

УДК 678; 621.6; 677.494.674+628.4.038

<https://doi.org/10.21869/2223-1528-2025-15-1-194-209>

Оценка технологических свойств полимерной пыли ТПЭЭ на этапе подготовки отходов к переработке

С.Д. Пожидаева^{1✉}, В.М. Вишняков¹, А.Д. Лебедева¹, Н.В. Кувардин¹,
А.М. Чернов¹

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

✉ e-mail: pozhidaeva_kursk@mail.ru

Резюме

Цель. Дробления полимерных отходов в процессе регенерации как основная стадия подготовки материала для дальнейшего использования сопровождается образованием мелких частиц полимерной пыли, которые не способны осаждаться под действием силы тяжести в приёмный бункер, а под действием центробежной силы выносятся из кривой движения газа в направлении стенки корпуса циклона и оседают в сборниках. Это приводит к накоплению значительного количества полимерных материалов, классифицируемых как отходы «Пыль полимерных материалов с фильтров» (код 578 002 00 11 00 4), и предполагает поиск путей дальнейшего использования.

Размер частиц полимерной пыли определяет объёмную плотность, сыпучесть и другие технологические характеристики на этапе подготовки отходов к переработке, а физико-химические свойства влияют на выбор оптимальных технологий, позволяющих эффективно перерабатывать отходы и получать полезные продукты.

Методы. В работе используется аналитический гравиметрический метод в основе измерения влажности, гигроскопичности, влагоёмкости, влагосодержания, физико-химические методы определения гранулометрического состава, температуры плавления, оценки химической стойкости.

Результаты. В работе проведена оценка фундаментальных свойств отходов полимерной пыли ТПЭЭ, изучены технологические свойства этих сыпучих материалов по гранулометрическому составу, величине влажности, сыпучести, удельному объёму, насыпной плотности и рассчитаны характеристики второго порядка (косвенные показатели), такие как угол естественного откоса, коэффициент внутреннего трения. Исследована стойкость отходов к действию растворителей, кислот, щелочей и их смесей.

Заключение. Полученные характеристики предполагается использовать при разработке методов переработки и утилизации отходов полимерной пыли ТПЭЭ.

Ключевые слова: термопластичные полиэфирные эластомеры; полимерная пыль; дисперсный анализ; технологические свойства; анализ.

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

Для цитирования: 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>.

Поступила в редакцию 20.12.2024

Подписана в печать 09.02.2025

Опубликована 20.03.2025

Assessment of the technological properties of polymer dust TPE-E at the stage of waste preparation for processing

Svetlana D. Pozhidaeva^{1✉}, Vadim M. Vishnyakov¹, Anastasia D. Lebedeva¹,
Nikolay V. Kuvardin¹, Artyom M. Chernov¹

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

✉ e-mail: pozhidaeva_kursk@mail.ru

Abstract

Purpose. The process of the crushing of polymer waste during the regeneration process is the main stage of the preparing the material for further use. It is usually accompanied by the formation of small particles of the polymer dust. These particles are unable to deposit into the receiving hopper under the influence of gravity; therefore, they are removed from the gas curve under the influence of centrifugal force. Small particles move towards the cyclone body wall and settle in the collectors.

This leads to the accumulation of a significant amount of polymer materials classified as waste "Dust of polymer materials from filters" (code 578 002 00 11 00 4), and involves the search for ways of further use. The size of polymer dust particles determines the volumetric density, flowability and other technological characteristics at the stage of waste preparation for processing, and the physico-chemical properties affect the selection of optimal technologies that allow efficient recycling of waste and obtaining useful products.

The aim of the work was to analyze the waste of polymer dust of polyesters TPE-E in order to determine a number of technological properties as a potential raw material for creating various functional materials based on it.

Methods. The analytical gravimetric method of the measurement of humidity, hygroscopicity, moisture capacity, moisture content, physico-chemical methods for determining granulometric composition, melting point, and chemical resistance assessment.

Results. The paper evaluates the fundamental properties of TPE-E polymer dust wastes, studies the technological properties of these bulk materials in terms of granulometric composition, humidity, flowability, specific volume, bulk density, and calculates second-order characteristics (indirect indicators), such as the angle of natural slope, coefficient of internal friction. The resistance of waste to solvents, acids, alkalis and their mixtures has been investigated

Conclusion. The obtained characteristics are supposed to be used in the development of methods for processing and recycling of polymer dust TPE-E.

Keywords: thermoplastic polyester elastomers; polymer dust; dispersion analysis; technological properties; analysis.

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

For citation: Pozhidaeva S.D., Vishnyakov V.M., Lebedeva A.D., Kuvardin N.V., Chernov A.M. Assessment of the technological properties of polymer dust TPE-E 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 Technologies*. 2025;15(1):194–209. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2025-15-1-194-209>.

Received 20.12.2024

Accepted 09.02.2025

Published 20.03.2025

Введение

Термоэластопласты (ТЭП) – особые резиноподобные полимеры [1], обладающие одновременно и термопластичными [2], и эластомерными свойствами [3]. Благодаря комплексу свойств, широкому температурному интервалу работоспособности [4], меньшей стоимости, являются перспективным классом полимерных композиционных материалов [5]. Термопластичные полиэфирные эластомеры

(ТПЭЭ) имеют полиблочный вид, представляют собой разновидность блок-линейных сополимеров, состоящих из твердых кристаллических и мягких аморфных сегментов $(PBT\ PTMO)_n$. Первые представлены полибутилентерефталатом, диметилтерефталатом, политерефтаметилентерефталатом, в качестве мягких сегментов обычно используют политетраметиленоксидгликоль (рис. 1) [6].

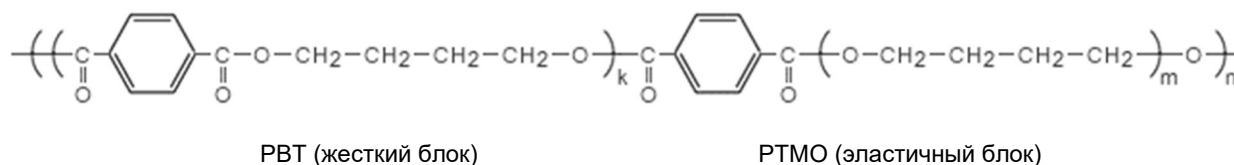


Рис. 1. Структура термоэластопласта

Fig. 1. Thermoplastics structure

Жесткий блок выполняет роль наполнителя [7] и узлов физической сетки [8], которые ассоциируют друг с другом, образуя дисперсные домены размерами 0,01–0,02 мкм, эластичный блок определяет эластичную природу термоэластопласта. Молекулярная масса и соотношение эластичных и жестких блоков влияют на свойства термопластов [7], изменение последнего влияет на модуль упругости [8] и деформационно-прочностные свойства [9].

