

Р. А. Любушкин, Н. И. Черкашина, Д. В. Пушкарская,
Р. А. Баринов, А. А. Кужелева, Ю. И. Литвинова

ФУНКЦИОНАЛИЗАЦИЯ ЧАСТИЦ ДИОКСИДА КРЕМНИЯ НАТУРАЛЬНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ ПОЛИМЕТИЛМЕТАКРИЛАТОМ

Ключевые слова: частицы диоксида кремния, полиметилметакрилат, модицирование, гидрофобизация, рисовая шелуха.

В данной работе изучен процесс функционализации частиц диоксида кремния, полученного из материала растительного происхождения, полиметилметакрилатом. Рассматривается получение диоксида кремния (SiO_2) из альтернативного, дешевого сырья натурально происхождения, а именно, из рисовой шелухи, так как в ней содержание SiO_2 достигает 25-30% масс. Получение диоксида кремния из рисовой шелухи происходит в несколько этапов. Для этого исходную рисовую шелуху обрабатывают сначала кислотным раствором H_2SO_4 слабой концентрации для удаления загрязнений и примесей, затем проводится щелочная гидролиз на основе раствора $NaOH$. Для осаждения аморфного кремнезема и удаления остатков щелочной среды, используют более концентрированный раствор H_2SO_4 , после полученный подкисленный раствор промывают несколько раз дистиллированной водой для снижения концентрации и удаления избытка кислоты, а остаток центрифугируют, высушивают в вакуумной печи и измельчают до тонкодисперсного порошка. После измельченный порошок диоксида кремния (SiO_2), полученный из рисовой шелухи, модицируют полиметилметакрилатом (ПММА) в процессе полимеризации. По истечению нескольких дней материал высушивают в вакуумной печи и измельчают до тонкодисперсного порошка. Для подтверждения процесса образования полимерной оболочки ПММА на частицах SiO_2 , проводились исследования краевого угла смачивания, не модицированного порошка и модицированного, методом сидячей капли в жидкой фазе дистиллированной воды; также был проведен анализ методом ИК-Фурье спектроскопии, для более точной идентификации функциональных изменений на поверхности материала; методом сканирующей электронной микроскопии изучали преобразование поверхности порошка после создания полимерной оболочки на основе ПММА. В результате исследований выявили, что модицирование не только увеличивает гидрофобность поверхности, но также способствует более равномерному распределению частиц SiO_2 , предотвращая их агломерацию, что в дальнейшем может оказать положительное влияние на прозрачность итогового материала, а также способствовать улучшению взаимодействия с различными полимерными матрицами.

R. A. Lyubushkin, D. V. Pushkarskaya, N. I. Cherkashina,
R. A. Barinov A. A. Kuzheleva, Yu. I. Litvinova

FUNCTIONALIZATION OF SILICON DIOXIDE PARTICLES OF NATURAL ORIGIN WITH POLYMETHYLMETHACRYLATE

Keywords: silicon dioxide particles, polymethylmethacrylate, modification, hydrophobization, rice husks.

This paper examines the functionalization of plant-based silicon dioxide particles with polymethyl methacrylate. We examine the production of silicon dioxide (SiO_2) from an alternative, inexpensive, natural raw material—namely, rice husks—as their SiO_2 content reaches 25-30% by weight. Silicon dioxide is obtained from rice husks in several stages. The rice husks are first treated with a weak acidic H_2SO_4 solution to remove contaminants and impurities, followed by alkaline hydrolysis using a $NaOH$ solution. A more concentrated H_2SO_4 solution is used to precipitate amorphous silica and remove residual alkaline media. The resulting acidified solution is then washed several times with distilled water to reduce the concentration and remove excess acid. The residue is centrifuged, dried in a vacuum oven, and ground to a fine powder. After milling, silicon dioxide (SiO_2) powder obtained from rice husks is modified with polymethyl methacrylate (PMMA) during polymerization. After several days, the material is dried in a vacuum oven and ground to a fine powder. To confirm the formation of the PMMA polymer shell on SiO_2 particles, wetting angle studies were conducted on unmodified and modified powder using the sessile drop method in the liquid phase of distilled water. Fourier transform infrared spectroscopy analysis was also performed to more accurately identify functional changes on the material surface. Scanning electron microscopy was used to study the transformation of the powder surface after the formation of the PMMA-based polymer shell. The studies revealed that modification not only increases the surface hydrophobicity but also promotes a more uniform distribution of SiO_2 particles, preventing their agglomeration. This may subsequently have a positive effect on the transparency of the final material, as well as contribute to improved interaction with various polymer matrices.

