

Оригинальная статья / Original article

УДК 678:677.494.674+628.4.038

<https://doi.org/10.21869/2223-1528-2026-16-1-158-174>

Оценка возможности использования микросфер Exrapcel в производстве полиэфирных материалов

Н. В. Кувардин¹, С. Д. Пожидаева^{1✉}, Н. Е. Киреева¹, Е. А. Зюлина¹

¹ Юго-Западный государственный университет
ул. 50 лет Октября, д. 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

✉e-mail: pozhideava_kursk@mail.ru

Резюме

Целью данной работы является изучение практического применения микросфер Exrapcel в сложных полиэфирах. Для облегчения массы полимерных изделий, экономии полимерного материала, а в некоторых случаях для увеличения прочности применяются технологии вспенивания посредством введения специализированных химически активных вспенивателей либо предварительно пористых структурированных материалов.

Методы. В работе используются следующие методы: сканирующая электронная микроскопия, элементный анализ на основе энергодисперсионной спектроскопии, испытания на сжатие.

Результаты. Представлена практическая возможность внедрения микросфер Exrapcel в сложные полиэфирные материалы методом экструзии. Получен термопластичный полимерный материал, содержащий в своем составе микросферы Exrapcel в количестве 1 и 2% соответственно. Изучено распределение микросфер в синтезированном полимерном материале на микроуровне, проведена оценка силовых характеристик модифицированных полимерных материалов и анализ механических свойств полученных полимерных материалов, содержащих микросферы Exrapcel, с механическими характеристиками исходного полимера. С помощью бесконтактной атомно-силовой микроскопии показано присутствие микросфер Exrapcel в полимерном материале, сделаны и представлены микрофотографии термопластэластомера с микросферами Exrapcel и без них.

Заключение. Сравнение механических свойств полученных полимерных материалов, содержащих микросферы Exrapcel, с механическими характеристиками чистого исходного полимера показало, что силовые характеристики модифицированного микросферами Exrapcel термопластэластомера снижаются незначительно, при этом наблюдается снижение остаточной деформации при силовых нагрузках от 3 до 5%, а также снижение массы полимерного материала при изготовлении изделий из него, до 100 г на 1 кг чистого полимера, что позволяет рекомендовать внедрение данного вида микросфер в сложные полиэфирные материалы.

Ключевые слова: термопластичные полиэфирные эластомеры; технологические режимы; микросферы; структура; композиционные материалы.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Для цитирования: Оценка возможности использования микросфер Exrapcel в производстве полиэфирных материалов / Н. В. Кувардин, С. Д. Пожидаева, Н. Е. Киреева, Е. А. Зюлина // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2026. Т. 16, № 1. С. 158–174. <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2026-16-1-158-174>.

Поступила в редакцию 02.02.2026

Подписана в печать 02.03.2026

Опубликована 25.03.2026

The evaluation of the possibility of using Expancel microspheres at the production of polyester materials

Nikolay V. Kuvardin¹, Svetlana D. Pozhidaeva¹✉, Nadezhda E. Kireeva¹, Ekaterina A. Zyulina¹

¹Southwest State University
50 Let Oktyabrya Str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

✉e-mail: wwfilippow@mail.ru

Abstract

The purpose of this work is to study the practical application of Expancel microspheres in complex polyesters. To lighten the weight of polymer products, save polymer material, and in some cases, to increase strength, foaming technologies are used by introducing specialized chemically active foamers or pre-porous structured materials.

Methods. The following methods are used in the work: scanning electron microscopy, element analysis based on energy dispersion spectroscopy, compression testing.

Results. The work presents the practical possibility of introducing Expancel microspheres into complex polyethers by extrusion. A thermoplastic polymer material containing Expancel microspheres in amounts of 1% and 2%, respectively, was obtained. The distribution of microspheres in the synthesized polymer material was studied at the micro-level, and the force characteristics of the modified polymer materials were evaluated, as well as the mechanical properties of the obtained polymer materials containing Expancel microspheres were analyzed in comparison with the mechanical properties of the original polymer. Using non-contact atomic force microscopy, the presence of Expancel microspheres in the polymer material was demonstrated, and micrographs of thermoplastic elastomer with and without Expancel microspheres were taken and presented.

Conclusion. A comparison of the mechanical properties of the obtained polymer materials containing Expancel microspheres with the mechanical characteristics of the pure initial polymer showed that the strength characteristics of the thermoplastic elastomer modified with Expancel microspheres decrease slightly, while the residual deformation decreases by 3 to 5% under force loads, and the mass of the polymer material decreases by up to 100 g per 1 kg of pure polymer when making products from it, which allows us to recommend the use of this type of microsphere in complex polyesters.

Keywords: thermoplastic polyester elastomers; technological modes; microspheres; structure; composite materials.

Conflict of interest: The Authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

For citation: Kuvardin N.V., Pozhidaeva S.D., Kireeva N.E., Zyulina E.A. The evaluation of the possibility of using Expancel microspheres at the production of polyester materials. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*. 2026;16(1):158-174. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2026-16-1-158-174>.

Received 02.02.2025

Accepted 02.03.2025

Published 25.03.2026

Введение

Полимерные композиционные материалы [1] становятся важнейшим типом конструкционных материалов [2]. Резкое увеличение цен на полимерные материалы активизировало производителей продукции на поиски путей снижения затрат

по этой статье. Решение данной проблемы возможно несколькими способами, основные из которых – снижение брака при производстве [3], с одной стороны, и уменьшение количества полимерного материала в загрузке введением добавок – с другой [4]. Наполнители [5], как правило, увеличивают прочностные характеристики

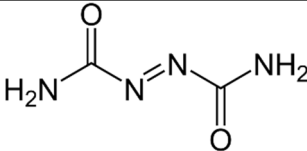
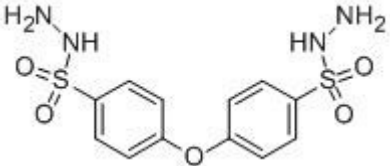
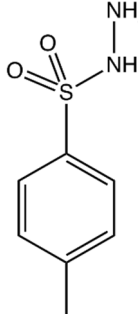
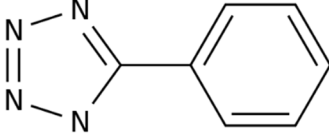
композиционных полимеров [6]. Их введение уменьшает расход полимерного основного компонента [7], который выступает в роли связующего, но эффективность упрочнения полимера зависит от количества [8] и дисперсности частиц наполнителя [9]. Альтернативным способом является формирование микропористой структуры полимера за счёт сферических полостей, заполненных газом, что достигается путем использования методики изготовления пенополимеров [10]. Технология вспенивания [11], помимо снижения массы изделия [12], способствует сокращению количества дефектов. И первое, и второе приводит к оптимизации бюджета и сокращению расходов [13]. Вспененные полимерные материалы можно получать как экструзионным способом, так и при применении литьевых

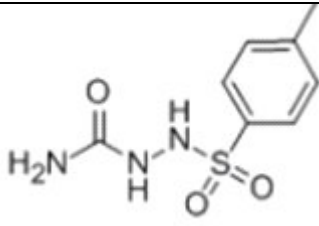
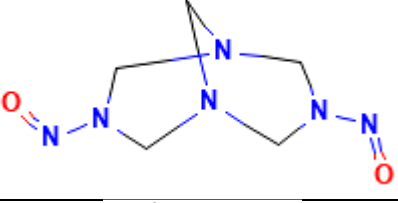
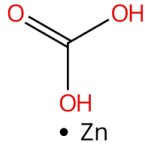
машин. Важным фактором при этом является подбор вспенивающего агента, правильность его применения к тому или иному полимеру, а также свойства полученного модифицированного полимера [14].

