

Влияние ультразвукового воздействия на структурные и антимикробные свойства полимерных композиций на основе полиолефинов, дисперсно-наполненных бетулином



И. Ю. Васильев*, В. А. Род , О. А. Савельева

Московский политехнический университет , Москва, Россия

Поступила в редакцию: 23.06.2025

Принята после рецензирования: 18.09.2025

Принята к публикации: 07.10.2025

*e-mail: iljanaras@ya.ru

© И. Ю. Васильев, В. А. Род, О. А. Савельева, 2025



Аннотация.

Ограниченный срок хранения пищевых продуктов является одной из основных проблем в пищевой отрасли. Увеличивается актуальность применения активной упаковки, содержащей антимикробные добавки, пролонгирующие срок хранения продуктов. Цель исследования – изучить влияние воздействия ультразвуковых колебаний на расплавы полимерных смесей на основе термопластичных полиолефинов (полиэтилен, полипропилен), дисперсно-наполненных бетулином, а также их рецептурно-технологических параметров на структурные и антимикробные свойства.

Объекты исследования – пленки на основе полиолефинов (полиэтилен и полипропилен), а также полимерные композиции на основе полиолефинов и бетулина, расплавы которых при отливе модифицировали воздействием ультразвуковых колебаний, используя плоскощелевой экструдер (МашПласт, Россия). Для вышеуказанных объектов определяли структурно-морфологические свойства на сканирующем электронном микроскопе JSM-7500F (JEOL, Япония), теплофизические свойства – на калориметре DSC 204 F1 (NETZSCH, Germany). Химический состав изучали методом ИК-спектроскопии на приборе ФСМ-1201 (Инфраспек, Россия) с приставкой НПВО. Деформационно-прочностные свойства – на разрывной машине Z010 (ZwickRoell, Германия). Определение антимикробных свойств – диско-диффузионным методом в соответствии с руководством МУК 4.2.1890-04.

Воздействие ультразвуковых колебаний на расплавы полимерных смесей эффективно при содержании бетулина в смесях с полиолефинами выше 6 мас. %. Данный процесс позволяет направленно диспергировать агломерированные частицы бетулина, минимизируя их размер, и получать более гомогенное его распределение в смесях с полиолефинами при их отливе в полимерные композиции. Модификация расплавов полимерных композиций воздействием ультразвуковых колебаний оказывала влияние на меньшее снижение деформационно-прочностных свойств, в сравнении с полимерными композициями, для которых ультразвук не применяли. Это обусловлено увеличением межфазного взаимодействия между полиолефинами и бетулином в результате образования функциональных групп с полярной структурой (карбоксильные и карбонильные) при их обработке. При этом воздействие ультразвуковых колебаний на расплавы полимерных композиций не влияло на температурные режимы их переработки и в значительной степени не снижало производительность экструзионного оборудования, что является как эргономически, так и экономически эффективным.

Подтвержден положительный результат антимикробного воздействия полимерных композиций на основе полиолефинов, дисперсно-наполненных бетулином, расплавы которых подвергали воздействию ультразвуковых колебаний: коэффициент ингибирования роста в отношении тест-микроорганизмов, в сравнении с исходными полимерными композициями, увеличился в 1,5 раза; для полимерных композиций на основе полипропилена – выше, чем для полиэтиленовых, что обусловлено химической структурой исходных полиолефинов. Данный коэффициент также позволяет ингибировать репродуцирование тест-микроорганизмов в отношении *Candida albicans*, *Staphylococcus aureus*, *Pseudomonas aeruginosa*, однако ингибирование репродуцирования для *Escherichia coli* не наблюдалось. Для данной группы тест-микроорганизмов бетулин в качестве модифицирующей добавки с функцией антимикробности не подходит. Таким образом, модификация расплавов полимерных композиций на основе полиолефинов в смесях с бетулином при воздействии ультразвуковых колебаний является актуальным направлением для создания активных пленочных материалов.

Ключевые слова. Полиэтилен, полипропилен, ультразвуковое воздействие, полимерные композиции, бетулин, антимикробные свойства, экструзия, тест-микроорганизмы

Для цитирования: Васильев И. Ю., Род В. А., Савельева О. А. Влияние ультразвукового воздействия на структурные и антимикробные свойства полимерных композиций на основе полиолефинов, дисперсно-наполненных бетулином. Техника и технология пищевых производств. 2025. Т. 55. № 4. С. 807–818. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2025-4-2608>

Effect of Ultrasonication on Structural and Antimicrobial Properties of Polymer Compositions Based on Polyolefins Dispersed with Betulin



Ilya Yu. Vasilyev* D, Viktor A. Rod D, Olga A. Saveleva D

Moscow Polytechnic University ROR, Moscow, Russia

Received: 23.06.2025

*e-mail: iljanaras@ya.ru

Revised: 18.09.2025

© I.Yu. Vasilyev, V.A. Rod, O.A. Saveleva, 2025

Accepted: 07.10.2025



Abstract.

Food products have a limited shelf life, which remains a major challenge for the food industry. Active packaging with antimicrobial additives extends shelf life and prevents spoilage. This research tested two hypotheses: 1) ultrasonic treatment affects polymer blends based on thermoplastic polyolefins (polyethylene, polypropylene) dispersed with betulin; 2) their structural and antimicrobial properties depend on the formulation and processing parameters.

The study featured polyolefin-based films (polyethylene and polypropylene), as well as polymer composites based on polyolefins and betulin. The melts of these composites were ultrasonicated during casting using a flat-die extruder (MashPlast, Russia). The structural and morphological properties of these composites were determined using a JSM-7500F scanning electron microscope (JEOL, Japan); their thermophysical properties were tested using a DSC 204 F1 calorimeter (NETZSCH, Germany). The chemical investigation relied on IR spectroscopy in an FSM-1201 device (Infraspek, Russia) with an NTR attachment. The strain and strength properties were measured on a Z010 tensile tester (ZwickRoell, Germany). The antimicrobial experiment involved the disk diffusion method.

Ultrasonic vibrations were effective when the betulin content in the polyolefin blends exceeded 6 wt.%. This process provided targeted dispersion of agglomerated betulin particles of minimal size. It resulted in a homogeneous distribution of polyolefin blends during polymerization. The ultrasonic treatment slowed down the decline in strain and strength properties. The increased interfacial interaction between the polyolefins and betulin was due to the development of polar functional carboxyl and carbonyl groups during processing. Ultrasonication affected neither processing temperatures nor extrusion performance, which makes the method ergonomical and cost-effective.

This research confirmed the positive antimicrobial effect of ultrasonicated polymer composites based on polyolefins dispersed with betulin. The growth inhibition coefficient for test microorganisms increased by 1.5 times, compared to the original polymer composites. For the polypropylene-based polymer composites, it was higher than for polyethylene-based ones. This phenomenon could be explained by the chemical structure of the original polyolefins. This coefficient also inhibited *Candida albicans*, *Staphylococcus aureus*, and *Pseudomonas aeruginosa*. However, it failed to inhibit *Escherichia coli*, rendering betulin unsuitable as an antimicrobial additive for this group of microorganisms.

In general, the ultrasonic modification of polyolefin-based polymer composites blended with betulin showed good prospects as a component in new active food films.

Keywords. Polyethylene, polypropylene, ultrasonic exposure, polymer compositions, betulin, antimicrobial properties, extrusion, test microorganisms

For citation: Vasilyev IYu, Rod VA, Saveleva OA. Effect of Ultrasonication on Structural and Antimicrobial Properties of Polymer Compositions Based on Polyolefins Dispersed with Betulin. Food Processing: Techniques and Technology. 2025;55(4):807–818. (In Russ.) <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2025-4-2608>

Введение

Полимерные материалы являются неотъемлемой частью упаковочной индустрии. Из общего количества производимых полимерных материалов значительная их часть (45 %) используется в упаковочной отрасли для изготовления изделий из пластмасс разной конфигурации и размеров: гибкая упаковка; жесткая, блистерная и формованная полимерная тара;

одноразовая пластиковая посуда; потребительская упаковка для фасовки и транспортировки пищевых продуктов [1–3].

