

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

УДК 544.3.032

<https://doi.org/10.32362/2410-6593-2026-21-1-98-108>

EDN EUJEZL



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Особенности морфологии смесей биodeградируемый пластик–эластомер

Н.Д. Блинов^{1,2,✉}, Л.С. Шибряева^{1,2,3}, М.О. Кульпина², А.Н. Неретина⁴, В.Э. Славкина²

¹ Институт биохимической физики им. Н.М. Эмануэля Российской академии наук, Москва 119334 Россия

² Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, 109428 Россия

³ МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

⁴ Институт проблем экологии и эволюции им. Северцова Российской академии наук, Москва 119071 Россия

✉ Автор для переписки, e-mail: nik.blinov76@gmail.com

Аннотация

Цели. Получение данных о совместимости полимерной смеси на основе поли-3-гидроксibuтирата и бутадиен-нитрильного каучука для создания биodeградируемого полимера с улучшенными механическими свойствами.

Методы. Методами оптической и сканирующей электронной микроскопии с применением компьютерной обработки, дифференциальной сканирующей калориметрии, математического анализа, инфракрасной Фурье-спектроскопии изучены пленочные образцы смесей биodeградируемого пластика и эластомера на примере смесей полигидроксibuтирата и бутадиен-нитрильного каучука.

Результаты. Установлено, что изучаемые смеси имеют гетерогенно-гетерофазную структуру. За счет кинетической совместимости проявляется взаимодействие между карбонильной группой полигидроксibuтирата и нитрильной группой блока акрилонитрила бутадиен-нитрильного каучука. Замечено изменение кристаллических областей полигидроксibuтирата при его смешении с каучуком. По результатам проведенного расчета энергии Гиббса смешения подтверждено взаимодействие карбонильных и нитрильных групп. Результатами микроскопии показана локализация частиц полигидроксibuтирата вокруг частиц каучука. Обсуждаются причины такого явления.

Выводы. Исследования показали связь между морфологией и содержанием компонентов в образцах. Изменение состава влияет на структуру и свойства поверхности и объема. Формирование ассоциатов приводит к образованию границы раздела, притягивающей второй компонент. По теории Флори–Хаггинса, уравнениям Авраами и микроскопическим данным выявлен сложный механизм взаимодействия: сближение и образование химических связей, перестройка кристаллических областей, переход сферолитных частиц в ламеллярные, диффузия макромолекул каучука, ассоциация частиц полигидроксibuтирата вокруг каучука и завершение химических связей.

Ключевые слова

биополимеры, полигидроксibuтират, бутадиен-нитрильный каучук, совместимость полимеров, морфология структуры, совместимость компонентов

Поступила: 14.08.2024

Доработана: 19.09.2025

Принята в печать: 16.01.2026

Для цитирования

Блинов Н.Д., Шибряева Л.С., Кульпина М.О., Неретина А.Н., Славкина В.Э. Особенности морфологии смесей биodeградируемый пластик–эластомер. *Тонкие химические технологии*. 2026;21(1):98–108. <https://doi.org/10.32362/2410-6593-2026-21-1-98-108>

RESEARCH ARTICLE

Morphology features of biodegradable plastic–elastomer blends

Nikita D. Blinov^{1,2,✉}, Ludmila S. Shybryaeva^{1,2,3}, Maria O. Kulpina², Anna N. Neretina⁴, Viktoria E. Slavkina²

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

² Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, 109428 Russia

³ MIREA – Russian Technological University (M.V. Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies), Moscow, 119454 Russia

⁴ A.N. Severtsov Institute of Ecology and Evolution, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119071 Russia

✉ Corresponding author, e-mail: nik.blinov76@gmail.com

Abstract

Objectives. To obtain data on the compatibility of a polymer blend based on poly-3-hydroxybutyrate and butadiene-nitrile rubber for the development of a biodegradable polymer with improved mechanical properties.

Methods. Film samples of biodegradable plastic–elastomer blends, using mixtures of poly-3-hydroxybutyrate and butadiene-nitrile rubber as a case study, were investigated by means of optical and scanning electron microscopy with computer-aided image analysis, differential scanning calorimetry, mathematical analysis, and Fourier transform infrared spectroscopy.

Results. The mixtures studied herein were found to have a heterogeneous heterophase structure. The interaction between the carbonyl group of poly-3-hydroxybutyrate and the nitrile group of acrylonitrile block of acrylonitrile butadiene-nitrile rubber is shown due to kinetic compatibility. A change in the crystalline regions of poly-3-hydroxybutyrate when it is mixed with rubber was also noted. The results of the Gibbs energy calculation of mixing confirmed the interaction of carbonyl and nitrile groups. Microscopy results show the localization of poly-3-hydroxybutyrate particles around rubber particles. The reasons for this phenomenon are discussed here.

Conclusions. Studies have shown a relationship between morphology and component content of the samples. The change in composition affects the structure and properties of the surface and volume. The formation of associates leads to the formation of an interface which attracts the second component. The Flory–Huggins theory, Avrami equations, and microscopic data established a complex interaction mechanism: convergence and formation of chemical bonds, rearrangement of crystalline regions, transition of spherulitic particles into lamellar particles, diffusion of rubber macromolecules, association of poly-3-hydroxybutyrate particles around the rubber, and completion of chemical bonds.

Keywords

biopolymers, poly-3-hydroxybutyrate, butadiene-nitrile rubber, polymer compatibility, structure morphology, component compatibility

Submitted: 14.08.2024

Revised: 19.09.2025

Accepted: 16.01.2026

For citation

Blinov N.D., Shybryaeva L.S., Kulpina M.O., Neretina A.N., Slavkina V.E. Morphology features of biodegradable plastic–elastomer blends. *Tonk. Khim. Tekhnol. = Fine Chem. Technol.* 2026;21(1):98–108. <https://doi.org/10.32362/2410-6593-2026-21-1-98-108>

ВВЕДЕНИЕ

Применение традиционных материалов в промышленности остается важным аспектом производства благодаря их проверенной надежности, доступности и хорошо изученным свойствам, что позволяет обеспечивать стабильное качество продукции и оптимизировать затраты [1]. По мере естественного истощения ископаемых ресурсов все больший удельный вес в использовании материалов стали занимать конструкционные неметаллические и композиционные материалы [2]. В настоящее время наблюдается быстрый рост производства полимерных композитов,

внедрение их в различные технические отрасли, успешное вытеснение традиционных материалов: металлов, керамики и др. [3, 4]. Высокие темпы развития рынка полимерных композиционных материалов определяются широким спектром их свойств, превосходящих свойства традиционных материалов, а также вариативным подходом к созданию изделия, начиная с моделирования его структуры, свойств и формы и заканчивая выбором технологий производства [5].