Введение

Переход к энергоэффективным технологиям остается актуальным направлением в области исследований новых светорассеивающих материалов. Светорассеиватели используют в светодиодных лампах для рассеивания прямого падающего луча на сетчатку глаза. В качестве светорассеивающих материалов могут быть использованы прозрачные полимеры, такие как полиметилметакрилат, полистирол, поликарбо-

нат [1-4], которые являются одними из наиболее доступных. У таких материалов высокий показатель термостойкости, за счет прозрачности, высокий показатель светопропускания, но низкий показатель светорассеивания [5]. Повышение показателя светорассеивания можно добиться введением модификаторов в полимерную матрицу, для создания гетерогенной системы, соизмеримой с длинной волны падающего света [6]. Введение модификаторов позво-

ляет регулировать не только оптические, но и эксплуатационные характеристики. Конечный продукт можно использовать для линз и корпусов, повышая световую отдачу в бытовых лампах, в уличных подсветках, в дисплеях, так как равномерное светорассеивание минимизирует блики [7]. Показатель светорассеивания зависит от результата взаимодействия образца с проходящим лучом светового излучения, проходящего через частицы различной формы и состава модифицированного наполнителя в полимерной матрице, а также от длины волны падающего света [8]. Показатели светопропускания и светорассеивания полимерных композиционных материалов зависит от содержания светорассеивающей добавки и толщины изделия.

В качестве рассеивающих добавок можно использовать органические и минеральные наполнители [9, 10]. Также некоторые органические вещества можно получать из аграрных отходов, что делает производства светорассеивателей более экономичным и решает проблему повторного использования малоэнергетического сырья. Их можно получать из растительных отходов. Минеральные наполнители характеризуются высокой стабильностью и термической устойчивостью. К ним относятся оксиды и диоксиды таких химических элементов, как кремний, титан, алюминий, кальций [11,12]. Минеральные наполнители в большинстве случаев получают методом золь-геля. Диоксид кремния (SiO_2) является одним из наиболее широко используемых материалов в оптических диффузорах благодаря своей химической стабильности, доступности и высокой светорассеивающей способности. Оптические диффузоры находят применение в светодиодном освещении, дисплеях и фотонике, где равномерное распределение света и снижение бликов играют ключевую роль в повышении качества визуального восприятия и эффективности устройств. Однако эффективность светорассеивания напрямую зависит от морфологии, размера и поверхностных свойств частиц SiO_2 , входящих в состав диффузора. Преимуществами использования диоксида кремния SiO_2 в светорассеивателях являются такие аспекты, как равномерное рассеивание света, снижение бликов и улучшение распределение освещения; термическая стабильность и устойчивость к нагреву, что предотвращает быструю деградацию полимерной композиции; прочность и долговечность, устойчивость к воздействию внешних факторов; экологичность и экономичность, так как можно SiO_2 получать из природных источников, таких как рисовая шелуха, что делает композиции более доступными и устойчивым вариантом по сравнению с синтетическими материалами [13]. В рисовой шелухе содержание диоксида кремния может достигать до 25-30% масс. от общего веса, что делает рисовую шелуху перспективным сырьем для получения диоксида кремния из альтернативного источника [14,15]. Это способствует сокращению растительных отходов, снижению затрат на производство продукции.

