течением деградации в случае с EVA и ПБАТ равна или даже превосходит потерю массы композиций ПГБ–БНКС-28 без дополнительных добавок.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе данной работы был подобран оптимальный режим смешения композиции ПГБ–БНКС-28–Модификатор, а также найдены необходимые модификаторы для улучшения совместности компонентов и придания необходимых физико-механических свойств с сохранением требуемой степени биоразлагаемости.

Полное исследование биоразлагаемости компонентов ведется в отдельном исследовании, однако предварительные выводы говорят о достаточной степени биоразлагаемости наиболее перспективных для изучения композиций, а именно, ПГБ–БНКС-28–EVA (60/10/30%) и ПГБ–БНКС-28–ПБАТ (60/10/30%). Что касается композиций с 90%-ным ПГБ, 10%-ным БНКС-28 и добавкой (ESO, Si-каучук), модификатор в размере 1–3% не оказывает негативного влияния на их биоразлагаемость, а композиция с чистым ПГБ и БНКС-28 в соотношении 9 к 1 уже была исследована ранее и является пригодной для использования в биоразлагаемых медицинских изделиях.

Введение модификаторов, как и предполагалось, позволило снизить средний размер частиц фазы БНКС в матрице ПГБ на 30–50% и более, а также изменило их морфологию со сферических частиц размерами 60–100 нм до вытянутых волокон, агрегированных в «пучки» и «ленты» толщиной от 5 до 20 нм и длиной от 10 до 50 нм для различных модификаторов. Равномерность распределения частиц при этом увеличилась, что позитивно повлияло на механические характеристики систем. Однако без введения второго полимера (EVA или ПБАТ) хрупкость систем оставалась достаточно высокой, в связи с чем модификаторы (ESO, Si-каучук) будут интересны в использовании при повышенном содержании БНКС (предположительно от 20% и более).

## Вклад авторов

**Л.С. Шибряева** — концепция и руководство работой, редактирование текста статьи.

**П.А. Повернов** — проведение экспериментов, обсуждение результатов исследования исследования, написание текста статьи.

**С.М. Аншин** — проведение экспериментов, обсуждение результатов исследования исследования.

## Authors' contributions

**L.S. Shibryaeva** — concept and management of the work, editing the text of the article.

**P.A. Povernov** — conducting experiments, discussing the results of the study, and writing the text of the article.

**S.M. Anshin** — conducting experiments, discussing the results of the study.

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*

*The authors declare no conflicts of interest.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Verma M.L., Kumar S., Jeslin J., Dubey N.K. Microbial Production of Biopolymers with Potential Biotechnological Applications. In: *Biopolymer-Based Formulations*. Elsevier; 2020. P. 105–137. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816897-4.00005-9>
2. Rebelo R., Vila N., Rana S., Figueiro R. Poly Lactic Acid Fibre Based Biodegradable Stents and Their Functionalization Techniques. In: Figueiro R., Rana S. (Eds.). *Natural Fibres: Advances in Science and Technology Towards Industrial Applications*. RILEM Bookseries. 2017;12:331–342. [https://doi.org/10.1007/978-94-017-7515-1\\_25](https://doi.org/10.1007/978-94-017-7515-1_25)
3. Васильев И.Ю., Ананьев В.В., Колпакова В.В., Сарджвеладзе А.С. Разработка технологии получения биоразлагаемых композиций на основе полиэтилена, крахмала и моноглицеридов. *Тонкие химические технологии*. 2020;15(6):44–55. <https://doi.org/10.32362/2410-6593-2020-15-6-44-55>

## REFERENCES

1. Verma M.L., Kumar S., Jeslin J., Dubey N.K. Microbial Production of Biopolymers with Potential Biotechnological Applications. In: *Biopolymer-Based Formulations*. Elsevier; 2020. P. 105–137. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816897-4.00005-9>
2. Rebelo R., Vila N., Rana S., Figueiro R. Poly Lactic Acid Fibre Based Biodegradable Stents and Their Functionalization Techniques. In: Figueiro R., Rana S. (Eds.). *Natural Fibres: Advances in Science and Technology Towards Industrial Applications*. RILEM Bookseries. 2017;12:331–342. [https://doi.org/10.1007/978-94-017-7515-1\\_25](https://doi.org/10.1007/978-94-017-7515-1_25)
3. Vasilyev I.Yu., Ananyev V.V., Kolpakova V.V., Sardzhveladze A.S. Development of technology for producing biodegradable hybrid composites based on polyethylene, starch, and monoglycerides. *Tonk. Khim. Tekhnol. = Fine Chem. Technol.* 2020;15(6):44–55. <https://doi.org/10.32362/2410-6593-2020-15-6-44-55>

