

УДК 620.9:538.9
DOI: 10.18799/24131830/2025/8/5262
Шифр специальности ВАК: 1.3.14
Научная статья

Сравнительная оценка влияния особенностей технологии на теплофизические характеристики наполненных эластомеров с углеродным компонентом

Н.Н. Минакова^{1✉}, В.Я. Ушаков²

¹Алтайский государственный университет, Россия, г. Барнаул

²Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск

✉ minakova@asu.ru

Аннотация. *Актуальность* работы обусловлена необходимостью комплексного изучения свойств полимерных композиционных материалов с углеродными компонентами, для которых характерны ресурсная, энергетическая и экологическая эффективность. К важным их достоинствам относятся промышленная технология изготовления, невысокая стоимость, небольшой вес. Такие особенности делают их перспективными в качестве материалов для изделий, применяемых в разведке и добыче нефтегазовых ресурсов. Материалы работают при различных эксплуатационных воздействиях: внешней среды (воздух, трансформаторное масло), механических деформациях и т. д. Эксплуатация таких материалов сопровождается регулируемыми процессами теплообмена и теплопередачи, например, для обеспечения требуемых тепловых режимов при транспортировке нефти и газа по трубопроводам. В этой связи актуальны экспериментальные исследования теплофизических характеристик материалов, из которых по промышленной технологии изготавливаются изделия разнообразных форм для нужд нефтегазовой отрасли. *Цель:* изучение теплофизических характеристик наполненных эластомеров с углеродными компонентами в зависимости от технологических режимов изготовления изделий. *Методы:* инструментальное измерение теплофизических характеристик, рентгеноструктурный, статистический и корреляционный анализы. *Результаты.* Для наполненных эластомеров с углеродными компонентами изучены зависимости теплоемкости, теплопроводности, температуропроводности от особенностей технологии (способа профилирования и вулканизации изделия). Выявлены закономерности изменения характеристик. Установлено, что изменение способа профилирования и вулканизации больше влияет на коэффициенты теплопроводности и температуропроводности, чем на теплоемкость. Проанализирована их связь с характеристиками структуры материала. На основании выполненных исследований предложены рекомендации по подбору технологии в зависимости от области применения конечных изделий.

Ключевые слова: наполненные эластомеры, технический углерод, экструзия, профилирование, теплопроводность, теплоемкость, температуропроводность

Благодарность: Авторы благодарны Артуру Насырбаеву, инженеру Инженерной школы энергетики Томского политехнического университета, за помощь в выполнении измерений.

Для цитирования: Минакова Н.Н., Ушаков В.Я. Сравнительная оценка влияния особенностей технологии на теплофизические характеристики наполненных эластомеров с углеродным компонентом // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 8. – С. 171–178. DOI: 10.18799/24131830/2025/8/5262

UDC 620.9:538.9
DOI: 10.18799/24131830/2025/8/5262
Scientific paper

Comparative assessment of technology features impact on thermophysical characteristics of filled elastomers with a carbon component

N.N. Minakova^{1✉}, V.Ya. Ushakov²

¹ Altai State University, Barnaul, Russian Federation

² National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

✉ minakova@asu.ru

Abstract. Relevance. The need for a comprehensive study of the properties of polymer composite materials with carbon components, which are characterized by resource, energy and environmental efficiency. Their important advantages include industrial manufacturing technology, low cost, and light weight. Such features make them promising as materials for products used in the exploration and production of oil and gas resources. The materials operate under the impact of changing external environments, mechanical effects and other factors. The operation of such materials is accompanied by controlled processes of heat exchange and heat transfer, for example, to ensure the required thermal conditions during oil and gas transportation through pipelines. In this regard, experimental studies of the thermophysical characteristics of materials, from which products of various shapes for the needs of the oil and gas industry are manufactured, using industrial technology, are relevant. **Aim.** To study the impact of technology features on thermophysical characteristics of filled elastomers with a carbon component. **Objective.** Dependencies of the thermophysical characteristics of filled elastomers with carbon components on the technological modes of manufacturing products of a wide range of shapes from them. **Methods.** Instrumental measurement of thermophysical characteristics, X-ray structural, statistical and correlation analysis. **Results.** The authors have studied the dependences of heat capacity, thermal conductivity, and thermal diffusivity on the technology features (product profiling and vulcanization method) for filled elastomers with carbon components. They revealed the patterns of change in characteristics. It was found that changing the profiling and vulcanization method has a greater effect on thermal conductivity and thermal diffusivity coefficients than on heat capacity. Their relationship with the characteristics of the material structure was analyzed. Based on the studies performed, recommendations were proposed for selecting a technology depending on the area of application of the final products.

