# MATEMATИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В МАТЕРИАЛОВЕДЕНИИ ЭЛЕКТРОННЫХ КОМПОНЕНТОВ / MATHEMATICAL MODELING IN MATERIALS SCIENCE OF ELECTRONIC COMPONENTS

Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. 2023. Т. 26, № 4. С. 300—308. DOI: 10.17073/1609-3577j.met202305.566

УДК 621.315:538.9

# Моделирование радиопоглощающих свойств пиролизованного полиакрилонитрила в диапазоне частот от 3 до 50 ГГц

© 2023 г. Д. П. Радченко<sup>1,</sup>,⊠, И. В. Запороцкова<sup>1</sup>, Л. В. Кожитов<sup>2</sup>, П. А. Запороцков<sup>1</sup>, А. В. Попкова<sup>3</sup>, В. Г. Косушкин<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Волгоградский государственный университет, Университетский просп., д. 100, Волгоград, 400062, Российская Федерация

<sup>2</sup> Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Ленинский просп., д. 4, стр. 1, Москва, 119049, Российская Федерация

<sup>3</sup> Научно-производственное объединение «Луч», ул. Железнодорожная, д. 24, Подольск, 142103, Российская Федерация

<sup>4</sup> Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (калужский филиал), ул. Баженова, д. 2., Калуга, 248000, Российская Федерация

<sup>™</sup>Автор для переписки: crystal\_steel@bk.ru

Аннотация. В настоящее время широко изучаются электромагнитные характеристики различных, в том числе и полимерных, материалов с целью применения их в качестве радиопоглощающих покрытий в изделиях электроники. Одним из таких материалов является пиролизованный полиакрилонитрил (ППАН). Рассмотрена модель поглощения электромагнитной волны слоями ППАН с электропроводностью 72 и 180 См/м и шириной слоя от 0,15 до 2 мм, в том числе содержащих металлический наполнитель (так называемый металлокомпозит на основе ППАН), в частотном диапазоне 3—50 ГГц. Моделирование выполнено в программном пакете COMSOL Multiphysics.

Проведено сопоставление экспериментальных результатов с данными, полученными в ходе моделирования, по таким параметрам, как показатели отражения, прохождения и поглощения. Выводы, полученные из анализа данных моделирования, совпадают с результатами практических экспериментов. Анализ модели показал сходимость результатов моделирования с экспериментальными данными на качественном уровне.

**Ключевые слова:** пиролизованный полиакрилонитрил, электромагнитное излучение, металлокомпозит, радиопоглощающие свойства, COMSOL Multiphysics

**Благодарности:** Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (тема FZUU–2023–0001).

**Для цитирования:** Радченко Д.П., Запороцкова И.В., Кожитов Л.В., Запороцков П.А., Попкова А.В., Косушкин В.Г. Моделирование радиопоглощающих свойств пиролизованного полиакрилонитрила в диапазоне частот от 3 до 50 ГГц. *Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники.* 2023; 26(4): 300—308. https://doi.org/10.17073/1609-3577j.met202305.566

# Simulation of the radio absorbing properties of pyrolyzed polyacrylonitrile in the frequency range from 3 to 50 GHz

D. P. Radchenko<sup>1,,∞</sup>, I. V. Zaporotskova<sup>1</sup>, L. V. Kozhitov<sup>2</sup>, P. A. Zaporotskov<sup>1</sup>, A. V. Popkova<sup>3</sup>, V. G. Kosushkin<sup>4</sup>

> <sup>1</sup> Volgograd State University, 100 Universitetsky Ave., Volgograd 400062, Russian Federation

<sup>2</sup> National University of Science and Technology "MISIS", 4–1 Leninsky Ave., Moscow 119049, Russian Federation

<sup>3</sup> JSC "Research Institute NPO "LUCH", 24 Zheleznodorozhnaya Str., Podolsk 142103, Russian Federation

<sup>4</sup> Bauman Moscow State Technical University (Kaluga Branch), 2 Bazhenov Str., Kaluga 248035, Russian Federation

<sup>™</sup>*Corresponding author: crystal\_steel@bk.ru* 

**Abstract.** Currently, the electromagnetic characteristics of various materials, including polymers, are being widely studied with the aim of using them as radio–absorbing coatings in electronics products. One such material is pyrolyzed polyacrylonitrile (PPAN). A model of electromagnetic wave absorption by PPAN layers with electrical conductivity of 72 and 180 S/m and a layer width of 0.15 to 2 mm, including those containing a metal filler (the so–called PPAN–based metal composite), in the frequency range of 3–50 GHz is considered. The simulation was performed in the COMSOL Multiphysics software package. A comparison of the experimental results with the data obtained during the simulation was carried out for such parameters as reflection, transmission and absorption. The conclusions obtained from the analysis of simulation data coincide with the results of practical experiments. Analysis of the model showed the convergence of modeling results with experimental data at a qualitative level.

