

УДК 620.9:538.9

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С УГЛЕРОДНЫМИ КОМПОНЕНТАМИ ДЛЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ

Минакова Наталья Николаевна¹,
minakova@asu.ru

Ушаков Василий Яковлевич²,
vyush@tpu.ru

¹ Алтайский государственный университет,
Россия, 656049, г. Барнаул, пр. Ленина, 61.

² Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

Актуальность работы обусловлена необходимостью дальнейшего улучшения свойств композиционных материалов – их технологичности и экологичности, ресурсной и энергетической эффективности. Сфера применения таких материалов расширяется, охватывая, в том числе, разведку и добычу нефтегазовых ресурсов, благодаря возможности регулирования их свойств в широких пределах. Резистивные и изоляционные изделия из полимерных материалов с углеродными компонентами характеризуются небольшим весом и стоимостью, а также доступностью исходного сырья и промышленной технологией изготовления. Многообразие процессов в наполненных полимерах, применяемых в резистивных конструкциях при повышенных температурах, требует изучения их теплофизических характеристик, определяющих процессы теплообмена и теплопередачи в материале. Тепловыделение и теплообмен в них реализуются на различных уровнях: полимерное связующее, свойства которого формируются под действием углеродного компонента, и электропроводящая сетка, погруженная в полимерную матрицу. Это делает актуальными исследования теплофизических характеристик, которые формируются за счет широкого набора параметров.

Цель: изучить теплофизические характеристики наполненных техническим углеродом каучуков для повышения эффективности их использования в изделиях и конструкциях; выявить влияние на теплофизические и структурные характеристики полимерных композиционных материалов углеродных компонентов.

Методы: инструментальные измерения теплофизических характеристик материалов, рентгеноструктурный, статистический и корреляционный анализы.

Результаты. Экспериментально подтверждено, что теплофизические характеристики (теплоемкость, теплопроводность, температуропроводность) зависят от вида связующей основы. Проанализирована их связь с физическими свойствами связующей основы и композиционного материала. Установлена зависимость теплофизических характеристик от степени кристалличности связующего компонента в композиционном материале – при увеличении содержания кристаллической фазы в полимере теплоемкость, теплопроводность и температуропроводность увеличиваются. Сформулированы рекомендации по подбору материала связующего для полимерных композиционных материалов с углеродными компонентами с учетом характера теплового режима конструкции, например, при работе в нестационарных тепловых режимах.

Ключевые слова:

Ресурсосбережение, полимерные композиционные материалы с углеродными компонентами, наполненные техническим углеродом эластомеры, метод лазерной вспышки, теплофизические характеристики, коэффициент теплопроводности, удельная теплоемкость, коэффициент температуропроводности, теплообмен, теплопередача, кристаллическая фаза.

Введение

Композиционные материалы на основе эластомеров благодаря ряду привлекательных свойств (дешевизна сырья, хорошо освоенная технология, возможность изменять свойства в широких пределах в зависимости от назначения) вызывают возрастающий интерес [1–3].

Наполнение эластомеров техническим углеродом в зависимости от его количества в материале может обеспечить электроизоляционные или электропроводящие свойства изделий из них. Эластомеры используются в нефтегазопромысловых отраслях при производстве транспортных лент, рукавов, уплотнителей [4]. Наполненные техническим углеродом эластомеры (НТУЭ) с резистивными свойствами применяются для защиты от электромагнитных помех, в установках

обезвоживания нефти, шахтных кабелях, датчиках, в качестве элементов катодной защиты трубопроводов и т. д. Они способны рассеивать большие мощности при коротких замыканиях и перенапряжениях в электрических сетях, решать задачу эффективной надежной работы ответственных потребителей, например, электродвигателей насосов и компрессоров.

Для широкомасштабного использования НТУЭ необходимо знание комплекса характеристик и особенностей их формирования. Улучшение их потребительских свойств требует изучения электрофизических, теплофизических, механических характеристик [5–8].