Недостатком данных материалов является необходимость утилизации и переработки, поскольку не утилизируемые отходы пластика наносят

вред окружающей среде [6, 7]. Большая часть производимого пластика — это одноразовый пластик. Примерно 40% производимого пластика используется в упаковочном секторе. Наиболее часто применяемыми термопластами для упаковки являются полиэтилен, полиэтилентерефталат, полипропилен и полистирол. В 2016 г. на их долю приходилось более 60% общего спроса на пластики в Европе. В России также основная доля пластиков приходится на упаковку, занимая более 40% рынка полимеров. Это, в сочетании с культурой одноразового использования, приводит к двум основным последствиям: загрязнению окружающей среды и потере ценного ресурса. В ЕС 70% собранных пластиковых отходов отправляются на свалки или сжигаются. В США 53% всех твердых бытовых отходов (ТБО) попадают на полигоны, при этом пластиковые отходы составляют 13% ТБО. В России ситуация также остается сложной: ежегодно образуется более 3.5 млн тонн пластиковых отходов, из которых перерабатывается лишь около 10–12% [8, 9].

Потенциал переработки пластиковых отходов остается в значительной степени неиспользованным во всем мире. Глобальный уровень переработки пластика остается крайне низким — всего 6% от общего спроса на пластик. В России переработка также сталкивается с трудностями, такими как нехватка инфраструктуры, низкая осведомленность населения и высокая доля смешанных отходов, что усложняет сортировку и дальнейшую утилизацию [10, 11].

Известно, что полимерные материалы разлагаются в почве от 100 до 500 лет в зависимости от состава. Попадая в землю, пластмассы распадаются на мелкие частицы и начинают выбрасывать в окружающую среду токсические вещества: хлор, стирол, формальдегид, фенол, хлоропрен, уретан и др. [12, 13]. Решением данной проблемы может стать применение биodeградируемых материалов.

Биополимеры отличаются от привычных пластиков, тем, что они способны разлагаться в природных условиях под действием физических процессов, а также микроорганизмов — бактерий и грибов. В основе этих полимеров лежит биодеструкция, то есть совокупность разрушающих данный материал химических и физических процессов, вызванных воздействием микроорганизмов [14].

Сегодня биополимеры составляют примерно 1% от 335 млн тонн полимеров, производимых ежегодно, но по мере роста спроса и появления более совершенных биополимеров рынок постоянно растет [15].

При разработке и создании новых полимерных биоразлагаемых материалов встает вопрос совместности используемых компонентов. Для обеспечения требуемого комплекса свойств необходимо

решить проблемы жесткости биodeградируемых пластиков. Решением становится добавка эластомера, но появляется другая проблема — термодинамическая несовместимость между поли-3-гидроксибутиратом (ПЗГБ) и бутадиен-нитрильным каучуком, обусловленной различиями в их параметрах растворимости, полярности и структуре макромолекул. Термодинамическая несовместимость приводит к формированию гетерофазной морфологии, что может оказывать как отрицательное, так и положительное влияние на свойства смеси. В этом случае становится интересен вопрос морфологии подобных систем.

Данная работа посвящена исследованию морфологии биodeградируемой смеси пластик–эластомер.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Из всего многообразия биорезорбируемых полигидроксиалканоатов, был выбран ПЗГБ, получаемый методом микробного синтеза. Благодаря биосинтетическому происхождению ПЗГБ считается одним из наиболее безопасных полиэфиров жирных кислот. ПЗГБ является полностью биоразлагаемым пластиком, устойчивым к ультрафиолетовому облучению. ПЗГБ имеет множество преимуществ перед другими, среди которых ключевыми являются: высокая биосовместимость, стабильность свойств и контролируемое биоразложение в широком диапазоне температур. Хотя этот полимер стабилен в водной среде, он поддается биологическому разложению в морской воде, почве, в средах компостирования и переработки отходов. В компосте при влажности 85% и температуре 20–60°C он разлагается на воду и углекислый газ за 7–10 недель [16–18].

Однако пленки из ПЗГБ получаются крайне жесткими и хрупкими, что является недостатками их использования [19]. Для увеличения эластичности, и, следовательно, для повышения физико-механических характеристик, ПЗГБ смешивается с бутадиен-нитрильным синтетическим каучуком БНКС-28АМН. Основные свойства данных материалов представлены в табл. 1 и 2.

Изучаемые в работе смеси полимеров ПЗГБ (*Biopolymer*, Германия) и БНКС-28АМН (*Красноярский завод синтетического каучука*, Россия) получали по растворной технологии из пленок, приготовленных механическим смешением 2%-ных растворов компонентов при 80°C.

Взаимодействие компонентов изучалось методом инфракрасной (ИК) Фурье-спектроскопии на ИК-спектрометре СИМЕКС ФТ-801 (*СИМЕКС*, Россия) с алмазной приставкой нарушенного полного внутреннего отражения.

Таблица 1. Основные характеристики ПЗГБ

Table 1. Main characteristics of poly-3-hydroxybutyrate (PЗНВ)

Характеристика Characteristics	Показатель Indicator
Размер частиц, мкм Particle size, μm	40
Показатель текучести расплава, г/10 мин ($T = 185^\circ\text{C}$, нагрузка 2.16 кг) Melt flow rate, g/10 min ($T = 185^\circ\text{C}$, 2.16 kg load)	3.2–3.6
Молекулярная масса (средневязкостная) Molecular weight (viscosity average)	250000
Плотность, г/см ³ Density, g/cm ³	1.25
Разрушающее напряжение при растяжении, МПа, не менее Tensile breaking stress, MPa, no less	35–40
Относительное удлинение при разрыве, % не менее Relative elongation at break, % at least	5–7
Температура стеклования, $^\circ\text{C}$ Glass transition temperature, $^\circ\text{C}$	5–10
Температура плавления, $^\circ\text{C}$ Melting temperature, $^\circ\text{C}$	173–180
Температура начала термодеструкции, $^\circ\text{C}$ Temperature of thermal destruction onset, $^\circ\text{C}$	150
Степень кристалличности, % Crystallinity level, %	65–80

Возможность смешения и совмещения компонентов оценивалась по результатам расчета энтальпии, энтропии и энергии Гиббса смешения по теории Флори–Хаггинса.