4. Васильев И.Ю., Ананьев В.В., Чернов М.Е. Биоразлагаемые упаковочные материалы на основе полиэтилена низкой плотности, крахмала и моноглицеридов. *Тонкие химические технологии*. 2022;17(3):231–241. <https://doi.org/10.32362/2410-6593-2022-17-3-231-241>
5. Гомзяк В.И., Демина В.А., Разуваева Е.В., Седуш Н.Г., Чвалун С.Н. Биоразлагаемые полимерные материалы для медицины: от импланта к органу. *Тонкие химические технологии*. 2017;12(5):5–20. <https://doi.org/10.32362/2410-6593-2017-12-5-5-20>
6. Лыкошин Д.Д., Зайцев В.В., Костромина М.А., Есипов Р.С. Остеопластические материалы нового поколения на основе биологических и синтетических матриц. *Тонкие химические технологии*. 2021;16(1):36–54. <https://doi.org/10.32362/2410-6593-2021-16-1-36-54>
7. Гомзяк В.И., Пучков А.А., Артамонова Н.Е., Поляков Д.К., Симакова Г.А., Грицкова И.А., Чвалун С.Н. Физико-химические свойства биоразлагаемого сверхразветвленного полиэфирполиола на основе 2,2-бис(метил)пропионовой кислоты. *Тонкие химические технологии*. 2018;13(4):67–73. <https://doi.org/10.32362/2410-6593-2018-13-4-67-73>
8. Гордиенко М.Г., Сомов Т.Н., Юсупова Ю.С., Чупикова Н.И., Меньшутина Н.В. Получение микрочастиц из биodeградируемых природных и синтетических полимеров для применения их в области регенеративной медицины. *Тонкие химические технологии*. 2015;10(5):66–76.
9. Luque-Agudo V., Hierro-Oliva M., Gallardo-Moreno A.M., González-Martín M.L. Effect of plasma treatment on the surface properties of polylactic acid films. *Polym. Test*. 2021;96:107097. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2021.107097>
10. Горшенёв В.Н., Зиангирова М.Ю., Колесов В.В., Краснополянская Л.М., Просвирин А.А., Телешев А.Т. Новые аддитивные технологии формирования сложных костных структур для медико-биологических применений. *РЭНСИТ*. 2019;11(3):369–390. <https://doi.org/10.17725/rensit.2019.11.369>
11. Gomzyak V.I., Artamonova N.E., Kovtun I.D., Kamyshinsky R.A., Gritskova I.A., Chvalun S.N. Heterophase Polymerization of Styrene in the Presence of Boltorn Polyester Polyol. *Polym. Sci. Ser. B*. 2020;62(1):22–29. <https://doi.org/10.1134/S156009041905004X>
12. Седуш Н.Г., Кадина Ю.А., Разуваева Е.В., Пучков А.А., Широкова Е.М., Гомзяк В.И., Калинин К.Т., Кулебякина А.И., Чвалун С.Н. Наносомальные лекарственные формы на основе биоразлагаемых сополимеров лактида с различной молекулярной структурой и архитектурой. *Российские нанотехнологии*. 2021;16(4):462–481. <https://doi.org/10.1134/S1992722321040117>
13. Карпова С.Г., Ольхов А.А., Кривандин А.В., Шаталова О.В., Лобанов А.В., Попов А.А., Иорданский А.Л. Влияние комплекса цинк–порфирин на структуру и свойства ультратонких волокон поли(3-гидроксibuтирата). *Высокомолекул. соединения. Сер. А*. 2019;61(1):67–81. <https://doi.org/10.1134/S2308112019010164>
14. Карпова С.Г., Ольхов А.А., Жулькина А.Л., Попов А.А., Иорданский А.Л. Нетканые материалы на основе ультратонких волокон поли(3-гидроксibuтирата) с комплексом хлорид олова–порфирин, полученных электроформованием. *Высокомолекул. соединения. Сер. А*. 2021;63(4):249–262. <https://doi.org/10.31857/S2308112021040040>
15. Pour-Esmail S., Sharifi-Sanjani N., Khoee S., Taheri-Qazvini N. Biocompatible chemical network of  $\alpha$ -cellulose-ESBO (epoxidized soybean oil) scaffold for tissue engineering application. *Carbohydr. Polym.* 2020;241:116322. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.116322>
4. Vasilyev I.Yu., Ananyev V.V., Chernov M.E. Biodegradable packaging materials based on low density polyethylene, starch and monoglycerides. *Tonk. Khim. Tekhnol. = Fine Chem. Technol.* 2022;17(3):231–241. <https://doi.org/10.32362/2410-6593-2022-17-3-231-241>