В последние годы особое внимание уделяется модификации поверхности и структуры частиц диоксида кремния с целью оптимизации их оптических характеристик, снижению бликов в устройствах [16-

18]. Контроль размера частиц, их агрегирования, а также химическая функционализация поверхности позволяют повысить коэффициент рассеяния света, улучшить стабильность и совместимость с полимерными матрицами, что в итоге ведет к созданию более эффективных и долговечных диффузоров. Несмотря на значительный прогресс, поиск оптимальных методов модификации и комплексное понимание влияния структурных изменений на светорассеяние остаются актуальными задачами. В качестве модификатора для улучшения совместимости частиц диоксида кремния и полимерной матрицы, а также для гидрофобизации поверхности можно использовать термопластичный полимер, а именно полиметилметакрилат. Без модификации диоксид кремния склонен к агломерации в полимерных матрицах из-за различий в полярности, что снижает дисперсию и оптическую эффективность. Эта модификация улучшает свойства композитных материалов, особенно в оптических приложениях, таких как светорассеивающие линзы и диффузоры [19]. Модификация частиц диоксида кремния соединениями на основе ПММА обеспечивает их равномерное распределение в полимерной матрице, повышает стабильность системы, снижает вероятность возникновения дефектов [20]. Модификация может увеличить световую отдачу на 10–20 %, без значительной потери прозрачности при оптимальной концентрации, продлить срок эксплуатации прибора в условиях повышенной влажности и температуры.

Настоящая работа посвящена исследованию процесса получения диоксида кремния из рисовой шелухи с последующей модификацией этих частиц полиметилметакрилатом. Полученные результаты могут способствовать разработке новых материалов с улучшенными характеристиками для современных оптических устройств.

Материалы и методы исследования

Материалы

Для получения диоксида кремния использовались следующие компоненты: рисовая шелуха (урожая 2024 года), 1% мас. раствор H_2SO_4 , изготовленный в лаборатории из концентрированной H_2SO_4 (производитель, ООО «ЛенРеактив», г. Санкт-Петербург, Россия), 17,5% мас. раствор NaOH , изготовленный в лаборатории из концентрированного NaOH (производитель, ООО «Химстор», г. Екатеринбург, Россия), 15% раствор H_2SO_4 , изготовленный в лаборатории из концентрированной H_2SO_4 (производитель, ООО «ЛенРеактив», г. Санкт-Петербург, Россия). В качестве мономера - метилметакрилат с плотностью 0,94 г/см³, молярной массой 100,12 г/моль (производитель, ООО «Химмед», г. Москва, Россия) и инициатор процесса полимеризации – бензоилпероксид с плотностью 1,334 г/см³, молярной массой 242,23 г/моль (производитель, ООО «ПраймКемикалсГрупп», г. Москва, Россия).

Синтез

Получение диоксида кремния из рисовой шелухи происходит в несколько этапов. На первом этапе проводят обработку сырья 1 мас.% раствором H_2SO_4 в массовом соотношении 1:5, в круглодонной колбе с постоянным нагревом до температуры кипения

смеси. После для удаления кислой среды, смесь промывают дистиллированной водой, остатки воды убирают вакуумным методом при использовании воронки Бюхнера и водоструйного насоса. Далее проводят щелочной гидролиз для выделения диоксида кремния в чистом виде, без остаточных масс лигнина или целлюлозы, для этого рисовую шелуху в массовом соотношении 1:3 смешивают с 17,5 мас.% щелочным раствором NaOH и выдерживают в течение 1,5-2 часов при температуре кипения, с использованием обратного холодильника. После раствор подконтрольно охлаждают до достижения значения температуры 20°C. Для нейтрализации щелочной среды и осаждения аморфного диоксида кремния раствор смешивают в массовом соотношении 2:1 с 15 мас.% раствором H₂SO₄, желеобразный осадок выпадает при достижении pH 8-8,5. Осадок отделяют от жидкости центрифугированием и промывают дистиллированной водой несколько раз для удаления кислотной составляющей. Осадок высушивают в вакуумном сушильном шкафу в течение 1 часа при температуре 90°C, затем полученный порошок измельчают до тонкодисперсного состояния для дальнейшего модифицирования. Модифицирование поверхности частиц диоксида кремния полиметилметакрилатом проводят в процессе полимеризации. Для этого на мешалку помещают раствор метилметакрилата с инициатором в их массовом соотношении 1:0,05, нагревают до температуры 80°C и по ее достижению добавляют мелкодисперсный порошок диоксида кремния. Длительность синтеза составляет около 3 часов. После материала герметично закрывают и оставляют на 4 суток, затем высушивают в печи при температуре 250 °C и измельчают.

