

УДК 536.2

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Д.П. Волков^a, А.Г. Егоров^b, М.Э. Мироненко^a

^a Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

^b Научно-исследовательский институт синтетического каучука им. С.В. Лебедева, Санкт-Петербург, 198035, Российская Федерация

Адрес для переписки: margarita@mironenko.xyz

Информация о статье

Поступила в редакцию 13.09.16, принята к печати 17.02.17

doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-2-287-293

Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: 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. doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-2-287-293

Аннотация

Предмет исследования. Изучены теплофизические свойства нового полисилоксанового заливочного компаунда. Исследованы закономерности изменения теплопроводности и теплоемкости этого материала в диапазоне температур от +25 °С до +175 °С в зависимости от состава образцов. Выполнен поиск оптимального состава компаунда, обеспечивающего теплопроводность не менее 0,5 Вт/(м·К) и набор данных для оценочного прогнозирования изменения теплофизических свойств в зависимости от состава компаунда. **Методы.** Образцы изготовлены в ФГУП «НИИ синтетического каучука им. С.В. Лебедева» на основе серийно выпускаемых силоксановых полимеров. Компаунды представляли собой двух- или трехкомпонентные композиции холодного отверждения на основе низкомолекулярного (жидкого) полидиметилсилоксанового каучука СКТН. В качестве переменных по массовому наполнению добавок использованы полиэтилсилоксан ПЭС-5, гидроксид алюминия, гидрид титана, карбид бора, окись цинка. Исследования теплопроводности и теплоемкости выполнены с помощью измерителей ИТ-λ-400 ИТ-С-400 методом монотонного разогрева. **Основные результаты.** Получены новые экспериментальные данные зависимости теплопроводности и теплоемкости полисилоксанового компаунда от температуры, состава и концентрации различных наполнителей. Показано, что введение добавок позволило увеличить теплопроводность композита и уменьшить теплоемкость. Выявлено, что с ростом температуры теплопроводность компаундов падает примерно на 15%, а теплоемкость возрастает на 60–70%. **Практическая значимость.** Полученные данные позволяют выбрать оптимальный состав компаунда, обеспечивающий требуемые эксплуатационные показатели: теплопроводность не менее 0,5 Вт/(м·К), длительную термостойкость в диапазоне температур от –60 °С до +200 °С, сохранность эксплуатационных свойств при интегральном флюенсе нейтронов до $1 \cdot 10^{14}$ нейтрон/см² и суммарной поглощенной дозы по гамма-излучению до 300 Гр. Разработанный компаунд проходит испытание и может найти применение в качестве материала твердой нейтронной защиты в составе транспортных упаковочных комплектов, предназначенных для перемещения и хранения отработанного ядерного топлива.

Ключевые слова

теплопроводность, теплоемкость, заливочный компаунд, калориметр

Благодарности

Работа выполнена в рамках НИР ФГУП «НИИ синтетического каучука им. С.В. Лебедева» для ПАО «Ижорские заводы».

THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF POLYMER COMPOSITE MATERIALS

D.P. Volkov^a, A.G. Egorov^b, M.E. Mironenko^a

^a ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

^b FSUE “Institute of Synthetic Rubber”, Saint Petersburg, 198035, Russian Federation

Corresponding author: dpv@grv.ifmo.ru

Article info

Received 13.09.16, accepted 17.02.17

doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-2-287-293

Article in Russian

For citation: Volkov D.P., Egorov A.G., Mironenko M.E. Thermophysical properties of polymer composite materials. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2017, vol. 17, no. 2, pp. 287–293 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-2-287-293