Для НТУЭ с углеродными компонентами детально изучались электрофизические характеристики [2, 9]. Однако полимерные материалы применяются

для регулирования удельной тепловой мощности блоков и узлов конструкций в машиностроении, электротехнических устройствах, перераспределения тепловой энергии в узлах электрической сети и т. д. О теплофизических характеристиках сведений существенно меньше, хотя они перспективны для создания защиты наиболее сложного и дорогостоящего оборудования, в том числе высоковольтных объемных резисторов, способных рассеивать огромные мощности и т. д. Проблема перераспределения и отвода тепловой энергии, управления тепловыми полями, которые из-за конструкционной гибкости материала могут быть различных сложных форм, требует понимания закономерностей изменений теплофизических свойств, которые определяются особенностями структуры. Структура таких материалов многокомпонентная, поэтому в формировании конечных характеристик участвует множество факторов [10–12]. На характеристики влияет вид полимера, марка и концентрация электропроводящего наполнителя.

На данном этапе изучалась возможность рассеивания тепла в зависимости от вида полимера. Решались следующие задачи:

- измерить теплофизические характеристики выбранных объектов исследования;
- сопоставить теплофизические характеристики материалов с физическими свойствами связующих компонентов;
- сопоставить теплофизические характеристики материалов с физическими характеристиками, зависящими от структуры композиционного материала.

Объекты и методы исследования

По названным выше причинам в качестве объекта исследования выбраны НТУЭ.

Исследован комплекс их теплофизических характеристик: теплоёмкость, теплопроводность, температуропроводность при повышенных температурах и многократных изменениях температурного режима [13–15]. Указанные параметры выбраны по следующим причинам. Скорость поступления тепла в материал и выхода из него зависит от теплопроводности. Теплопроводность позволяет оценить теплоизоляционные свойства материала. Скорость подъема температуры в материале после поступления в него тепла зависит от теплоемкости. Температуропроводность, отражающая скорость распространения тепловой энергии по объему материала, важна для конструкций, работающих в нестационарном режиме [15].

Для оценки влияния связующей основы на теплофизические свойства проанализированы материалы одинаковой технологии изготовления и вида наполнителя. Эксперименты выполнялись с материалами, имеющими в качестве связующей основы кристаллический каучук (Butil Rubber, IIR по ASTM) в РФ БК-2055 и аморфный бутадиен-метилстирольный каучук Styrene Butadiene Rubber (SBR по ASTM) в РФ СКМС-30АРК. Электропроводящий наполнитель – технический углерод П-234. Он выбран вследствие того, что производится в промышленных масштабах, хорошо зарекомендовал себя при формировании

электрофизических характеристик [2, 16]. Исследованы материалы с концентрацией технического углерода 80 массовых частей на 100 массовых частей каучука.

Испытания теплофизических характеристик производились методом лазерной вспышки на установке DLF-1200. Преимуществом этого метода является высокая скорость измерения с хорошей точностью и воспроизводимостью [17–19]. Эксперимент заключался в воздействии импульсом на лицевую часть образца. Результаты записывались в виде температурной кривой. Для оптимизации поглощения импульса образцы покрывались тонким слоем графита (графитовый спрей). Для измерения теплопроводности регистрировалась разница между начальной и конечной температурами тыльной стороны образца. Значение теплопроводности определялось как отношение величин теплового потока к температурному градиенту.

В программную часть прибора вводились масса, диаметр, высота и плотность материала образца. Задавались значения температур, при которых производилась лазерная вспышка. Использованы шесть точек сегмента (первый сегмент пробный). В дальнейшем для определения теплофизических характеристик его данные не участвовали. Среднее значение посчитано прибором по всем «выстрелам» лазера по образцу (пять величин). Исследования выполнены в области температур 30–70 °С. Полученные результаты представлены на рис. 1–3.

Результаты исследования

Экспериментальные данные представлены на рис. 1–3.