Промышленное производство ТПЭЭ на основе полибутилентерефталата и политетраметиленоксидгликоля проходит под торговыми марками Arnitel E и Arnitel P (DSM), Hytrel (DuPont), KEYFLEX (LG Chemical), SKYPEL (SK CHEMICALS), Беласт (Могилевхимволокно) и др. Термоэластопласты содержат от 20–80% жестких блоков, определяющих свойства получаемой продукции (табл. 1).

Таблица 1. Характеристики материалов Hytrel при различном содержании жестких блоков

Table 1. Characteristics of Hytrel materials with different contents of rigid blocks

Характеристика материала Material Characteristics	Содержание жестких блоков, % The content of the hard blocks, %		
	33	58	76
Плотность, г/см ³	1,15	1,20	1,22
Температура плавления, °С	163	202	212
Температура стеклования, °С	–78	–50	–2
Прочность при растяжении, МПа	40	45	49
Относительное удлинение, %	810	760	510
Твердость по Шору	A92	D55	D63

Полимерная пыль состоит из частиц полимеров различных размеров и форм, возникает на производстве во время измельчения отходов полимерных материалов на вторичную переработку. Мелкие частицы пыли при дроблении остаются на сборниках циклонов. Пыль образует слой осадка на поверхности, удаляется с неё механическим встряхиванием и накапливается на производстве в значительных количествах.

Различными авторами проводились исследования влияния размеров частиц [10] на технологические свойства полимерных композиций [11]. В этих работах показано влияние степени дисперсности измельченного сырья [12] на характеристики [13] и свойства эластомерных композиций [14].

Использование полимерной пыли ТПЭЭ в качестве добавки к исходному сырью затруднено агломерацией и сгущиванием мелкодисперсных частиц, приводящей к неравномерностям свойств полимерного материала [15], разная степень дисперсности пыли является причиной снижения механических свойств [16] и появления дефектов материала [17]. Частицы полимерной пыли не всегда могут формировать прочную структуру из-за недостаточного сцепления и стабилизации частиц в матрице [18], а большая площадь поверхности и высокая поверхностная энергия частиц приводят к увеличению вязкости и изменению течения материала [19]. Добавление мелкодисперсной пыли к гранулированному материалу приводит к нарушению режима термообработки: малые размеры частицы полимерной пыли обуславливают её преждевременное плавление, переходящее в деструкцию при достижении температуры плавления основной массы гранул перерабатываемого полимера. Кроме того, использование пыли полимерного материала осложняет работу вакуумных погрузчиков. Все эти факторы

отрицательно сказываются на качестве полимерного материала и исключают возможность использования полимерной пыли в качестве добавки к исходному сырью.

С учётом данных проблем существует необходимость поиска процессов переработки мелкодисперсного сырья производства полимера ТПЭЭ с целью сокращения количества отходов.

Технология использования мелкодисперсных полимерных материалов для создания различных функциональных материалов получила широкое признание благодаря своей универсальности, эффективности и возможности использования различных типов полимеров: полимерная пыль может быть добавлена в матрицу композита для улучшения механических свойств, упругости, гибкости, теплостойкости, электрической проводимости и общей производительности материала. Это позволяет создавать композитные изделия с высокой прочностью [20], жесткостью [21] и устойчивостью к различным воздействиям [22].

Интенсивность процесса смешивания и дозирования, качество получаемого продукта существенно зависят от свойств сырья [23], поэтому проектирование процессов технологической переработки полимерной пыли ТПЭЭ необходимо начинать с исследования технологических свойств сыпучих материалов.

Целью работы стало проведение анализа отходов полимерной пыли ТПЭЭ на предмет определения ряда технологических свойств как потенциального сырья для создания различных функциональных материалов на её основе.

Материалы и методы

Гранулометрический анализ и обработка результатов проводятся в соответствии с ТУ 38.32.33-001-44971101-2017 «Гранулы вторичные. Технические условия», согласно которым отбирают (100 ± 1) г

продукта и помещают на верхнее сито с круглыми отверстиями. Просеивают ручным способом при 100–120 движениях в минуту и размахе колебаний сит около 10 см. Время встряхивания 2 мин. Использование тонких сит затрудняет просеивание материала, в этом случае рекомендуется согласно ТУ каждые 5 минут очищать мягкой кисточкой нижнюю поверхность сита, все опадающие частицы присоединять к прошедшим. Операция считается оконченной в том случае, если повторное встряхивание в течение 2 мин сопровождается уменьшением массы остатка на сите не более чем на 0,2%.

Пыль каждой фракции, прошедшую через каждое сито, высыпают в приемник, добавляют застрявшие в ячейках сетки частицы, которые извлекают легким ударом по обечайке сита с обеих сторон мягкой волосяной кисточкой, и взвешивают. Операция считается законченной, если суммарная масса всех фракций составляет не менее 98% от массы взятой навески пыли¹.

Температура плавления определяется в соответствии с ГОСТ 18995.4-73 «Продукты химические органические. Методы определения интервала температуры плавления». Навеска берётся из разных мест общей массы для избежания неоднородности. Полимер измельчается, набивается в капилляр, фиксируется температура плавления.

Влажность твёрдых материалов определяется в соответствии с методикой, описанной в [24].

Для определения влажности (массовой доли воды) используют аналитические весы с точностью до 0,0002 г. Метод термической сушки при атмосферном давлении заключается в том, что навеску

твёрдого вещества помещают в бюкс известной массы. Пыль берут в таком количестве, чтобы высота её слоя не превышала 5–10 мм, и взвешивают.

Бюкс с навеской, не закрывая крышкой, помещают в сушильный шкаф, предварительно нагретый до температуры 105°C, и выдерживают 2–4 часа. По истечении указанного времени бюкс закрывают крышкой, переносят для охлаждения в эксикатор, содержащий CaCl₂, для охлаждения. Остывший бюкс взвешивают.