Из литературы известно, что вспенивающие агенты – химические соединения, выделяющие газ при нагревании [10]. На данный момент известны следующие материалы (табл. 1) в качестве вспенивателей во всем мире. Азодикарбонамид признан во всем мире лидером среди вспенивателей, его доля составляет приблизительно 85% от всех потребляемых в настоящее время в Западной Европе пенообразователей [14]. При термическом разложении образуются газы, которые попадают в полимер в виде пузырьков, вспенивая его, и образуют вспененный материал [15].

Таблица 1. Основные материалы, используемые в качестве вспенивателей

Table 1. Main materials used as foaming agents

Название	Торговая марка	Формула	Структурная формула	Газ при вспенивании
Азодикарбонамид	(ADC)	$C_2H_4O_2N_4$		N_2 , CO, CO_2 , NH_3
4,4-Окси-бис(бензол-сульфонилгидразид)	(OBSh)	$C_{12}H_{14}N_4O_5S_2$		CO_2
<i>n</i> -Толуол-сульфонил-гидразид	TSH	$H_{10}C_7SO_2N_2$		N_2
5-Фенил-тетразол	(PT)	$C_7H_6N_4$		N_2

Название	Торговая марка	Формула	Структурная формула	Газ при вспенивании
<i>n</i> -Толуол-сульфонил-сесмикарбазид	PTSS	C ₈ H ₁₁ N ₃ O ₃ S		N ₂
Динитрозопен-таметилентет-рамин	DNPT	C ₅ H ₁₀ N ₆ O ₂		N ₂
Натрия бикар-бонат	SBC	NaHCO ₃	Na ⁺ O ⁻ C(=O) OH	CO ₂
Карбонат цинка	-	ZnCO ₃		CO ₂

Микросферы Expancel (рис. 1) – это маленькие сферические частицы из полимерного материала¹. В отличие от других вспенивающих агентов микросферы состоят из капсул с уже заключенным в них газом [16]. Под воздействием тепла газ увеличивается в объеме, что вызывает существенное расширение объёма микросфер [17].

Расширенные микросферы обладают способностью легко деформироваться под давлением, однако сохраняют эластичность и возвращаются к своему первоначальному объёму при снижении нагрузки. За счёт быстрого восстановления формы микросферы способны многократно проходить цикл сжатия и расширения [18],

выдерживая тысячи повторений без разрушения [18]. Это свойство имеет большое значение при применении микросфер в материалах, поглощающих удары, а также при транспортировке их насосами, как самостоятельно, так и в составе различных смесей. Микросферы имеют полимерную оболочку, изготовленную из мономеров с этиленовыми двойными связями, внутри которой заключён пропеллент. Мономеры с этиленовой ненасыщенностью содержат акрилонитрил (40–70 мас. %), метакрилонитрил (5–40 мас. %), мономеры на основе эфиров акриловой кислоты, эфиров метакриловой кислоты и их смесей (10–50 мас. %) [5].

Пропеллент состоит из углеводорода либо смеси углеводородов, температура

¹ Микросферы Expancel // Лега: сайт. URL: <https://lega-nn.ru/products/produkczia-ooo-lega-mikrosferyi-expancel/?ysclid=>

mmkbhd9yg4695694503 (дата обращения: 12.01.2026).

кипения которых не превышает точку размягчения термопластичного полимера оболочки. Состав пропеллента включает минимум одно вещество из следующего списка: метан, этан, пропан, изобутан, *n*-бутан, неопентан. Предпочтительная температура кипения при атмосферном давлении такого пропеллента должна составлять от -20 до 30°C . Тем не менее полимерная оболочка коммерческих микросфер с низким порогом активации зачастую производится из смеси мономеров, включающей галогеносодержащие компоненты, такие как винилиденхлорид. Эти микросферы часто характеризуются высоким содержанием остаточных мономеров [18], склонны к потере цвета и демонстрируют низкую устойчивость к воздействию химических веществ, включая растворители и пластификаторы, применяемые в производстве искусственной кожи и пла-

стизоля [19]. Кроме перечисленных метана, этана, пропана, изобутана, *n*-бутана и неопентана, состав пропеллента может включать дополнительные углеводороды в количестве от 0 до 50% массы пропеллента: *n*-пентан, изопентан, циклопентан, гексан, изогексан, неогексан, циклогексан, гептан, изогептан, октан и изооктан. Кроме насыщенных углеводородов, в состав пропеллента могут входить такие соединения, как петролейный эфир, хлорированные или фторированные углеводороды (например, метилхлорид, метилхлорид, дихлорэтан, дихлорэтилен, трихлорэтан, трихлорэтилен, трихлорфторметан), перфторуглеводороды, фторсодержащие простые эфиры и прочие подобные вещества. Из перечисленных компонентов наиболее часто в качестве пропеллентов используют изобутан в количестве 50–100 мас. % [18] самостоятельно или в смеси с углеводородами.

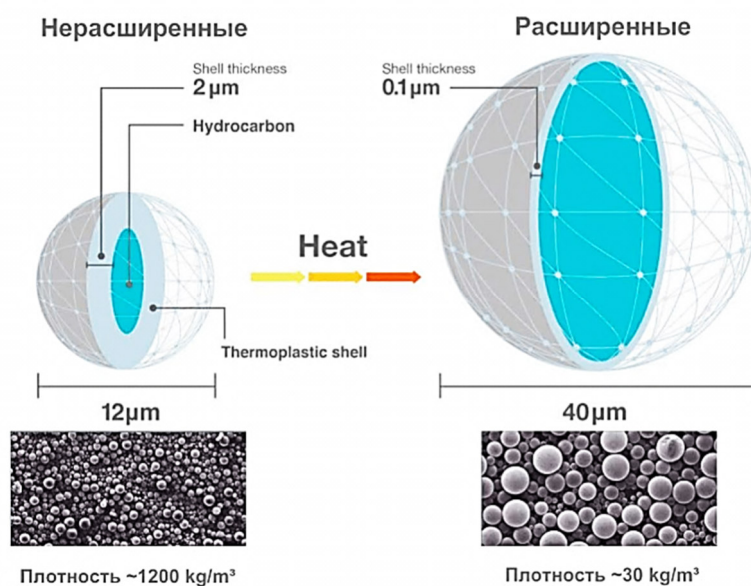


Рис. 1. Принцип работы полимерных микросфер

Fig. 1. Principle of operation of polymer microspheres

В литературе приводятся два основных метода создания газовых сред при изготовлении изделий из вспененных полимеров [15]: непосредственное введение газа в полимерный расплав (так называемый физический способ) и использование

специальных добавок (присадок), разлагающихся с образованием газа, исключая случаи производства пенополиуретанов, где выделение газа происходит вследствие химической реакции компонентов в

процессе формования изделия (химический способ) [16].