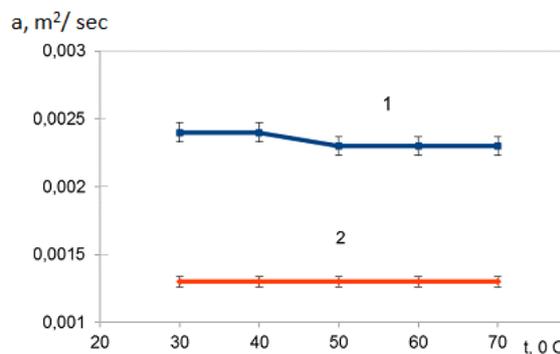


Рис. 1. Зависимость коэффициента температуропроводности от температуры: связующее 1 – БК-2055, 2 – СКМС-30АРК

Fig. 1. Dependence of thermal diffusivity on temperature: binder 1 – BK-2055, 2 – SKMS-30ARK

Полученные результаты показали следующее:

- в выбранном интервале температур их влияние на исследуемые теплофизические параметры незначительно;
- коэффициент теплопроводности в рассматриваемом диапазоне температур практически не изменяется;
- между коэффициентами теплопроводности и температуропроводности материалов имеет место прямая пропорциональная зависимость, однако диапазон изменения различен;

- значения удельной теплоемкости, коэффициентов теплоемкости и температуропроводности зависят от материала связующей основы;
- вид полимера больше влияет на температуропроводность и теплопроводность, чем на теплоемкость;
- полимерные композиционные материалы с углеродными компонентами со связующим кристаллического строения имеет лучшие теплофизические характеристики по сравнению со связующим аморфного строения.

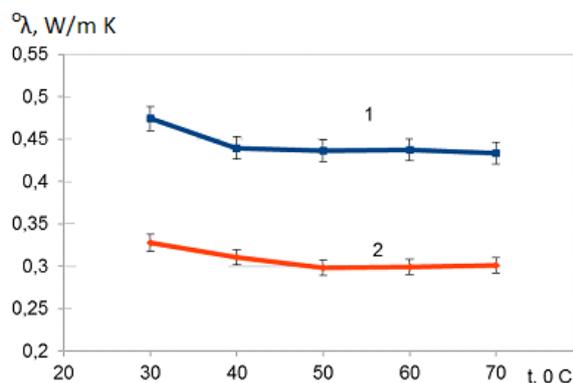


Рис. 2. Зависимость коэффициента теплопроводности от температуры: связующее 1 – BK-2055, 2 – SKMS-30ARK

Fig. 2. Dependence of thermal conductivity coefficient on temperature: binder 1 – BK-2055, 2 – SKMS-30ARK

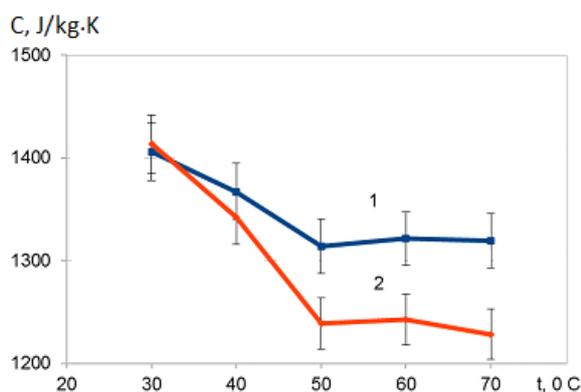


Рис. 3. Зависимость удельной теплоемкости от температуры: связующее 1 – BK-2055, 2 – SKMS-30ARK

Fig. 3. Dependence of specific heat capacity on temperature: binder 1 – BK-2055, 2 – SKMS-30ARK

Выявленные закономерности по теплофизическим характеристикам сопоставлялись с физическими характеристиками связующей основы и самого материала.

Структурные характеристики полимеров, влияющие на процессы нагрева, известны: молекулярный вес, конформационный набор макромолекул у твердой поверхности, молекулярная подвижность, меняющаяся из-за адсорбционного взаимодействия с частицами электропроводящего компонента, и т. д. [20, 21]. Проанализированы характеристики, связанные с этими процессами (табл. 1).

Таблица 1. Свойства исследуемых каучуков [22, 23]

Table 1. Properties of the studied rubbers [22, 23]

Связующая основа Bonding base	d , кг/м ³ (kg/m ³)	t , °C	$C_{уд}$, кДж/(кг·K) $C_{сп}$, kJ/(kg·K)	M , тысяч единиц M , thous. un.
БК-2055 BK-2055	910	120	1,94	35–85
СКМС-30АРК SKMS-30ARK	920	80–100	1,5–1,9	100–150

Сопоставление данных рис. 1–3 и табл. 1 позволяет сделать вывод о том, что плотность материала связующей основы несущественно влияет на исследованные теплофизические характеристики. Разница практически в два раза по молекулярному весу материала связующей основы непропорционально мало изменяет теплофизические характеристики НТУЭ.