Операцию повторяют несколько раз, чтобы убедиться в том, что масса бюкса с навеской остается неизменной.

Расчёт влажности в испытуемом образце проводят по формуле

$$w = \frac{(m_0 - m_c)}{m_c} \cdot 100\%,$$

где m_0 – масса пыли до высушивания, г; m_c – масса пробы пыли после высушивания до постоянной массы, г.

Определение гигроскопичности (H , %) заключается в том, что взвешенную навеску полимерной пыли выдерживают в течение 4 ч в эксикаторе с относительной влажностью $(98 \pm 1)\%$. По окончании бюксы с полимерной пылью взвешивают, закрывают крышкой и высушивают до постоянной массы в эксикаторе, заполненном обезвоженным хлоридом кальция.

Расчёт гигроскопичности в испытуемом образце проводят по формуле

$$H = \frac{(m_{\text{вл}} - m_c)}{m_c} \cdot 100\%,$$

где $m_{\text{вл}}$ – масса влажной пробы полимерной пыли, г; m_c – масса пробы полимерной пыли после высушивания до постоянной массы, г.

¹ Ситовый анализ. Часть 1. Методы с использованием контрольных сит из проволоочной ткани и перфорированных металлических листов: СТБ ИСО 2591-1-2000. Введен

01.01.2001; принят в качестве международного стандарта ГОСТ ИСО 2591-1-2002. Минск: Госстандарт: БелГИИС, 2000. 24 с.

Методика определения водопоглощения проводится в соответствии с ГОСТ 4650–2014 «Пластмассы. Методы определения водопоглощения».

Для определения водопоглощения навеску полимерной пыли предварительно высушивают в течение 24 ч при температуре $(50 \pm 3)^\circ\text{C}$ в сушильном шкафу, охлаждают в эксикаторе, заполненном обезвоженным хлоридом кальция и взвешивают с точностью до 0,001 г.

Подготовленные образцы пыли помещают в дистиллированную воду таким образом, чтобы они были полностью погружены в воду, не соприкасались между собой и не касались стенок стакана. В таких условиях выдерживают в дистиллированной воде 24 часа при температуре $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ или же (30 ± 1) мин в кипящей дистиллированной воде при температуре $(100 \pm 2)^\circ\text{C}$.

Продолжительность процедуры не должна превышать 1 мин с момента извлечения до момента взвешивания при выдерживании образца при температуре $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$. При определении водопоглощения при кипячении образец переносят в стакан с холодной дистиллированной водой, охлаждают в течение (15 ± 1) мин. Далее образцы полимерной пыли извлекают из воды, удаляют избыток воды, тщательно промокая фильтровальной бумагой, взвешивают.

Расчёт водопоглощения испытуемого образца проводят по формуле

$$B = \frac{(m_1 - m)}{m} \cdot 100\%,$$

где m – масса высушенной пыли, г;
 m_1 – масса полимерной пыли после выдерживания в дистиллированной воде, г.

Измерение влагоёмкости [25] проводили по известным методикам [26].

Для определения сыпучести полимерной пыли использована методика, представленная в ГОСТ 25139–93 (ИСО 6186–80) «Пластмассы. Метод определения сыпучести».

Насыпная плотность полимерной пыли определяется по методикам, представленным в ГОСТ 11035.1–93 «Пластмассы. Определение насыпной плотности формовочного материала, который не просыпается через специальную воронку».

Для определения стойкости полимерных отходов ТПЭЭ к действию химических сред используются методики ГОСТ 12020-2018 (ISO 175:2010) «Пластмассы. Методы определения стойкости к действию химических сред» по изменению массы, размеров и внешнего вида образцов и по изменению свойств испытательной жидкости.

За окончательный результат каждого испытания принимают среднее арифметическое результатов не менее трёх определений с погрешностью не более 0,01%, округленное до 0,1%.

Результаты и их обсуждение

Согласно определению, к сыпучим материалам относят материалы, состоящие из большого количества твердых частиц [27]. Наличие большого количества частиц придает материалу нетривиальный характер, для учёта которого требуется ряд специфических показателей, используемых для описания и принимаемых в расчёт при проектировании и эксплуатации оборудования.

К таким специфичным характеристикам относят форму частиц и их размер, дисперсный (гранулометрический) состав, угол естественного откоса, коэффициенты внешнего и внутреннего трения, насыпную плотность, сводообразование,

витание, слеживаемость, текучесть. К менее специфичным характеристикам сыпучих материалов относят влажность, гигроскопичность, адгезию. При этом размер и форму частиц относят к первичным или так называемым фундаментальным характеристикам (свойствам) сыпучих материалов [26].

Отходы полимерной пыли ТПЭЭ образуются на стадии дробления полимерных отходов. Благодаря малой насыпной плотности мелкие частицы не способны оседать под действием силы тяжести в приёмный бункер, а под действием центробежной силы выносятся в направлении стенки корпуса циклона и оседают в сборниках, накапливаясь в значительных количествах при производстве термопластов.

Отходы полимерной пыли ТПЭЭ (рис. 2) представляют совокупность большого числа мелких твёрдых частиц с минимальной связью между ними, без образования конгломератов. Полимерная пыль чёрного цвета, непрозрачная, без характерного блеска, с размерами частиц от 0,05 до 5 мм. Частицы пыли неправильной многогранной формы, в большинстве случаев вытянутые, немного заостренные, ширина и длина больше толщины.

Наблюдаются неровные зазубренные, с выступающими фрагментами или с неровными, хаотичными линиями края частиц, образовавшиеся при механическом удалении отходов с поверхности волокнистых фильтров.

Частицы твёрдые, упругие, не ломаются.

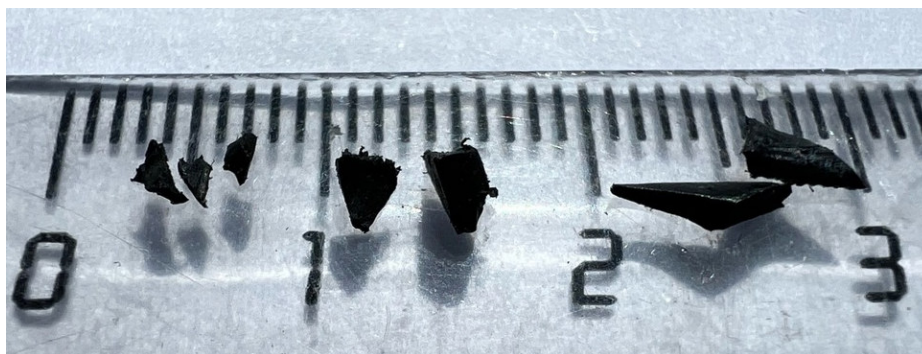


Рис. 2. Внешний вид частиц отходов полимерной пыли ТПЭЭ

Fig. 2. Appearance of waste particles of polymer dust TPE-E

В соответствии с ТУ 2298-014-01877509-00 «Основные показатели качества вторичного полимерного сырья» отходы были проанализированы на отсутствие в них загрязнений (инертных примесей, масел).