Keywords: filled elastomers, carbon black, extrusion, profiling, thermal conductivity, heat capacity, thermal diffusivity

Acknowledgments: The authors are grateful to Artur Nasyrbaev, the engineer of the Engineering School of Power Engineering of Tomsk Polytechnic University, for assistance in performing the measurements.

For citation: Minakova N.N., Ushakov V.Ya. Comparative assessment of technology features impact on the thermophysical characteristics of filled elastomers with a carbon component. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 8, pp. 171–178. DOI: 10.18799/24131830/2025/8/5262

Введение

В нефтегазовой промышленности композиционные материалы с углеродными компонентами применяются для решения широкого круга задач [1–3]. Необходимы материалы, удовлетворяющие потребителей по ряду свойств: электрофизических, теплофизических, механических и т. д.

В типовых резинотехнических изделиях технический углерод из-за небольшого количества не образует пространственной электропроводящей сетки. Он улучшает механические свойства резин (прочность, износостойкость), делая их пригодными для использования в качестве изоляционных изделий, подвергающихся механическим нагрузкам.

Резистивные композиционные материалы применяются в энергетическом оборудовании на объектах

магистральных трубопроводов, в установках обезвоживания нефти, датчиках, катодной защите трубопроводов и т. д. [4, 5]. Одна из перспективных областей применения наполненных эластомеров с углеродным компонентом – экраны кабелей. Для нефтегазовой промышленности необходимы силовые гибкие кабели, кабели для электродвигателей погружных нефтегазовых насосов, кабели управления и передачи данных и др. [6]. Все они отличаются друг от друга предъявляемыми к ним требованиями по набору свойств. Наполненные эластомеры с углеродным компонентом могут работать как фазопереходные теплоаккумулирующие системы, что позволяет решать задачи экономии электроэнергии [7].

Перспективность использования резистивных композиционных материалов в широком спектре

применений связана с особенностями их структуры: электропроводящие частицы помещены в сетку связующей основы – полимера (эластомера). Она закладывается как исходными компонентами, так и технологическим процессом [8–10]. Материалы можно использовать при производстве изделий с широким диапазоном функциональных свойств, в том числе при экструзивном профилировании формировать изделия различных габаритов и форм (крупногабаритные монолитные, пленочные и др.) [11, 12]. Как известно, форма изделий, как и свойства, во многом зависит от технологии.

Наполненные резистивные эластомерные композиционные материалы с углеродным компонентом изготавливаются по стандартной для шинной и резинотехнической продукции промышленной технологии. Основные стадии технологического процесса – смешение, профилирование, вулканизация [13].

Рассматриваемые материалы, в отличие от применяемых в резинотехнической промышленности изделий, обладают резистивными свойствами из-за повышенной концентрации технического углерода. Для них подбираются дополнительные ингредиенты, уменьшающие повышенный разогрев [1, 10]. Разрабатываются технологии, обеспечивающие высокое качество изделий и снижение их себестоимости. Это улучшает ресурсоэффективность, минимизирует отходы при изготовлении изделий, увеличивает срок службы, что повышает конкурентоспособность.