Известно, что присутствие электропроводящего наполнителя вносит коррективы в структуру связующей основы материала. Пространственное распределение наполнителя в полимере зависит от кристалличности. Структурная организация кристаллических полимеров – наличие упорядоченных областей, чередующихся с областями беспорядка, а также большие размеры упорядоченных участков по сравнению с аморфными полимерами [20, 24].

Электропроводящий наполнитель меняет молекулярную подвижность полимера из-за взаимодействия с поверхностью частиц наполнителя. Изменение межмолекулярных взаимодействий в системе приводит к изменению плотности упаковки макромолекул. В этой связи сопоставлялись плотности исследуемых НТУЭ с содержанием кристаллической и аморфной фаз. В качестве основного параметра выбрана кристалличность, которая оценивалась методом рентгеновской дифрактометрии на дифрактометре Shimadzu XRD 7000S (CuKα-излучение, счетчик-монохроматор Shimadzu SM-3121). Значения плотности материалов и содержание кристаллической фазы представлены в табл. 2.

Таблица 2. Физические свойства объектов исследования

Table 2. Physical properties of the objects of study

Вид каучука Type of rubber	d , кг/м ³ (kg/m ³)	Фаза, процент/Phase, percentage	
		Кристаллическая Crystalline	Аморфная Amorphous
БК-2055 BK-2055	1,4065	71,23	28,77
СКМС-30АРК SKMS-30ARK	1,7731	26,04	73,96

Эксперименты показали, что диапазон изменения исследуемых теплофизических характеристик определяется в основном степенью кристалличности. При этом плотность исследуемых материалов изменяется несущественно. Сопоставление данных о степени кристалличности с данными, представленными на рис. 1–3, показало, что при увеличении степени кристалличности связующей основы значения теплофизических характеристик возрастают. Известно, что кристаллический и аморфный полимер закладывают в материале разное количество прослоек между части-

цами электропроводящего компонента, что подтверждается значениями объемного электрического сопротивления [24, 25]. Поэтому можно полагать, что уменьшение количества прослоек между частицами углеродного компонента улучшает теплофизические характеристики вследствие увеличения числа контактов между частицами электропроводящего компонента.

Заключение

Полученные результаты показали, что формирование теплофизических характеристик полимерных композиционных материалов с углеродными компонентами обусловлено процессами изменения структуры полимера за счет взаимодействия с частицами углеродного компонента. Установлено, что теплофизические характеристики зависят от содержания кристаллической фазы в структуре материала. При возрастании количества кристаллической фазы в поли-

мере имеет место увеличение количественных значений теплофизических характеристик.

Результаты проведенных исследований позволяют рекомендовать использование полимерных композиционных материалов с углеродными компонентами с учетом теплового режима работы конструкций. Для конструкций, работающих в неравновесных тепловых режимах, целесообразно выбирать материал с кристаллическим каучуком в качестве связующей основы. При необходимости увеличения скорости подъема температуры при нагреве материала, например, для термисторов, необходим связующий компонент с увеличенным содержанием аморфной фазы.