Для характеристики технологических свойств полимерной пыли из перечисленных выше показателей проведено определение гранулометрического состава, удельного объема, насыпной плотности, влажности и сыпучести.

По результатам гранулометрического анализа (рис. 3) удалось выявить преобладание в смеси частиц с размерами от 1,25 до 1,75 мм, получить характеристику крупности материала, вогнуто-выпуклый характер кривой по «плюсу» которой говорит о неравномерном распределении частиц: фракции содержат в основном мелкие частицы, но среди них присутствуют и частицы крупного размера. Полулогарифмическая кривая крупности позволяет более точно отсчитывать выход мелких классов и определить средний размер частиц в смеси (1,9 мм).

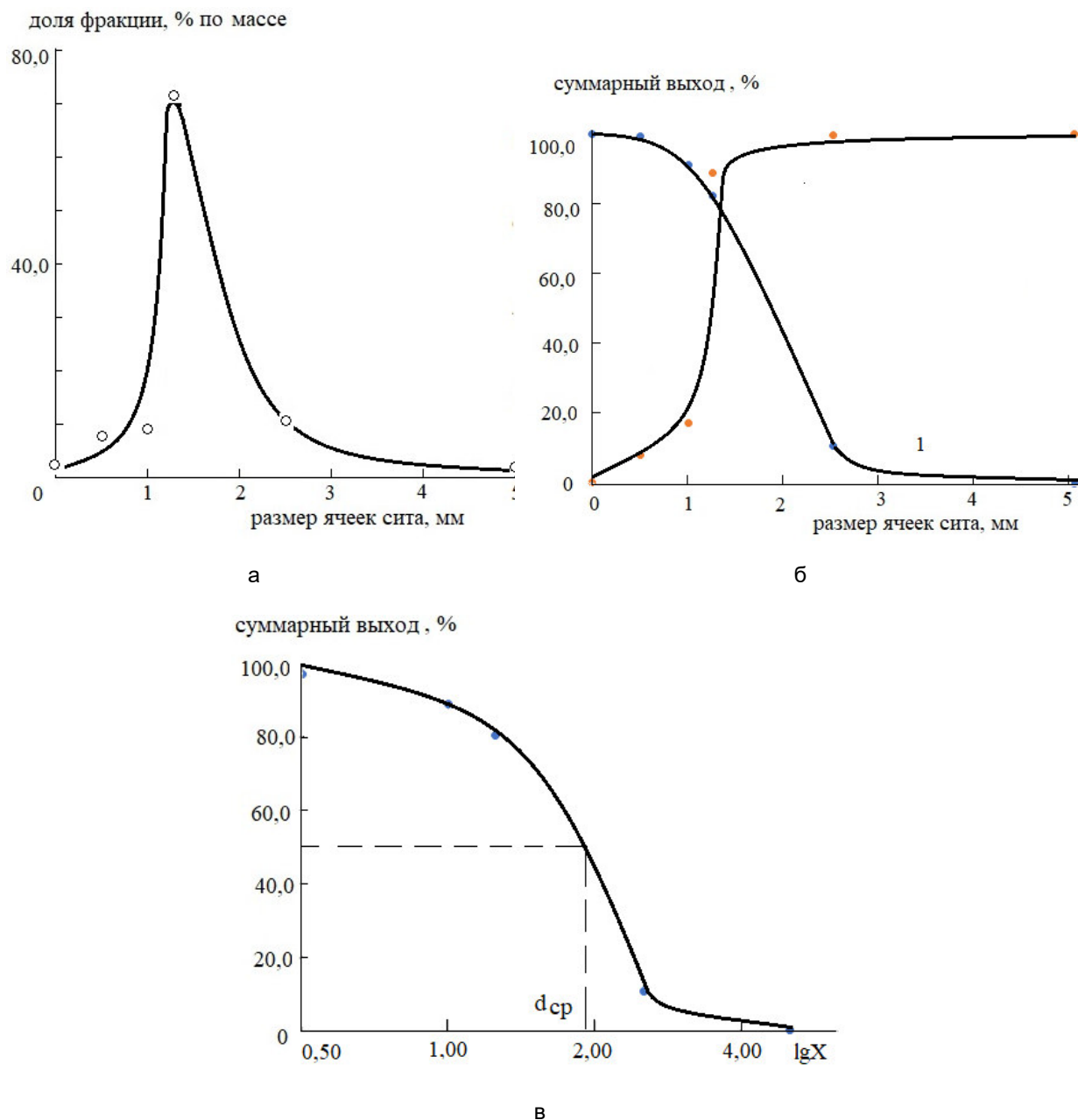


Рис. 3. Графическое изображение гранулометрического состава отходов полимерной пыли ТПЭЭ: а – по выходам отдельных классов (частная характеристика крупности); б – по суммарным выходам классов или суммарные характеристики (крупности: 1 – «по минусу»; 2 – «по плюсу»); в – полулогарифмическая характеристика крупности

Fig. 3. The graphic representation of the granulometric composition of TPE-E polymer dust waste: а – according to the outputs of the individual classes (or the particular characteristic of the size); б – according to the total class outputs or total characteristics (size: 1 – "minus"; 2 – "plus"); в – semi-logarithmic characterization of the size

Для характеристики влияния воды на сыпучий материал используют такие характеристики, как влажность, гигроскопичность, влагоотдача и ряд других. Влага

влияет на коэффициент трения [26], слипание [27], плотность, сыпучесть [28], ухудшая технологические характеристики [29].

Для определения гигроскопических свойств (табл. 2) отходы полимерной крошки разделили на три основные фрак-

ции по размеру: до 1,25 мм, 1,25–2,5 мм, больше 2,5 мм.