Методы исследования

Гранулометрический состава определяли методом лазерной дифракции на оборудование Analysette 22 NanoTec plus (Frisch, Idar-Oberstein, Germany).

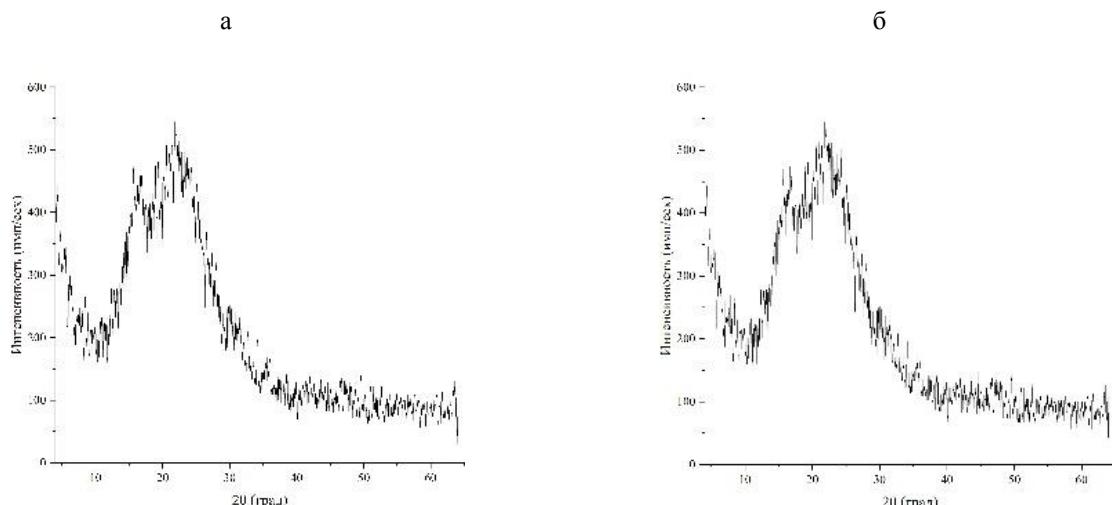


Рис. 1 – Рентгеновская дифрактограмма порошка диоксид кремния (а), модифицированной поверхности диоксида кремния частицами ПММА (б)

Fig. 1 - X-ray diffractogram of silicon dioxide powder (a) modified by PMMA particles on the surface of silicon dioxide (b)

Измерения краевого угла смачивания поверхности проводились методом сидячей капли в жидкой фазе

Кристаллическое состояние определяли методом рентгенофазового анализа на рентгеновском аппарате ДРОН – 3 (НПП Буревестник, г. Санкт-Петербург, Россия).

Для изучения преобразования поверхности модифицированного порошка проводился анализ измерения краевого угла смачивания на оборудовании Krüss DSA30 (Krüss GmbH, Hamburg, Германия).

Для анализа изменения функциональных групп итогового порошка применяли метод ИК-Фурье спектроскопии с использованием спектрометра VERTEX 70 (Bruker Optik GmbH, Германия).

Микроструктуру поверхности и распределение частиц в порошке изучали, используя метод сканирующей электронной микроскопии на оборудовании TESCAN MIRA 3 LMU (Tescan, Brno, Чехия).

Результаты и их обсуждение

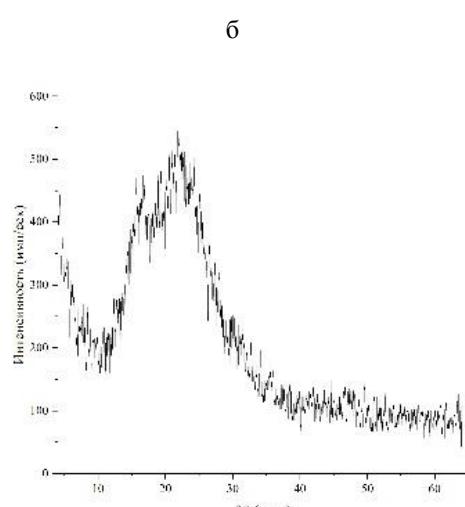
Полученные частицы диоксида кремния из рисовой шелухи характеризуются следующим гранулометрическим составом (табл.1).