Применение вспенивателей позволяет изменить некоторые свойства исходного полимера, при этом получить определенные преимущества, а именно: снижение плотности и массы готовых изделий, облегчающее логистику, эксплуатацию и монтаж; повышение выхода готовой продукции из единицы полимера, что экономически выгодно и благоприятствует охране природы; улучшение эластичности материала [20]; усиление теплоизоляционных свойств [17]; повышение звукозащитных качеств полимера; разнообразие функциональных возможностей и эстетического оформления поверхностей [21]; устранение дефектов усадки изделий; уменьшение стоимости конечного продукта; точное регулирование количества вспенивающего агента в пределах от 0,05 до 20% от общей массы полимера [13].

В зависимости от типа полимерной основы, вспенивающего агента и его количества, введенного в полимер, можно получить следующие виды материалов: сверхлегкие с плотностью 3–50 кг/м³; легкие с плотностью 50–200 кг/м³; средние (плотность 200–500 кг/м³); тяжелые (плотность 500–700 кг/м³) и супертяжелые (плотность более 700 кг/м³) [22].

Химические вспенивающие агенты преимущественно применяются для обработки поливинилхлорида (около половины всего расхода азодикарбонамида), эластомеров и полиолефинов [10]. Сегодня доля вспененных конструкционных термопластичных материалов относительно невелика, однако ученые прогнозируют значительный рост их использования, особенно в сфере переработки отходов конструкционной пластмассы.

Сейчас отмечается тенденция роста использования химических вспенивате-

лей в полистироле [13], позволяющая создавать декоративный эффект, имитирующий структуру дерева. Снижение плотности материала, наряду с улучшением тепло- и звукоизоляционных свойств, делает его незаменимым в качестве строительного материала. Материалы из вспененного полистирола активно применяют при производстве рамок для картин. Листовые вспененные изделия из полистирола востребованы в индустрии пищевых упаковок благодаря возможности их формовки горячим прессованием.

В строительной сфере вспененные материалы получили широкое распространение для решения задач теплоизоляции, шумоизоляции и виброзащиты, а также в качестве сырья для создания конструктивных элементов конструкций [23], позволяющие заменить деревянные аналоги. Применение вспененного материала обеспечивает сохранение жесткости конструкции при аналогичном весе или позволяет достичь снижения плотности в 2–2,5 раза по сравнению с таким же объемом сплошного материала. Так как для указанных изделий решающими факторами выступают не механические характеристики, главным минусом становится лишь сравнительно низкая тепловая стойкость, уступающая показателям древесины.

Теплоизоляция труб за счет использования вспененных поливинилхлорида и полипропилена позволяет снижать вес труб до 30% и обладает рядом преимуществ [21]: не подвержена процессам старения, обеспечивает стабильные теплофизические параметры на протяжении нормативного срока эксплуатации трубопровода (30 лет) и соответствует требованиям экологии [22].

Использование вспенивателей при литье под давлением позволит уменьшить массу готовых изделий за счёт уменьше-

ния плотности материала, благодаря наличию воздушных карманов внутри материала обеспечить улучшенные тепло- и звукоизоляционные свойства и устранять дефекты литья, например, усадочные раковины в толстостенных изделиях [24]. Заливка расплава полимерного материала с ячеистой структурой в литейную форму стандартной или облегчённой конструкции создаёт оптимальные условия для качественного заполнения внутренних полостей формы и получения изделий без дефектов. Этот прием используют при изготовлении разделочных досок, основания бытовых щёток и других изделий, не предназначенных к работе под нагрузкой.

Использование химических вспенивающих агентов в ротационном формовании [21] позволяет увеличивать толщину стенок изделия без дополнительного веса, придать изделию термоизоляционные свойства, способность держаться на воде и предотвратить его затопление [22].

Вспенивание в этом случае происходит в несколько этапов. На первом этапе порофор равномерно распределяется в полимерной массе, при нагревании начинается выделение газа. Газовые пузырьки распределяются, придавая объем изделию, который сохраняется при охлаждении или отверждении полимера. Такой способ лежит в производстве из полиэтилена больших контейнеров с повышенной жёсткостью, ударопрочностью и улучшенной теплоизоляцией.

Технология выдувного формования используется в пищевой [18] (изготовление бутылок и упаковки для напитков), фармацевтической (флаконы, контейнеры), автомобильной (топливные баки, технические ёмкости, различного рода канистры) промышленности, производстве игрушек (шарики для сухого бассейна, игрушки, игровые элементы и т. д.). Преимущество использования вспененных материалов заключается в экономии расхода полимера [13].

Получение вспененных термопластичных полиэфирных композиционных материалов добавлением микросфер Expancel с оценкой свойств стало *целью данной работы*.

Материалы и методы

Исследуемый материал представляет собой сополимер диметилтерефталата и тетрагидрофурана с молекулярной массой 1000–2000 и более [25]. Микросферы Expancel в виде мелкодисперсных частиц сферической формы с размерами частиц от 20 до 120 мкм, состоящие из полимерной оболочки с заключённым в неё газом, используют для работы с термопластичным полиэфиром в температурном интервале 190–210⁰С [26]. Многоэтапный процесс модифицирования микросферами показан на рисунке 2.

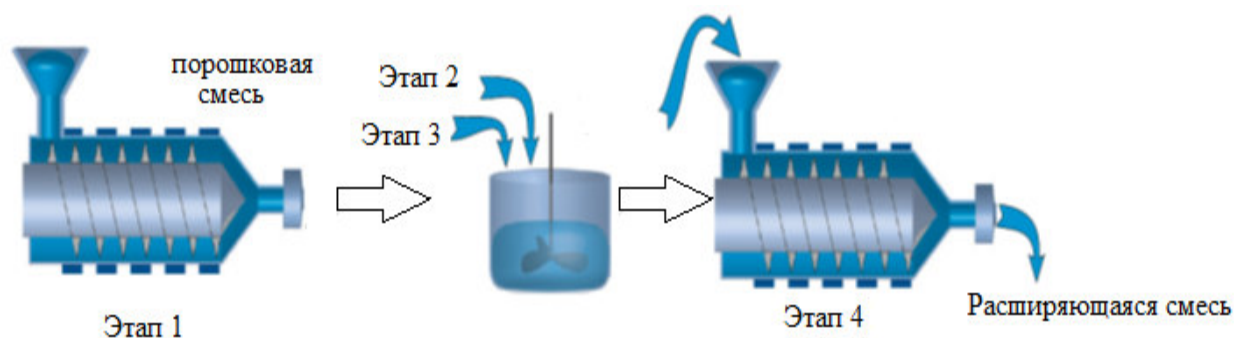


Рис. 2. Схема процесса получения вспененного продукта экструзией

Fig. 2. Process diagram for producing foamed product by extrusion

Данный метод рекомендуется при отсутствии возможности добавлять микросферы в конце экструзионного процесса. Процесс осуществляется следующим образом: сначала готовят порошковую смесь, затем добавляют в неё 0,5–1,0% масла и вводят компонент, содержащий микросферы Extrancel¹. Завершающим этапом является подача смеси через экструдер с минимальной деформацией. Важно поддерживать температуру ниже 100–150°C², чтобы избежать преждевременного расширения микросфер.