Для изготовления вышеперечисленных упаковочных изделий используют различные виды полимерных материалов: полиолефины (полиэтилен, полипропилен) [4–6], полиэтилентерефталат [7], полиамид [8], полистирол [9] и их производные.

Современное многообразие пищевых продуктов предъявляет различные требования к упаковочным материалам и изделиям, основными из которых являются защитные и потребительские свойства [10]. В этой связи наиболее используемыми являются полимерные пленочные материалы. К основным достоинствам использования полимерных пленочных материалов, позиционируемых в качестве упаковки, относят требуемые для упаковочных материалов прочность, стойкость к проколу и химическую стойкость, барьерные свойства, легкость в эксплуатации, низкую плотность [11, 12].

Одна из основополагающих проблем пищевой отрасли – ограниченный срок хранения пищевых продуктов. Однослойная гибкая полимерная упаковка в подавляющем большинстве случаев не удовлетворяет предъявляемым к пленочным материалам требованиям [13]. К примеру, полипропиленовая пленка характеризуется низкой паропроницаемостью, но при этом высокой кислородопроницаемостью, что свойственно полиэтилентерефталату. Так, актуальным является изготовление многослойных пленочных материалов, которые характеризуются свойствами, присущими каждому отдельному компоненту, входящему в их состав [14–16]. Для изготовления многослойных пленочных материалов применяют технологию соэкструзии, нередко – каширование. Эти процессы, в свою очередь, более трудоемкие и энергозатратные, чем производство однослойных полимерных пленок [17]. Из большого многообразия полимерных материалов, позиционируемых в качестве упаковочных, полиолефины до сих пор имеют высокие темпы производства, устойчивое развитие и являются актуальными для научных разработок.

Принимая во внимание разные методы и особенности технологий производства упаковочных материалов и изделий, одним из альтернативных и перспективных направлений является разработка технологии изготовления активной упаковки. Данная технология является аналогичной производству однослойной упаковки с возможностью пролонгации срока хранения продуктов [18]. Таким образом, актуальным направлением как в пищевой, так и в упаковочной отрасли является создание полимерных упаковочных материалов с антимикробными свойствами [19].

В качестве модификатора, способствующего приданию полимерной упаковке антимикробных свойств, используют дисперсные наполнители природного и синтетического происхождения, иногда применяют и модификаторы наноразмерных характеристик (наночастицы) [20]. Перспективным антимикробным модификатором является бетулин, который получают путем выделения из коры березы. Он позиционируется как биологически активное вещество. Наличие в его многокомпонентном составе лупенона, увеола, ацетат бетулина и олеиновой кислоты формирует широкий спектр фармакологической, антимикробной, фунгицидной, противовирусной и антимутагенной

активности. Также неоспоримым преимуществом использования бетулина является практически неисчерпаемая и возобновляемая сырьевая база, легкость выделения готового продукта при химической и / или механической переработке и высокое содержание основного вещества (25–40 %). Бетулин устойчив к УФ-излучению, нетоксичен, что позволяет применять его в составе полимерных пленочных материалов для прямого контакта с пищевыми продуктами [21–22].

Придание полимерной матрице антимикробной функции достигается при достаточно высоком содержании антимикробного наполнителя, что технологически осуществить практически невозможно. Высокое содержание наполнителя в полимерных смесях вызывает его агломерацию, низкое диспергирование и распределение, что сказывается на структурных характеристиках и свойствах готовых изделий. Одним из научно-практических решений для минимизации технологических проблем при создании активных полимерных материалов является использование ультразвука, который направленно воздействует на расплав полимера при их экструзии, улучшая технологические характеристики пленочных материалов [23, 24]. К наиболее практико-ориентированным методам изготовления активных полимерных пленочных материалов относят переработку через расплав [25] с возможностью масштабирования на существующем технологическом оборудовании для их изготовления [26].

Цель исследования – изучить влияние воздействия ультразвуковых колебаний на расплавы полимерных смесей на основе термопластичных полиолефинов (полиэтилен, полипропилен), дисперсно-наполненных бетулином, а также их рецептурно-технологических параметров на структурные и антимикробные свойства.

Объекты и методы исследования

Для изготовления антимикробных полимерных композиций использовали две разновидности полиолефинов: полиэтилен низкой плотности 11503-070 (Казаньоргсинтез, Россия) и полипропилен PP H080 CF (SIBEX, Сибур, Россия).

Для придания матрицам полиолефинов антимикробной функции в работе применяли бетулин – соответствующий декларации RU Д-RU.ВЯ01.В24672 от 11.04.2018 экстракт коры березы (ЭКБ, Кортекс, Россия) по ТУ 9154-001-35348291-16.

Полимерные композиции на основе полиолефинов, дисперсно-наполненных бетулином, изготавливали на модернизированном плоскощелевом оснащенным ультразвуковой приставкой экструдере с барьерным шнеком (лаборатория Разработки и эксплуатации синтетических и природных полимеров и композитов ФГАОУ «Московский политехнический университет»), варьируя концентрацию бетулина в смесях с полиолефинами от 2–10 мас. %. Выходящий из плоскощелевой головки расплав принимали на охлаждаемые валы и формировали в пленки толщиной (70 ± 3 мкм).

Температурные режимы получения полимерных композиций на основе полиолефинов, дисперсно-наполненных бетулином, представлены в таблице 1.

Технологическая особенность получения полимерных композиций на основе полиолефинов, дисперсно-наполненных бетулином, состоит в том, что расплавы полимерных смесей дополнительно подвергали направленному воздействию ультразвуковых колебаний (УЗ) при формировании пленок из них. Технологические параметры процесса представлены в таблице 2. Ультразвуковую приставку устанавливали между зоной дозирования и плоскощелевой головкой экструдера, погруженного непосредственно в расплав.

Влияние ультразвукового воздействия при обработке расплавов полимерных композиций разных смесевых составов на их фазовое состояние определяли с помощью дифференциальной сканирующей калориметрии на приборе DSC 204 F1 (NETZSCH, Германия) в интервале температур 20–200 °C при скорости сканирования 10 град/мин и навеске образца 11 ± 1 мг. В качестве теплофизических свойств определяли температуру плавления ($T_{\text{пп}}$), степень кристалличности ($\chi_{\text{кр}}$), энталпию плавления (ΔH). Для расчета степени кристалличности полимерных композиций использовали энталпии плавления полностью кристаллического полиэтилена (ПЭ) – $\Delta H(\text{ПЭ}) = 293$ Дж/г и кристаллического полипропилена (ПП) – $\Delta H(\text{ПП}) = 147$ Дж/г согласно ГОСТ 55134-2012.

Влияние ультразвукового воздействия на реологические свойства (текучесть) полимерных композиций при их экструзии определяли на измерителе индекса расплава термопластов ИИРТ-5 (Точмашприбор, Россия). При проведении испытаний полимерные смеси загружали в цилиндрический бункер ИИРТ-5 и нагре-

вали до 190 °C. При воздействии груза массой 2,16 кг вытекающий через сквозное отверстие капилляра ($d = 2,095$ мм) расплав отсекали (10 мин) и измеряли его массу в соответствии с ГОСТ 11645-2021.

Воздействие ультразвука на деформационно-прочностные свойства полимерных композиций определяли в соответствии с ISO 527-3:2018. В качестве показателей деформационно-прочностных свойств исследовали разрушающее напряжение при растяжении (σ_p) и относительное удлинение при разрыве (ε_p).