5. Gomzyak V.I., Demina V.A., Razuvaeva E.V., Sedush N.G., Chvalun S.N. Biodegradable polymer materials for medical applications: From implants to organs. *Tonk. Khim. Tekhnol. = Fine Chem. Technol.* 2017;12(5):5–20 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2410-6593-2017-12-5-5-20>
6. Lykoshin D.D., Zaitsev V.V., Kostromina M.A., Esipov R.S. New-generation osteoplastic materials based on biological and synthetic matrices. *Tonk. Khim. Tekhnol. = Fine Chem. Technol.* 2021;16(1):36–54. <https://doi.org/10.32362/2410-6593-2021-16-1-36-54>
7. Gomzyak V.I., Puchkov A.A., Artamonova N.E., Polyakov D.K., Simakova G.A., Gritskova I.A., Chvalun S.N. Physico-chemical properties of biodegradable hyperbranched polyester polyol based on 2,2-bis(methyl)propionic acid. *Tonk. Khim. Tekhnol. = Fine Chem. Technol.* 2018;13(4):67–73 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2410-6593-2018-13-4-67-73>
8. Gordienko M.G., Somov T.N., Yusupova Y.S., Chupikova N.I., Menshutina N.V. Preparation of spherical microparticles from biodegradable natural and synthetic polymers for their application in regenerative medicine. *Tonk. Khim. Tekhnol. = Fine Chem. Technol.* 2015;10(5):66–76 (in Russ.).
9. Luque-Agudo V., Hierro-Oliva M., Gallardo-Moreno A.M., González-Martín M.L. Effect of plasma treatment on the surface properties of polylactic acid films. *Polym. Test*. 2021;96:107097. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2021.107097>
10. Gorshenyov V.N., Ziangurova M.Yu., Kolesov V.V., Krasnopolskaya L.M., Prosvirin A.A., Teleshev A.T. New additive technologies for forming complex bone structures for medical and biological applications. *RENSIT*. 2019;11(3):369–390. (in Russ.). <https://doi.org/10.17725/rensit.2019.11.369>
11. Gomzyak V.I., Artamonova N.E., Kovtun I.D., Kamyshinsky R.A., Gritskova I.A., Chvalun S.N. Heterophase Polymerization of Styrene in the Presence of Boltorn Polyester Polyol. *Polym. Sci. Ser. B*. 2020;62(1):22–29. <https://doi.org/10.1134/S156009041905004X>
12. Sedush N.G., Kadina Yu.A., Razuvaeva E.V., et al. Nanoformulations of Drugs Based on Biodegradable Lactide Copolymers with Various Molecular Structures and Architectures. *Nanotechnol. Rep.* 2021;16(4):421–438. <https://doi.org/10.1134/S2635167621040121> [Original Russian Text: Sedush N.G., Kadina Yu.A., Razuvaeva E.V., Puchkov A.A., Shirokova E.M., Gomzyak V.I., Kalinin K.T., Kulebyakina A.I., Chvalun S.N. Nanosomal dosage forms based on biodegradable lactide copolymers with different molecular structure and architecture. *Rossiiskie Nanotekhnologii*. 2021;16(4):462–481 (in Russ.). <https://doi.org/10.1134/S1992722321040117> ]
13. Karpova S.G., Ol'khov A.A., Krivandin A.V., et al. Effect of zinc–porphyrin complex on the structure and properties of poly(3-hydroxybutyrate) ultrathin fibers. *Polym. Sci. Ser. A*. 2019;61(1):70–84. <https://doi.org/10.1134/S0965545X19010140> [Original Russian Text: Karpova S.G., Ol'khov A.A., Krivandin A.V., Shatalova O.V., Popov A.A., Lobanov A.V., Iordanskii A.L. Effect of zinc–porphyrin complex on the structure and properties of poly(3-hydroxybutyrate) ultrathin fibers. *Vysokomolekulyarnye Soedineniya. Seriya A*. 2019;61(1):67–81 (in Russ.). <https://doi.org/10.1134/S2308112019010164> ]
14. Karpova S.G., Ol'khov A.A., Zhul'kina A.L., et al. Nonwoven Materials Based on Electrospun Ultrathin Fibers of Poly(3-hydroxybutyrate) and Complex Tin Chloride–Porphyrin. *Polym. Sci. Ser. A*. 2021;63(4):369–381. <https://doi.org/10.1134/S0965545X21040040>