Вспенивание проводится на конвекционной машине, при необходимости получения продукта более высокого качества возможно использование специально модифицированных машин. Вспенивание проводится при закрытом клапане, расположенном на выходе, он регулирует давление, предотвращает изменение веса продукта и закупорку выходного отверстия. Давление во время производства должно быть высоким для обеспечения максимальной скорости впрыска. Скорость вращения шнека 20–50 об/мин. Температура в задней зоне достаточно низкая для предотвращения преждевременного разложения пенообразователя и выхода газа через воронку бункера. Продолжительность цикла определяется типом полимера и толщиной изделия. Следует учитывать, что газ, выделяющийся при разложении пенообразователя, может повлиять на процесс заполнения, поэтому для полного заполнения формы необходима вентиляция. Вспенивание в сочетании с азотом облегчает плавление пластика, приво-

дит к более однородной ячеистой структуре и иногда сокращает продолжительность цикла.

При приготовлении и использовании смеси, содержащей микросферы, необходимо соблюдать указанную температуру использования микросфер, чтобы не повредить их на этапе сушки материала. Расширение должно происходить во время окончательного формования продукта, а не во время приготовления смеси.

Для исследования были подготовлены три типа экструдированных образцов полиэфирного эластомера:

- 1) чистый полимер;
- 2) модифицированный состав, содержащий 1% микросфер Extrancel;
- 3) модифицированный состав, содержащий 2% микросфер Extrancel.

Испытание полимеров на сжатие проводили в соответствии с межгосударственным стандартом ГОСТ 4651-2014 (ISO 604:2002). Образцы представляли собой цилиндры диаметром и высотой по 100 мм. Экспериментальное сжатие проводилось до достижения 80%-ной деформации. Эта величина является оптимальной для анализа, т. к. превышение данного порога приводит к экспоненциальному росту сопротивления материала без существенного изменения его размеров.

Силовые характеристики снимались на универсальном испытательном стенде Shimadzu (рис. 3). Для получения достоверных данных полимерные образцы необходимо термостатировать в течение 24 часов при температуре 22°C в климатической камере КТХ-74-75/180.

¹ Устройство и способ для расширения термически расширяемых термопластических микросфер до расширенных термопластических микросфер : патент 2696709 Российская Федерация / Нордин Я., Сведберг Л. О., Айден П., Онг Ф. Ш. № 2017123042; заявл.

08.12.2015; опубл. 05.08.2019, Бюл. № 22. 20 с. : ил.

² Микросферы : патент 2432201 Российская Федерация / Нордин О., Стрем Х., Ньюхольм К., Хаммер К. № 2008136397/05 ; заявл. 12.01.2007; опубл. 27.10.2011, Бюл. № 30. 18 с.



Рис. 3. Универсальный испытательный стенд Shimadzu (температура испытаний 22°C)

Fig. 3. Shimadzu Universal Test Stand (test temperature 22°C)

Для проведения исследований образец материала отбирается и взвешивается в пропорциях, соответствующих массовой доле термопластичного эластомера (соответственно 1 и 2%). Затем подготовленная смесь направляется в смесительное устройство, где перемешивается до достижения однородности состава. Полимерную смесь подвергают сушке в специальной камере при температуре не выше 120°C, чтобы исключить нежелательное вскрытие микросфер. Далее высушенная масса дозированно загружается в компаундер посредством специального дозирующего устройства марки Brabender.

Получение вспененного продукта производится на двухшнековом компаундере с соотношением длины шнеков к их диаметру не превышающем 32, без использования насоса для подачи расплава, с применением малосдвиговых шнеков и высокоэффективных смесительных головок.

Определение плотности полимеров проводили в соответствии с ГОСТ 15139-69 «Пластмассы. Методы определения плотности (объемной массы)».

Результаты и их обсуждение

Эффективность процесса вспенивания сложных полиэфиров методом экструзии во многом определяется корректным подбором расширяющихся микросфер. Конечная плотность композита является производной от концентрации микросфер Exhancel, типа полимерной матрицы и параметров перерабатывающего оборудования [17]. Установлено, что в процессе экструзии микросферы способны обеспечивать снижение плотности до значений 15–25 кг/м³. Для процессов литья под давлением оптимальным является использование микросфер с плотностью 30–70 кг/м³, в то время как при раздувном формовании степень расширения лимитируется давлением раздува в пресс-форме.

Применение Expancel для модификации сложных полиэфиров технически обосновано при условии соблюдения температурного диапазона переработки от 140°C до 230°C и соответствующих реологических характеристик расплава. Материалы с более высоким индексом теку-

чести расплава демонстрируют более интенсивное расширение вспенивающего агента.

Зависимость плотности конечного продукта от массовой доли и характеристик микросфер представлена на графике (рис. 4).

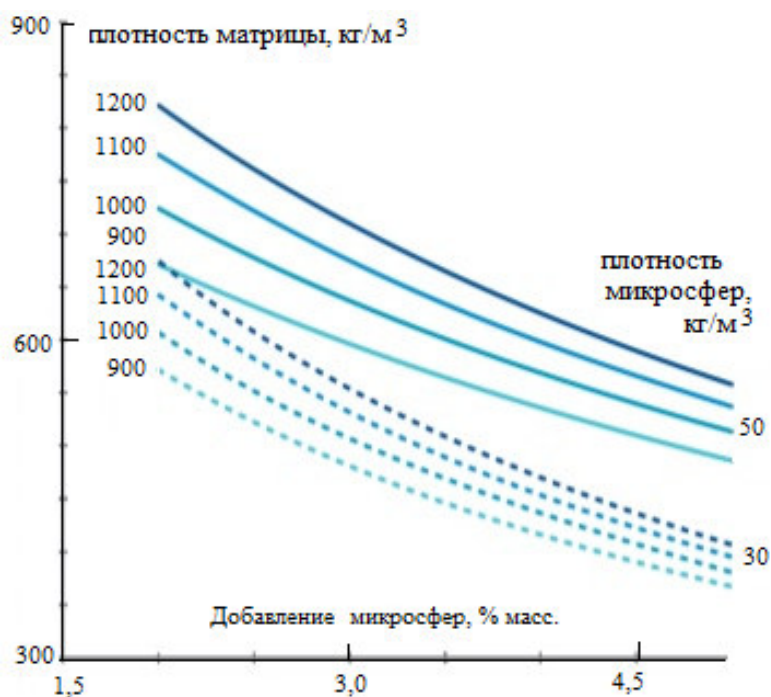


Рис. 4. Зависимость плотности продукта от количества и плотности микросфер (рассчитана окончательная плотность термопласта с различными уровнями добавления микросфер Expancel)