Abstract

Subject of Study. The paper deals with thermophysical properties of a new polydimethylsiloxane potting compound. We study the principles of thermal conductivity and heat capacity changing depending on composition of materials in the temperature range of 25-175 °C. The search of optimal composition of the compound is carried out providing thermal conductivity not less than 0.5 W/(m·K) and data set for the change prediction of thermo-physical properties depending on a compound composition. **Methods.** All the samples were produced by FSUE "Institute of Synthetic Rubber" on the basis of polymers used in serial production. All the compounds are two- or three-component materials based on a low molecular weight (liquid) polydimethylsiloxane caoutchouc made by a cold solidification method. Polyethylsiloxane PES-5, aluminum hydroxide, TiN, boron, zinc oxide are used as additives. The research of thermal conductivity and heat capacity are carried out by meters λ -400 and C-400 by dynamic method of monotonic warming. **Main Results.** We have obtained new experimental data about the thermal conductivity and heat capacity of the polysiloxane compound, depending on the temperature and the concentrations of various fillers. With increasing of the filler concentration the thermal conductivity of the samples increases as well and the heat capacity decreases. It is shown that with increasing of temperature the thermal conductivity of compounds is falling by about 15%, and the heat capacity increases by about 60-70%. **Practical Relevance.** The retrieved data give the possibility to find the optimal composition of compound material that guarantees the following operational properties: thermal conductivity not less than 0.5 W/(m·K), long thermostability in the temperature range of -60 - +200 °C, the density of hydrogen nucleus not less than $1 \cdot 10^{14}$ nucleus/cm² and the summary absorbed gamma radiation dose up to 300 Gy. The developed compound is being tested and can be applicable in the development of neutron shielding for the transportation of the used nuclear fuel in the nuclear fuel containers.

Keywords

thermal conductivity, heat capacity, potting compound, calorimeter

Acknowledgements

The research is performed within S&R work of FSUE "Institute of Synthetic Rubber" for OMZ Group "Izhorskiye Zavody".

Введение

Развитие современной техники способствует разработке новых материалов со специфическим комплексом полезных свойств. К их числу относятся кремнийорганические эластомеры, обладающие повышенной термостойкостью, хорошей эластичностью, высокими диэлектрическими показателями, атмосферо-, влаго-, и озоностойкостью, биологической инертностью. Все шире используются композиции холодного отверждения на основе низкомолекулярных полиорганосилоксанов. Эти композиции, в частности различные типы силиконовых заливочных материалов, в настоящее время с успехом применяются в различных областях техники [1–7]. Исследование выполнено в рамках научно-исследовательской работы, проводимой ФГУП «НИИ синтетического каучука им. С.В. Лебедева (НИИСК)» для ПАО «Ижорские заводы» по разработке нового типа заливочного компаунда на основе полисилоксанов и набору теплофизических и физико-химических данных для обоснования возможности его применения в качестве материала твердой нейтронной защиты в составе транспортных упаковочных комплектов (ТУК), предназначенных для транспортирования и хранения отработавших тепловыделяющих сборок реакторов ВВЭР-1000/1200. Основу компаундов составляет силиконовый каучук термостойкий низкомолекулярный СКТН-А с пластификатором – полиэтилсилоксановой жидкостью ПЭС-5. В качестве наполнителей использовались гидроксид алюминия (Al(OH)₃), гидрид титана (TiH₂), карбид бора (B₄C) и цинковые белила (ZnO).

Нейтронная защита на сегодняшний день имеет различные вариации в исполнении. Так, в ТУК-13 в качестве нейтронной изоляции использованы жидкие наполнения, что имеет множество недостатков, таких как усадка при деформации, неравномерное распределение и др. Другой пример: согласно исследованиям [8], в конструкции некоторых ТУК сложность связана с тем, что через материал для поглощения нейтронов пропущены элементы с высокой теплопроводностью, служащие для лучшего отвода тепла от тепловыделяющих сборок к наружной поверхности контейнера. Данные элементы требуют специальных крепежных операций для их соединения с внутренней и внешней оболочкой, что увеличивает трудоемкость работ по изготовлению контейнера, кроме того, возможно попадание быстрых нейтронов в окружающую среду через теплоотводящие элементы, соединяющие внешнюю и внутреннюю оболочки и проходящие сквозь нейтронно-поглощающий материал.

Чтобы увеличить теплопроводность и термостабильность материалов, были разработаны композиции заливочных компаундов, представленные в таблице. Образцы изготовлены в ФГУП «НИИСК» на основе серийно выпускаемых силоксановых полимеров. В работе приводятся результаты экспериментального исследования теплопроводности и теплоемкости нового типа полидиметилсилоксанового заливочного компаунда. Исследовалась зависимость теплофизических свойств от температуры и концентрации различных наполнителей. Полученные данные позволили скорректировать и выбрать оптимальный состав компаунда, обеспечивающий следующие эксплуатационные показатели: теплопроводность не менее 0,5 Вт/(м·К), длительная термостойкость в диапазоне рабочих температур от –60 до +200 °С, сохранность эксплуатационных свойств при интегральном флюенсе нейтронов до $1 \cdot 10^{14}$ нейтрон/см² и суммарной поглощенной дозе по гамма-излучению до 300 Гр. Разработанный компаунд испытывается для применения в качестве материала твердой нейтронной защиты в ТУК, предназначенных для транспортирования и хранения отработанного ядерного топлива.