16. Zhang H.-C., Huang J., Zhao P.-F., Lu X. Bio-based ethylene-co-vinyl acetate/poly (lactic acid) thermoplastic vulcanizates with enhanced mechanical strength and shape memory behavior. *Polym. Test.* 2020;87:106537. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2020.106537>
17. Emmanuelle M., Yves C., Nathalie I., Franck E., Laurent G., Philippe F. The Controlled Solvolysis of Ethylene-Vinyl Acetate Copolymers. *Macromolecules.* 2001;34(17): 5838–5847. <https://doi.org/10.1021/ma0102666>
18. Сухих Е.С., Силантьева М.Э., Лирова Б.И., Суворов А.Л., Надольский А.Л., Тюкова И.С., Суворова А.И. Синтез сополимеров этилена и винилового спирта (ЭВС), их структура и мембранные свойства. В сб.: *Проблемы теоретической и экспериментальной химии: тезисы докладов XX Российской молодежной научной конференции.* Екатеринбург. 2010. С. 406–408.
19. Zhang J., Hirschberg V., Rodrigue D. Mechanical fatigue of biodegradable polymers: A study on polylactic acid (PLA), polybutylene succinate (PBS) and polybutylene adipate terephthalate (PBAT). *Int. J. Fatigue.* 2022;159(2):106798. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2022.106798>
20. Povernov P.A., Shibryaeva L.S., Lyusova L.R., et al. The Influence of Mixing Conditions on the Morphology of Poly-3-hydroxybutyrate and Nitrile-Butadiene Rubber Polymer Compositions. *Polym. Sci. Ser. D.* 2022;15(4):628–632. <https://doi.org/10.1134/S1995421222040220>
21. Жорина Л.А., Роговина С.З., Прут Э.В., Кузнецова О.П., Грачев А.В., Иванушкина Н.Е., Иорданский А.Л., Берлин А.А. Биоразлагаемые композиции на основе полиэфиров поли-(3-гидроксibuтирата) и полилактида, получаемых из растительного сырья. *Высокомолекул. соединения. Сер. А.* 2020;62(4):263–270. <https://doi.org/10.31857/S2308112020040136>
22. Тарасенко А.Д., Дулина О.А., Буканов А.М. Влияние непалимерных компонентов резиновой смеси на поверхностные свойства эластомерных композиций. *Тонкие химические технологии.* 2018;13(5):67–72. <https://doi.org/10.32362/2410-6593-2018-13-5-67-72>
23. Дулина О.А., Еськова Е.В., Тарасенко А.Д., Котова С.В. Влияние различных факторов на поверхностные свойства эластомерных материалов на основе бутадиен-нитрильных каучуков. *Тонкие химические технологии.* 2022;17(2):152–163. <https://doi.org/10.32362/2410-6593-2022-17-2-152-163>
24. Yeo J.C.C., Muiruri J.K., Thitsartarn W., Li Z., He C. Recent advances in the development of biodegradable PHB-based toughening materials: Approaches, advantages and applications. *Mater. Sci. Eng.: C.* 2017;92:1092–1116. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2017.11.006>
25. Повернов П.А., Шибряева Л.С. Научные подходы к разработке материалов на основе композиций из поли-3-гидроксibuтирата и полилактида для костных имплантатов. *Инновации в создании материалов и методов для современной медицины: материалы региональной конференции.* 2020. С. 173–179.
26. Повернов П.А., Шибряева Л.С., Люсова Л.Р., Попов А.А. Современные полимерные композиционные материалы для костной хирургии: проблемы и перспективы. *Тонкие химические технологии.* 2022;17(6):514–536. <https://doi.org/10.32362/2410-6593-2022-17-6-514-536>
27. Kabe T., Tsuge T., Kasuya K., Takemura A., Hikima T., Takata M., Iwata T. Physical and Structural Effects of Adding Ultrahigh-Molecular-Weight Poly[(R)-3-hydroxybutyrate] to Wild-Type Poly[(R)-3-hydroxybutyrate]. *Macromolecules.* 2012;45(4):1858–1865. <https://doi.org/10.1021/ma202285c> [Original Russian Text: Karpova S.G., Ol'khov A.A., Zhul'kina A.L., Popov A.A., Iordanskii A.L. Nonwoven Materials Based on Electrospun Ultrathin Fibers of Poly(3-hydroxybutyrate) and Complex Tin Chloride-Porphyrin. *Высокомолекулярные Соединения. Серiya A.* 2021;63(4):249–262 (in Russ.). <https://doi.org/10.31857/S2308112021040040> ]
15. Pour-Esmacel S., Sharifi-Sanjani N., Khoee S., Taheri-Qazvini N. Biocompatible chemical network of  $\alpha$ -cellulose-ESBO (epoxidized soybean oil) scaffold for tissue engineering application. *Carbohydr. Polym.* 2020;241:116322. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.116322>
16. Zhang H.-C., Huang J., Zhao P.-F., Lu X. Bio-based ethylene-co-vinyl acetate/poly (lactic acid) thermoplastic vulcanizates with enhanced mechanical strength and shape memory behavior. *Polym. Test.* 2020;87:106537. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2020.106537>
17. Emmanuelle M., Yves C., Nathalie I., Franck E., Laurent G., Philippe F. The Controlled Solvolysis of Ethylene-Vinyl Acetate Copolymers. *Macromolecules.* 2001;34(17): 5838–5847. <https://doi.org/10.1021/ma0102666>
18. Sukhikh E.S., Silant'eva M.E., Lirova B.I., Suvorov A.L., Nadol'skii A.L., Tyukova I.S., Suvorova A.I. Synthesis of copolymers of ethylene and vinyl alcohol (EVA), their structure and membrane properties. In: *Problems of Theoretical and Experimental Chemistry: Abstracts of reports of the 20th Russian Youth Scientific Conference.* Yekaterinburg: 2010. P. 406–408 (in Russ.).
19. Zhang J., Hirschberg V., Rodrigue D. Mechanical fatigue of biodegradable polymers: A study on polylactic acid (PLA), polybutylene succinate (PBS) and polybutylene adipate terephthalate (PBAT). *Int. J. Fatigue.* 2022;159(2):106798. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2022.106798>
20. Povernov P.A., Shibryaeva L.S., Lyusova L.R., et al. The Influence of Mixing Conditions on the Morphology of Poly-3-hydroxybutyrate and Nitrile-Butadiene Rubber Polymer Compositions. *Polym. Sci. Ser. D.* 2022;15(4):628–632. <https://doi.org/10.1134/S1995421222040220>
21. Zhorina L.A., Rogovina S.Z., Prut E.V., et al. Biodegradable compositions based on poly-(3-hydroxybutyrate) and polylactide polyesters obtained from vegetable raw materials. *Polym. Sci. Ser. A.* 2020;62(4):361–367. <https://doi.org/10.1134/S0965545X20040136> [Original Russian Text: Zhorina L.A., Rogovina S.Z., Prut E.V., Kuznetsova O.P., Grachev A.V., Ivanushkina N.E., Iordanskii A.L., Berlin A.A. Biodegradable compositions based on poly-(3-hydroxybutyrate) and polylactide polyesters obtained from vegetable raw materials. *Высокомолекулярные Соединения. Серiya A.* 2020;62(4):263–270 (in Russ.). <https://doi.org/10.31857/S2308112020040136> ]
22. Tarasenko A.D., Dulina O.A., Bukanov A.M. The effect of non-polymeric components of a rubber mixture on surface properties of elastomer compositions. *Tonk. Khim. Tekhnol. = Fine Chem. Technol.* 2018;13(5):67–72 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2410-6593-2018-13-5-67-72>
23. Dulina O.A., Eskova E.V., Tarasenko A.D., Kotova S.V. Influence of various factors on surface properties of elastomeric materials based on nitrile butadiene rubbers. *Tonk. Khim. Tekhnol. = Fine Chem. Technol.* 2022;17(2):152–163. <https://doi.org/10.32362/2410-6593-2022-17-2-152-163>
24. Yeo J.C.C., Muiruri J.K., Thitsartarn W., Li Z., He C. Recent advances in the development of biodegradable PHB-based toughening materials: Approaches, advantages and applications. *Mater. Sci. Eng.: C.* 2017;92:1092–1116. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2017.11.006>