Авторы благодарны инженеру Инженерной школы энергетики ТПУ Артуру Насырбаеву за помощь в выполнении измерений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Quijada C. Conductive polymers: materials and applications // *Materials*. – 2020. – V. 13. – № 10. – P. 2344–2348.
2. Минакова Н.Н., Ушаков В.Я. Полимеры с углеродными наполнителями для мощных резисторов // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2018. – Т. 329. – № 2. – С. 74–80.
3. Szadkowski B., Marzec A., Zaborski M. Effect of different carbon fillers on the properties of nitrile rubber composites // *Composite Interfaces*. – 2019. – V. 26. – № 8. – P. 729–750.
4. Эластомеры и полимерные композиции для нефтепромышленного оборудования. Проблемы и возможности / И.С. Пятов, С.В. Тихонова, А.И. Салимон, Л.В. Воробьева, В.В. Лунев, Л.Э. Фомичева // ООО «PEAM-PTI». URL: <https://ream-rti.ru/upload/iblock/ae0/ae0e77ad7e2c4dbe88098556f439ac345.pdf> (дата обращения 15.03.2023).
5. Chen J. et al. Advances in responsively conductive polymer composites and sensing applications // *Polymer Reviews*. – 2021. – V. 61. – № 1. – P. 157–193.
6. Gao Q., Liu J., Liu X. Electrical conductivity and rheological properties of carbon black based conductive polymer composites prior to and after annealing // *Polymers and Polymer Composites*. – 2021. – V. 29. – № 9. – P. S288–S295.
7. He X., Wang Y. Recent advances in the rational design of thermal conductive polymer composites // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. – 2021. – V. 60. – № 3. – P. 1137–1154.
8. Zhansakova K.S., Russkikh G.S., Eremin E.N. The effect of vulcanization accelerator on the properties of porous rubber // *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*. – 2021. – V. 14. – № 2. – P. 215–221.
9. Minakova N.N., Ushakov V.Ya. Stochastic and deterministic modeling of spatially oriented structures in dispersion-filled polymers // *Polymer Science – Series A*. – 1998. – V. 40 (9). – P. 1025–1029.
10. Brunella V. et al. Thermal/electrical properties and texture of carbon black PC polymer composites near the electrical percolation threshold // *Journal of Composites Science*. – 2021. – V. 5. – № 8. – P. 212.
11. Волков Д.П., Егоров А.Г., Мироненко М.Э. Теплофизические свойства полимерных композиционных материалов // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. – 2017. – Т. 17. – № 2. – С. 287–293.
12. Экспериментальная оценка теплофизических характеристик высокотемпературных теплоизоляционных материалов / Томак В.И., Бурков Ф.С., Рыцарев А.М., Товстоног В.А. // *Вестник Московского государственного технического университета им. НЭ Баумана. Серия «Естественные науки*». – 2020. – № 2 (89). – С. 99–116.
13. Фокин В.М., Бойков Г.П., Видин Ю.В. Основы технической теплофизики. – М.: Машиностроение, 2004. – 172 с.
14. Крейт О., Блек У. Основы теплопередачи. – М.: Мир, 1983. – 256 с.
15. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. – М.: Энергия, 1981. – 416 с.
16. Bortnikov A.Yu., Minakova N. Structure analysis of electrically conductive polymers filled with agglomerated components // *Russian Physics Journal*. – 2006. – V. 49 (11). – P. 1165–1170.
17. Cowan R.D. Pulse method of measuring thermal diffusivity at high temperatures // *J. of Appl. Phys.* – 1963. – V. 34. – P. 926.
18. Cape J.A., Lehman G.W. Temperature and finite pulse-time effects in the flash method for measuring thermal diffusivity // *J. of Appl. Phys.* – 1963. – V. 34. – P. 1909.
19. Инструкция по работе с прибором DLF-1200. URL: <https://www.directindustry.com.ru/prod/ta-instruments/product-38477-1796308.html> (дата обращения 15.02.2023).
20. Гуль В.Е., Шенфиль Л.З. Электропроводящие полимерные композиты. – М.: Химия, 1984. – 226 с.
21. Бартнев Г.М., Френкель С.Я. Физика полимеров. – Л.: Химия, 1990. – 432 с.
22. Энциклопедия полимеров. В 3 т. Т. 1 / под ред. В.А. Каргина. – М.: Сов. энциклопедия, 1972. – 1196 с.
23. Справочник химика 21. Химия и химическая технология. URL: <https://www.chem21.info/info/312232/> (дата обращения 15.03.2023).
24. Minakova N.N., Karpov S.A., Ushakov V.Ya. Texture method of studying the resistance properties of disperse-filled elastomers // *Russian Physics Journal*. – 2000. – V. 43 (10). – P. 821–828.
25. Minakova N.N., Karpov S.A., Ushakov V.Ya. Texture analysis of the disperse structure of composite elastomers with a modified carbon filler // *Russian Physics Journal*. – 2002. – № 45 (2). – P. 185–189.

Поступила: 03.04.2023 г.

Прошла рецензирование: 26.05.2023 г.