Методика эксперимента

Композиции заливочных компаундов представлены в таблице.

Номер композиции	Состав композиций					
	СКТН-А	ПЭС-5	Гидроксид алюминия	Гидрид титана	Карбид бора	Цинковые белила
515	70,8	28,4	–	–	–	–
346	39,4	15,8	19,7	19,7	–	–
503	78,7	–	19,7	–	–	–
504	65,7	–	32,8	–	–	–
505	56,3	–	42,2	–	–	–
506	49,3	–	49,3	–	–	–
516	47,4	19	–	23,7	3,8	4,7
517	42,6	17,0	–	31,9	3,4	4,3
518	32,3	12,9	–	48,4	2,6	3,2
512	66,1	–	–	–	–	33
513	56,7	–	–	–	–	42,5
514	49,6	–	–	–	–	49,6

Таблица. Состав исследуемых материалов, мас. %

Компаунды представляют собой двух- или трехкомпонентные композиции «холодного» отверждения на основе низкомолекулярного (жидкого) полидиметилсилоксанового каучука СКТН.

Композиции «холодного» отверждения отверждаются при комнатной температуре за счет катализатора, введенного в состав композиции. Для композиций этого типа в англоязычной научно-технической литературе принято обозначение RTV (Room Temperature Vulcanization), и далее цифра 1 или 2, обозначающая одно- или двухкомпонентную систему. По типу отверждения (химическому механизму образования поперечных связей полимер-отвердитель) композиции «холодного» отверждения делятся на поликонденсационные и полиприсоединения.

При отверждении по поликонденсационному механизму в качестве отвердителя обычно используют гидролитически нестабильные (легко гидролизующиеся водой или парами воды из воздуха) кремний-органические соединения с функциональностью три или четыре, такие как ацетоксисиланы, производные оксимов кетонов (однокомпонентные композиции, отверждаются в слое до 3–4 мм при воздействии водяных паров из окружающего воздуха) или алкоксисиланы (тетраэтоксисилан или его олигомеры – этилсилилаты) в сочетании с металлоорганическими катализаторами – двух- и трехкомпонентные композиции, отверждаются в неограниченном по толщине слое, воздействие водяных паров из окружающего воздуха не обязательно. Отверждение происходит за счет химического взаимодействия концевых силанольных (Si-OH) групп полисилоксанового каучука с отвердителем (гидролитическая поликонденсация). При отверждении выделяется:

- соответствующая карбоновая кислота, обычно – уксусная (в случае применения ацетоксисиланов);
- оксим кетона (в случае применения производных оксимов кетонов);
- этанол (в случае применения тетраэтоксисилана или его олигомеров – этилсилилатов) в количестве, эквивалентном вступившим в реакцию силанольным группам.

Переданные для определения коэффициента теплопроводности компаунды отверждены при комнатной температуре за счет химического взаимодействия концевых силанольных (Si-OH) групп полидиметилсилоксанового каучука типа СКТН с отвердителем – полиэтоксисилоксаном «Этилсиликат 40» при содействии катализатора – ди(2-этилгексаноат) олова (II) (октоат олова).

В основе данных полимеров находится каучук синтетический термостойкий низкомолекулярный СКТН, марки А-Г; полимерная основа компаунда представлена на рис. 1.

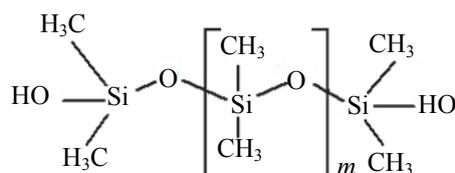


Рис. 1. Структурная формула синтетического термостойкого низкомолекулярного каучука.
 m – степень полимеризации, $m = 20 - 200$

Полиэтилсилоксановая жидкость ПЭС-5 в состав компаунда введена для увеличения содержания водорода. Полиэтилсилоксановые жидкости и каучуки – единственные с увеличенным содержанием водорода в номенклатуре полисилоксанов, разработанных в СССР и до сих пор выпускаемых крупнотоннажно. Структурная формула представлена на рис. 2.