В технологическом процессе на компоненты материала воздействуют высокие температуры, механические напряжения деформации сдвига. В потоке высоковязкой жидкости происходит диспергирующее смешение. Имеет место комплекс процессов, в том числе и деструктивных, например, в вязкотекучем состоянии имеет место деструкция полимеров [14, 15]. В процессе течения под действием нагрузки макромолекулы взаимодействуют друг с другом, что сопровождается изменением поверхности раздела компонентов смеси. Происходят взаимодействия в граничных слоях, диффузионные процессы, как сегментов концевых групп макромолекул, так и частиц углеродного компонента в полимерную матрицу [16, 17]. Макромолекулы увеличивают диспергирующий эффект частиц углеродного компонента. Параллельно со случайными разрывами связей в макромолекулах при деструкции полимеров происходит их присоединение [18]. Присутствие углеродного компонента увеличивает точки сшивания, реализует химическое или механическое соединение, что обеспечивает трехмерную сетку углеродного компонента в эластомере [19]. Таким образом, на свойства композиционного материала влияет многофакторный технологический процесс.

Установлено, что теплофизические характеристики наполненных техническим углеродом каучу-

ков формируются под влиянием технологии, воздействующей на молекулярную структуру связующего, граничные слои из-за межфазных процессов, связанных с химическими и физико-химическими взаимодействиями составляющих смеси и т. д. [20–22]. Это исключает корректное теоретическое прогнозирование. Поэтому влияние технологии на теплофизические характеристики наполненных эластомеров с углеродными компонентами изучается экспериментально. Результаты исследования зависимости теплофизических характеристик от компонентов структуры изложены в [23].

В данной работе продолжено исследование влияния особенностей технологии на теплофизические характеристики наполненных эластомеров с углеродным компонентом для решения следующих задач:

- определения теплофизических характеристик материалов при двух технологиях изготовления, отличающихся способами профилирования и вулканизации;
- сравнения их между собой, выявления закономерности влияния технологии на теплофизические характеристики;
- оценки связи полученных закономерностей с характеристиками структуры материала.

Объекты и методы исследования

В качестве углеродного компонента применялся печной технический углерод П-234, изготавливаемый промышленным способом. Связующая основа – нитрильный каучук СКН-40. Концентрация технического углерода – 80 весовых частей на 100 весовых частей каучука. Выбраны технологии изготовления материалов, существенно отличающиеся способом профилирования и параметрами процесса вулканизации. Рассмотрены две технологии переработки материалов на основе эластомеров. Одна включает профилирование и вулканизацию в прессформе. Другая технология разработана для пластичных смесей (беспрессовая) и включает профилирование наполненных эластомеров с углеродным компонентом в шприцмашине и вулканизацию в паровом котле [13]. При беспрессовой технологии после профилирования происходит вулканизация в паровом котле без прессформы, где применяется меньшее по величине давление, чем в прессовой [11]. Такая технология уменьшает дефекты, обусловленные течением смеси в прессформе.

Рассматриваемые технологии значительно различаются величиной давления во время вулканизации. При прессовой технологии давление на прессформу при вулканизации составляет 125 атм, при беспрессовой технологии давление в паровом котле 6 атм [10, 19]. В процессе вулканизации между макромолекулами происходит сшивание, формируются поперечные связи с образованием трехмерной сетевой струк-

туры, что влияет на структуру и, соответственно, на свойства композиционного материала [15].

Исследованы температуропроводность, теплопроводность, теплоёмкость наполненных эластомеров с углеродным компонентом. Применена установка DLF-1200, в которой используется метод лазерной вспышки [24]. Исходные данные для определения характеристик: масса, диаметр, высота и плотность материала образца. Диапазон температур, при которых производилась лазерная вспышка, составлял 30–70 °С. Рентгеновские дифрактограммы снимались при температуре 20 °С, на дифрактометре Shimadzu XRD 7000S (CuK α -излучение, счетчик-монохроматор Shimadzu CM-3121). Степень кристалличности (C_k) рассчитывалась на основе метода Германа–Вейдингера [24]. Полученные результаты измерения обрабатывались с помощью методов описательной статистики и корреляционного анализа.

Результаты исследования

Полученные результаты представлены на рис. 1–3. Диапазон изменения анализируемых показателей указан на рис. 4.