Информация об авторах

Минакова Н.Н., доктор физико-математических наук, профессор, кафедра информационной безопасности Алтайского государственного университета.

Ушаков В.Я., доктор технических наук, заслуженный деятель науки и техники РФ, профессор отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 620.9:538.9

THERMOPHYSICAL CHARACTERISTICS OF POLYMERIC COMPOSITE MATERIALS WITH CARBON COMPONENTS FOR ELECTRICAL DEVICES

Natalya N. Minakova¹,
minakova@asu.ru

Vasily Ya. Ushakov²,
vyush@tpu.ru

¹ Altai State University,
61, Lenin avenue, Barnaul, 656049, Russia.

² National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

The relevance of the work is caused by the need to further improve the properties of composite materials – their manufacturability, resource and energy efficiency. The scope of such materials is expanding, covering, among other things, the exploration and production of oil and gas resources, due to the possibility of regulating their properties over a wide range. Resistive and insulating products made of polymer materials with carbon components are characterized by low weight and cost, as well as the availability of raw materials and industrial manufacturing technology. The variety of processes in filled polymers used in resistive structures at elevated temperatures requires the study of their thermophysical characteristics, which determine the processes of heat transfer in the material. Heat release and heat transfer in them are realized at different levels: electrically conductive mesh immersed in a polymer matrix. This makes it relevant to study thermophysical characteristics, which are formed due to a wide range of parameters.

Purpose: to study the thermophysical characteristics of rubbers filled with carbon black to increase the efficiency of their use in products and structures; to reveal the effect of carbon components on the thermophysical and structural characteristics of polymer composite materials.

Methods: instrumental measurements of thermophysical characteristics of materials, X-ray diffraction, statistical and correlation analyses.

Results. It was experimentally confirmed that thermophysical characteristics (heat capacity, thermal conductivity, thermal diffusivity) depend on the type of binder base. Their relationship with the physical properties of the binder base and composite material is analyzed. The dependence of thermophysical characteristics on the degree of crystallinity of the binder component in the composite material was established – with an increase in the content of the crystalline phase in the polymer, the heat capacity, thermal conductivity and thermal diffusivity increase. Recommendations are formulated for the selection of a binder material for polymer composite materials with carbon components, depending on the nature of the thermal regime of the structure, for example, when operating in non-stationary thermal regimes.

Key words:

Resource saving, polymer composite materials with carbon components, elastomers filled with carbon black, laser flash method, thermophysical characteristics, thermal conductivity coefficient, specific heat capacity, thermal diffusivity coefficient, heat exchange, heat transfer, crystalline phase.

The authors appreciate the assistance of Artur Nasyrbaev, engineer at School of Energy and Power Engineering TPU, in measuring.

REFERENCES

- Quijada C. Conductive polymers: materials and applications. *Materials*, 2020, vol. 13, no. 10, pp. 2344. Available at: <https://www.mdpi.com/1996-1944/13/10/2344/html> (accessed 15 February 2022).
- Minakova N.N., Ushakov V.Ya. Polymers with carbon fillers for powerful resistors. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 2, pp. 74–80. In Rus.
- Szadkowski B., Marzec A., Zaborski M. Effect of different carbon fillers on the properties of nitrile rubber composites. *Composite Interfaces*, 2019, vol. 26, no. 8, pp. 729–750.
- Pyatov I.S., Tikhonova S.V., Salimon A.I., Vorobyeva L.V., Lunev V.V., Fomicheva L.E. *Elastomery i polimernye kompozitsii dlya neftepromysloвого oborudovaniya. Problem i vozmozhnosti* [Elastomers and polymeric compositions for oil-field equipment. Problems and possibilities]. OOO «REAM-RT». Available at: <https://ream-rti.ru/upload/iblock/ae0/ae0e77ad7e2cdbe88098556f439ac345.pdf> (accessed 15 February 2022).
- Chen J. Advances in responsively conductive polymer composites and sensing applications. *Polymer Reviews*, 2021, vol. 61, no. 1, pp. 157–193.
- Gao Q., Liu J., Liu X. Electrical conductivity and rheological properties of carbon black based conductive polymer composites prior to and after annealing. *Polymers and Polymer Composites*, 2021, vol. 29, no. 9, pp. 288–295.
- He X., Wang Y. Recent advances in the rational design of thermal conductive polymer composites. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2021, vol. 60, no. 3, pp. 1137–1154.
- Zhansakova K.S., Russkikh G.S., Eremin E.N. The effect of vulcanization accelerator on the properties of porous rubber. *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*, 2021, vol. 14, no. 2, pp. 215–221.
- Minakova N.N., Ushakov V.Ya. Stochastic and deterministic modeling of spatially oriented structures in dispersion-filled polymers. *Polymer Science – Series A*, 1998, vol. 40 (9), pp. 1025–1029.
- Brunella V. Thermal/electrical properties and texture of carbon black PC polymer composites near the electrical percolation threshold. *Journal of Composites Science*, 2021, vol. 5, no. 8, pp. 212–220.
- Volkov D.P., Egorov A.G., Mironenko M.E. Thermophysical properties of polymer composite materials. *Scientific and technical bulletin of information technologies, mechanics and optics*, 2017, vol. 17, no. 2, pp. 287–293.
- Tomak V.I., Burkov F.S., Rytsarev A.M., Tovstonog V.A. Experimental assessment of the thermophysical characteristics of high-temperature heat-insulating materials. *Bulletin of the*