Структурно-морфологические свойства поверхности полимерных композиций и модифицированных воздействием ультразвука изучали с помощью высокоразрешающего автоэмиссионного сканирующего электронного микроскопа JSM-7500F (JEOL, Япония).

Химическую структуру полимерных композиций, расплавы которых подвергали воздействию ультразвуковых колебаний, определяли согласно ГОСТ 57939-2017 Фурье ИК-спектроскопией с приставкой НПВО на приборе ФСМ-1201 (Инфраспек, Россия) с разрешением в 1 см^{-1} в диапазоне волновых чисел от 375 до 4000 см^{-1} .

Исследование полимерных композиций на определение антимикробных свойств проводили диско-диффузионным методом в соответствии с руководством МУК 4.2.1890-04.

В качестве тест-микроорганизмов использовали грамположительные и грамотрицательные стафилококк (*Staphylococcus aureus*), кишечную палочку (*Escherichia coli*), синегнойную палочку (*Pseudomonas aeruginosa*), дрожжевые грибки (*Candida albicans*).

Тестируемые штаммы культивировали в пробирках на скошенной агаризированной питательной среде в термостате при температуре 35 ± 1 °C. По истечении 24 ч с использованием денситометра готовили микробную супензию, соответствующую оптическому стандарту мутности Мак-Фарланда № 0,5; затем доводили ее до $1,5 \times 10^8$ кл./мл.

На чашки Петри с агаризированной питательной мясо-пептонной средой и питательным агаром Сабуро наносили взвесь тест-микроорганизмов (200 мкл), равномерно распределяя стерильным шпателем по поверхности, на них укладывали исследуемые образцы размером 1×1 см.

Посевы помещали в термостат при температуре 35 ± 1 °C на 24 ч. После оценивали рост микроорганизмов и измеряли площадь зоны ингибирования роста при наличии. Антимикробные свойства полимерных композиций выражали в коэффициенте ингибирования роста (КИ), который рассчитывали как $S_{\text{зир}}/S_{\text{образца пленки}}$.

Результаты и их обсуждение

Придание антимикробных свойств полимерным композициям и изделиям на их основе зависит не только от равномерного, но и объемного распределения наполнителя в матрице полимера при формировании структуры в процессе экструзии.

Таблица 1. Температурные режимы изготовления полимерных композиций

Table 1. Temperature modes for polymer compositions

Композиция	Температура по зонам цилиндра, °C				
	Зона экструдера				
	1 зона	2 зона	3 зона	4 зона	5 зона
ПЭ:бетулин	100	110	120	130	130
ПП:бетулин	160	165	170	175	180

Таблица 2. Технологические параметры обработки расплавов полимерных смесей ультразвуком

Table 2. Ultrasonication of polymer melts: Processing parameters

Параметры ультразвуковой приставки	Технические показатели
Генератор колебаний	до 25 кГц
Торец волновода	до 10 мкм
Частота колебаний	20 кГц
Мощность генератора	1,2 кВт

Морфология поверхности пленки на основе полипропилена (рис. 1а) представляет бездефектную, сплошную, монолитную поверхность с ориентационными тяжами, соответствующими фибрилярной структуре, которую возможно получить в процессе медленной вытяжки расплава полимера при формировании полимерных пленок из него. Для полимерной композиции на основе полипропилена, дисперсно-наполненного бетулином (10 мас. %) (рис. 1б), заметно неоднородное распределение последнего в матрице полипропилена, как и в случае полимерных композиций на основе полиэтилена. Это обусловлено широким его распределением по размеру (10–70 мкм) и влияет на образование агломератов вследствие их высокой поверхностной энергии. При воздействии ультразвуковых колебаний на расплавы полимерных смесей размер частиц бетулина значительно (10–25 мкм) снижался (рис. 1с), что связано с кавитационным потоком, возникающим при воздействии ультразвуковых колебаний, который разрушает агломерированные частицы бетулина,

дополнительно диспергируя их. В результате этого процесса возможно получить более гомогенное его распределение в смесях с полиолефинами, регулируя размеры частиц, обладающих сферической и / или неправильной формой, которые распределяются не только на поверхности, но и в объеме, что предопределяет улучшение его влияния на анаэробное и / или аэробное ингибирование в зависимости от вида тест-микроорганизмов.

Позиционируя разработанные полимерные композиции в качестве активной упаковки, необходимо учитывать технологию их получения. Одним из практико-ориентированных методов является экструзия. Определили влияние ультразвука на теплофизические (рис. 2) и реологические свойства полимерных композиций, в которых содержание бетулина в смесях с полиолефинами составляет 10 мас. %.

ДСК кривая полимерной композиции на основе полиэтилена, представленная на термограмме, имеет эндотермический пик, позволяющий идентифицировать

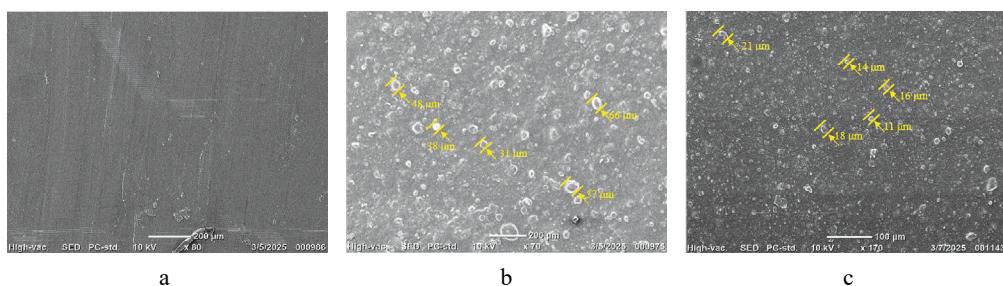


Рисунок 1. СЭМ изображения структурно-морфологических свойств поверхности полимерных композиций:
а – ПП ; б – ПП:бетулин (90:10 мас. %); в – ПП:бетулин (90:10 мас. %) при ультразвуковом воздействии

Figure 1. SEM images of structural and morphological properties of the surface of polymer compositions: a – polypropylene; b – polypropylene:betulin (90:10 wt.%); and c – polypropylene:betulin (90:10 wt.%) with ultrasonication

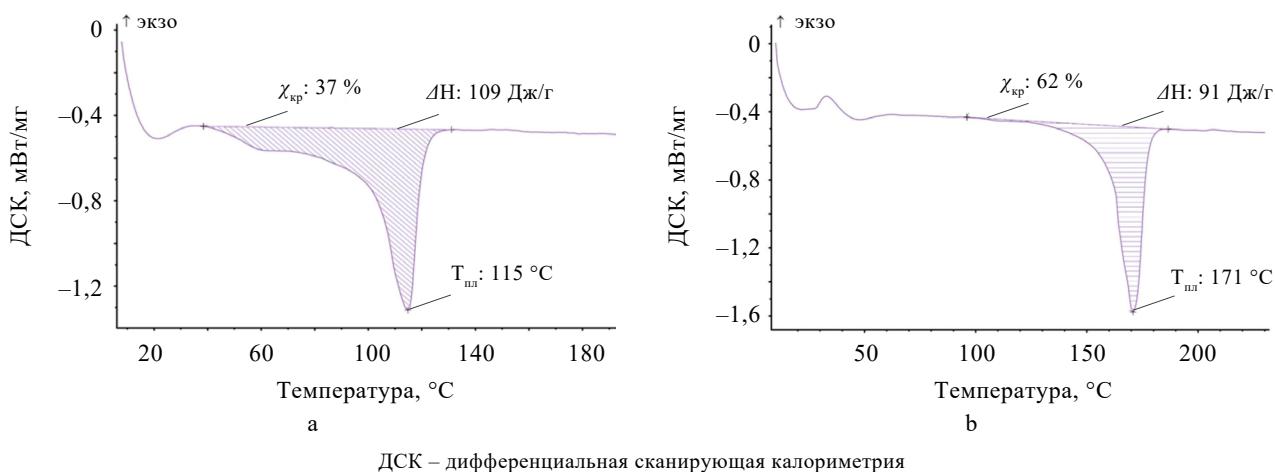


Рисунок 2. Теплофизические свойства полимерных композиций 90:10 мас. % при ультразвуковом воздействии:
а – ПЭ:бетулин; б – ПП:бетулин