Fig. 4. Dependence of the product density on the quantity and density of the microspheres (the final density of the thermoplastic with different levels of Expancel microspheres added is calculated)

В процессе изготовления композиционного материала с использованием микросфер установлено, что применение вакуумной дегазации на этапе его обработки для удаления газовых компонентов (остаточной влаги, летучих мономеров, воздуха, захваченного при загрузке сырья, растворителей, продуктов разложения) из полимерного расплава, для избежания пустот и пузырьков в готовых изделиях, снижающих механическую прочность и ухудшающих внешний вид изделий, нежелательно. В случае использования вакуумной установки эффект наличия микросфер

не был установлен (рис. 5, а). Полимерные образцы не имели матовой поверхности, при микрокопировании не наблюдалась структура, соответствующая присутствию микросфер, не наблюдалось уменьшение массы полимерных образцов.

В случае отсутствия вакуумной зоны мы наблюдаем присутствие микросфер (рис. 5, б). Следовательно, применение вакуумных установок приводит к разрушению микросфер и вытяжке газа из расплава полимера, что подтверждает рекомендации производителя.

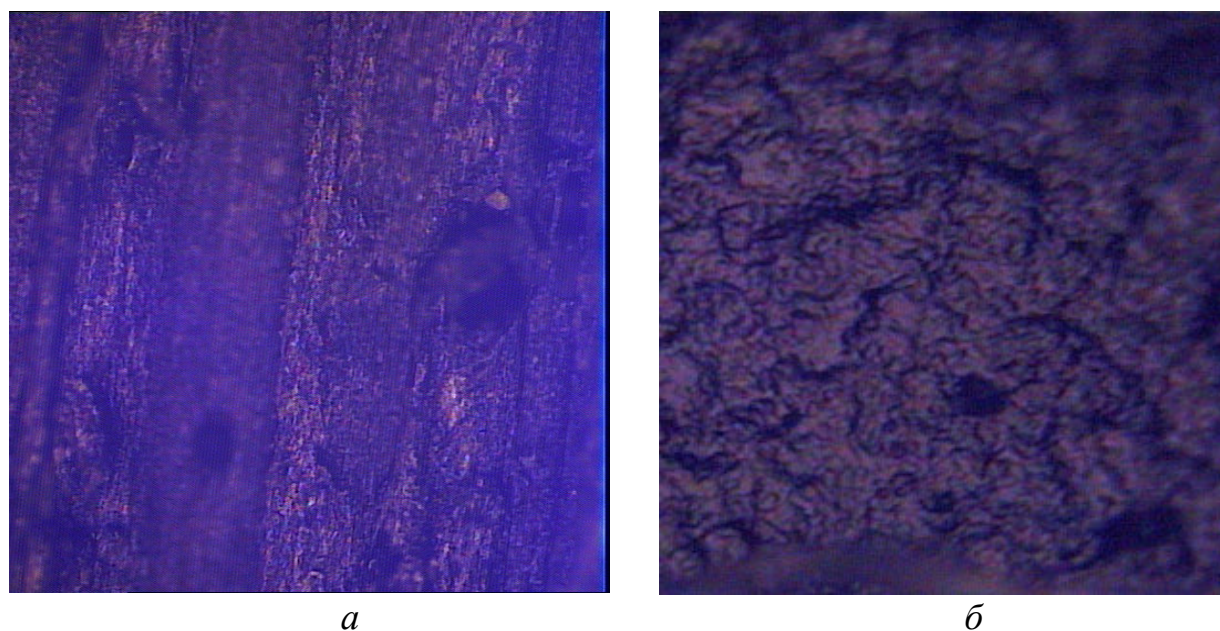


Рис. 5. Структура поверхности полимерных образцов, полученных с использованием вакуумной установки (а) и без нее (б); фотография поверхности получена при увеличении в 505 раз

Fig. 5. Surface structure of polymer samples obtained using a vacuum system (a) and without it (b); the surface photo was taken at a magnification of 505 times

Исследование проводили на трех образцах, полученных методом экструзии: чистом полиэфирном эластомере (ТРЕ-Е) и полиэфирном материале с добавлением микросфер Expancel 1 и 2 мас. % соответственно. Вышеуказанные материалы представляли собой цилиндры диаметром

100 мм и высотой 100 мм (рис. 6). Материалы с разным количеством микросфер Expancel были исследованы на оборудовании Shimadzu с целью измерения механических показателей (сопротивление сжатию и оценка прочности) (рис. 7).



Рис. 6. Внешний вид гранул эластомерного полиэфирного материала а (ТРЕ-Е), содержащего микросферы Expancel в количестве 1 мас. %

Fig. 6. Appearance of elastomeric polyester material (TPE-E) granules containing Expancel microspheres at a concentration of 1% by weight