- Moscow State Technical University named after N. Bauman. Series «Natural Sciences», 2020, no. 2 (89), pp. 99–116.
13. Fokin V.M., Boikov G.P., Vidin Yu.V. *Fundamentals of technical thermal physics*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2004. 172 p.
 14. Kreit O., Black U. *Osnovy teploperedachi* [Fundamentals of heat transfer]. Moscow, Mir Publ., 1983. 256 p.
 15. Isachenko V.P., Osipova V.A., Sukomel A.S. *Teploperedacha* [Heat transfer]. Moscow, Energiya Publ., 1981. 416 p.
 16. Bortnikov A.Yu., Minakova N. Structure analysis of electrically conductive polymers filled with agglomerated components. *Russian Physics Journal*, 2006, vol. 49 (11), pp. 1165–1170.
 17. Cowan R.D. Pulse method of measuring thermal diffusivity at high temperatures. *Journal of Applied Physics*, 1963, vol. 34, 926.
 18. Cape J.A., Lehman G.W. Temperature and finite pulse-time effects in the flash method for measuring thermal diffusivity. *Journal of Applied Physics*, 1963, vol. 34, 1909.
 19. *Instruktsiya po rabote s priborom DLF-1200* [Instructions for working with the DLF-1200 device]. Available at: <https://www.directindustry.com.ru/product/ta-instruments/product-38477-1796308.html> (accessed 15 February 2023).
 20. Gul V.E., Shenfil L.Z. *Elektroprovodyashchie polimernye kompozity* [Electrically conductive polymer composites]. Moscow, Khimiya Publ., 1984. 226 p.
 21. Bartenev G.M., Frenkel S.Ya. *Fizika polimerov* [Physics of polymers]. Leningrad, Khimiya Publ., 1990. 432 p.
 22. *Entsiklopediya polimerov* [Encyclopedia of polymers]. Ed. by V.A. Kargin. Moscow, Sovetskaya entsiklopediya Publ., 1972. Vol. 1, 1196 p.
 23. *Spravochnik khimika 21. Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya* [Reference book for a chemist. Chemistry and chemical technology]. Available at: <https://www.chem21.info/info/312232/> (accessed 15 March 2023).
 24. Minakova N.N., Karpov S.A., Ushakov V.Ya. Texture method of studying the resistance properties of disperse-filled elastomers. *Russian Physics Journal*, 2000, vol. 43, no. 10, pp. 821–828.
 25. Minakova N.N., Karpov S.A., Ushakov V.Ya. Texture analysis of the disperse structure of composite elastomers with a modified carbon filler. *Russian Physics Journal*, 2002, vol. 45, no. 2, pp. 185–189.

Received: 3 April 2023.
Reviewed: 26 May 2023.

Information about the authors

Natalya N. Minakova, Dr. Sc., professor. Altai State University.

Vasily Ya. Ushakov, Dr. Sc., professor. National Research Tomsk Polytechnic University.