Figure 2. Thermophysical properties of polymer compositions 90:10 wt.%; with ultrasonication: a – polyethylene:betulin; b – polypropylene:betulin

наличие кристаллической фазы с температурой плавления 115 °C, удельной энергией эндотермического процесса 109 Дж/г и, как следствие, со степенью кристалличности 37 %. Наличие небольшого эндотермического пика плавления при температуре 60 °C свидетельствует о начальном процессе размягчения полиэтилена, что, вероятно, связано с содержанием низкомолекулярных веществ в его структуре. Для полимерной композиции на основе полипропилена, как и в случае полимерной композиции на основе полиэтилена, на термограмме присутствовала кристаллическая фаза с температурой плавления 171 °C. Энталпия плавления на 18 Дж/г ниже, чем для полиэтилена (91 Дж/г), при этом степень кристалличности составляла 62 %. При воздействии ультразвуковых колебаний на расплавы полимерных смесей теплофизические свойства полимерных композиций на основе полиолефинов, дисперсно-наполненных бетулином, не изменились и представляли собой классический вид плавления полиолефинов. Таким образом, в данном случае ультразвуковая модификация расплавов полимерных смесей не влияла на температуру их переработки.

Показатель текучести расплава при отливке полиэтиленовой пленки составляет 7 г/10 мин, для полипропиленовой – 8 г/10 мин. При увеличении содержания бетулина в смесях с полиолефинами показатель текучести расплава снижался (рис. 3), что обусловлено его большей массовой долей в полимерных композициях, а также исходным размером частиц. Для полимерных композиций на основе полиэтилена и бетулина – 10 мас. %, показатель текучести расплава в сравнении с исходной полиэтиленовой пленкой снижался

на 26,0 %, для полимерных композиций на основе полипропилена при том же массовом содержании бетулина – на 37,5 %. При воздействии ультразвуковых колебаний на расплавы полимерных смесей в процессе экструзии показатель текучести расплава для полимерных композиций снижался в меньшей степени: на основе полиэтилена и бетулина – на 6 %, на основе полипропилена и бетулина – на 5 %. Воздействие ультразвуковых колебаний до 6 мас. % бетулина в смесях с полиолефинами не влияло на изменение показателя текучести расплава. Это позволяет сделать вывод, что модификация расплавов полимерных смесей ультразвуковым воздействием при более высоком массовом содержании бетулина эффективнее. Такой подход способствует минимизации образования агломерированных частиц бетулина, диспергируя их, и позволяет изготавливать полимерные композиции при переработке через расплав с более гомогенным его распределением в смесях с полиолефинами. При этом снижение показателя текучести расплава для полимерных композиций на основе полиолефинов и бетулина не влияет на производительность экструзионного оборудования и является как эргономически, так и экономически эффективным.

Для дополнительного определения механизма воздействия ультразвуковых колебаний на расплавы полимерных смесей при изготовлении композиционных материалов на основе полиолефинов и бетулина определили их химический состав методом ИК-спектроскопии. Для полиэтиленовой пленки на ИК-спектре (рис. 4а) присутствуют асимметричные и симметричные полосы поглощения в области 2950 и 2850 cm^{-1} и деформационные колебания в области 1460 cm^{-1} , характерные для наличия CH_2 -групп. На ИК-спектре полипропиленовой пленки (рис. 4б) присутствует интенсивная полоса поглощения в области 2950 cm^{-1} , характерной для асимметричной CH_2 -группы, и интенсивные полосы поглощения в областях 1435 и 1370 cm^{-1} , характерных для асимметричной деформационной CH -группы и симметричной CH_3 -группы. Так, полиолефиновые пленки представляют собой классические спектры, соответствующие исходным полиэтилену низкой плотности и изотактическому полипропилену.

Для полимерной композиции на основе полиэтилена, дисперсно-наполненной бетулином (10 мас. %), дополнительно к функциональным группам, соотнесенным к полиэтилену, на ИК-спектрах (рис. 5) появилась широкая полоса поглощения в области 3300 cm^{-1} , характерная для OH -групп. Она относится к бетулину и свидетельствует о его частичной гидрофильности. Также появилась полоса поглощения в области 1200 до 960 cm^{-1} , характерная для CH -групп и CH -колебаний бензольного кольца. Таким образом, наличие бетулина до 10 мас. % в составе полимерных композиций не влияло на изменение их химической структуры, а также позволяло установить физический, а не химический (или другой) тип взаимодействия в системе полимер / наполнитель.

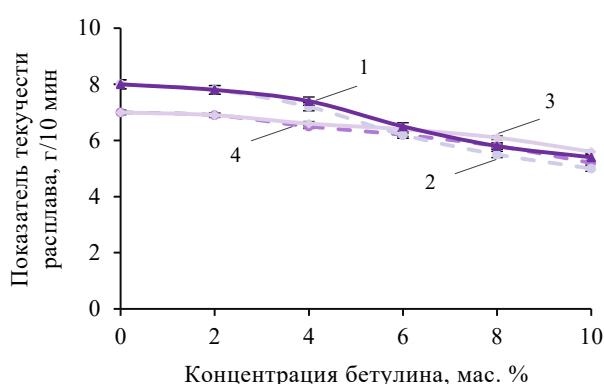


Рисунок 3. Влияние ультразвукового воздействия на показатель текучести расплава полимерных композиций на основе полиолефинов, дисперсно-наполненных бетулином: при ультразвуковом воздействии (1 – ПП, 3 – ПЭ); без ультразвукового воздействия (2 – ПП, 4 – ПЭ)

Figure 3. Effect of ultrasonic exposure on melt flow index of polymer compositions based on polyolefins dispersed with betulin with ultrasonication (1 – polypropylene, 3 – polyethylene); without ultrasonication (2 – polypropylene, 4 – polyethylene)