Анализ морфологии структур проводился по микрофотографиям, полученным на микроскопе Levenhuk MedPro 600 FLUO (*Левенгук*, Россия), снабженном окулярной цифровой камерой Altami UCMOC2000КРВ (*Альтами*, Россия). Дополнительная визуализация морфологии проводилась методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) на микроскопе TESCAN MIRA 3 LMN (*TESCAN*, Чехия) с катодом Шоттки. Поверхность образцов пленок для СЭМ напылялась золотом с толщиной слоя напыления около 10 нм на установке S150A Sputter Coater (*Edwards*, Великобритания). Расчет и установление характеристик кристаллических областей велся по уравнениям Авраами

Таблица 2. Основные характеристики БНКС-28АМН

Table 2. Main characteristics of BNKS-28AMN

Показатель Indicator	БНКС-28АМН 2-я группа BNKS-28AMN 2nd group	Метод испытания Testing method
Вязкость по Муни (1+4) 100 $^\circ\text{C}$, усл.ед. Mooney viscosity (1+4) 100 $^\circ\text{C}$, a.u.	61–70	ТУ 38.30313-2006
Разброс вязкости по Муни внутри партии МБ (1+4) 100 $^\circ\text{C}$, усл.ед. Variation of Mooney toughness within the MB batch (1+4) 100 $^\circ\text{C}$, a.u.	≤ 8	ТУ 38.30313-2006
Массовая доля свя- занного нитрила акри- ловой кислоты, % Mass fraction of bound acrylic acid nitrile, %	27–30	ТУ 38.30313-2006
Потери массы при сушки, % Weight loss during drying, %	≤ 0.8	ТУ 38.30313-2006
Массовая доля золы, % Mass fraction of ash, %	≤ 1.0	ТУ 38.30313-2006
Растворимость в метилэтилкетоне, % Methyl ethyl ketone solubility, %	≥ 95	ТУ 38.30313-2006
Тип антиоксиданта Antioxidant type	Не окраши- вающий Nonstaining	–
Массовая доля антиоксиданта агидол-2, % Mass fraction of agidol-2 antioxidant, %	0.5–1.2	ТУ 38.30313-2006

в программном обеспечении OriginPro 8 по данным дифференциальной сканирующей калориметрии при скорости сканирования 8 $^\circ$ в минуту, полученных на микрокалориметре ДСМ-2М (Россия).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для образования единой системы из термодинамически несовместимых полимеров необходимо проявление физического, физико-химического или только химического взаимодействия. Результаты расчета совместимости компонентов представлены в табл. 3 и 4.

Таблица 3. Энергия Гиббса ΔG_{mix} смешения смесей ПЗГБ и нитрила акриловой кислоты (НАК)

Table 3. Gibbs energy ΔG_{mix} of mixing P3NB with acrylonitrile

Состав смеси, % Mixture composition, %		ΔG_{mix} , Дж/моль ΔG_{mix} , J/mol
ПЗГБ P3NB	НАК Acrylonitrile	
10	90	-0.006
20	80	-0.011
30	70	-0.014
40	60	-0.017
50	50	-0.018
60	40	-0.019
70	30	-0.018
80	20	-0.015
90	10	-0.011

С учетом теории Флори–Хаггинса показано, что в случае попытки совмещения структур ПЗГБ и блоков нитрила акриловой кислоты $\Delta G_{\text{mix}} < 0$.

В случае же расчета полных молекул компонентов результаты расчетов ($\Delta G_{\text{mix}} > 0$) подтверждают термодинамическую несовместимость данных полимеров.

Таким образом для ПЗГБ и БНКС взаимодействие может быть выражено в виде образования связей между карбонильной и нитрильной группами. Согласно данным ИК-спектроскопии, совмещение данных компонентов приводит к межмолекулярным взаимодействиям по нитрильным группам каучука и карбонильным группам ПЗГБ с образованием сшивок,

Таблица 4. Энергия Гиббса ΔG_{mix} смешения смесей ПЗГБ–БНКС-28АМН

Table 4. Gibbs energy ΔG_{mix} of mixing P3NB with BNKS-28AMN

Состав смеси, % Mixture composition, %		ΔG_{mix} , Дж/моль ΔG_{mix} , J/mol
ПЗГБ P3NB	БНКС BNKS	
10	90	8585.964
20	80	15263.937
30	70	20033.918
40	60	22895.907
50	50	23849.903
60	40	22895.907
70	30	20033.918
80	20	15263.937
90	10	8585.964

о чем свидетельствует интенсивность пика 2250 см^{-1} , отсутствующего в спектрах отдельных компонентов.

По результатам ИК-спектроскопии (рис. 1а) показано, что на спектрах поверхности есть полоса $\sim 967 \text{ см}^{-1}$, соответствующая транс-структурам в БНКС, и есть полоса $\sim 2250 \text{ см}^{-1}$, свидетельствующая о взаимодействии.

Наличие полосы 2250 см^{-1} характеризует с одной стороны нитрильную группу каучука БНКС-28, а с другой стороны протекание реакции, показанной на рис. 2.

Кроме химического процесса, возможно образование соединения на основе физического взаимодействия (рис. 3).

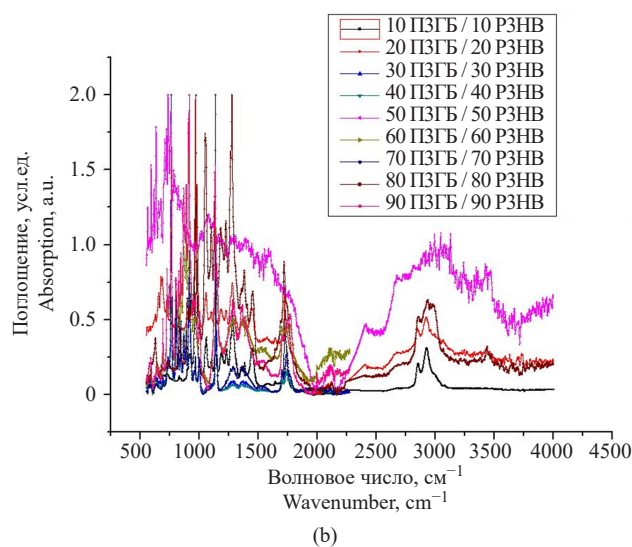
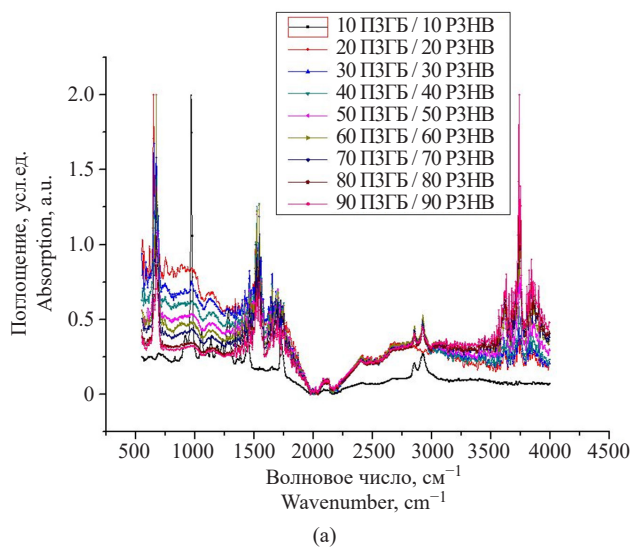