Наличие в структуре олигомера ПЭС-5 Т-звеньев приводит к увеличению плотности, теплопроводности и термостабильности.

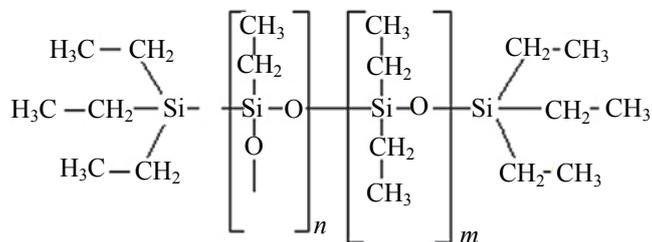


Рис. 2. Структурная формула ПЭС-5. n, m – степень полимеризации, $n = 3,1; m = 16,9$

Гидроксид алюминия выполняет в композиции функции наполнителя, увеличивающего теплопроводность и плотность композиции, антипирена. Продукт «Скар-Лет 305» (компания «ТендерХим», С.-Петербург, собственное производство) – тонкодисперсный кристаллический гидроксид алюминия повышенной температуры начала дегидратации, заявленная химическая формула $\text{Al}(\text{OH})_3$.

Гидрид титана, фракция меньше 20 мкм, введен в состав композиции как наполнитель-термостабилизатор, не снижающий содержание водорода. В компаундах использован гидрид титана, произведенный в ЗАО НПФ «Уралинвест». Цинковые белила (оксид цинка) выполняют функцию термостабилизирующего наполнителя.

Исследования теплопроводности проведены на измерителе ИТ-λ-400 в диапазоне температур от 25 °С до 175 °С. В основу работы измерителя положен динамический метод монотонного разогрева. Работа измерителя и вывод расчетных формул подробно рассмотрены в [9, 10]. Образцы изготавливались в виде дисков диаметром 15 мм и высотой около 3 мм (рис. 3); предел допускаемой основной погрешности измерения теплопроводности составил ±10%.



Рис. 3. Исследуемые композиты

Исследования теплоемкости выполнены на измерителе теплоемкости ИТ-С-400 в диапазоне температур от 25 до 200 °С. В основу работы установки положен метод динамического калориметра в режиме монотонного нагрева [9, 10]. Для исследования теплоемкости образцы выполнялись в форме цилиндров диаметром 15 мм и высотой 9 мм.

Основные результаты и их обсуждение

Результаты исследований теплопроводности образцов в диапазоне температур 20–175 °С представлены на рис. 4–6.

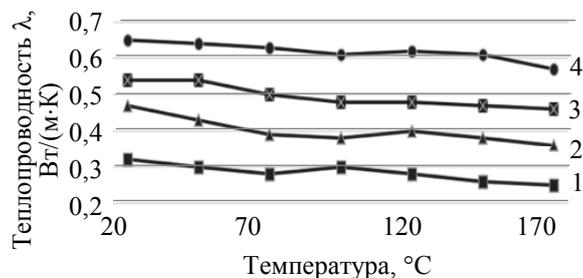


Рис. 4. Зависимость теплопроводности образцов с гидроксидом алюминия от температуры: 1 – образец 503; 2 – образец 504; 3 – образец 505; 4 – образец 506

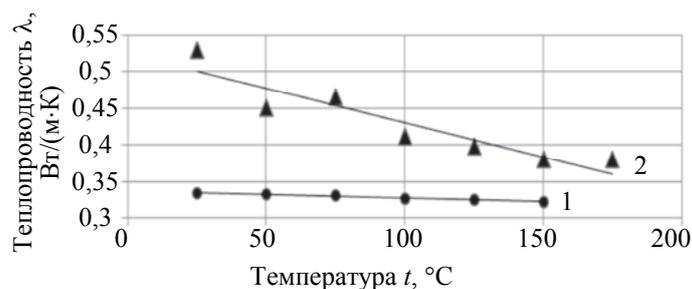


Рис. 5. Зависимость теплопроводности от температуры: 1 – исходный образец (без добавок); 2 – образец с гидроксидом алюминия и гидридом титана