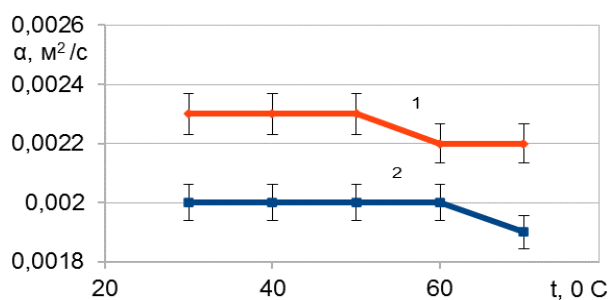


Рис. 1. Зависимость коэффициента температуропроводности от температуры. Технологии: 1 – прессовая (P=125 атм), 2 – беспрессовая (P=6 атм)

Fig. 1. Thermal diffusivity coefficient dependence on temperature. Technologies: 1 – press (P=125 atm), 2 – non-press (P=6 atm)

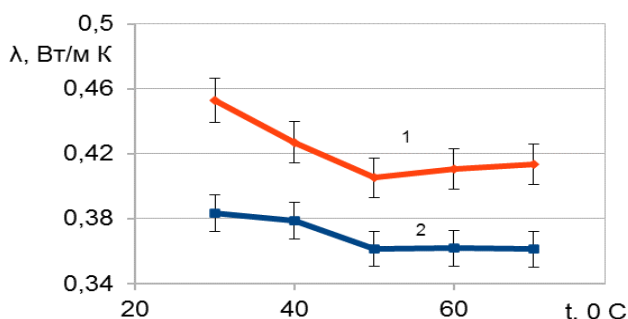


Рис. 2. Зависимость коэффициента теплопроводности от температуры. Технологии: 1 – прессовая (P=125 атм), 2 – беспрессовая (P=6 атм)

Fig. 2. Thermal conductivity coefficient dependence on temperature. Technologies: 1 – press (P=125 atm), 2 – non-press (P=6 atm)

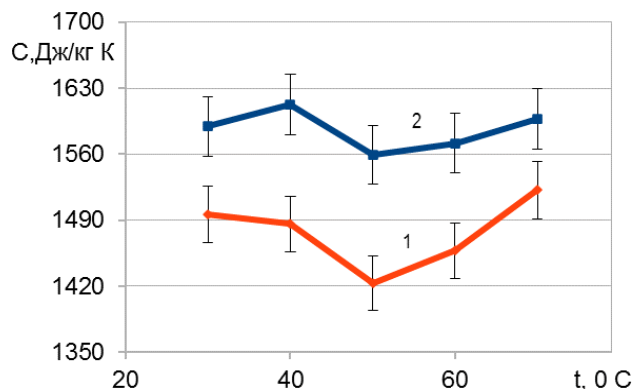


Рис. 3. Зависимость удельной теплоемкости от температуры. Технологии: 1 – прессовая (P=125 атм), 2 – беспрессовая (P=6 атм)

Fig. 3. Specific heat capacity dependence on temperature. Technologies: 1 – press (P=125 atm), 2 – non-press (P=6 atm)

Анализ полученных результатов выявил, что теплофизические параметры зависят от изучаемых характеристик технологии изготовления, однако в разной степени:

1. Влияние температуры (диапазон 30–70°) на рассматриваемые теплофизические характеристики незначительно (рис. 1, 2). При повышении температуры в рассматриваемом диапазоне меньше изменяется теплоемкость, больше – коэффициенты теплопроводности и температуропроводности.
2. При замене прессовой технологии на беспрессовую влияние на коэффициенты температуропроводности и теплопроводности примерно одинаково. Материалы, полученные по прессовой технологии, имеют теплопроводность и температуропроводность больше, чем по беспрессовой во всем диапазоне рассматриваемых температур (рис. 1, 2). Влияние на теплоемкость изменяется на противоположное, т. е. в первом случае величина уменьшается, во втором увеличивается (рис. 3).
3. При изменении температуры (рис. 3) наблюдается локальный экстремум. Он может быть связан с образованием дополнительных электропроводящих каналов из-за перераспределения частиц технического углерода при случайных диффузионных процессах. Увеличение электропроводности уменьшает теплоемкость. При нагреве с разной интенсивностью протекают разнотемпературные процессы. Можно полагать, что при дополнительном тепловом воздействии связи «полимер–наполнитель» могут быть ослаблены. Разрушение электропроводящих каналов уменьшает электропроводность, соответственно, повышает теплоемкость.