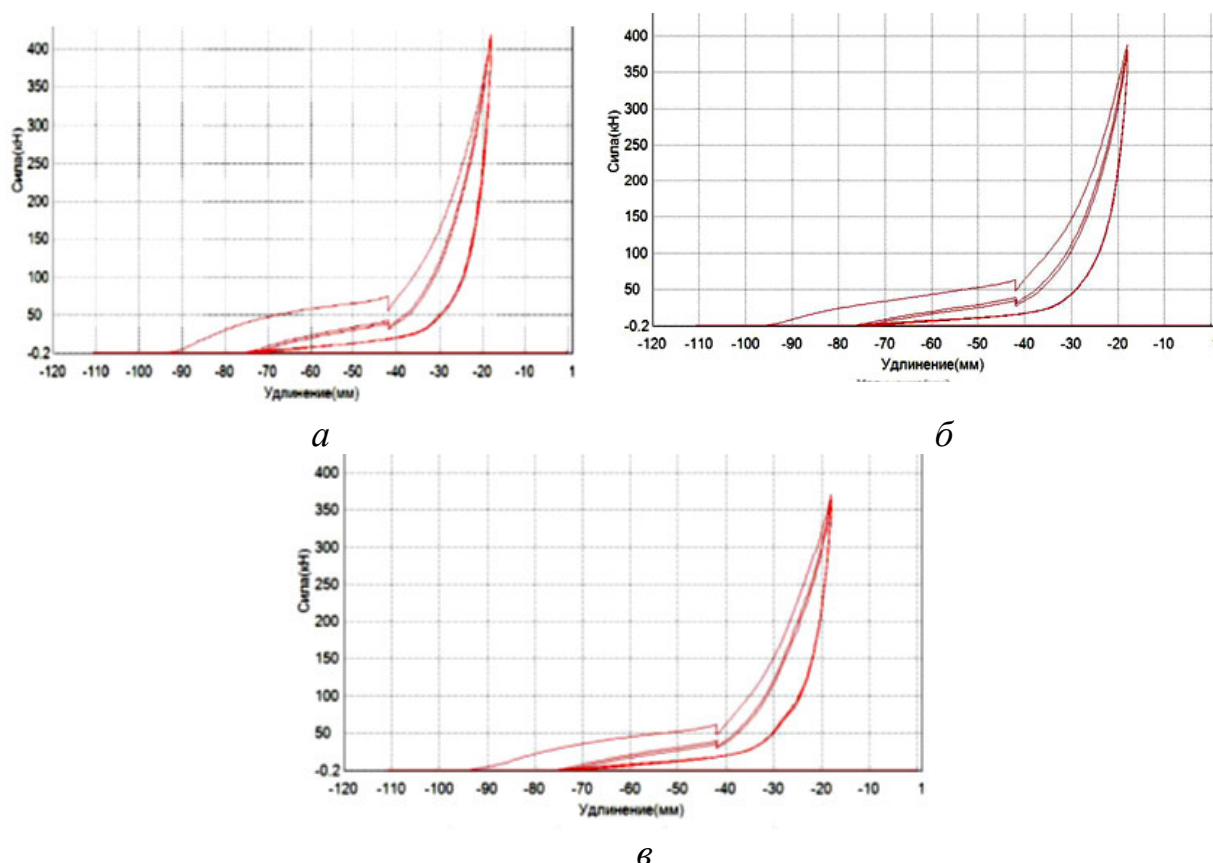


Рис. 7. Диаграммы сжатия эластомерного материала: а – без наполнителя; б-в – с наполнителем в количестве 1 и 2 мас. %

Fig. 7. Compression diagrams of an elastomeric material: а – without filler; б-в – with a filler content of 1 and 2% by weight

Анализ графиков показывает, что при введении 1% вспенивателя усилие сжатия снижается на 7,64%, тогда как при увеличении концентрации вспенивателя до 2% падение усилия достигает 11,9%. Таким образом, появление пористой структуры уменьшает сопротивление материала сжатию, хотя этот эффект выражен умеренно и существенно не ухудшает механические свойства.

Также важно подчеркнуть сокращение остаточной деформации материала. Например, у чистого эластомера остаточная высота образца составляла 90 мм, что соответствовало деформации в 10%. В образцах с добавлением 1 и 2% микросфер остаточные деформации составили соот-

ветственно 5 и 3%, что эквивалентно высоте образцов 95 и 97 мм. Это обстоятельство позитивно сказывается на характеристиках материала, поскольку предотвращает преждевременное проседание под высокими механическими нагрузками, повышая долговечность эксплуатации.

Весовые замеры полученных образцов показали уменьшение их массы: образец с содержанием 1% микросфер стал легче на 50 г на каждый килограмм, а при добавлении 2% микросфер масса снизилась на 100 г на килограмм. Эта особенность положительно отражается на экономическом аспекте, т. к. снижает расход материала и сокращает затраты на продукцию. Экологический аспект также выигрывает, ведь использование микросфер

позволяет сократить объемы производства и потребления полимеров.

Исходя из представленных результатов (табл. 2), очевидно, что включение микросфер в эластомерные композиции весьма целесообразно. Применяемый эластомер обладает уникальными характерис-

тиками: растягивается более чем на 600%, отличается повышенной устойчивостью к механическим ударам и статическим нагрузкам, что обуславливает его активное использование в промышленности, особенно там, где требуется эффективное поглощение энергии.

Таблица 2. Сравнительные характеристики полимерных образцов

Table 2. Comparative characteristics of polymer samples

Образец	Сила сжатия, кН	Снижение силы сжатия, %	Остаточная деформация при сжатии, %	Масса образца, г
Без добавки	419	-	10	1000
Добавка микросфер	387	7,64	5	950
Добавка микросфер	369	11,9	3	900

Однако на данный момент существует ряд вопросов, интересных для изучения, среди которых химическая устойчивость по отношению к агрессивным средам, устойчивость к излучениям, устойчивость к повышенным и пониженным температурам, влагопоглощение, устойчивость к циклическим и ударным нагрузкам и т. д.

Выводы

В ходе работы установлено, что добавление микросфер Expancel в полимерную матрицу термопластичного полимерного материала возможно. Введение пенообразователя в количестве 1 и 2 мас. % путем экструзии с использованием одношнекового экструдера позволило получить полимер с микроячеистой структурой. В статье представлен механизм работы пенообразователя, а также технология введения микросфер в полимерную матрицу.

Сравнение механических свойств полученных композиционных материалов, содержащих расширяющиеся микросферы, с механическими свойствами исходного полимера показало, что прочностные характеристики термопластичного эластомера существенно не снижаются при добавлении микросфер Expancel, возможно снижение остаточной деформации при силовых нагрузках с 3 до 5%, а также уменьшение массы полимерного материала при изготовлении изделий из него вплоть до 100 г на 1 кг чистого полимера.

Одновременно установлено, что использование вакуумной дегазации для удаления нежелательных газовых компонентов на стадии изготовления композиционного материала невозможно, поскольку её применение приводит к разрушению микросфер и удалению газа из полимерного материала.

Список литературы

1. Qiu G., Ma W. Low dielectric and thermal properties of polyimides based on PMDA, BPADA, TPE-Q and TPE-R // Journal of Macromolecular Science. Part A: Pure and Applied Chemistry. 2023. Vol. 60, no. 4. P. 297-305. <https://doi.org/10.1080/10601325.2022.2138763>.
2. Can tetraphenylethane (TPE) "iniferter" groups be introduced into polymer chains by coupling TPE diol with diisocyanates? / M. Grabowski, B. Kost, B. Gostyński, M. Bednarek // Polymer. 2022. Vol. 246. P. 124738. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2022.124738>.