Рис. 1. Инфракрасные спектры поверхности (а) и объема (б) образцов

Fig. 1. Infrared spectra of the surfaces (a) and volumes (b) of the samples

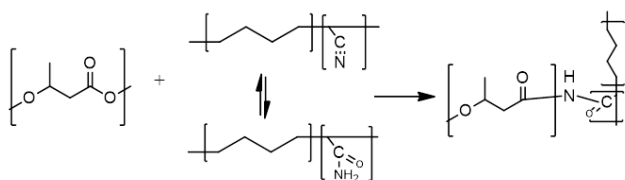


Рис. 2. Схема химического взаимодействия ПЗГБ с БНКС через образование амидной связи

Fig. 2. Scheme of chemical interaction between P3NB and BNKS through amide bond formation

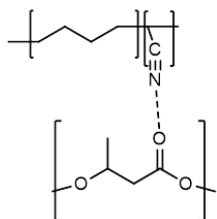


Рис. 3. Схема образования соединения с помощью физических связей

Fig. 3. Scheme of compound formation via physical bonds

В объеме (рис. 1b) полоса 2250 см^{-1} практически пропадает, интенсивность полосы $\sim 967\text{ см}^{-1}$ уменьшается и появляется ряд полос в области $\sim 1500\text{--}1580\text{ см}^{-1}$, обозначающих двойные связи.

Таким образом, сделан вывод о том, что матрицей во всем диапазоне содержания компонентов является БНКС, и на поверхности образцов взаимодействие компонентов сильнее.

Подобное взаимодействие должно оказывать влияние на протекание процессов кристаллизации и плавления. Исходя из этого проводили расчет параметров процесса изотермической кристаллизации по уравнениям Аврами (табл. 5).

Из полученных данных можно сделать вывод, что происходит переход сферолитных структур в ламеллярные, и такие структуры распределяются вокруг связанных цепей каучука.

Локализацию частиц ПЗГБ вокруг цепей каучука на поверхности можно визуализировать благодаря зарядке частиц ПЗГБ под электронным пучком, и это подтверждают результаты сканирующей электронной микроскопии (рис. 4).

По результатам микроскопии видно, что часть ПЗГБ диспергирует на поверхность. В зависимости от состава и силы взаимодействия компонентов, присутствие ПЗГБ на поверхности различно. Из анализа микрофотографий СЭМ видна локализация и агрегация частиц ПЗГБ вокруг частиц каучуковой матрицы. Из полученных результатов, а также принимая во внимание представление о возможном механизме компонентов, можно сделать следующие выводы:

- в ПЗГБ при введении в него каучука в процессе взаимодиффузии компонентов образуются две модификации кристаллитов, по-разному взаимодействующих с каучуком;
- по-видимому, часть кристаллитов остается в объеме материала, а часть диффундирует на поверхность, при взаимодействии с каучуком претерпевает перестройку из сферолитов в ламеллярные

Таблица 5. Параметры процесса кристаллизации

Table 5. Parameters of the crystallization process

Образец Sample	Температура, °C Temperature, °C	Параметры изотермической кристаллизации Parameters of isothermal crystallization				
		n_1	k_1	n_2	k_2	$\tau_{0.5, c}$ $\tau_{0.5, s}$
100% ПЗГБ 100% РЗНВ	105	3.66	$1.10 \cdot 10^{-10}$	2.25	$1.10 \cdot 10^{-6}$	400
90% ПЗГБ 90% РЗНВ		2.33	$3.16 \cdot 10^{-7}$	2.0	$1.10 \cdot 10^{-5}$	285
80% ПЗГБ 80% РЗНВ		2.56	$5.10 \cdot 10^{-7}$	1.25	$1.10 \cdot 10^{-3}$	190/380
70% ПЗГБ 70% РЗНВ		3.3	$4.10 \cdot 10^{-9}$	1.4	$1.58 \cdot 10^{-4}$	165/240

Примечание: n_1 — показатель Аврами при первичном этапе кристаллизации; k_1 — константа скорости изотермической кристаллизации для первичного этапа; n_2 — показатель Аврами при вторичном этапе кристаллизации; k_2 — константа скорости изотермической кристаллизации для вторичного этапа; $\tau_{0.5}$ — период полукристаллизации.

Note: n_1 is the Avrami exponent for the primary crystallization stage; k_1 is the rate constant for isothermal crystallization for the primary stage; n_2 is the Avrami exponent for the secondary crystallization stage; k_2 is the rate constant for isothermal crystallization for the secondary stage; $\tau_{0.5}$ is a half-crystallization period.

структуры и локализуется вокруг сцепленных с ними макромолекул каучука.

Сходные процессы происходят как в объеме, так и на поверхности. Как показано на микрофотографиях в проходящем и отраженном свете (рис. 5 и 6) в образцах исследуемых композиций происходит образование ассоциатов, которое протекает, в основном, на поверхности образцов.

Проведенная компьютерная обработка микрофотографий позволила провести оценку размеров частиц в объеме и на поверхности образцов (рис. 7 и 8).

Как видно из представленных зависимостей, на поверхности образцов частиц больше и их распределение по размерам шире. Также видно смещение максимума размеров с 70 на 80% ПЗГБ.