28. Kabe T., Hongo C., Tanaka T., Hikima T., Takata M., Iwata T. High tensile strength fiber of poly[(R)-3-hydroxybutyrate-co-(R)-3-hydroxyhexanoate] processed by two-step drawing with intermediate annealing. *J. Appl. Polym. Sci.* 2014;132(2):41258. <https://doi.org/10.1002/app.41258>
25. Povernov P.A., Shibryaeva L.S. Scientific approaches to the development of materials based on compositions of poly-3-hydroxybutyrate and polylactide for bone implants. In: *Innovatsii v sozdanii materialov i metodov dlya sovremennoi meditsiny (Innovations in the Creation of Materials and Methods for Modern Medicine): Proceedings of the regional conference.* 2020. P. 173–179 (in Russ.).
26. Povernov P.A., Shibryaeva L.S., Lusova L.R., Popov A.A. Modern polymer composite materials for bone surgery: Problems and prospects. *Tonk. Khim. Tekhnol. = Fine Chem. Technol.* 2022;17(6): 514–536. <https://doi.org/10.32362/2410-6593-2022-17-6-514-536>
27. Kabe T., Tsuge T., Kasuya K., Takemura A., Hikima T., Takata M., Iwata T. Physical and Structural Effects of Adding Ultrahigh-Molecular-Weight Poly[(R)-3-hydroxybutyrate] to Wild-Type Poly[(R)-3-hydroxybutyrate]. *Macromolecules.* 2012;45(4):1858–1865. <https://doi.org/10.1021/ma202285c>
28. Kabe T., Hongo C., Tanaka T., Hikima T., Takata M., Iwata T. High tensile strength fiber of poly[(R)-3-hydroxybutyrate-co-(R)-3-hydroxyhexanoate] processed by two-step drawing with intermediate annealing. *J. Appl. Polym. Sci.* 2014;132(2):41258. <https://doi.org/10.1002/app.41258>