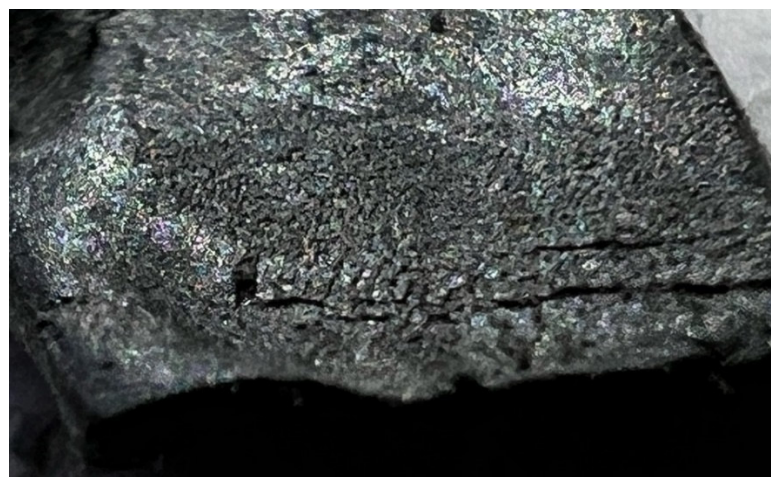
Таблица 2. Гигроскопические свойства отходов полимерной крошки ТПЭЭ

Table 2. Hygroscopic properties of waste polymer chips TPE

Фракция, размер частиц, мм Fraction, particle size, mm	Влажность w , % Humidity, w , %	Гигроскопичность H , % Hygroscopicity H , %	Влагоёмкость, % по истечении, ч Moisture capacity, % after expiration, h			Водопоглощение B , % Water absorption B , %
			2	4	24	
До 1,25	0,26	0,83	36,2	36,7	37,8	2,65
1,25–2,5	0,28	0,67	18,3	21,3	23,3	2,45
>2,5	0,11	0,67	17,8	20	20,0	2,25

Как видно из таблицы 2, содержание влаги в полимерных отходах соответствует норме (до 8%), но для них характерны высокие влагоёмкость и водопоглощение, что выдвигает особые требования к условиям хранения материала из-за его способности быстро впитывать влагу.

Наиболее высокие значения выявлены для фракции с размерами частиц до 1,25 мм, что предположительно связано с большой площадью поверхности частиц, а также наличием на поверхности пор и каналов (рис. 4).



a



б

Рис. 4. Макроанализ поверхности отдельных частиц полимерной пыли ТПЭЭ при 10-ти (а) и 15-кратном (б) увеличении

Fig. 4. Macroanalysis of the surface of individual particles of polymer dust TPEE at 10 (a) and 15-fold (b) magnification

Некоторые определённые экспериментально технологические характери-

стики отходов полимерной пыли ТПЭЭ представлены в таблице 3.

Таблица 3. Определенные экспериментально некоторые технологические характеристики отходов полимерной пыли ТПЭЭ

Table 3. Some experimentally determined technological characteristics of polymer TPEE dust waste

Параметр Parameter	Количество определений Number of definitions	Значение параметра The value of the parameter
Температура плавления, °С	5	221
Насыпная плотность, кг/м ³	8	544
Угол естественного откоса, град	8	31
Коэффициент внутреннего трения	8	0,59

Температура плавления отходов полимерной пыли ТПЭЭ, определенная по результатам пяти измерений на приборе Stuart SMP-30, составила 221°С, что соответствует температуре плавления исходного термопласта.

Определенная насыпная плотность полимерной пыли ТПЭЭ составила 544 кг/м³, что позволяет отнести данный материал к категории лёгких.

Косвенные показатели или характеристики второго порядка используются для описания движения полимерной пыли. К ним относят угол естественного откоса, коэффициент внутреннего трения. Так, величина угла трения дает представление о способности частиц скользить или скатываться по наклонной поверхности, поэтому её используют для расчёта желобов оборудования и определения наклона стенок бункера. Значение угла трения определяется силами сцепления между частицами и зависит от сил трения между

частицами и при перемещении частиц относительно друг друга. Угол естественного откоса используется для характеристики сыпучести материала. Для частиц с гладкой поверхностью угол наименьший, зато отклонение от шарообразной формы приводит к уменьшению сыпучести.

По полученному для отходов полимерной крошки ТПЭЭ значению угла естественного откоса 31° можно сказать, что данный материал обладает хорошей и очень хорошей степенью сыпучести, при которой угол естественного откоса составляет 25–35°.

Стойкость отходов ТПЭЭ к действию химических сред определялась в соответствии с ГОСТ 12020-2018 (ISO 175:2010) «Пластмассы. Методы определения стойкости к действию химических сред» (табл. 4–6). В качестве сред были выбраны органические растворители, растворы кислот разной концентрации, смеси растворителей.

Таблица 4. Устойчивость отходов полимерной пыли к действию растворителей; (22±2)°С

Table 4. Resistance of the polymer TPEE dust waste to the solvents; (22±2)°C

Природа Nature	Потеря массы, % Weight loss, %	Природа Nature	Потеря массы, г Weight loss, %
Диметилформамид	1,2	Циклогексанол	2,7
Петролейный эфир	1,3	Ацетилацетат	4,7
Толуол	2,3	Уайт-спирт	6,3
Керосин	2,1	Масло веретенное	9,9
Хлороформ	разрушается*		

* Полимерная пыль меняет степень дисперсности, переходит в порошкообразное состояние или в состояние эмульсии, далее оседает тонкой пленкой; раствор окрашен в черный цвет.

Таблица 5. Стойкость отходов полимерной пыли ТПЭЭ к действию водных растворов кислот; (22±2)°C**Table 5.** The resistance of of the polymer TPEE dust waste to the action of aqueous acid solutions; (22±2)°C

Природа Nature	[HA], % [HA], %	Потеря массы, % Weight loss, %	Природа Nature	[HA], % [HA], %	Потеря массы, % Weight loss, %
Азотная	60	разрушается*	Трихлоук- сусная	60	растворяется
Амино- бензойная	5	1,2	Уксусная	90	2,2
Борная	5	2,5	о-Фосфор- ная	80	2,5
Бромово- дородная	10	1,8	Фталевая	5	1,0
Винная	5	2,0	Щавелевая	5	1,6
Серная	96	разрушается*	Янтарная	5	1,0
Соляная	30	разрушается**			

* Полимерная пыль меняет степень дисперсности, переходит в порошкообразное состояние; раствор окрашен в черный цвет.