Таблица 1 – Средний размер частиц диоксида кремния

Table 1 – Average particle size of silicon dioxide

Размер частиц, нм	
Не модифицированный диоксид кремния	Модифицированный диоксид кремния
17,06	23,76

Результаты рентгенограммы порошка диоксида кремния до модифицирования и после модифицирования поверхности частиц ПММА идентичны (рис. 1). На дифрактограмме как до, так и после модифицирования не зафиксировано кристаллического состояния порошков, следовательно, состояние порошка после модификации остается аморфным.



дистиллированной воды (рис.2., таблица 2). Для этого не модифицированный порошок диоксида

кремния и модифицированный спрессовывались в таблетки и на поверхность помещали каплю.



Рис. 2 – Изображение капли дистиллированной воды на не модифицированной поверхности диоксида кремния (а), на модифицированной поверхности диоксида кремния частицами ПММА (б)
Fig. 2 - Image of a drop of distilled water on an unmodified surface of silicon dioxide (a), on a modified surface of silicon dioxide with PMMA particles (b)

Таблица 2 - Показатели измерения краевого угла смачивания

Table 2 - Indicators for measuring the wetting edge angle

Показатель краевого угла смачивания диоксида кремния, $\theta_c, ^\circ$	
Не модифицированный диоксид кремния	Модифицированный диоксид кремния
76, 2±0,8	121,8±0,2

Вследствие модификации частиц диоксида кремния ПММА, краевой угол смачивания составил $121,8\pm0,2^\circ$. Это означает, что энергия взаимодействия поверхности с водой значительно снизилась по сравнению с не модифицированным образцом, где поверхность активно притягивает частицы воды. ПММА. Модифицированный порошок характеризуется, как гидрофобный материал с низкой поверхностной энергией.

Для анализа изменения функциональных групп полученных материалов, изучались их ИК-Фурье спектры (рис.3). На графике не модифицированного диоксида кремния интенсивные полосы в области $\sim 1100 - 1000 \text{ см}^{-1}$ свидетельствуют о наличии силоксановых связей и кремний-кислородных связей (Si—O—Si). График модифицированного диоксида кремния показывает интенсивные полосы в области $\sim 3500 - 3000 \text{ см}^{-1}$, которые характеризуют наличие силильно-гидроксильных групп (Si-OH) на поверхности, что типично из-за высокой гидрофильности материала. Наличие полимерной оболочки после модификации частицами ПММА подтверждают спектры в областях $\sim 1750 - 1650 \text{ см}^{-1}$, $\sim 1450 - 1090 \text{ см}^{-1}$, определяемые наличие карбонильных (C=O) и метильных групп ($-\text{CH}_3$), характерных для структуры термопластичного полимера ПММА.

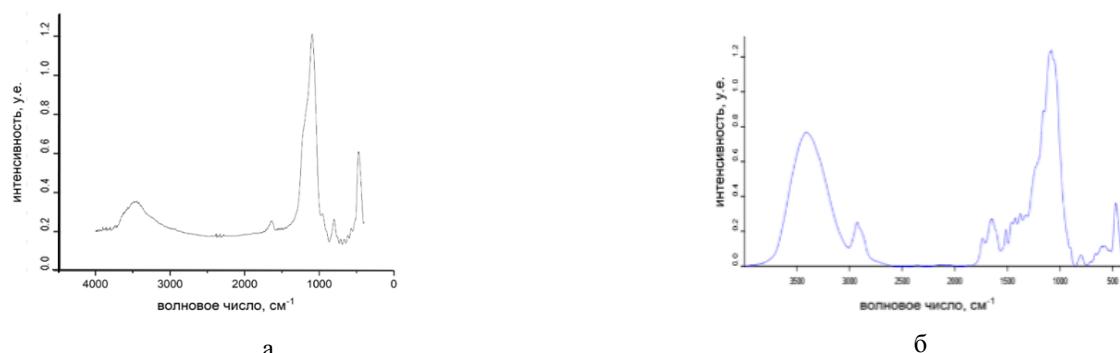


Рис. 3 – ИК-спектры не модифицированной поверхности диоксида кремния (а), модифицированной поверхности диоксида кремния частицами ПММА (б)