3. Лукичева К. С., Николаева О. И. Влияние введения вторичного ПЭВД на физико-химические свойства трудногорючего компаунда // Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение. 2024. № 2(78). С. 117-122. <https://doi.org/10.6060/snt.20247802.00017>.
4. Ишин Л. А. Организационно-экономические и технологические проблемы переработки полимерных отходов // Вестник Алтайской академии экономики и права. 2025. № 8-1. С. 63-70. <https://doi.org/10.17513/vaael.4273>.
5. Shalomova E. V., Kuznetsova D. I. Composite materials based on thermoplastic binders // Global Scientific Potential. 2025. vol. 10, no. 175. P. 396-399.
6. Composite building materials based on recycled thermoplastic polymers / Yu. E. Jakubovski, E. G. Dubrovsky, L. B. Khairullina, S. V. Aleksandrov // Construction of Unique Buildings and Structures. 2024. Vol. 4, no. 113. P. 11311. <https://doi.org/10.4123/CUBS.113.11>.
7. Вихарева И. Н. Формирование полимерных материалов повышенной термостабильности // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Химия. 2024. Т. 16, № 2. С. 136-147. <https://doi.org/10.14529/chem240216>.
8. Инновационные подходы к использованию экологически безопасных полимерных связующих в производстве теплоизоляционных материалов на основе растительного сырья / М. Содомон, И. В. Степина, А. Е. Воронина, С. Р. Рагимова // Инженерный вестник Дона. 2024. № 12(120). С. 1-22.
9. Чимчикова М. К., Иманкулова А. С. К вопросу применения полимерных композиционных материалов // Материаловедение. 2022. № 1(36). С. 43-47.
10. Колосова А. С., Пикалов Е. С. Современные газонаполненные полимерные материалы и изделия // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2020. № 10. С. 54-67.
11. Структура и теплофизические характеристики газонаполненных полимеров / Б. А. Ефимов, А. Ю. Ушаков, А. М. Тякина, А. М. Минаева // Строительные материалы. 2022. № 11. С. 81-85. <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-808-11-81-85>.
12. Усталостная прочность вспененных полимеров / Е. Ю. Боброва, И. И. Попов, А. Д. Жуков, М. И. Ганжунцев // Научный журнал строительства и архитектуры. 2022. № 4(68). С. 61-71. <https://doi.org/10.36622/VSTU.2022.68.4.006>.
13. Коваленко А. Н. Полимерные добавки для снижения себестоимости готовых изделий // Твердые бытовые отходы. 2025. № 3(225). С. 44-48.
14. Лукичева Н. С. О некоторых перспективных направлениях научных исследований // Композитный мир. 2024. № 1(106). С. 14-15.
15. Анализ макрокинетики вспенивания эластомерных материалов / П. Д. Феклисов, А. В. Шуваева, Е. А. Крупкин, Ю. А. Наумова, А. В. Марков // Известия Кабардино-Балкарского государственного университета. 2022. Т. 12, № 5. С. 84-89.
16. Fabrication of SERS-active structures via electrostatic deposition of colloidal gold nanoparticles on polymer microspheres / M. A. Miropoltsev, A. P. Tkach, K. A. Maleeva, K. V. Bogdanov // St. Petersburg Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics. 2022. Vol. 15, no. 3.3. P. 182-187. <https://doi.org/10.18721/JPM.153.335>.
17. Исследование влияния полимерных микросфер на эффективность эластомерных огне- и теплозащитных покрытий / М. Х. Ву, А. Н. Гайдадин, В. Ф. Каблов, Д. А. Нилидин, Н. В. Сидоренко, Тхань Тыу Лыонг // Каучук и резина. 2024. Т. 83, № 6. С. 334-339. <https://doi.org/10.47664/0022-9466-2024-83-6-334-339>.
18. Старшова Я. В., Панфилов Д. А. Применение микросфер для регулирования свойств полимерных композиционных материалов // Пластические массы. 2023. № 5-6. С. 37-40. <https://doi.org/10.35164/0554-2901-2023-5-6-37-40>.
19. Медведева Д. А., Полетаева А. Н. Влияние содержания полимерных микросфер на вязкость и жизнеспособность пластизолой поливинилхлорида // Физика волокнистых материалов: структура, свойства, наукоемкие технологии и материалы (SMARTEX). 2024. № 1. С. 230-234.

20. Динамика микросферы с двухслойной оболочкой в полимерном связующем при действии ударной волны / М. Б. Марков, Д. Н. Садовничий, О. Г. Ольховская, Д. С. Бойков, В. А. Гасилов, С. В. Поляков // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2025. № 26. С. 1-19. EDN: SGKMAV
21. Яковлева Л. М. Вспененные полимерные материалы: структура, свойства и применение в спортивной обуви // Вестник молодых ученых Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. 2021. № 1. С. 85-93.
22. Бойцов Е. П., Благинин С. И., Синьков А. В. Импортозамещение функциональных изделий с применением гибридных технологий // Известия Кабардино-Балкарского государственного университета. 2023. Т. 13, № 4. С. 93-95.
23. Поливинилхлоридные строительные материалы и изделия / А. Н. Ахсянов, И. И. Гатаулина, Д. А. Габбасов, К. И. Закирова, А. Г. Хантимиров, К. Р. Хузиахметова // Полимеры в строительстве. 2021. № 1(9). С. 10-66. EDN KACEIQ.
24. Ниматулаев Н. С., Садрединов С. Н., Аметов И. Э. Параметры процесса литья некоторых полимеров под давлением // Bonum Initium. 2025. № 21(29). С. 123-128.
25. Задубровская Т. А., Кувардин Н. В., Пожидаева С. Д. Оценка влияния времени теплового воздействия на отдельных технологических стадиях переработки на свойства сополимера диметилтерефталата и тетрагидрофурана и изделий из него // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2025. Т. 15, № 3. С. 195-212. <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2025-15-3-195-212>.
26. Оценка технологических свойств полимерной пыли ТПЭЭ на этапе подготовки отходов к переработке / С. Д. Пожидаева, В. М. Вишняков, А. Д. Лебедева, Н. В. Кувардин, А. М. Чернов // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2025. Т. 15, № 1. С. 194-209. <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2025-15-1-194-209>.

Reference

1. Qiu G., W. Ma Low dielectric and thermal properties of polyimides based on PMDA, BPADA, TPE-Q and TPE-R. *Journal of Macromolecular Science. Part A: Pure and Applied Chemistry*. 2023;60(4):297-305. <https://doi.org/10.1080/10601325.2022.2138763>.
2. Grabowski M., Kost B., Gostyński B., Bednarek M. Can tetraphenylethane (TPE) “iniferter” groups be introduced into polymer chains by coupling TPE diol with diisocyanates? *Polymer*. 2022;246:124738. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2022.124738>.
3. Lukicheva K.S., Nikolaeva O.I. The effect of the introduction of secondary HDPE on the physico-chemical properties of a difficult-to-burn compound. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii. Regional'noe prilozhenie = Modern High technologies. Regional Application*. 2024;2(78):117-122. (In Russ.) <https://doi.org/10.6060/snt.20247802.00017>.
4. Ishin L.A. Organizational, economic and technological problems of polymer waste processing. *Vestnik Altaiskoi akademii ekonomiki i prava = Bulletin of the Altai Academy of Economics and Law*. 2025;(8-1):63-70. (In Russ.) <https://doi.org/10.17513/vaael.4273>.
5. Shalomova E.V., Kuznetsova D.I. Composite materials based on thermoplastic binders. *Global Scientific Potential*. 2025;10(175):396-399.
6. Jakubovski Yu.E., Dubrovsky E.G., Khairullina L.B., Aleksandrov S.V. Composite building materials based on recycled thermoplastic polymers. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2024;4(113):11311. <https://doi.org/10.4123/CUBS.113.11>.
7. Vikhareva I.N. Formation of polymer materials with increased thermal stability. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Khimiya = Bulletin of the South Ural State University. Series: Chemistry*. 2024;16(2):136-147. (In Russ.) <https://doi.org/10.14529/chem240216>.
8. Sodomon M., Stepina I.V., Voronina A.E., Ragimova S.R. Innovative approaches to the use of environmentally friendly polymer binders in the production of thermal insulation materials based on vegetable raw materials. *Inzhenernyi vestnik Dona = Engineering Bulletin of Don*. 2024;(12):1-22. (In Russ.)