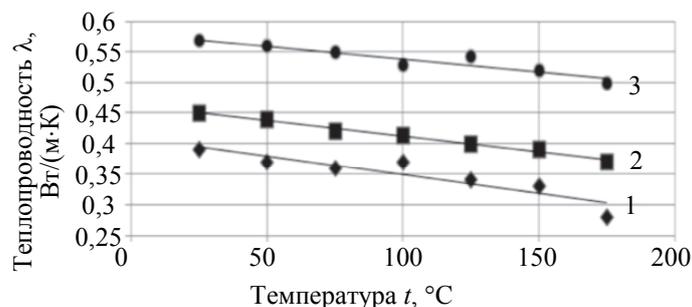


Рис. 6. Зависимость теплопроводности образцов с гидридом титана от температуры: 1 – образец № 516; 2 – образец № 517; 3 – образец № 518

Как видно из приведенных данных, теплопроводность всех образцов с увеличением температуры от 20 до 175 °C монотонно уменьшается. Введение в композицию указанных выше добавок (наполнителя) приводит к увеличению теплопроводности. При этом введение в композицию гидроксида алюминия увеличивает теплопроводность незначительно, температура для таких образцов не оказывает существенного воздействия на теплофизические свойства полимера. Наибольшее влияние на увеличение теплопроводности полимера оказывает введение в него гидроксида алюминия, что, в первую очередь, связано с высокой теплопроводностью самого наполнителя.

Если теплопроводность основного компаунда практически не изменяется с ростом температуры, то теплопроводность образца, наполненного композицией двух полимеров (гидроксид алюминия и гидрид титана) в равных пропорциях, значительно уменьшается при увеличении температуры. Введение такого наполнителя увеличивает теплопроводность полимера с 0,33 до 0,52 Вт/(м·К).

Теплопроводность образцов с наполнителем в виде цинковых белил (рис. 7) значительно растет с увеличением концентрации наполнителя. Это связано с тем, что теплопроводность цинковых белил значительно больше теплопроводности каучука. Данный наполнитель позволил увеличить теплопроводность полимера в 2 раза.

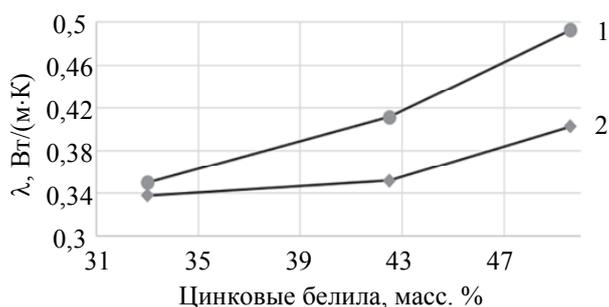


Рис. 7. Зависимость теплопроводности от концентрации цинковых белил при температуре 50 °C (1) и 175 °C (2)

Результаты измерений теплоемкости композиций представлены на рис. 8 и 9.

Видно, что теплоемкость композиций значительно увеличивается с ростом температуры в диапазоне 30–200 °C. Увеличение массовой доли цинковых белил приводит к снижению теплоемкости во всем исследуемом диапазоне температур. Зависимость теплоемкости от концентрации наполнителя в серии образцов (ZnO) приведены на рис. 9.

Таким образом, показано, что с ростом температуры теплоемкость образцов возрастает, а с ростом концентрации наполнителя теплоемкость уменьшается, что коррелирует с результатами, полученными авторами в [11–14].

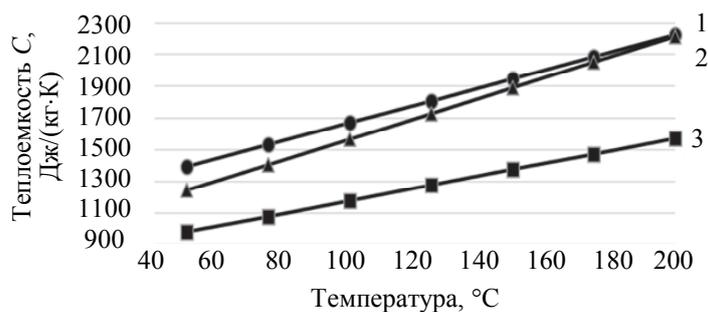


Рис. 8. Зависимость теплоемкости образцов с цинковыми белилами от температуры: 1 – образец 512; 2 – образец 513; 3 – образец 514