Fig. 3 - IR spectra of an unmodified surface of silicon dioxide (a), modified surface of silicon dioxide by PMMA particles (b)



Рис. 4 – СЭМ-изображения поверхности не модифицированного диоксида кремния (а), модифицированного диоксида кремния частицами ПММА (б)

Fig. 4 – SEM images of the surface of unmodified silicon dioxide (a) and silicon dioxide modified with PMMA particles (b)

Микроструктуру поверхности изучали при использовании метода сканирующей электронной микроскопии (рис.4). На изображении модифицированных частиц видно отсутствие маленьких включений и шероховатостей, что свидетельствует о появлении нового слоя ПММА на частицах диоксида кремния. Это покрытие не только защищает основные наноструктуры кремнезема, но и придает им повышенную гидрофобность, механическую стабильность и совместимость с другими материалами, превращая их в универсальные композиты из микросфер для передовых областей материаловедения.

Заключение

В результате исследований удалось создать модифицирование частиц диоксида кремния, полученного из рисовой шелухи, полиметилметакрилатом. Модифицирование способствовало созданию оболочки на частицах диоксида кремния, с сохранением аморфного состояния системы, и приданнию поверхности гидрофобных свойств, так значение краевого угла смачивания не модифицированного порошка диоксида кремния составляет $76,2 \pm 0,8^\circ$, что характеризует гидрофильность порошка, а после модификации значение уже составляет $121,8 \pm 0,2^\circ$, что характеризует гидрофобность порошка. Предположительно, гидрофобное покрытие предотвратит агломерацию частиц в полимерной матрице, что будет способствовать улучшению прозрачности и снижению рассеяния света.

В будущем гидрофобность композитов на основе разработанного модифицированного диоксида кремния позволит повысить их устойчивость к коррозии, УФ-излучению и влаге, продлевая срок службы. ИК-Фурье спектроскопия подтвердила образование оболочки из ПММА на частицах диоксида кремния, полученного из рисовой шелухи, что продемонстрировали СЭМ-исследования. Модифицирование диоксида кремния будет способствовать лучшему его взаимодействию полимерной матрицей, что значительно расширяет область применения полученного материала, в оптических устройствах для лучшего контролируемого светорассеивания.

Благодарности

Исследование выполнено в рамках государственного задания Минобрнауки России № FZWN-2024-0001 с использованием оборудования на базе Центра высоких технологий БГТУ им. В. Г. Шухова.