9. Chimchikova M.K., Imankulova A.S. On the issue of application of polymer composite materials. *Materialovedenie = Materials Science*. 2022;(1):43-47. (In Russ.)
10. Kolosova A.S., Pikalov E.S. Modern gas-filled polymer materials and products. *Mezhdunarodnyi zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy = International Journal of Applied and Fundamental Research*. 2020;(10):54-67. (In Russ.)
11. Efimov B.A., Ushakov A.Yu., Tyakina A.M., Minaeva A.M. Structure and thermophysical characteristics of gas-filled polymers. *Stroitel'nye materialy = Building Materials*. 2022;(11):81-85. (In Russ.) <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-808-11-81-85>.
12. Bobrova E.Yu., Popov I.I., Zhukov A.D., Ganzhuntsev M.I. Fatigue strength of foamed polymers. *Nauchnyi zhurnal stroitel'sta i arkhitektury = Russian Journal of Bulding Construction and Architecture*. 2022;(4):61-71. (In Russ.) <https://doi.org/10.36622/VSTU.2022.68.4.006>.
13. Kovalenko A.N. Polymer additives to reduce the cost of finished products. *Tverdye bytovye ot-khody = Solid household waste*. 2025;(3):44-48. (In Russ.)
14. Lukicheva N.S. About some promising areas of scientific research. *Kompozitnyi mir = Composite world*. 2024;(1):14-15. (In Russ.)
15. Feklisov P.D., Shuvaeva A.V., Krupkin E.A., Naumova Yu.A., Markov A.V. Analysis of the macrokinetics of foaming of elastomeric materials. *Izvestiya Kabardino-Balkarskogo gosudarstvennogo universiteta = Izvestiya Kabardino-Balkaria State University*. 2022;12(5):84-89. (In Russ.)
16. Miropoltsev M.A., Tkach A.P., Maleeva K.A., Bogdanov K.V. Fabrication of SERS-active structures via electrostatic deposition of colloidal gold nanopar-ticles on polymer microspheres. *St. Petersburg Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics*. 2022;15(3.3):182-187. <https://doi.org/10.18721/JPM.153.335>.
17. Vu M.Kh., Gaidadin A.N., Kablov V.F., Nilidin D.A., Sidorenko N.V., Tkhan' Tyu Lyong. Investigation of the effect of polymer microspheres on the effectiveness of elastomeric fire and heat protection coatings. *Kauchuk i rezina = Rubber and rubber*. 2024;83(6):334-339. (In Russ.) <https://doi.org/10.47664/0022-9466-2024-83-6-334-339>.
18. Starshova Ya.V., Panfilov D.A. The use of microspheres to regulate the properties of polymer composite materials. *Plasticheskie massy = Plastic masses*. 2023;(5-6):37-40. (In Russ.) <https://doi.org/10.35164/0554-2901-2023-5-6-37-40>.
19. Medvedeva D.A., Poletaeva A.N. The content of polymer microspheres on the viscosity and viability of polyvinyl chloride plastisols. *Fizika voloknistykh materialov: struktura, svoistva, naukoemkie tekhnologii i materialy (SMARTEX) = Physics of fibrous materials: structure, properties, high-tech technologies and materials (SMARTEX)*. 2024;(1):230-234. (In Russ.)
20. Markov M.B., Sadovnichii D.N., Ol'khovskaya O.G., Boikov D.S., Gasilov V.A., Polyakov S.V. Dynamics of a microsphere with a two-layer shell in a polymer binder under the action of a shock wave. *Preprinty IPM im. M.V. Keldysha = Preprints of the Keldysh IPM*. 2025;(26):1-19. (In Russ.) EDN SGKMA B.
21. Yakovleva L.M. Foamed polymer materials: structure, properties and application in sports shoes. *Vestnik molodykh uchenykh Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta tekhnologii i dizaina = Bulletin of Young Scientists of St. Petersburg State University of Technology and Design*. 2021;(1):85-93. (In Russ.)
22. Boitsov E.P., Blaginin S.I., Sin'kov A.V. Import substitution of functional products using hybrid technologies. *Izvestiya Kabardino-Balkarskogo gosudarstvennogo universiteta = Extracts from Kabardino-Balkarian State University*. 2023;13(4):93-95. (In Russ.)
23. Akhsyanov A.N., Gataullina I.I., Gabbasov D.A., Zakirova K.I., Khantimirov A.G., Khuzi-akhmetova K.R. Polyvinyl chloride building materials and products. *Polimery v stroitel'stve = Polymers in construction*. 2021;(1):10-66. (In Russ.) EDN KACEIQ.
24. Nimatulaev N.S., Sadredinov S.N., Ametov I.E. Parameters of the injection molding process of some polymers. *Bonum Initium*. 2025;(21):123-128. (In Russ.)
25. Zadubrovskaya T.A., Kuvardin N.V., Pozhidaeva S.D. Evaluation of the effect of heat exposure time on the properties of dimethyl terephthalate – tetrahydrofuran copolymer and its products at different

processing stages. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii* = *Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*. 2025;15(3):195-212. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2025-15-3-195-212>.

26. Pozhidaeva S. D., Vishnyakov V. M., Lebedeva A. D., Kuvardin N. V., Chernov A. M. Evaluation of the technological properties of polymer TPE dust at the stage of waste preparation for processing. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii* = *Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technology*. 2025;15(1):194-209. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2025-15-1-194-209>.

Информация об авторах / Information about the Authors

Кувардин Николай Владимирович, кандидат химических наук, доцент, заведующий кафедрой фундаментальной химии и химической технологии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: kuvardin.nik@yandex.ru

Nikolay V. Kuvardin, Candidate of Sciences (Chemical), Associate Professor, Head of the Department of Fundamental Chemistry and Chemical Technology, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: kuvardin.nik@yandex.ru

Позидаева Светлана Дмитриевна, кандидат химических наук, доцент кафедры фундаментальной химии и химической технологии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: pozhidaeva_kursk@mail.ru, ORCID: 0000-0002-5690-1102, Researcher ID 411051, SPIN-код: 5601-9449

Svetlana D. Pozhidaeva, Candidate of Sciences (Chemical), Associate Professor of the Department of Fundamental Chemistry and Chemical Technology, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: pozhidaeva_kursk@mail.ru, ORCID: 0000-0002-5690-1102, Researcher ID 411051, SPIN-код: 5601-9449

Киреева Надежда Евгеньевна, аспирант кафедры фундаментальной химии и химической технологии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: kireevanadya1315@yandex.ru

Nadezhda E. Kireeva, Postgraduate Student of the Department of Fundamental Chemistry and Chemical Technology, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: kireevanadya1315@yandex.ru

Зюлина Екатерина Андреевна, студент кафедры фундаментальной химии и химической технологии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: teddycat36196@gmail.com

Ekaterina A. Zyulina, Student of the Department of Fundamental Chemistry and Chemical Technology, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: teddycat36196@gmail.com