4. Влияние технологии на теплопроводность и температуропроводность больше, чем на теплоемкость. Значения характеристик изменяются не менее чем в 2 раза (рис. 4, 5).

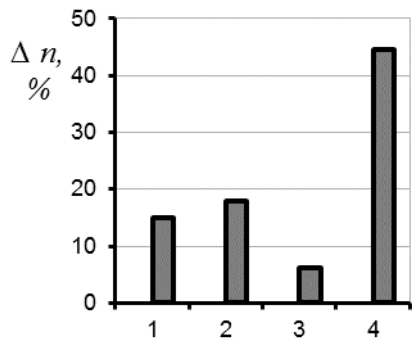


Рис. 4. Диапазон изменения показателей: 1 – температуропроводность, 2 – теплопроводность, 3 – теплоемкость; (1–3 – температура 30 °C); 4 – степень кристалличности

Fig. 4. Range of change of indicators: 1 – thermal diffusivity, 2 – thermal conductivity, 3 – heat capacity; (1–3 – 30°C); 4 – degree of crystallinity

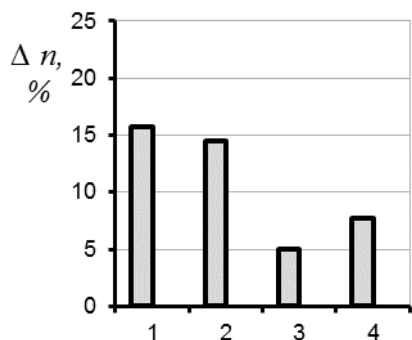


Рис. 5. Диапазон изменения показателей: 1 – температуропроводность, 2 – теплопроводность, 3 – теплоемкость; (1–3 – температура 70 °C); 4 – плотность

Fig. 5. Range of change of indicators: 1 – thermal diffusivity, 2 – thermal conductivity, 3 – heat capacity; (1–3 – 70°C); 4 – density

Выявленные закономерности сравнивались с характеристиками структуры материала. Описанное выше влияние технологии на структуру композиционного материала показывает, что технологический цикл обуславливает механохимические реакции в полимерной матрице [25]. Расплавление смеси сопровождается деформированием и разрывом химических связей.

Полимеры имеют длинные макромолекулы, из-за чего требуется больше энергии для повышения их температуры по сравнению с короткими. Теплоперенос происходит по цепочке макромолекул,

между атомами и группами атомов или группами атомов боковых ответвлений [22, 25]. В технологическом процессе макромолекулы могут как разрушаться, так и соединяться друг с другом. Цепи макромолекул при высоких температурах и деформациях подвергаются внутреннему трению. Реализация свободно радикального механизма приводит к рекомбинации радикалов, их распаду, образованию низкомолекулярных соединений. Это изменяет молекулярный вес макромолекул, ведет к образованию областей вязкого состояния и уплотненных или кристаллических областей различных размеров [15, 19].

Перенос тепловой энергии в полимерных композиционных материалах зависит от молекулярной и надмолекулярной структуры полимера [22, 26]. Тепловые процессы в резистивных полимерных композиционных материалах реализуются не только на макроуровне (в электропроводящей сетке), но и в единичных контактах (проводящая фаза – полимер – проводящая фаза), которые при одинаковых компонентах смеси имеют большое различие в параметрах при разных технологиях изготовления [19, 26].

На основании изложенного для выявления взаимосвязи «структура–свойства» в исследуемых материалах анализировались плотность материала и степень кристалличности. Установлена корреляционная связь между теплофизическими характеристиками и рассматриваемыми характеристиками структуры. Выявлено, что степень кристалличности зависит от технологии значительно больше, чем плотность материала (рис. 4). Однако теплофизические характеристики изменяются существенно меньше, чем степень кристалличности. Зависимость плотности материалов от рассматриваемых технологий также существенно меньше, чем коэффициентов температуропроводности и теплопроводности. Изменение значений теплоемкости и плотности материалов практически сопоставимы (рис. 4).