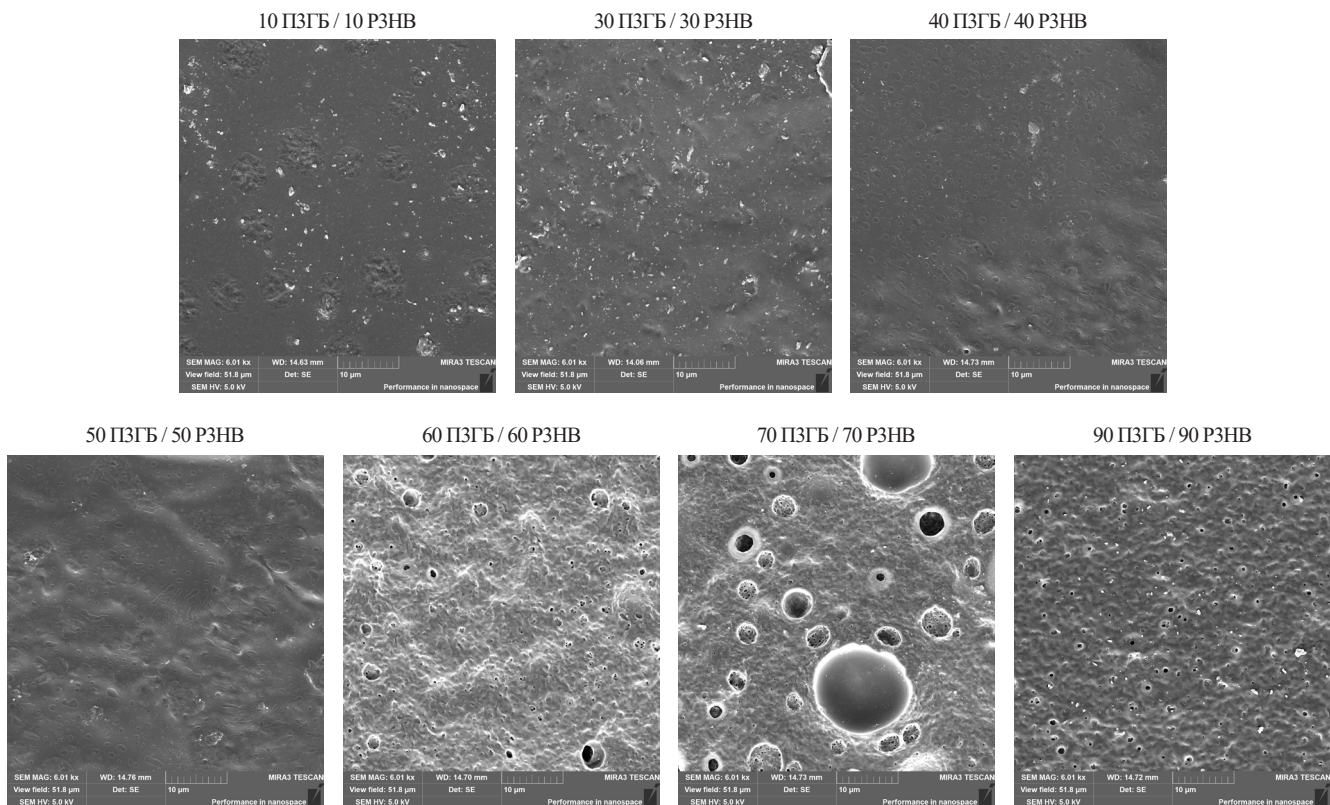


Рис. 4. Микрофотографии СЭМ

Fig. 4. Scanning electron microscopy microphotographs

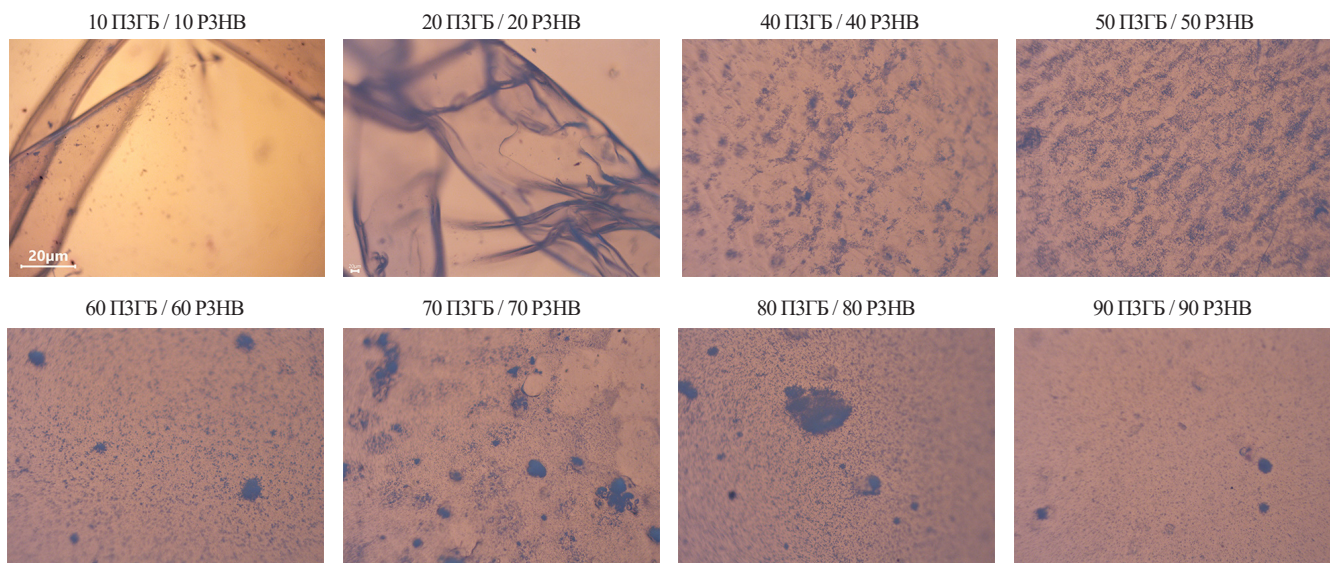


Рис. 5. Микрофотографии объема образцов (проходящий свет, увеличение 10×)

Fig. 5. Microphotographs of sample volume (transmitted light, magnification 10×)

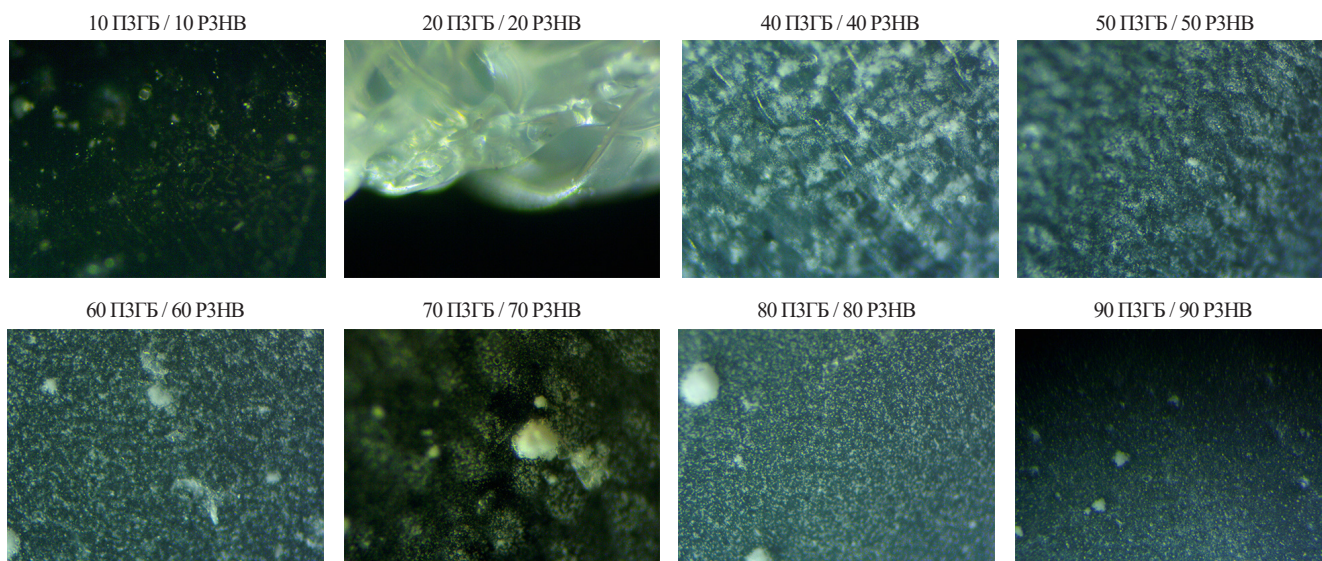


Рис. 6. Микрофотографии поверхности образцов (отраженный свет, увеличение 10×)