** Полимерная пыль меняет степень дисперсности; переходит в порошкообразное состояние; раствор мутнеет.

Таблица 6. Результаты оценки устойчивости отходов полимерной пыли ТПЭЭ к действию смеси растворителей и некоторых кислот; (22±2)°C**Table 6.** Results of the assessment of the resistance of polymer dust waste TPEE to the action of a mixture of solvents and some acids; (22±2)°C

Компоненты смеси The components of the mixture			Результат result
растворитель solvent	HA / растворитель HA / solvent	соотношение по объёму volume ratio	
Петролейный эфир	Азотная	9:1	Полимерная крошка меняет степень дисперсности, переходит в порошкообразное состояние
	Соляная	9:1	
	Серная	7:3	Агрегация крошки в агломерат
Хлороформ	Этанол	4:6	Чёрный раствор

Как видно из таблиц 4–6, повышенная растворимость полимерной крошки наблюдается в растворителях, содержащих в своём составе хлор.

Обработка пыли полиэфира водным раствором щелочи NaOH 0,01, 0,1 и 4 М при комнатной температуре в течение 240 мин к серьезным изменениям не привела. Серьёзные изменения в структуре и

свойствах полимеров не были обнаружены. Это, вероятно, согласуется с тем утверждением [30], что гидролиз полиэфиров в высокой степени случайный процесс, т. к. реакция не идет по механизму последовательного отщепления мономеров.

Выводы

Таким образом, в работе проведена оценка фундаментальных свойств отходов полимерной пыли ТПЭЭ, изучены технологические свойства этих сыпучих материалов по гранулометрическому составу, величине влажности, сыпучести, удельному объему, насыпной плотности и рассчитаны характеристики второго порядка

(косвенные показатели), такие как угол естественного откоса, коэффициент внутреннего трения.

Полученные характеристики предполагается использовать при разработке методов переработки и утилизации отходов полимерной пыли ТПЭЭ при проведении контроля поступающего сырья [30].

Список литературы

1. Гайдадин А.Н., Навроцкий В.А., Степанов Г.В. Термопластичные эластомеры на основе полиамида-6 // Журнал прикладной химии. 2015. Т. 88, № 6. С. 945–951.
2. Получение и исследование свойств нанокompозитных термопластичных эластомеров на основе изотактического полипропилена / Н.И. Курбанова, Н.А. Алимйрзоева, А.М. Кулиев, Т.И. Мединцева, О.П. Кузнецова, Э.В. Прут // Перспективные материалы. 2017. № 2. С. 59–65.
3. Термопластичные эластомеры для замены резин / Г.Н. Петрова, Д.Н. Перфилова, В.И. Грязнов, Э.Я. Бейдер // Авиационные материалы и технологии. 2012. № S. С. 302–308.
4. Segregated electrically conductive nanocomposites based on thermo-plastic elastomers and graphite / N.T. Kakhramanov, Kh.V. Allahverdiyeva, Yu.N. Gahramanli, F.A. Mustafayeva, N.M. Sadikhov, G.S. Martynova // ChemChemTech. 2024. Vol. 67, no. 11. P. 122–137. <https://doi.org/10.6060/ivkkt.20246711.7045>.
5. Термопластичные эластомеры на основе атактического полипропилена / Т.И. Мединцева, Л.А. Ришина, С.С. Лалаян, Э.В. Прут // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2024. № 8. С. 10–17. <https://doi.org/10.31044/1994-6260-2024-0-8-10-17>.
6. Хакимуллин Ю.Н., Охотина Н.А. Термоэластопластичные материалы на основе блок-сополимеров. Казань: Казан. нац. исслед. техн. ун-т, 2017. 84 с.
7. Кочергин Ю. С., Григоренко Т. И., Золотарева В. В. Релаксационные свойства композиционных материалов на основе смесей эпоксидных полимеров и термоэластопластов // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2020. № 2. С. 85–95. <https://doi.org/10.34031/2071-7318-2020-5-2-85-95>.
8. Зеленев Ю.В. Исследование взаимосвязи состава, строения, структуры и физических свойств блок-сополимеров на основе гибко- и жесткоцепных компонентов // Пласт. массы. 2002. № 3. С. 11–18.
9. Вольфсон С.И. Влияние рецептурно-технологических параметров на молекулярную структуру динамически вулканизированных ТЭП // Каучук и резина. 2003. № 6. С. 16–17.
10. Canhui Lu, Xinxing Zhang, Mei Liang. Mechanochemical recycling and processing of waste crosslinked polymers: waste tire rubber and waste XLPE from cable scraps // The 5th ISFR. Chengdu, China, 2009. С. 148–155.
11. Recycling of EPDM waste. I. Effect of ground EPDM vulcanizate on properties of EPDM rubber / C. Jacob, P.P. De, A.K. Bhowmick, S.K. De // J. Appl. Polym. Sci. 2001. Vol. 82. P. 3293–3303.
12. Шрубок А.О., Хаппи Вако Б.Ж. Оценка степени кристалличности мелкодисперсных порошков вторичного полиэтилентерефталата методом ИК-спектроскопии // Труды БГТУ. Серия 2: Химические технологии, биотехнология, геоэкология. 2022. № 2(259). С. 41–48. <https://doi.org/10.52065/2520-2669-2022-259-2-41-48>.
13. Термодформационные характеристики нанокompозитов на основе полипропилена и термозолы бытовых отходов / Н.Т. Кахраманов, А.А.Г. Гасанова, Х.В.Г. Аллахвердиева,

З.Н.Г. Гусейнова, Н.Б.Г. Арзуманова // Перспективные материалы. 2022. № 9. С. 56–63. <https://doi.org/10.30791/1028-978X-2022-9-56-63>.

14. Диспергирование этиленпропилендиенового каучука в тальконаполненной композиции полипропилена / И.Г. Рыжикова, А.М. Волков, Н.А. Бауман, Ю.М. Казаков, С.И. Вольфсон, Е.В. Новикова // Вестник Технологического университета. 2015. Т. 18, № 6. С. 123–126.

15. Sánchez-Soto M. Influence of particle size on the powder bed homogeneity and mechanical properties in selective laser sintering processes // CRC Press. 2018. Vol. 11, no. 8. P. 73-80.