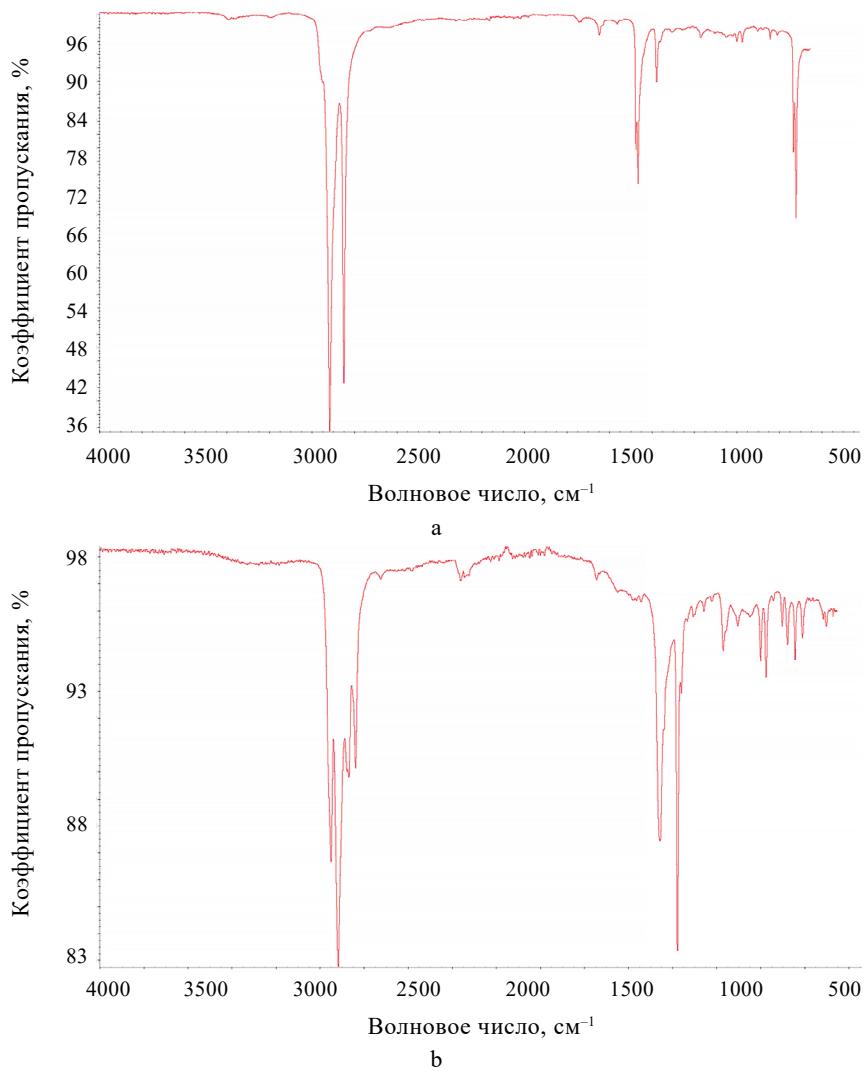


Рисунок 4. ИК-спектры исходных полиэтилена низкой плотности (а) и изотактического полипропилена (б)

Figure 4. IR spectra of initial low-density polyethylene (a) and isotactic polypropylene (b)

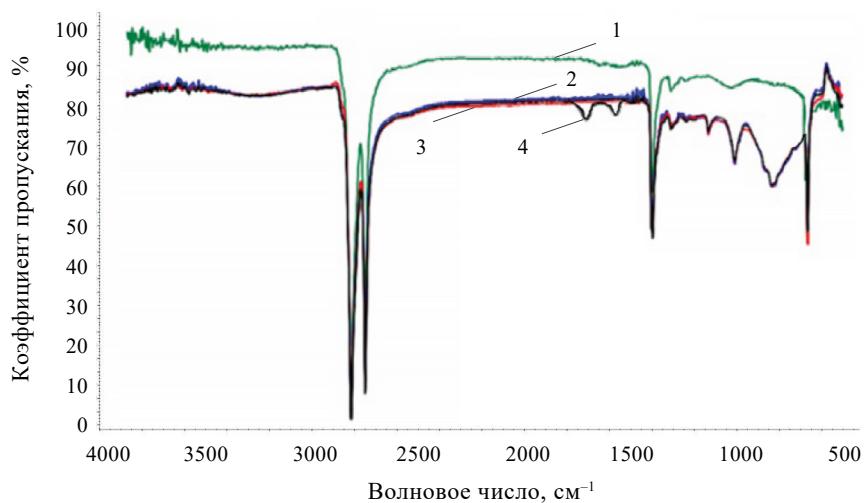


Рисунок 5. ИК-спектры полимерных композиций: 1 – исходная пленка ПЭ; 2 – ПЭ:бетулин (95:5 мас. %); 3 – ПЭ:бетулин (90:10 мас. %); 4 – ПЭ:бетулин (90:10 мас. %) при ультразвуковом воздействии

Figure 5. IR spectra of polymer compositions: 1 – initial polyethylene film; 2 – polyethylene:betulin (95:5 wt.%); 3 – polyethylene:betulin (90:10 wt.%); and 4 – polyethylene:betulin (90:10 wt.%) with ultrasonication

Для полимерных композиций на основе полиолефинов и бетулина-10 мас. %, расплавы которых подвергали воздействию ультразвуковых колебаний, на ИК-спектре появились дополнительные полосы поглощения в области $1740\text{--}1720\text{ cm}^{-1}$, указывающие на наличие C=O -групп, и 1600 cm^{-1} , характерные для COOH -групп. Следовательно, воздействие ультразвуковых колебаний на расплавы полимерных смесей при экструзии позволяет увеличить полярность синтетических термопластов, влияющую на смачивающую способность, проявляющуюся в увеличении межфазного взаимодействия между полиолефинами и бетулином.

Для активной полимерной упаковки важно учитывать комплекс деформационно-прочностных свойств. Для этого определили разрушающее напряжение при растяжении (рис. 6) и относительное удлинение при разрыве (рис. 7).

Для полиэтиленовой пленки разрушающее напряжение при растяжении составляло 16 МПа, для полипропиленовой – 27 МПа. При увеличении содержания бетулина до 10 мас. % в смесях с полиолефинами прочность полимерных композиций снижалась, что обусловлено образованием гетерогенной структуры. Так, разрушающее напряжение при растяжении полимерных композиций на основе полиэтилена и бетулина до 10 мас. % снижалось на 23 % и составляло 12,4 МПа. Для полимерных композиций на основе полипропилена и бетулина при том же массовом содержании, как и в случае с полимерными композициями на основе полиэтилена, разрушающее напряжение при растяжении снижалось на 19 % и составляло 22 МПа.

У полимерных композиций на основе полиолефинов и бетулина (10 мас. %), расплавы которых подвергали ультразвуковому воздействию, снижение прочностных

свойств осуществлялось в меньшей степени. Разница для полимерных композиций на основе полиэтилена составляла 13 %, на основе полипропилена – 12 %. Этим опосредованно увеличение межфазного взаимодействия между компонентами, которое обеспечивают полярные (COOH - и C=O -) функциональные группы.

Аналогичную зависимость наблюдали и при определении деформационных свойств. Относительное удлинение при разрыве для полиэтиленовой пленки составляло 390 %, для полипропиленовой – 250 %. При увеличении содержания бетулина в смесях с полиолефинами до 10 мас. % деформационные свойства полимерных композиций снижались: на основе полиэтилена – на 8 %; полипропилен – на 16 %. При воздействии ультразвуковых колебаний на их расплавы разница в деформационных свойствах, в сравнении с исходными полимерными композициями, составляла: для полиэтиленовой – 2 %, для полипропиленовой – 4 %. Анализируя деформационно-прочностные свойства, можно заключить, что полимерные композиции на основе полиолефинов и бетулина целесообразны для применения в качестве упаковочных материалов.

Исследование полимерных композиций на основе полиолефинов с бетулином осуществляли для определения антимикробных свойств. В качестве тест-микроорганизмов использовали грамположительные и грамотрицательные стафилококк *Staphylococcus aureus* (штамм 906), кишечную палочку *Escherichia coli* (штамм 1257), синегнойную палочку *Pseudomonas aeruginosa* (ATCC 27853), дрожжевые грибы *Candida albicans* (РКПГУ 1353/1277) (рис. 8).