Fig. 6. Microphotographs of sample surface (reflected light, magnification 10×)

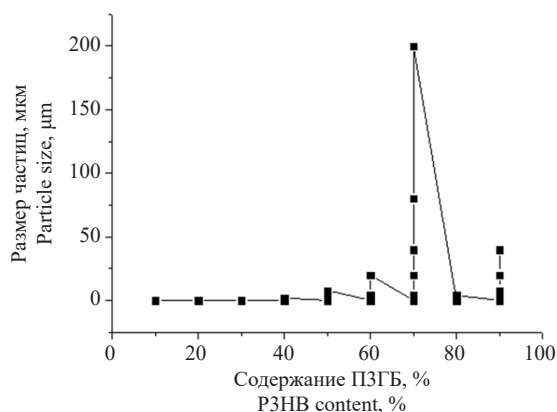


Рис. 7. Оценка размеров частиц в объеме образцов

Fig. 7. Estimation of particle sizes in the sample volume

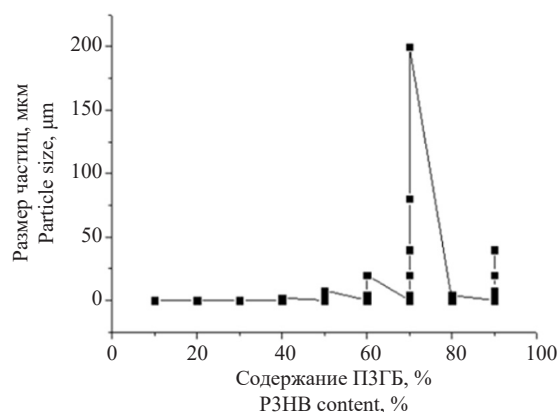


Рис. 8. Оценка размеров частиц на поверхности образцов

Fig. 8. Estimation of particle sizes on the surface of samples

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведенных исследований показывают взаимосвязь морфологии и содержания компонентов в исследуемых образцах. Выявлено влияние изменения состава на структуру и свойства как поверхности, так и объема, показано, что формирование ассоциатов влечет формирование границы раздела, на которую «притягивается» второй компонент.

Из расчетов по теории Флори–Хаггинса, критерия геометрии частиц n_1 уравнений Авраами, результатов оптической и сканирующей электронной микроскопии установлено взаимодействие выражается в виде достаточно сложного механизма, который последовательно состоит из:

- сближения блоков нитрила акриловой кислоты со сферолитами ПЗГБ при нагревании, начала образования химических связей;

- перестройки кристаллических областей ПЗГБ при введении каучука;
- перехода сферолитных частиц в ламеллярные;
- диффундирования связанных с «распрявившимися» сферолитами макромолекул каучука на поверхность;
- ассоциации частиц ПЗГБ и локализации их вокруг частиц каучука;
- завершения образования химических связей.

Вклад авторов

Н.Д. Блинов — получение образцов для исследования, написание текста статьи.

Л.С. Шибряева — выбор направления и методическое сопровождение исследования, общее руководство.

М.О. Кульпина — исследование процесса кристаллизации.

А.Н. Неретина — проведение электронной микроскопии и ее интерпретация.

В.Э. Славкина — обзор литературы, редактирование рукописи.

Authors' contributions

N.D. Blinov — obtaining samples for the study, writing the text of the article.

L.S. Shibryaeva — research idea, methodological support, general management.

M.O. Kulpina — carrying out the study of the crystallization process.

A.N. Neretina — carrying out electron microscopy and its interpretation.

V.E. Slavkina — literature review, editing the article.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflict of interest.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Колобков А.С. Полимерные композиционные материалы для различных конструкций авиационной техники (обзор). *Труды ВИАМ*. 2020;6-7(89):38–44. <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2020-0-67-38-44>
2. Романченко Н.М. Использование полимерных материалов разных видов в агропромышленном производстве. В сб.: *Наука и образование: опыт, проблемы, перспективы развития: Материалы международной научно-практической конференции*. Красноярск; 2021. Т. 1. Ч. 2. С. 176–180. <https://www.elibrary.ru/ovgemh>
3. Шарипов Г.Н. Передовая современная авиация на основе композиционных материалов. *J. New Century Innovations*. 2024;51(2):41–44.
4. Гладунова О.И., Лысенко А.А. Мировой и российский рынок полимерных композиционных материалов. Тенденции и перспективы. *Композитный мир*. 2021;3(96):28–33. <https://elibrary.ru/gqezdg>
5. Zanchin G., Leone G. Polyolefin thermoplastic elastomers from polymerization catalysis: Advantages, pitfalls and future challenges. *Progress Polym. Sci.* 2021;113:101342. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2020.101342>
6. Канунникова К.И., Канунникова Р.Р. Пути и способы решения существующих проблем утилизации полимерных отходов. *Международный журнал гуманитарных и естественных наук*. 2021;12-1(63):80–82. <https://doi.org/10.24412/2500-1000-2021-12-1-80-82>
7. Копнина О.В., Мерзликina А.И., Ключникова Н.В. Проблемы утилизации и переработки отходов полиэтилен-терефталата. *Молодежный вестник Новороссийского филиала Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (Молодежный вестник НФ БГТУ)*. 2023;3(4-12):46–50. <https://elibrary.ru/bkxyllh>
8. Колбасина Ю.С., Соседенко Т.Ю. Биоразлагаемая пластмасса – решение глобальной пластиковой проблемы. *Вестник науки*. 2023;2(5-62):496–505. <https://elibrary.ru/syinyq>
9. Яковлева Е.А., Петрова А.С. Проблемы использования биоразлагаемой упаковки в Российской Федерации. В сб.: *Дни науки и инноваций НовГУ: Материалы XXI Всероссийской научной конференции преподавателей, аспирантов и студентов НовГУ*. Великий Новгород: Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого. 2022. Т. 4. С. 94–99. <https://doi.org/10.34680/978-5-89896-816-8/2022.DN-4.16>
10. Файзулина Ю.Р. Основные методы утилизации и сокращения пластиковых отходов. *Дневник науки*. 2022;3(63):4. <https://www.elibrary.ru/bzeaio>
11. Аксеновская Ю.М., Аксеновский А.В. Экологическая безопасность и проблемы утилизации бытовых и промышленных отходов. *Наука и Образование*. 2022;5(2):205. <https://www.elibrary.ru/zxbqxm>
12. Безязыкая Р.А., Киприя А.В., Сокупенко Е.Л. Применение биоразлагаемых полимерных материалов для решения экологических проблем. *Пожарная и техносферная безопасность: проблемы и пути совершенствования*. 2021;1(8):41–42. <https://www.elibrary.ru/lbpcxm>