16. Carneiro O.S. Polymeric nanocomposites: processing, characterization, and modeling // CRC Press. 2017. Vol. 10, no. 6. P. 52-62.

17. Лесун А.Н., Скаскевич А.А., Кочерова В.А. Технологические особенности рециклинга промышленных отходов переработки политетрафторэтилена // Вестник Гродненского государственного университета имени Янки Купалы. Серия 6. Техника. 2016. Т. 6, № 2. С. 66–72.

18. Zhang J. Surface modification of nano-sized inorganic fillers for reinforcing polymer composites // Journal of Materials Science. 2014. Vol. 49, no. 2. P. 463-474.

19. Bikiaris D. Nanocomposites of polymers and inorganic particles: preparation, structure and properties // Progress in polymer science. 2011. Vol. 36, no. 7. P. 932-997.

20. Пугачева И.Н., Седых В.А., Никулин С.С. Применение вторичных полимерных материалов в качестве агентов межфазного сочетания в резиноволокнистых композитах // Каучук и резина. 2018. Т. 77, № 3. С. 192–195.

21. Ярцев В.П., Долженкова М.В., Петрова Н.В. Влияние наполнителей и нанодобавок на эксплуатационные свойства композитов на основе битума // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2014. Т. 20, № 4. С. 801-809.

22. Андрианова К.А., Амирова Л.М. Функционально-градиентные материалы: получение, свойства, применение (обзор) // Журнал прикладной химии. 2024. Т. 97, № 2. С. 92–113. <https://doi.org/10.31857/S0044461824020014>.

23. Пожидаева С.Д., Пожидаева В.В. Поиск оптимальных условий и отработка анализа изоцианатных групп в преполимерах // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2024. Т. 14, № 3. С. 191–205. <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2024-14-3-191-205>.

24. Рачинский Ф.Ю., Рачинская М.Ф. Техника лабораторных работ. Ленинград: Химия, Ленингр. отд-ние, 1982. 432 с.

25. Пеклер В.В. Влагометрия сыпучих материалов: состояние и перспективы развития // Методы оценки соответствия. 2009. № 9. С. 15–17.

26. Ловкис З.В., Григель А.И. Параметры и фракционный состав сыпучих материалов // Пищевая промышленность: наука и технологии. 2018. Т. 11, № 4(42). С. 94–103.

27. Влияние рН-среды на влагоемкость сополимеров на основе диметиламмоний хлорида / Р.С. Лукша, С.Т. Рашидова, И.М. Борисов, Е.В. Машкова // Фундаментальные и прикладные исследования: естественные науки: материалы Национальной научно-практической конференции молодых ученых и студентов. Уфа: Башкир. гос. пед. ун-т им. М. Акмуллы, 2021. С. 213–217.

28. Павлихин Г.П., Львов В.А., Калугина О.Г. Оценка влагоемкости силикагеля для обеспечения безопасной эксплуатации пневматических систем // Безопасность в техносфере. 2014. Т. 3, № 6. С. 43-52. <https://doi.org/10.12737/6635>.

29. Фарзалиев Э.Ф., Филиппенко Н.Г., Чумбадзе Т.Т. Исследование гигроскопичности многокомпонентных полимерных материалов // Молодая наука Сибири. 2021. № 1(11). С. 471–480.

30. Fairgrieve S. Degradation and stabilisation of aromatic polyesters. Shawbury: Smithers Rapra Publishing, 2009. 280 p.

References

1. Gaidadin A.N., Navrotsky V.A., Stepanov G.V. Thermoplastic elastomers based on polyamide-6. *Zhurnal prikladnoi khimii = Journal of Applied Chemistry*. 2015;88(6):945-951. (In Russ.)
2. Kurbanova N. I., Alimirzoeva N.A., Kuliyeu A.M., Medintseva T.I., Kuznetsova O.P., Prut E.V. Obtaining and studying the properties of nanocomposite thermoplastic elastomers based on isotactic polypropylene. *Perspektivnye materialy = Promising materials*. 2017;(2):59-65. (In Russ.)
3. Petrova G.N., Perfilova D.N., Gryaznov V.I., Bader E.Ya. Thermoplastic elastomers for replacing rubbers. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii = Aviation materials and Technologies*. 2012;S:302-308. (In Russ.)
4. Kakhramanov N.T., Allahverdiyeva Kh.V., Gahramanli Yu.N., Mustafaeyeva F.A., Sadi-khov N.M., Martynova G.S. Segregated electrically conductive nanocomposites based on thermo-plastic elastomers and graphite. *ChemChemTech*. 2024; 67(11):122-137. <https://doi.org/10.6060/ivkkt.20246711.7045>.
5. Medintseva T.I., Rishina L.A., Lalayan S.S., Prut E.V. Thermoplastic elastomers based on atactic polypropylene. *Vse materialy. Entsiklopedicheskii spravochnik = All materials. Encyclopedic reference*. 2024;(8):10-17. (In Russ.) <https://doi.org/10.31044/1994-6260-2024-0-8-10-17>.
6. Khakimullin Yu.N., Okhotina N.A. Thermoplastics based on block copolymers. Kazan': Kazan. nats. issled. tekhn. un-t; 2017. 84 p. (In Russ.)
7. Kochergin Yu.S., Grigorenko T.I., Zolotareva V.V. Relaxation properties of composite materials based on mixtures of epoxy polymers and thermoplastics. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V.G. Shukhova = Bulletin of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*. 2020;(2):85-95. (In Russ.) <https://doi.org/10.34031/2071-7318-2020-5-2-85-95>.
8. Zelenev Yu.V. Investigation of the relationship between the composition, structure, structure and physical properties of block copolymers based on flexible and rigid chain components. *Plast. Massy = Plast. the masses*. 2002;(3):11-18. (In Russ.)
9. Wolfson S.I. Influence of formulation and technological parameters on the molecular structure of dynamically vulcanized TEPS. *Kauchuk i rezina = Rubber and rubber*. 2003;(6):16-17. (In Russ.)
10. Canhui Lu, Xinxing Zhang, Mei Liang. Mechanochemical recycling and processing of waste crosslinked polymers: waste tire rubber and waste XLPE from cable scraps. *The 5th ISFR*. Chengdu, China; 2009. P. 148–155.
11. Jacob C., De P.P., Bhowmick A.K., De S.K. Recycling of EPDM waste. I. Effect of ground EPDM vulcanizate on properties of EPDM rubber. *J. Appl. Polym. Sci.*, 2001;82:3293–3303.
12. Shrubok A.O., Happi Waco B.J. Assessment of the degree of crystallinity of fine powders of secondary polyethylene terephthalate by IR spectroscopy. *Trudy BGTU. Seriya 2: Khimicheskie tekhnologii, biotekhnologiya, geoekologiya = Proceedings of BSTU. Series 2: Chemical technologies, biotechnology, geocology*. 2022;(2):41-48. (In Russ.) <https://doi.org/10.52065/2520-2669-2022-259-2-41-48>
13. Kahramanov N.T., Hasanova A.A.G., Allakhverdieva H.V.G., Guseynova Z.N.G., Arzu-manova N.B.G. Thermodeformational characteristics of nanocomposites based on polypropylene and thermosols of household waste. *Perspektivnye materialy = Promising materials*. 2022;(9):56-63. (In Russ.) <https://doi.org/10.30791/1028-978X-2022-9-56-63>.
14. Ryzhikova I.G., Volkov A.M., Bauman N.A., Kazakov Yu.M., Vol'fson S.I., Novikova E.V. Dispersion of ethylene propylene diene rubber in a talc-filled composition of polypropylene. *Vestnik Tekhnologicheskogo universiteta = Bulletin of the Technological University*. 2015;18(6):123-126. (In Russ.)
15. Sánchez-Soto M. Influence of particle size on the powder bed homogeneity and mechanical properties in selective laser sintering processes. *CRC Press*. 2018;11(8):73-80.