Литература

- 1.Л.П. Варфоломеев, *Светотехника*, 3, 4-11 (2011).
- 2.Пат. Российской Федерации 2410241 С2 (2011).
- 3.K. Liu, L. Zou, Y. Li, K. Wang, H. Wang, J. Song, *Sustainability*, **15**, 3155 (2023).
- 4.T. Bubmann, A. Seidel, H. Ruckdäschel, V. Altstädt, *Polymers*, **14**, 73 (2022).
- 5.T. Shuji, O. Hiroaki, N. Shogo, Y. Masayuki, *European Polymer Journal*, **48**, 5, 974-980 (2012).
- 6.B. Lee, Y. Chang, H. Lim, *Elastomers and Composites*. **50**, 49-54 (2015).
- 7.A. Samarin, *Components and Technologies*, 2, 115-126 (2011).
- 8.В. Н. Серова, Р. А. Идрисов, И. Г. Темел, *Вестник Казанского технологического университета*, **16**, 15, 71-73 (2013).
- 9.П. Б. Цырторов, Т. И. Андреева, Т. Н. Вахтинская, Т. П. Кравченко, Н. И. Лукашов, *Успехи в химии и химической технологии*, **32**, 6(202), 178-180 (2018).
10. К. А. Усова, А. Е. Шкуро, А. В. Артемов, В. В. Глухих, *Вестник Технологического университета*, Т. **28**, 3, 54-58 (2025).
11. Н. Х. Нгия, Л. А. Зенитова, Л. К. Зиен, *Проблемы региональной экологии*, **2**, 5-11(2019).
12. А. С. Круглова, А. А. Селина, П. С. Минакова, *Евразийское Научное Объединение*, **9-3**, 168-170 (2020).
13. М. С. Петровнина, П. В. Гришин, В. Е. Катнов, С. Н., *Вестник Казанского технологического университета*, **6**, 67- 69 (2014).
14. В. К. Хоанг, С. В. Резниченко, С. В. Емельянов, В. Д. Доан, Д. С. Резниченко, *Каучук и резина*, **81**, 4, 178-183 (2022).
15. М. П. Козубов, Е. В. Хохлов, Г. Г. Исламова, Е. М. Готлиб, К. Р. Габдулхаев, V Всероссийская научно-практическая конференция (Киров, Россия, Ноябрь 14-15, 2023) Вятский государственный университет, Киров, 2023, 86-89.
16. З. З. Файзулина, Е. Д. Ли, К. Р. Сафиуллин, О. О. Сазонов, А. А. Низамов, И. М. Давлетбаева, *Вестник Технологического университета*, **27**, 4, 92-96 (2024).
17. Б. К. Зуев, Р. В. Новичков, Е. О. Александрова, А. Ю. Оленин, *Российские нанотехнологии*, 10, 1-2, 45 (2015).
18. Д. В. Сапсалёв, Г. Б. Мельникова, Т. Н. Толстая, С. А. Чижик, *Известия Национальной академии наук Беларусь. Серия химических наук*, **58**, 3, 325-333 (2022).
19. D. V. Sapsaliou, G. B. Melnikova, V. A. Lapitskaya, T. N. Tolstaya, T. A. Kuznetsova, D. A. Kotov, S. A. Chizhik, *Journal of the Belarusian State University. Chemistry*, **2**, 36-49 (2021).
20. Н. И. Черкашина, Д. В. Пушкарская, Д. А. Рыжих, Р. А. Любушкин, *Вестник Технологического университета*, **27**, 11, 46-50 (2024).

References

- 1.L.P. Varfolomeev, *Lighting Engineering*, 3, 4-11 (2011).
- 2.Pat. Russian Federation 2410241 C2 (2011).
- 3.K. Liu, L. Zou, Y. Li, K. Wang, H. Wang, J. Song, *Sustainability*, **15**, 3155 (2023).
- 4.T. Bubmann, A. Seidel, H. Ruckdäschel, V. Altstädt, *Polymers*, **14**, 73 (2022).
- 5.T. Shuji, O. Hiroaki, N. Shogo, Y. Masayuki, *European Polymer Journal*, **48**, 5, 974-980 (2012).
- 6.B. Lee, Y. Chang, H. Lim, *Elastomers and Composites*. **50**, 49-54 (2015).
- 7.A. Samarin, *Components and Technologies*, 2, 115-126 (2011).
- 8.В. Н. Серова, Р. А. Идрисов, И. Г. Темел, *Bulletin of Kazan Technological University*, **16**, 15, 71-73 (2013).
- 9.Ts. B. Tsyritorov, T. I. Andreeva, T. N. Vakhtinskaya, T. P. Kravchenko, N. I. Lukashov, *Advances in Chemistry and Chemical Technology*, **32**, 6(202), 178-180 (2018).
10. К. А. Усова, А. Е. Шкуро, А. В. Артемов, В. В. Глухих, *Herald of Technological University*, Vol. 28, 3, 54-58 (2025).
11. Н. Н. Nghia, Л. А. Zenitova, Л. К. Zien, *Problems of Regional Ecology*, 2, 5-11 (2019).
12. А. С. Круглова, А. А. Селина, П. С. Минакова, *Eurasian Scientific Association*, 9-3, 168-170 (2020).
13. М. С. Петровнина, П. В. Гришин, В. Е. Катнов, С. Н., *Herald of Kazan Technological University*, 6, 67-69 (2014).
14. В. К. Hoang, S. V. Reznichenko, S. V. Emelyanov, V. D. Doan, D. S. Reznichenko, *Kauchuk i rezina*, **81**, 4, 178-183 (2022).