Заключение

Установлено, что теплофизические характеристики полимерных композиционных материалов с углеродными компонентами слабо изменяются при замене прессовой технологии на беспрессовую. Удельная теплоемкость практически не изменяется. Коэффициенты температуропроводности и теплопроводности изменяются незначительно, что практически не сказывается на сохранении теплозащитных свойств. При невысоких значениях теплопроводности уменьшаются потери тепла, улучшаются теплоизоляционные свойства, снижаются потери энергии при транспортировке, что улучшает энергоэффективность конструкции.

Данные материалы могут применяться для теплоизоляции изделий практически любой формы благодаря их пластичности. При этом изменение формы изделий практически не ухудшает их теплофизические характеристики. Однако некоторое уменьшение коэффициента теплопроводности может увеличить время выравнивания температуры, поэтому материалы беспрессовой технологии целесообразно применять в стационарных тепловых полях.

Полученные результаты дают основания полагать, что рассматриваемые материалы могут при-

меняться в виде крупногабаритных изделий, пластин, пленок различной толщины и размера, могут работать практически в тех же тепловых режимах, что и материалы прессовой технологии. Многообразие форм изделий позволяет применять их по широкому спектру назначений, что увеличивает применимость материалов при разработке конструкций. Можно ожидать, что потребительские свойства наполненных эластомеров с углеродными компонентами продолжают улучшаться, а область их применения – расширяться.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Quijada C. Conductive polymers: materials and applications // *Materials*. – 2020. – Vol. 13. – № 10. – P. 2344–2348.
2. 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. URL: <https://ream-rti.ru/upload/iblock/ae0/ae0e77ad7e2cdbc88098556f439ac345.pdf> (дата обращения 07.04.2025).
3. Advances in responsively conductive polymer composites and sensing applications / J. Chen, Y. Zhu, J. Huang, J. Zhang // *Polymer Reviews*. – 2021. – Vol. 61. – P. 157–193.
4. 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. – № 9. – P. S288–S295.
5. Improved electrical conductivity of polymer/carbon black composites by simultaneous dispersion and interaction-induced network assembly / B. Zhang, B. Guo, J. Yu, Z. Guo // *Composites Science and Technology*. – 2019. – Vol. 179. – P. 106–114.
6. Structure-performance relationship of polypropylene/elastomer/carbon black composites as high voltage cable shielding layer / X. Zhang, S. Hu, S. Huang, Y. Zhou, W. Zhang // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. – 2024. – Vol. 185. – P. 108334.
7. Аксененко А.Ю. Инновационные технологии электрообогрева для обеспечения бесперебойных процессов добычи и транспортировки нефти и газа // *Нефть. Газ. Новации*. – 2020. – № 9. – С. 76–78.
8. Саввинова М.Е. Электропроводящие полимерные композиционные материалы электротехнического назначения // *Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки*. – 2015. – № 4 (185). – С. 44–49.