REFERENCES

1. Kolobkov A.S. Polymeric composite materials for various aircraft structures (review). *Trudy VIAM = Proceedings of VIAM*. 2020;6-7(89):38–44 (in Russ.). <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2020-0-67-38-44>
2. Romanchenko N.M. Use of different types of polymeric materials in agricultural production. In: *Science and Education: Experience, Problems, and Development Prospects: Materials of the International Scientific and Practical Conference*. Krasnoyarsk; 2021. V. 1. Part 2. P. 176–180 (in Russ.). <https://elibrary.ru/ovgemh>
3. Sharipov G.N. Advanced modern aviation based on composite materials. *J. New Century Innovations*. 2024;2(51):41–44 (in Russ.).
4. Gladunova O.I., Lysenko A.A. World and Russian market of polymer composite materials. Tendencies and prospects. *Kompozitnyi mir = Composite World*. 2021;3(96):28–33 (in Russ.). <https://elibrary.ru/gqezdg>
5. Zanchin G., Leone G. Polyolefin thermoplastic elastomers from polymerization catalysis: Advantages, pitfalls and future challenges. *Progress Polym. Sci.* 2021;113:101342. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2020.101342>
6. Kanunnikova K.I., Kanunnikova R.R. Ways and methods of solving existing problems of polymer waste disposal. *Mezhdunarodnyi zhurnal gumanitarnykh i estestvennykh nauk = International Journal of Humanities and Natural Sciences*. 2021;12-1(63):80–82 (in Russ.). <https://doi.org/10.24412/2500-1000-2021-12-1-80-82>
7. Koptina O.V., Merzlikina A.I., Klyuchnikova N.V. Problems of polyethylene terephthalate waste disposal and recycling. *Molodezhnyi Vestnik NF BGTU*. 2023;3(4-12):46–50 (in Russ.). <https://elibrary.ru/bkxyllh>
8. Kolbasina Y.S., Sosedenko T.Y. Biodegradable plastic is solution to global plastic problem. *Vestnik Nauki*. 2023;2(5-62):496–505 (in Russ.). <https://elibrary.ru/syinyq>
9. Yakovleva E.A., Petrova A.S. Problems of the use of biodegradable packaging in the Russian Federation. In: *Days of Science and Innovation of Novgorod State University: Proceedings of the 21st All-Russian Scientific Conference of Teachers, Graduate Students and Students of Novgorod State University: Velikii Novgorod: Novgorod State University; 2022. V. 4. P. 94–99 (in Russ.)*. <https://doi.org/10.34680/978-5-89896-816-8/2022.DN-4.16>
10. Faizulina Yu.R. Basic methods for disposing and reducing plastic waste. *Dnevnik nauki*. 2022;3(63):4 (in Russ.). <https://www.elibrary.ru/bzeaio>
11. Aksevnovskaya Yu.M., Aksevnovskii A.V. Environmental safety and problems of household and industrial waste disposal. *Nauka i Obrazovanie*. 2022;5(2):205. <https://www.elibrary.ru/zxbqxm>
12. Bezyazykaya R.A., Kiprya A.V., Sokupenko E.L. Application of biodegradable polymer materials for solving environmental problems. *Pozharnaya i tekhnosfernaya bezopasnost': problemy i puti sovershenstvovaniya = Fire and Technosphere Safety: Problems and Ways of Improvement*. 2021;1(8):41–42 (in Russ.). <https://www.elibrary.ru/lbpcxm>