15. M. P. Kozubov, E. V. Khokhlov, G. G. Islamova, E. M. Gottlieb, K. R. Gabdulkhaev, V All-Russian Scientific and Practical Conference (Kirov, Russia, November 14-15, 2023) Vyatka State University, Kirov, 2023, 86-89.
16. Z. Z. Fayzulina, E. D. Li, K. R. Safiullin, O. O. Sazonov, A. A. Nizamov, I. M. Davletbaeva, Herald of Technological University, 27, 4, 92-96 (2024).
17. B. K. Zuev, R. V. Novichkov, E. O. Aleksandrova, A. Yu. Olenin, Russian Nanotechnologies, 10, 1-2, 45 (2015).
18. D. V. Sapsalev, G. B. Melnikova, T. N. Tolstaya, S. A. Chizhik, Bulletin of the National Academy of Sciences of Belarus. Series of Chemical Sciences, 58, 3, 325-333 (2022).
19. D. V. Sapsaliou, G. B. Melnikova, V. A. Lapitskaya, T. N. Tolstaya, T. A. Kuznetsova, D. A. Kotov, S. A. Chizhik, Journal of the Belarusian State University. Chemistry, 2, 36-49 (2021).
20. N. I. Cherkashina, D. V. Pushkarskaya, D. A. Ryzhikh, R. A. Lyubushkin, Herald of Technological University, 27, 11, 46-50 (2024).

© **Р. А. Любушкин** – канд. хим. наук, доц. каф. Теоретической и прикладной химии (ТПХ), Белгородский государственный технологический университет имени В.Г. Шухова (БГТУ им. В.Г. Шухова), Белгород, Россия, romanlyubushkin@yahoo.com; **Д.В. Пушкарская** – асп. каф. ТПХ, БГТУ им. В.Г. Шухова; младший научный сотрудник НИЛ «Разработка научно-технических основ создания полимерных систем из возобновляемого растительного сырья» (РНТОСПСВРС), Белгород, Россия, dashamenzhulina@mail.ru; **Н. И. Черкашина** – д-р техн. наук, руководитель молодежной НИЛ РНТОСПСВРС; ведущий научный сотрудник каф. ТПХ, БГТУ им. В.Г. Шухова, natalipv13@mail.ru; **Р. А. Баринова** – студент каф. ТПХ БГТУ им. В.Г. Шухова, barinovroman216@gmail.com; **А. А. Кужелева** – младший научный сотрудник НИЛ РНТОСПСВРС, akujeleva@yandex.ru; **Ю. И. Литвинова** – младший научный сотрудник НИЛ РНТОСПСВРС, litwinova.julija@ya.ru.

© **R. A. Lyubushkin** – PhD (Chemical Sci.), Associate Professor of the Department of Theoretical and Applied Chemistry (TAC), Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (BSTU named after V.G. Shukhov), Belgorod, Russia, romanlyubushkin@yahoo.com; **D. V. Pushkarskaya** – PhD-student of the TAC department, BSTU named after V.G. Shukhov; Junior Researcher, Research Laboratory “Development of Scientific and Technical Foundations for the Creation of Polymer Systems from Renewable Plant Raw Materials” (DSTFCPSRPRM), Belgorod, Russia, dashamenzhulina@mail.ru; **N. I. Cherkashina** – Doctor of Sciences (Technical Sci.), Head of the DSTFCPSRPRM Research Laboratory; Leading Researcher of the TAC department, BSTU named after V.G. Shukhov, natalipv13@mail.ru; **R. A. Barinova** – Student, the TAC department, BSTU named after V.G. Shukhov, barinovroman216@gmail.com; **A. A. Kuzheleva** – Junior Researcher at the DSTFCPSRPRM Research Laboratory, akujeleva@yandex.ru; **Yu. I. Litvinova** – Junior Researcher at the DSTFCPSRPRM Research Laboratory, litwinova.julija@ya.ru.

Дата поступления рукописи в редакцию – 07.10.25.

Дата принятия рукописи в печать – 30.10.25.