9. An electrically conductive polymer composite with a co-continuous segregated structure for enhanced mechanical performance / Y. Xu, Y. Wang, C. Zhou, W. Sun, K. Dai, J. Tang, J. Lei, D. Yan // *Journal of Materials Chemistry*. – 2020. – Vol. 8. – P. 11546–11554.
10. Минакова Н.Н., Карпов С.А., Ушаков В.Я. Текстурированный метод исследования резистивных свойств дисперсно-наполненных эластомеров // *Известия вузов. Физика*. – 2000. – Т. 43. – № 10. – С. 16–23.
11. Fatigue-crack-propagation behavior and mechanism of long hemp-fiber-enhanced styrene-butadiene rubber/carbon black compounds / J. Liang, H. Zhang, Z. Luo, J. Zhong // *Polymer Composites*. – 2024. – Vol. 45. – № 4. – P. 2941–2953.
12. Enhancing electrical characteristics and electromagnetic interference shielding effectiveness in thermoplastic elastomeric polymer blends by utilizing the selective distribution of conductive black / S. Choudhury, J. Nayak, P. Das, A. Pal // *Functional Composite Materials*. – 2024. – Vol. 5. – № 1. – P. 4.
13. Кошелев Ф.Ф., Корнев А.Е., Климов Н.С. Общая технология резины. – М.: Химия, 1978. – 528 с.
14. Цобкалло Е.С., Москалюк О.А., Степашкина А.С. Функциональные композиционные полимерные материалы электротехнического назначения // *Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета)*. – 2020. – № 52. – С. 28–35.
15. Липатов Ю.С. Физико-химические основы наполнения полимеров. – М.: Химия, 1991. – 260 с.
16. Heat diffusivity and mechanical properties of a tire bladder composite in the presence of ceramic fillers / M. Shiva, M. Ahmadi, E. Esmaili, M. Zivdar // *Polymer Bulletin*. – 2024. – Vol. 81. – № 2. – P. 1635–1649.
17. Gu H., Yao F. An overview of three-dimensional fillers-polymer composites: fabrications and applications for electronics and energy storage // *Polymer Reviews*. – 2024. – Vol. 64. – № 4. – P. 1322–1386.
18. Де Жен П. Идеи скейлинга в физике полимеров. – М.: Мир, 1982. – 376 с.
19. Гуль В.Е., Шенфиль Л.З. Электропроводящие полимерные композиты. – М.: Химия, 1984. – 226 с.
20. From the whole process of making thermal conductive polymer, the effective method of improving thermal conductivity / X. Wu, X. Zhang, X. Yan, C. Zhang // *Journal of Polymer Science*. – 2024. – Vol. 62. – № 11. – С. 2410–2442.
21. He X., Wang Y. Recent advances in the rational design of thermal conductive polymer composites // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. – 2021. – Vol. 60. – № 3. – P. 1137–1154.
22. Фокин В.М., Бойков Г.П., Видин Ю.В. Основы технической теплофизики. – М.: Машиностроение, 2004. – 172 с.
23. Минакова Н.Н., Ушаков В.Я. Теплофизические характеристики полимерных композиционных материалов с углеродными компонентами для электротехнических устройств // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2023. – Т. 334. – № 6. – С. 134–139.
24. Инструкция по работе с прибором DLF-1200. URL: <https://www.directindustry.com.ru/prod/ta-instruments/product-38477-1796308.html> (дата обращения 22.03.2025).
25. Тагер А.А. Физико-химия полимеров. – М.: Научный мир, 2007. – 576 с.
26. 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.