13. Мьяленко Д.М. Современные биоразлагаемые материалы с ускоренной деградацией для молочной и пищевой продукции (предметный обзор). *Пищевые системы*. 2023;6(1): 11–21. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2023-6-1-11-21>
14. Серик В.О. Применение биоразлагаемых материалов в производстве и жизни человека. В сб.: *Наука и молодежь: Материалы XVIII Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых*. Т. 1. Часть 1. Барнаул: Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова; 2021. С. 337–339. <https://www.elibrary.ru/qcqhhej>
15. Панфилов Б.В. Мировой рынок биополимеров. *Полимерные материалы. Изделия, оборудование, технологии*. 2019;7:53.
16. Романов Р.Р., Тюбаева П.М., Гаспарян К.Г., Ларкина Е.А., Попов А.А. Нетканые материалы на основе полигидроксibuтирата и производных хлорина. В сб.: *Биохимическая физика: труды XXIII Ежегодной молодежной конференции с международным участием*. Москва, 20–22 ноября 2023 г. М.: РУДН. 2024. С. 106–110. <https://www.elibrary.ru/vzivei>
17. Повернов П.А., Шибряева Л.С. Биоразложение двухкомпонентного ПКМ на основе ПГБ и БНКС-28 АМН. В сб.: *Экологические аспекты в науке и образовании: Материалы межвузовской научной конференции*. Москва, 18 апреля 2023 г. М.: РЭУ им. Г.В. Плеханова. 2023. С. 58–60. <https://www.elibrary.ru/imvfxl>
18. Ваганова Е.С., Айзатуллин Т.И., Кузиков Ю.А. Биоразлагаемые полимеры. В сб.: *Технологии в экологии. Сборник научных трудов. Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов, молодых ученых, преподавателей, приуроченная к VII Ежегодному молодежному фестивалю в области устойчивого развития ВУЗЭКОФЕСТ*. Ульяновск, 22 апреля 2021 г. Ульяновск: Ульяновский государственный технический университет. 2021. С. 5–6. <https://elibrary.ru/mcoonl>
19. Носирова К.А. Исследование влияния триацетина на свойства пленок на основе поли-3-гидроксibuтирата. В сб.: *Физические методы в естественных науках и материаловедении: Материалы 58-й Международной научной студенческой конференции*. Новосибирск, 10–13 апреля 2020 г. Новосибирск: Новосибирский национальный исследовательский государственный университет. 2020. С. 57. <https://elibrary.ru/tbpgjp>
13. Myalenko D.M. Modern biodegradable materials with accelerated degradation for dairy and food products (subject review). *Pishchevye sistemy = Food Systems*. 2023;6(1):11–21 (in Russ.). <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2023-6-1-11-21>
14. Serik V.O. Application of biodegradable materials in production and human life. In: *Science and Youth: Proceedings of the 18th All-Russian Scientific and Technical Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists*. V. 1. Part 1. Barnaul: Polzunov Altai State Technical University; 2021. P. 337–339 (in Russ.). <https://www.elibrary.ru/qcqhhej>
15. Panfilov B.V. Global Biopolymer Market. *Polimernye materialy. Izdeliya, oborudovanie, tekhnologii = Polymer Materials. Products, Equipment, Technology*. 2019;7:53 (in Russ.).
16. Romanov R.R., Tyubaeva P.M., Gasparyan K.G., Larkina E.A., Popov A.A. Nonwoven materials based on polyhydroxybutyrate and chlorine derivatives. In: *Biochemical Physics: Proceedings of the 23rd Annual Youth Conference with International Participation*. Moscow, November 20–22, 2023. Moscow: RUDN. 2024. P. 106–110 (in Russ.). <https://www.elibrary.ru/vzivei>
17. Povernov P.A., Shibyayeva L.S. Biodegradation of two-component PCM based on PGBP and BNKS-28 AMN. In: *Ecological Aspects in Science and Education: Proceedings of the Interuniversity Scientific Conference*, Moscow, April 18, 2023. Moscow: G.V. Plekhanov Russian University of Economics. 2023. P. 58–60 (in Russ.). <https://www.elibrary.ru/imvfxl>
18. Vaganova E.S., Aizatullin T.I., Kuzhakov Yu.A. Biodegradable polymers. In: *Technologies in Ecology: Collection of Scientific Papers. International Scientific and Practical Conference of Students, Postgraduates, Young Scientists, Teachers, Dedicated to the 7th Annual Youth Festival in the Field of Sustainable Development VUZÉKOFEST*. Ulyanovsk, April 22, 2021. Ulyanovsk: Ulyanovsk State Technical University. 2021. P. 5–6 (in Russ.). <https://elibrary.ru/mcoonl>
19. Nosirova K.A. Investigation of the effect of triacetin on the properties of films based on poly-3-hydroxybutyrate. In: *Physical Methods in Natural Sciences and Materials Science: Proceedings of the 58th International Scientific Student Conference*. Novosibirsk, April 10–13, 2020. Novosibirsk: Novosibirsk National Research State University. 2020. P. 57 (in Russ.). <https://elibrary.ru/tbpgjp>

Об авторах

Блинов Никита Дмитриевич, младший научный сотрудник, ФГБУН Институт биохимической физики им. Н.М. Эмануэля Российской академии наук (199334, Россия, Москва, ул. Косыгина, д. 4); инженер, ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (ФГБНУ ФНАЦ ВИМ) (109428, Россия, Москва, 1-й Институтский проезд, д. 5). E-mail: nik.blinov76@gmail.com. Scopus Author ID 58295953000, SPIN-код РИНЦ 5033-8004

Шибряева Людмила Сергеевна, д.х.н., 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); ведущий научный сотрудник, ФГБУН Институт биохимической физики им. Н.М. Эмануэля Российской академии наук (199334, Россия, Москва, ул. Косыгина, д. 4); ведущий научный сотрудник, ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (ФГБНУ ФНАЦ ВИМ) (109428, Россия, Москва, 1-й Институтский проезд, д. 5). 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>

Кульпина Мария Олеговна, инженер, ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (ФГБНУ ФНАЦ ВИМ) (109428, Россия, Москва, 1-й Институтский проезд, д. 5). E-mail: hebo-10-16.htpe@yandex.ru. SPIN-код РИНЦ 9792-0329

Неретина Анна Николаевна, к.б.н., научный сотрудник, ФГБУН «Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова Российской академии наук» (ИПЭЭ РАН) (119071, Россия, Москва, Ленинский пр-т, д. 33). E-mail: neretina-anna@yandex.ru. Scopus Author ID 56955649500, ResearcherID A-4377-2017, SPIN-код РИНЦ 3486-0220, <https://orcid.org/0000-0002-6876-079X>

Славкина Виктория Эдуардовна, младший научный сотрудник, ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (ФГБНУ ФНАЦ ВИМ) (109428, Россия, Москва, 1-й Институтский проезд, д. 5). E-mail: slavkina@vimlab.ru. Scopus Author ID 57216149451, SPIN-код РИНЦ 9888-2844, <https://orcid.org/0000-0003-2906-8917>

About the Authors

Nikita D. Blinov, Junior Researcher, N.M. Emanuel Institute of Biochemical Physics, Russian Academy of Sciences (4, Kosygina ul., Moscow, 119334, Russia); Engineer, Federal Scientific Agroengineering Center VIM (FSAC VIM) (5, 1 Institutskii proezd, Moscow, 109428, Russia). E-mail: nik.blinov76@gmail.com. Scopus Author ID 58295953000, RSCI SPIN-code 5033-8004

Lyudmila S. Shibryaeva, Dr. Sci. (Chem.), 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); Leading Researcher, N.M. Emanuel Institute of Biochemical Physics, Russian Academy of Sciences (4, Kosygina ul., Moscow, 119334, Russia); Leading Researcher, Federal Scientific Agroengineering Center VIM (FSAC VIM) (5, 1 Institutskii proezd, Moscow, 109428, 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>

Maria O. Kulpina, Engineer, Federal Scientific Agroengineering Center VIM (FSAC VIM) (5, 1 Institutskii proezd, Moscow, 109428, Russia). E-mail: hebo-10-16.htpe@yandex.ru. RSCI SPIN-code 9792-0329

Anna N. Neretina, Cand. Sci. (Biol.), Researcher, A.N. Severtsov Institute of Ecology and Evolution, Russian Academy of Sciences (IEE RAS) (33, Leninskii pr., Moscow, 119071, Russia). E-mail: neretina-anna@yandex.ru. Scopus Author ID 56955649500, ResearcherID A-4377-2017, RSCI SPIN-code 3486-0220, <https://orcid.org/0000-0002-6876-079X>

Victoria E. Slavkina, Junior Researcher, Federal Scientific Agroengineering Center VIM (FSAC VIM) (5, 1 Institutskii proezd, Moscow, 109428, Russia). E-mail: slavkina@vimlab.ru. Scopus Author ID 57216149451, RSCI SPIN-code 9888-2844, <https://orcid.org/0000-0003-2906-8917>