Исследуемые полимерные композиции на основе синтетических полиолефинов, дисперсно-наполненных бетулином до 2 мас. %, не обладали антимикробным

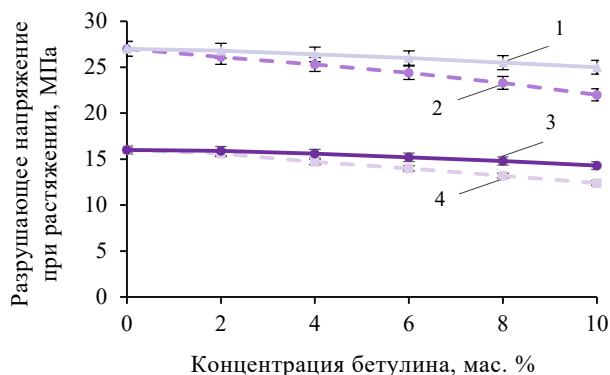


Рисунок 6. Влияние ультразвука на прочностные свойства полимерных композиций на основе полиолефинов, дисперсно-наполненных бетулином, при ультразвуковом воздействии (1 – ПП, 3 – ПЭ); без ультразвукового воздействия (2 – ПП, 4 – ПЭ)

Figure 6. Effect of ultrasound on tensile properties of polymer compositions based on polyolefins dispersed with betulin: with ultrasonication (1 – polypropylene, 3 – polyethylene); without ultrasonication (2 – polypropylene, 4 – polyethylene)

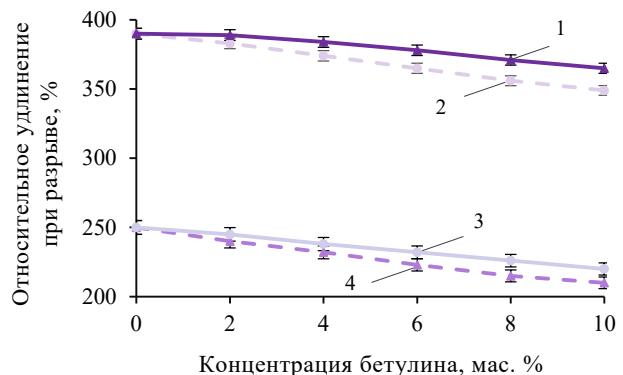


Рисунок 7. Влияние ультразвука на деформационные свойства полимерных композиций на основе полиолефинов, дисперсно-наполненных бетулином, при ультразвуковом воздействии (1 – ПЭ, 3 – ПП); без ультразвукового воздействия (2 – ПЭ, 4 – ПП)

Figure 7. Effect of ultrasound on deformation properties of polymer compositions based on polyolefins dispersed with betulin: with ultrasonication (1 – polyethylene, 3 – polypropylene); without ultrasonication (2 – polyethylene, 4 – polypropylene)

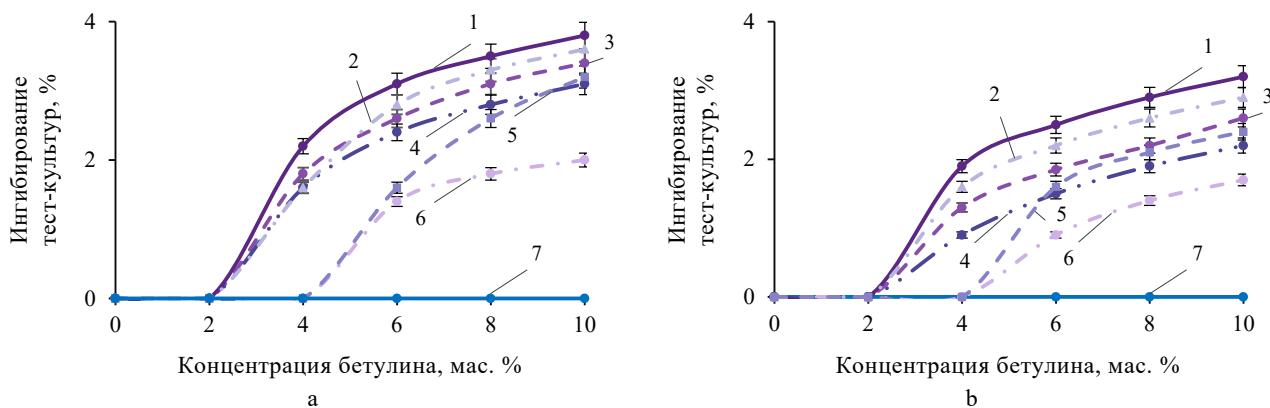


Рисунок 8. Влияние ультразвукового воздействия на коэффициент ингибирования тест-культур: а – ПЭ:бетулин; б – ПП:бетулин (*Candida albicans*: 1 – при ультразвуковом воздействии, 3 – без ультразвукового воздействия; *Pseudomonas aeruginosa*: 2 – при ультразвуковом воздействии, 4 – без ультразвукового воздействия; *Staphylococcus aureus*: 5 – при ультразвуковом воздействии, 6 – без ультразвукового воздействия; 7 – *Escherichia coli*)

Figure 8. Effect of ultrasound exposure on the inhibition rate of test cultures: a – polyethylene:betulin; b – polypropylene:betulin (*Candida albicans*: 1 – with ultrasonication, 3 – without ultrasonication; *Pseudomonas aeruginosa*: 2 – with ultrasonication, 4 – without ultrasonication; *Staphylococcus aureus*: 5 – with ultrasonication, 6 – without ultrasonication; and 7 – *Escherichia coli*)

действием. Полимерная композиция на основе полиэтилена с бетулином при 4 мас. % приобретала избирательную противомикробную активность в значениях коэффициента ингибирования роста (КИ) = 0,9 и 1,3 %, ингибировала рост бактерий *P. aeruginosa* и рост дрожжевых грибков *C. albicans*. Значимый результат по определению antimикробной активности полимерных композиций на основе полиэтилена в смесях с бетулином достигнут при 10 мас. % последнего; КИ в отношении *S. aureus* составил 1,7%; *P. aeruginosa* – 2,2 %. Максимальный результат достигнут в отношении *C. albicans* – 2,6 %.

Для полимерных композиций на основе полипропилена в смесях с бетулином – 10 мас. %, КИ в отношении роста *S. aureus* составил 2,0%; *P. aeruginosa* – 3,1%; максимальный результат достигнут в отношении *C. albicans* – 3,4 %.

При определении antimикробных свойств полимерных композиций на основе полиолефинов, наполненных бетулином до 10 мас. %, расплавы которых модифицировали ультразвуковым воздействием, КИ в отношении тест-микроорганизмов увеличивался. Так, для полимерных композиций на основе полиэтилена с бетулином КИ в отношении *P. aeruginosa* составил 2,9%; *S. aureus* – 2,4%; *C. albicans* – 3,2 %. Для полимерных композиций на основе полипропилена КИ в отношении *P. aeruginosa* – 3,6%; *S. aureus* – 3,2%; *C. albicans* – 3,8 %. Повышение коэффициента ингибирования у исследуемых тест-микроорганизмов полимерных композиций на основе полиолефинов в смесях с бетулином, полученных при обработке расплавов ультразвуковым воздействием, вероятно, связано с тем, что гомогенное распределение последнего в матрицах полиолефинов и наличие полярных

групп на их поверхности разрушают клеточные стенки микроорганизмов, мешая их синтезу, что приводит к мутации и гибели клеток.

При этом на чашках Петри с «газонными» культурами *E. coli* наблюдали, что зоны подавления репродукции отсутствовали, но при этом рост бактерий под фрагментами полимерных композиций не выявлен и позволяет сделать вывод, что antimикробный наполнитель – бетулин – для данной группы тест-микроорганизмов ингибирующее воздействие не оказывал.

Таким образом, применение бетулина в смесях с полиолефинами, модифицированными воздействием ультразвуковых колебаний их расплавов при экструзии, является перспективной технологией, которая позволяет изготавливать полимерные упаковочные материалы с заданными свойствами, в том числе antimикробными.

Выводы

Проведено комплексное исследование, направленное на определение влияния воздействия ультразвуковых колебаний на расплавы полимерных смесей полиолефинов, дисперсно-наполненных бетулином от 2 до 10 мас. %, при изготовлении полимерных композиций из них.