Информация об авторах

Наталья Николаевна Минакова, доктор физико-математических наук, профессор, кафедра информационной безопасности Алтайского государственного университета, Россия, 656049, г. Барнаул, пр. Ленина, 61. minakova@asu.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7665-8069>

Василий Яковлевич Ушаков, заслуженный деятель науки и техники РФ, доктор технических наук, профессор отделения энергетики и электротехники Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. vyush@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2931-2086>

Поступила в редакцию: 14.05.2025

Поступила после рецензирования: 07.07.2025

Принята к публикации: 14.07.2025

REFERENCES

1. Quijada C. Conductive polymers: materials and applications. *Materials*, 2020, vol. 13, no. 10, pp. 2344–2348.
2. Pyatov I.S., Tikhonova S.V., Salimov A.I., Vorobyeva L.V., Lunev V.V., Fomocheva L.E. *Elastomers and polymer compositions for oilfield equipment. Problems and opportunities.* (In Russ.) Available at: <https://ream-rti.ru/upload/iblock/ae0/ae0e77ad7e2cdbe88098556f439ac345.pdf> (accessed 7 April 2025).
3. Chen J., Zhu Y., J. Huang, J. Zhang Advances in responsively conductive polymer composites and sensing applications. *Polymer Reviews*, 2021, vol. 61, no. 1, pp. 157–193.
4. 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.
5. Zhang B., Guo B., Yu J., Guo Z. Improved electrical conductivity of polymer/carbon black composites by simultaneous dispersion and interaction-induced network assembly. *Composites Science and Technology*, 2019, vol. 179, pp. 106–114.
6. Zhang X., Hu S., Huang S., Zhou Y., Zhang W. Structure-performance relationship of polypropylene/elastomer/carbon black composites as high voltage cable shielding layer. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2024, vol. 185, p. 108334.
7. Aksenenko A.Yu. Innovative electric heating technologies to ensure uninterrupted processes of oil and gas production and transportation. *Oil. Gas. Innovations*, 2020, no. 9, pp. 76–78. (In Russ.)
8. Savvinova M.E. Electrically conductive polymer composite materials for electrical purposes. *News of higher educational institutions. North Caucasian region. Technical sciences*, 2015, no. 4 (185), pp. 44–49. (In Russ.)
9. Xu Y., Wang Y., Zhou C., Sun W., Dai K., Tang J., Lei J., Yan D. An electrically conductive polymer composite with a co-continuous segregated structure for enhanced mechanical performance. *Journal of Materials Chemistry*, 2020, vol. 8, pp. 11546–11554.
10. Minakova N.N., Karpov S.A., Ushakov V.Ya. Texture method for studying the resistive properties of dispersed-filled elastomers. *Russian Physics Journal*, 2000, vol. 43, no. 10, pp. 16–23. (In Russ.)
11. Liang J., Zhang H., Luo Z., Zhong J. Fatigue-crack-propagation behavior and mechanism of long hemp-fiber-enhanced styrene-butadiene rubber/carbon black compounds. *Polymer Composites*, 2024, vol. 45, no. 4, pp. 2941–2953.
12. Choudhury S., Nayak J., Das P., Pal A. Enhancing electrical characteristics and electromagnetic interference shielding effectiveness in thermoplastic elastomeric polymer blends by utilizing the selective distribution of conductive black. *Functional Composite Materials*, 2024, vol. 5, no. 1, p. 4.
13. Koshelev F.F., Kornev A.E., Klimov N.S. *General technology of rubber*. Moscow, Khimiya Publ., 1978. 528 p. (In Russ.)
14. Tsobkallo E.S., Moskalyuk O.A., Stepashkina A.S. Functional composite polymer materials for electrical purpose. *Bulletin of Saint Petersburg State Institute of Technology (Technical University)*, 2020, no. 52, pp. 28–35. (In Russ.)
15. Lipatov Yu.S. *Physicochemical foundations of polymer filling*. Moscow, Khimiya Publ., 1991. 260 p. (In Russ.)
16. Shiva M., Ahmadi M., Esmaili E., Zivdar M. Heat diffusivity and mechanical properties of a tire bladder composite in the presence of ceramic fillers. *Polymer Bulletin*, 2024, vol. 81, no. 2, pp. 1635–1649.
17. Gu H., Yao F. An overview of three-dimensional fillers-polymer composites: fabrications and applications for electronics and energy storage. *Polymer Reviews*, 2024, vol. 64, no. 4, pp. 1322–1386.
18. De Zhen P. *Scaling ideas in polymer physic*. Moscow, Mir Publ., 1982. 376 p. (In Russ.)
19. Gul V.E., Shenfiel L.Z. *Electrically conductive polymer composites*. Moscow, Khimiya Publ., 1984. 226 p. (In Russ.)
20. Wu X., Zhang X., Yan X., Zhang C. From the whole process of making thermal conductive polymer, the effective method of improving thermal conductivity. *Journal of Polymer Science*, 2024, vol. 62, no. 11, pp. 2410–2442.
21. 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.
22. Fokin V.M., Boykov G.P., Vidin Yu.V. *Fundamentals of technical thermal physics*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2004. 172 p. (In Russ.)
23. Minakova N.N., Ushakov V.Ya. Thermophysical characteristics of polymer composite materials with carbon components for electrical devices. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2023, vol. 334, no. 6, pp. 134–139. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2024/5/4531
24. *Instructions for using the DLF-1200 device* (In Russ.) Available at: <https://www.directindustry.com.ru/prod/ta-instruments/product-38477-1796308.html>. (Accessed 22 March 2025).
25. Tager A.A. *Physical chemistry of polymers*. Moscow, Nauchny Mir Publ., 2007. 576 p. (In Russ.)
26. 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 Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2024/5/4531

Information about authors

Natalya N. Minakova, Dr. Sc., Professor, Altai State University, 61, Lenin avenue, Barnaul, 656049, Russian Federation. minakova@asu.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7665-8069>

Vasily Ya. Ushakov, Dr. Sc., Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. vyush@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2931-2086>

Received: 14.05.2025

Revised: 07.07.2025

Accepted: 14.07.2025