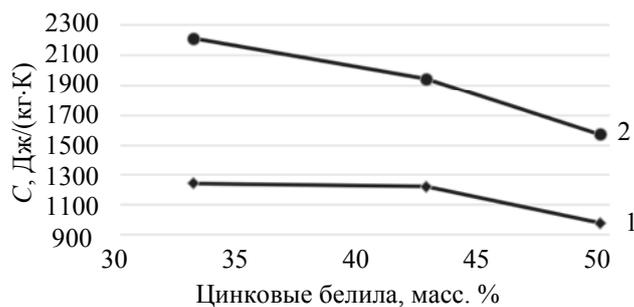


Рис. 9. Зависимость теплоемкости от концентрации цинковых белил: 1 – при 50 °C; 2 – при 200 °C

Заключение

Обобщая результаты работы, отметим следующее.

По техническому заданию ФГУП «НИИСК» композиции для нейтронной защиты должны иметь теплопроводность не менее 0,5 Вт/(м·К). Показано, что введение в полимер в качестве переменных по массовому наполнению добавок (полиэтилсилоксан ПЭС-5, гидроксид алюминия, гидрид титана, карбид бора, окись цинка) позволяет получить композицию, удовлетворяющую данному требованию, что обеспечивает необходимый коэффициент теплопередачи при заливке в полости транспортных упаковочных комплектов теплоотвод, не создавая значительного теплового сопротивления.

Показано, что теплопроводность исходного полимера и всех исследованных композиций на его основе с ростом температуры уменьшается, а теплоемкость увеличивается. Увеличение концентрации наполнителей повышает теплопроводность композиций и приводит к снижению их теплоемкости. Относительная погрешность теплофизических измерений на данных установках не превышает 6% [15, 16].

Полученные данные позволяют скорректировать и выбрать оптимальный состава компаунда, обеспечивающий такие эксплуатационные показатели, как теплопроводность, длительную термостойкость в диапазоне температур от –60 до +200 °C, сохранность эксплуатационных свойств при интегральном флюенсе нейтронов до $1 \cdot 10^{14}$ нейтрон/см² и суммарной поглощенной дозе по гамма-излучению до 300 Гр.

Литература

1. Гросберг А.Ю., Хохлов А.Р. Полимеры и биополимеры с точки зрения физики. Долгопрудный: Интеллект, 2014. 304 с.
2. Зуев Ю.С., Дегтева Т.Г. Стойкость эластомеров в эксплуатационных условиях. М.: Химия, 1986. 264 с.
3. Михайлин Ю.А. Термостойчивые полимеры и полимерные материалы. СПб.: Профессия, 2006. 624 с.
4. Godovsky Y.K. Thermophysical Properties of Polymers. NY: Springer Verlag, 1992. 300 p.
5. Штеникова И.Н., Рюлшев Е.И., Эскин В.Е. и др. Современные физические методы исследования полимеров. М.: Химия, 1982. 251 с.
6. Радиационная стойкость органических материалов: Справочник / под ред. В.К. Милинчука, В.И. Тупикова. М.: Энергоатомиздат, 1986. 272 с.
7. Ревун Ю.А., Комкова А.Д., Кондратьев А.Н., Лебеденко С.Г. Твердые материалы нейтронной защиты в конструкциях ТУК // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Химические проблемы атомной энергетики. 1991. №2, ч.1. С. 47–50.
8. Шутова Е.М. Краткий обзор новых патентов на оборудование для транспортировки и хранения отработавшего ядерного

References

1. Grosberg A.Yu., Khokhlov A.R. *Polymers and Biopolymers from the Point of Physics*. Dolgoprudnyi, Russia, Intellect Publ., 2014, 304 p. (In Russian)
2. Zuev Yu.S., Degtereva T.G. *Durability of Elastomers in Operating Conditions*. Moscow, Khimiya Publ., 1986, 264 p. (In Russian)
3. Mihailin Yu.A. *Thermostable Polymers and Polymeric Materials*. St. Petersburg, Professiya Publ., 2006, 624 p. (In Russian)
4. Godovsky Y.K. *Thermophysical Properties of Polymers*. NY, Springer Verlag, 1992, 300 p.
5. Shtennikova I.N., Rylshchev E.I., Eskin V.E. et al. *Modern Physical Methods of Polymer Research*. Moscow, Khimiya Publ., 1982, 251 p. (In Russian)
6. *Radiation Stability of Organic Materials. Reference Book* / Eds. V.K. Milinchuk, V.I. Tupikov. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1986, 272 p. (In Russian)
7. Revun Yu.A., Komkova A.D., Kondrat'ev A.N., Lebedenko S.G. Solid materials of the neutron shielding in the construction of TUK. *Voprosy Atomnoi Nauki i Tekhniki. Seriya: Khimicheskie*