## Об авторах

**Повернов Павел Алексеевич**, аспирант, младший научный сотрудник, лаборатория физико-химии композиций природных и синтетических полимеров, ФГБУН Институт биохимической физики им. Н.М. Эмануэля, Российская академия наук (199334, Россия, Москва, ул. Косыгина, д. 4). E-mail: pav3444@yandex.ru. Scopus Author ID 57210264564, ResearcherID ABC-5732-2021, SPIN-код РИНЦ 1408-2867, <https://orcid.org/0000-0003-3017-4397>

**Шибряева Людмила Сергеевна**, д.х.н., профессор, ведущий научный сотрудник, лаборатория физико-химии композиций природных и синтетических полимеров, ФГБУН Институт биохимической физики им. Н.М. Эмануэля, Российская академия наук (199334, Россия, Москва, ул. Косыгина, д. 4); профессор, кафедра химии и технологии переработки эластомеров им. Ф.Ф. Кошелева, Институт тонких химических технологий им. М.В. Ломоносова, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: lyudmila.shibryaeva@yandex.ru. Scopus Author ID 7003539026, ResearcherID A-7634-2014, SPIN-код РИНЦ 3664-7997, <https://orcid.org/0000-0001-6805-4492>

**Аншин Сергей Михайлович**, младший научный сотрудник, кафедра химии инновационных материалов и технологий, ФГБОУ ВО «Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова» (115054, Россия, Москва, Стремянный переулок, д. 36). E-mail: asm51@bk.ru

## About the authors

**Pavel A. Povernov**, Postgraduate Student, Junior Researcher, Laboratory of Physico-Chemistry of Compositions of Synthetic and Natural Polymers, N.M. Emanuel Institute of Biochemical Physics, Russian Academy of Sciences (4, Kosygina ul., Moscow, 119334, Russia). E-mail: pav3444@yandex.ru. Scopus Author ID 57210264564, ResearcherID ABC-5732-2021, RSCI SPIN-code 1408-2867, <https://orcid.org/0000-0003-3017-4397>

**Lyudmila S. Shibryaeva**, Dr. Sci. (Chem.), Professor, Leading Researcher, Laboratory of Physico-Chemistry of Compositions of Synthetic and Natural Polymers, N.M. Emanuel Institute of Biochemical Physics, Russian Academy of Sciences (4, Kosygina ul., Moscow, 119334, Russia); Professor, F.F. Koshelev Department of Chemistry and Technology of Processing of Elastomers, M.V. Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454, Russia). E-mail: lyudmila.shibryaeva@yandex.ru. Scopus Author ID 7003539026, ResearcherID A-7634-2014, RSCI SPIN-code 3664-7997, <https://orcid.org/0000-0001-6805-4492>

**Sergey M. Anshin**, Junior Researcher, Department of Chemistry of Innovative Materials and Technologies, Plekhanov Russian University of Economics (36, Stremyanni per., Moscow, 115054, Russia). E-mail: asm51@bk.ru