Воздействие ультразвуковых колебаний на расплавы полимерных смесей проявляет эффективность выше 6 мас. % бетулина в смесях с полиолефинами, в результате чего становится возможным диспергировать агломерированные частицы бетулина в матрицах полиолефинов, снижая их размер в 3 раза (с 70 мкм для исходных до 20 мкм для модифицированных ультразвуком). Деформационно-прочностные свойства снижались в меньшей степени вследствие увеличения межфазного взаимодействия в системе полимер /

наполнитель, что проявлялось при появлении функциональных групп с полярной структурой (карбонильной и карбоксильной).

В полимерных композициях, для которых ультразвук не применяли, взаимодействие компонентов при переработке через расплав осуществлялось путем физического, а не химического (или другого) типа взаимодействия. Это подтверждается ИК-спектрами, на которых отсутствуют полосы поглощения, нехарактерные для функциональных групп исходных полиолефинов. Воздействие ультразвуковых колебаний на расплавы полимеров не влияло на температурные режимы их переработки и в значительной степени не снижало производительность экструзионного оборудования, что является как эргономически, так и экономически эффективным.

Самый высокий коэффициент ингибирования роста (КИ) микроорганизмов осуществлялся при 10 мас. % бетулина в смесях с полиолефинами, расплавы которых подвергали воздействию ультразвуковых колебаний. Для полимерных композиций на основе полиэтилена КИ микроорганизмов составил: *Staphylococcus aureus* – 2,4 %; *Pseudomonas aeruginosa* – 2,9 %; *Candida albicans* – 3,2 %. Для полимерных композиций на основе полипропилена КИ микроорганизмов составил:

S. aureus – 3,2 %; *P. aeruginosa* – 3,6 %; *C. albicans* – 3,8 %. При этом для полимерных композиций на основе полиолефинов, дисперсно-наполненных бетулином, в отношении *Escherichia coli* установили, что подавление репродукции микроорганизмов отсутствовало.

Критерии авторства

И. Ю. Васильев – руководство проектом, редактирование и окончательное одобрение рукописи; В. А. Род – сбор и обработка материала; О. А. Савельева – проведение исследования.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution

I.Yu. Vasilyev supervised the project and proofread the final version of the manuscript; V.A. Rod collected and processed the material; O.A. Saveleva conducted the research.

Conflict of interest

The authors declared no conflict of interest regarding the publication of this article.

Список литературы / References

1. Guivan MYu, Ovchinnikov VA, Mamin EA, Pantyukhova PV, Mastalygina EE, et al. The influence of metal sludge on the oxidative destruction of low-density polyethylene. *Polymer Science, Series D*. 2024;17(2):502–506. <https://doi.org/10.1134/S1995421224700850>
2. Brovina SD, Mastalygina EE, Trofimchuk ES, Popov AA. Development of materials based on poly(lactic acid) and copper(II) sulfate impregnated by the crazing method. *Colloid Journal*. 2024;86(1):4–13. <https://doi.org/10.1134/S1061933X23601178>
3. Миролюбова Т. В., Бенеманская Е. А., Редина Л. В., Няглов О. С. Антимикробные свойства мастербатчей на основе полиолефинов и квазикристаллов. Инновационное развитие техники и технологий в промышленности. Сборник материалов Всероссийской научной конференции молодых исследователей с международным участием. Часть 3. Москва, 2023. С. 53–58. [Mirolyubova TV, Benemanskaya EA, Redina LV, Neyaglova OS. Antimicrobial properties of masterbatches based on polyolefins and quasicrystals. Innovative industrial engineering and technology. Proceedings of the All-Russian scientific conference of young researchers, with international participation. Part 3. Moscow, 2023. pp. 53–58. (In Russ.)] <https://elibrary.ru/OEWYBX>
4. Русланова С. Н., Юсупов Б. Н., Бородина А. С., Темникова Н. Е., Зиганшина А. С. и др. Исследование смесей полиолефинов с сополимерами этилена и винилового спирта. Все материалы. Энциклопедический справочник. 2024. № 2. С. 36–42. [Rusanova SN, Yusupov BN, Borodina AS, Temnikova NE, Ziganshina AS, et al. Investigation of mixtures of polyolefins with ethylene copolymers with vinyl alcohol. All materials. Encyclopedic Handbook. 2024;(2):36–42. (In Russ.)] <https://doi.org/10.31044/1994-6260-2024-0-2-36-42>
5. Троян А. С., Троян А. А. Переработка вторичного полиэтилентерефталата. Химия и химическая технология в XXI веке. Материалы XXIII Международной научно-практической конференции студентов и молодых ученых имени выдающихся химиков Л. П. Кулёва и Н. М. Кижнера. В 2-х томах. Т. 2. Томск, 2022. С. 339–341. [Troyan AS, Troyan AA. Recycling of secondary polyethylene terephthalate. Chemistry and chemical technology in the 21st century. Proceedings of the 23rd L. P. Kulev and N. M. Kizhner International Scientific and Practical Conference of Students and Young Scientists. In 2 Vol. Tomsk, 2022;339–341. (In Russ.)] <https://elibrary.ru/VFWBOW>
6. Ухарцева И. Ю., Цветкова Е. А., Гольдаде В. А., Шаповалов В. М. Технологические аспекты производства тары и упаковки для пищевых продуктов (обзор). Полимерные материалы и технологии. 2022. Т. 8. № 4. С. 6–31. [Ukhartseva IYu, Tsvetkova EA, Goldade VA, Shapovalov VM. Technological aspects of manufacturing containers and packaging for food products. Polymer materials and technologies. 2022;8(4):6–31. (In Russ.)] <https://doi.org/10.32864/polymattech-2022-8-4-6-31>