- топлива // Инженерный вестник Дона. 2012. № 3. С. 531–535.
9. Волков Д.П., Успенская М.В. Теплопроводность наполненных полимеров // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2010. Т. 53. № 4. С. 49–51.
 10. Платунов Е.С., Баранов И.В., Буравой С.Е., Курепин В.В. Теплофизические измерения: учеб. пособие. СПб.: СПбГУ НИИПТ, 2010. 738 с.
 11. Fon W.C.W. Thermal Properties of Nano- and Microstructures. PhD Thesis, California Institute of Technology, 2004.
 12. Wunderlich B. Thermal Analysis of Polymeric Materials. Berlin: Springer, 2005. 894 p. doi: 10.1007/b137476
 13. Blomberg T. Heat Conduction in Two and Three Dimensions. Report TVBH-1008. Lund University, Sweden, 1996. 188 p.
 14. Varma-Nair M., Wunderlich B. Heat Capacity and Other Thermodynamic Properties of Linear Macromolecules. University of Tennessee, 1990.
 15. Димов Ю.В. Метрология, стандартизация и сертификация. 3-е изд. СПб.: Питер, 2010. 464 с.
 16. Сергеев А.Г., Крохин В.В. Метрология: Учеб. пособие для вузов. М.: Логос, 2000. 408 с.
 8. Shutova E.M. The short review of new patents for the equipment for transportation and storage of the fulfilled nuclear fuel. *Engineering Journal of Don*, 2012, no. 3, pp. 531–535.
 9. Volkov D.P., Uspenskaya M.V. Thermal conductivity of filled polymers. *Journal of Instrument Engineering*, 2010, vo. 53, no. 4, pp. 49–51.
 10. Platonov E.S., Baranov I.V., Buravoi S.E., Kurepin V.V. *Thermophysical Measurements: Handbook*. St. Petersburg, SPbSU NPT Publ., 2010, 738 p. (In Russian)
 11. Fon W.C.W. *Thermal Properties of Nano- and Microstructures*. PhD Thesis, California Institute of Technology, 2004.
 12. Wunderlich B. *Thermal Analysis of Polymeric Materials*. Berlin, Springer, 2005, 894 p. doi: 10.1007/b137476
 13. Blomberg T. *Heat Conduction in Two and Three Dimensions*. Report TVBH-1008. Lund University, Sweden, 1996, 188 p.
 14. Varma-Nair M., Wunderlich B. *Heat Capacity and Other Thermodynamic Properties of Linear Macromolecules*. University of Tennessee, 1990.
 15. Dimov Yu.V. *Metrology, Standardization and Certification*. 3rd ed. St. Petersburg, Piter Publ., 2010, 464 p. (In Russian)
 16. Sergeev A.G., Krokhin V.V. *Metrology: Handbook*. Moscow, Logos Publ., 2000, 408 p. (In Russian)

Авторы

Волков Дмитрий Павлович – кандидат технических наук, доцент, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, dpv@grv.ifmo.ru

Егоров Александр Геннадьевич – старший научный сотрудник, Научно-исследовательский институт синтетического каучука им. С.В. Лебедева, Санкт-Петербург, 198035, Российская Федерация, aegoroff1@mail.ru

Мироненко Маргарита Эдуардовна – аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, margarita@mironenko.xyz

Authors

Dmitry P. Volkov – PhD, Associate professor, Associate professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, dpv@grv.ifmo.ru

Alexander G. Egorov – senior researcher, FSUE “Institute of Synthetic Rubber”, Saint Petersburg, 198035, Russian Federation, aegoroff1@mail.ru

Margarita E. Mironenko – postgraduate, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, margarita@mironenko.xyz