16. Carneiro O.S. Polymeric nanocomposites: processing, characterization, and modeling. *CRC Press*. 2017;10(6):52-62.
17. Lesun A.N., Skaskevich A.A., Kocherova V.A. Technological features of recycling of industrial waste of polytetrafluoroethylene processing. *Vestnik Grodnenskogo gosudarstvennogo universiteta imeni Yanki Kupaly. Seriya 6: Tekhnika = Bulletin of the Yanka Kupala Grodno State University. Series 6. Technique*. 2016;6(2):66-72. (In Russ.)
18. Zhang J. Surface modification of nano-sized inorganic fillers for reinforcing polymer composites. *Journal of Materials Science*. 2014;49(2):463-474.
19. Bikiaris D. Nanocomposites of polymers and inorganic particles: preparation, structure and properties. *Progress in polymer science*. 2011;36(7):932-997.
20. Pugacheva I.N., Sedykh V.A., Nikulin S.S. The use of secondary polymer materials as agents of interfacial combination in rubber fiber composites. *Kauchuk i rezina = Rubber and rubber*. 2018;77(3):192-195. (In Russ.)
21. Yartsev V.P., Dolzhenkova M.V., Petrova N.V. The influence of fillers and nano-additives on the operational properties of bitumen-based composites. *Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Tambov State Technical University*. 2014;20(4):801-809. (In Russ.)
22. Andrianova K.A., Amirova L.M. Functionally gradient materials: radiation, properties, application (review). *Zhurnal prikladnoi khimii = Journal of Applied Chemistry*. 2024;97(2):92-113. (In Russ.) <https://doi.org/10.31857/S0044461824020014>.
23. Pozhidaeva S.D., Pozhidaeva V.V. Search for optimal conditions and working out the analysis of isocyanate groups in prepolymers. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*. 2024;14(3):191-205. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2024-14-3-191-205>.
24. Rachinsky F.Y., Rachinskaya M.F. Technique of laboratory work. Leningrad: Khimiya, Leningr. otd-nie; 1982. 432 p. (In Russ.)
25. Pekler V.V. Moisture measurement of bulk materials: state and prospects of development. *Metody otsenki sootvetstviya = Methods of conformity assessment*. 2009;(9):15-17. (In Russ.)
26. Lovkis Z.V., Grigel A.I. Parameters and fractional composition of bulk materials. *Pishchevaya promyshlennost': nauka i tekhnologii = Food industry: science and technology*. 2018;11(4):94-103. (In Russ.)
27. Luksha R.S., Rashidova S.T., Borisov I.M., Mashkova E.V. Influence of the pH medium on the moisture capacity of copolymers based on dimethylammonium chloride. *Fundamental'nye i prikladnye issledovaniya: estestvennye nauki: materialy Natsional'noi nauchno-prakticheskoi konferentsii molodykh uchenykh i studentov = Fundamental and applied research: natural sciences: materials of the National scientific and practical conference of young scientists and students*. Ufa: Bashkir. gos. ped. univ-t im. M. Akmulla; 2021. P. 213-217. (In Russ.)
28. Pavlikhin G.P., Lvov V.A., Kalugina O.G. Assessment of silica gel moisture capacity to ensure safe operation of pneumatic systems. *Bezopasnost' v tekhnosfere = Safety in the technosphere*. 2014;3(6):43-52. (In Russ.) <https://doi.org/10.12737/663>
29. Farzaliev E.F., Filippenko N.G., Chumbadze T.T. Investigation of hygroscopicity of multi-component polymer materials. *Molodaya nauka Sibiri = Young Science of Siberia*. 2021;(1): 471-480. (In Russ.)
30. Fairgrieve S. Degradation and stabilisation of aromatic polyesters. Shawbury: Smithers Rapra Publishing; 2009. 280 p.

Информация об авторах / Information about the Authors

Пожидаева 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

Svetlana D. Pozhidaeva, Candidate of Sciences (Chemistry), 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

Вишняков Вадим Михайлович, студент кафедры фундаментальной химии и химической технологии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: v.vishnyakov2003@yandex.ru

Vadim M. Vishnyakov, Student of the Departments of Fundamental Chemistry and Chemical Technology, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: v.vishnyakov2003@yandex.ru

Лебедева Анастасия Дмитриевна, студент кафедры фундаментальной химии и химической технологии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: Immi992@yandex.ru

Anastasia D. Lebedeva, Student of the Departments of Fundamental Chemistry and Chemical Technology, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: Immi992@yandex.ru

Кувардин Николай Владимирович, кандидат химических наук, доцент кафедры 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 (Chemistry), Associate Professor of the Department of Fundamental Chemistry and Chemical Technology, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: kuvardin.nik@yandex.ru

Чернов Артём Максимович, аспирант, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: tcer.ar28@gmail.com

Artyom M. Chernov, Post-Graduate Student, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: tcer.ar28@gmail.com