7. Пономарев А. П. Проблемы качества вторичного полимерного сырья для производства промышленной упаковки. Современные проблемы и перспективы развития науки, техники и образования. Материалы III Национальной научно-практической конференции. Под редакцией И. А. Долматовой. Магнитогорск, 2023. С. 86–88. [Ponomarev AP. Quality issues of secondary polymer raw materials for industrial packaging production. Relevant issues and prospects for the development of science, technology, and education. Proceedings of the 3rd National Scientific and Practical Conference. Edited by I. A. Dolmatova. Magnitogorsk, 2023. pp. 86–88. (In Russ.)] <https://elibrary.ru/RSLURQ>
8. Зверькова Я. А., Хамнаева Н. И. Исследование технологии получения упаковочных материалов для продуктов питания. Вестник ВСГУТУ. 2020. № 4. С. 31–36. [Zverkova YaA, Khamnaeva NI. Research of technology for obtaining packaging materials for food products. ESSUTM Bulletin. 2020;(4):31–36. (In Russ.)]
9. Шарифов Д. М., Ниязбекова Р. К., Мухамбетов Г. М., Михалченко В. Н., Бегайдарова Ж. А. и др. Технология получения и перспективы развития нанокомпозитных материалов на полимерной основе. Физика твердого тела. Материалы XV Международной научной конференции. Астана, 2022. С. 152–154. [Sharifov DM, Niyazbekova RK, Mukhambetov GM, Mikhalchenko VN, Begaidarov ZhA, et al. Technology and development prospects of polymer-based nanocomposite materials. Solid state physics. Proceedings of the 15th International Scientific Conference. Astana, 2022. pp. 152–154. (In Russ.)] <https://elibrary.ru/QCBTEQ>
10. Тришина О. А., Кормильцева К. А. Повышение экологичности полимерных отходов. Актуальные вопросы общества, науки и образования. Сборник статей V Международной научно-практической конференции. Часть 1. Пенза, 2023. С. 189–191. [Trishina OA, Kormiltseva KA. Sustainable polymer waste. Current issues in society, science, and education. Proceedings of the 5th International Scientific and Practical Conference. Part 1. Penza, 2023. pp. 189–191. (In Russ.)] <https://elibrary.ru/OMYNUX>
11. Фролов Е. И. Упаковочные материалы на основе фторполимеров: преимущества и будущее. Современная наука: актуальные вопросы, достижения и инновации. Сборник статей XXXVII Международной научно-практической конференции. Пенза, 2024. С. 9–11. [Frolov EI. Fluoropolymer-based packaging materials: Advantages and prospects. Modern Science: Current Issues, Achievements, and Innovations. Collection of Articles from the 37th International Scientific and Practical Conference. Penza, 2024. pp. 9–11. (In Russ.)] <https://elibrary.ru/QSEYQP>
12. Ухарцева И. Ю., Цветкова Е. А., Гольдаде В. А. Методы изготовления полимерной упаковки для пищевых продуктов (обзор). Пластические массы. 2020. № 7–8. С. 40–48. [Ukhartseva IYu, Tsvetkova EA, Goldade VA. Methods of manufacturing polymeric food packaging (Overview). Plastics. 2020;(7–8):40–48. (In Russ.)] <https://doi.org/10.35164/0554-2901-2020-7-8-40-48>
13. Магаюмова О. Н., Белокурова Г. Б., Минеева Н. С. Технология производства перспективной полимерной упаковки для диоксида циркония длительного хранения. Международный научный сборник. Инновационные технологии производства и хранения материальных ценностей для государственных нужд. 2022. № 17. С. 131–142. [Magayumova ON, Belokurova GB, Mineeva NS. Production technology of promising polymer for long-term storage of zirconium dioxide. International scientific collection. Innovative technologies for the production and storage of material assets for state needs. 2022;(17):131–142. (In Russ.)] <https://elibrary.ru/VEAJLX>
14. Стефанович М. А., Губачев В. А., Толстов А. М. Моделирование экструзионных процессов расплава полимерных композитов. Международный журнал прикладных наук и технологий Integral. 2022. № 2. Номер статьи 2. [Stefanovich MA, Gubachev VA, Tolstov AM. The modelling of extrusion melt processes for polymer composites. International Journal of Applied Science and Technology Integral. 2022;(2):2. (In Russ.)] https://doi.org/10.55186/02357801_2022_7_2_1
15. Шурыгина Н. А., Глазер А. М. Перспективные материалы и технологии. Деформация и разрушение материалов. 2020. № 2. С. 2–15. [Shurygina NA, Glezer AM. Production methods of amorphous-crystalline materials. Deformation and destruction of materials. 2020;(2):2–15. (In Russ.)] <https://doi.org/10.31044/1814-4632-2020-2-2-15>
16. Мисин В. М., Зезин А. А., Климов Д. И., Сыбачин А. В., Ярославов А. А. Биоцидные полимерные рецептуры и покрытия. Высокомолекулярные соединения. Серия Б. 2021. Т. 63. № 5. С. 295–306. [Misin VM, Zezin AA, Klimov DI, Sybachin AV, Yaroslavov AA. Biocidal polymer formulations and coatings. Polymer Science. Series B. 2021;63(5):295–306. (In Russ.)] <https://doi.org/10.31857/S2308113921050077>
17. Афанасьева П. В., Ботвинкова С. А., Мацкiv А. А., Тимчук Е. Г. Методические положения оценки качества пищевых продуктов. Инновационные научные исследования в современном мире. Сборник научных статей по материалам IX Международной научно-практической конференции. Часть 1. Уфа, 2022. С. 74–82. [Afanas'yeva PV, Botvinkova SA, Matskiv AA, Timchuk EG. Methodological guidelines for assessing food quality. innovative scientific research in the modern world. Proceedings of the 9th International Scientific and Practical Conference. Part 1. Ufa, 2022. pp. 74–82. (In Russ.)] <https://elibrary.ru/YTIQKV>
18. Дерябина Е. А., Гладских А. Д. Асептическая упаковка жидких продуктов. Качество продукции, технологий и образования. Материалы XIV Международной научно-практической конференции. Магнитогорск, 2019. С. 203–205. [Deryabina EA, Gladskikh AD. Quality of products, technologies, and education. Proceedings of the 14th International Scientific and Practical Conference. Magnitogorsk, 2019. pp. 203–205. (In Russ.)] <https://elibrary.ru/EFSGJZ>
19. Жаринов А. И. Пищевые добавки и ингредиенты: особенности использования в технологии мясных продуктов. Мясные технологии. 2021. № 6. С. 38–43. [Zharinov AI. Food additives and ingredients: features of use in meat products technology. Meat technology. 2021;(6):38–43. (In Russ.)] <https://doi.org/10.33465/2308-2941-2021-06-38-43>

20. Касымакунова А. М., Омурзак уулу Э., Акай Тегин Р. А. Исследование антимикробных свойств наночастиц в активной упаковке пищевых продуктов. Известия КГТУ. 2023. № 1. С. 666–673. [Kasymakunova AM, Omurzak uulu E, Akai Tegin RA. Study of the antimicrobial properties of nanoparticles in active food packaging. The Herald of KSTU. 2023;(1): 666–673. (In Russ.)] <https://doi.org/10.56634/16948335.2023.1.666-673>
21. Коляда Л. Г., Тарасюк Е. В., Васькина А. К., Эргардт Р. В. Высокобарьерная упаковка для пищевых продуктов. Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. 2019. Т. 10. № 1. С. 143–147. [Kolyada LG, Tarasyuk EV, Vaskina AK, Ergardt RV. High-barrier food packaging. Current problems of modern science, technology and education. 2019; 10(1):143–147. (In Russ.)]
22. Ревуцкая Н. М., Насонова В. В., Левина Л. В. Антимикробная упаковка – способы получения и эффективность применения в мясной промышленности. Всё о мясе. 2020. № 2. С. 30–34. [Revutskaya NM, Nasonova VV, Levina EV. Antimicrobial packaging – methods to obtain and effectiveness of application in the meat industry. Vsyo o myase. 2020;(2):30–34. (In Russ.)] <https://doi.org/10.21323/2071-2499-2020-2-30-34>
23. Кирш И. А., Тверитникова И. С., Безнаева О. В., Банникова О. А., Кондратова Т. А. и др. Исследование влияния ультразвуковой обработки полиэтиленовых композиций, содержащих бетулин, на формирование эксплуатационных свойств упаковочных материалов. Health, Food & Biotechnology. 2020. Т. 2. № 4. С. 28–40. [Kirsh IA, Tveritnikova IS, Beznaeva OV, Bannikova OA, Kondratova TA, et al. Study of the influence of ultrasonic processing of polyethylene compositions containing betulin on the formation of operational properties of packaging materials. Health, Food & Biotechnology. 2020;2(4):28–40. (In Russ.)] <https://doi.org/10.36107/hfb.2020.i4.s73>
24. Tveritnikova IS, Kirsh IA, Beznaeva OV. Modification of ultrasonic machining of polyolefinic, starch-containing composite materials in the process of extrusion. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2022;1052(1):012133. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1052/1/012133>
25. Shlush E, Davidovich-Pinhas M. Bioplastics for food packaging. Trends in Food Science & Technology. 2022;125: 66–80. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2022.04.026>
26. Klaiber M, Moreno-Gordaliza E, Gómez-Gómez MM, Marazuela MD. Human intake assessment of triclosan associated with the daily use of polypropylene-made antimicrobial food packaging. Food Chemistry. 2024;451:139475. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.139475>

Дополнительная информация об авторах / Additional information about the authors

Васильев Илья Юрьевич / Ilya Yu. Vasilyev ORCID 0000-0001-8488-5907; eLIBRARY SPIN 2038-4156
Род Виктор Андреевич / Viktor A. Rod ORCID 0009-0008-8333-4749; eLIBRARY SPIN 5509-7202
Савельева Ольга Александровна / Olga A. Saveleva ORCID 0009-0004-5645-6637; eLIBRARY SPIN 7954-9281