**Keywords:** pyrolyzed polyacrylonitrile, electromagnetic radiation, metal composite, radio absorption properties, COMSOL Multiphysics

**Acknowledgments:** The work was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (topic FZUU–2023–0001).

**For citation:** Radchenko D.P., Zaporotskova I.V., Kozhitov L.V., Zaporotskov P.A., Popkova A.V., Kosushkin V.G. Simulation of the radio absorbing properties of pyrolyzed polyacrylonitrile in the frequency range from 3 to 50 GHz. *Izvestiya vuzov. Materialy elektronnoi tekhniki = Materials of Electronics Engineering*. 2023; 26(4): 300—308. https://doi.org/10.17073/1609-3577j.met202305.566

## Введение

Развитие науки позволило создавать полимерные композитные наноматериалы на основе углеродной матрицы [1]. Одним из наиболее доступных углеродосодержащих полимеров, которые могут выступать в качестве матрицы, является пиролизованный полиакрилонитрил (ППАН), который представляет собой слоевую графитоподобную структуру, имеющую в своем составе атомы азота. В настоящее время ППАН получают путем ИК– нагрева известного полимера полиакрилонитрила, растворенного в диметилформамиде. ППАН имеет в своих макромолекулах непрерывную цепь сопряжения (полисопряжение) и обладает полупроводниковыми свойствами [2—4]. Такой материал используют в качестве матрицы для создания металлополимерных нанокомпозитов [5], которые

<sup>© 2023</sup> National University of Science and Technology "MISIS".

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

нашли свое применение в вакуумной электронике для создания дисплеев [6]. Также ППАН используют для создании эффективных аккумуляторов. Например, композит Со/ППАН имеет потенциал применения в конструкционных анодах литийионных аккумуляторов [7, 8]. На основе ППАН был изготовлен углерод-углеродный нанокомпозит k-CoreTM с теплопроводностью, в 5 раз превышающей теплопроводность алюминия. Благодаря этому свойству удалось решить проблему миниатюризации в микроэлектронике [9]. Основными преимуществами ППАН являются низкая себестоимость, простота синтеза и возможность контролируемого пиролиза, позволяющего получать материалы с заданными параметрами.

Структура металлокомпозитов на основе ППАН. а также условия его синтеза позволяют применять его в качестве широкополосного поглотителя электромагнитных волн.

Ниже представлена модель, позволяющая оценить степень поглощения электромагнитной волны в частотном диапазоне от 3 до 50 ГГц слоем металлокомпозита на основе ППАН с различной шириной и электропроводностью. Моделирование выполнено в программном пакете COMSOL Multiphysics.

# представлена на рис. 1, а. В центре модели расположен слой ППАН (1). За ним слой воздуха (2), в котором электромагнитная волна равномерно распределяется перед попаданием на слой ППАН. Слой 3 задан как «идеально согласованный слой» (Perfectly Matched Layer — PML). Этот слой полностью поглощает любое падающее на него электромагнитное излучение. Он описывает открытые границы модели. Плоскости, отмеченные зеленым и розовым цветом, являются портами. Плоскость, выделенная зеленым цветом, является портом, порождающим ЭМВ с амплитудой магнитной моды H = 1 A/m и мощностью P = 1 Bt, а плоскость розового цвета — портом, принимающим ее. Каждой из боковых граней задано свойство, характеризующее их как квазибесконечную периодическую структуру [10]. Вся область моделирования разбивается на множество треугольников, для каждого из которых решается уравнение Максвелла [11].

На рис. 1, б представлены 25 кругов с определенным радиусом, заменяющих частицы металлов для уменьшения объема вычислений. При этом их общая площадь равна объему, который занимают частицы металлов в реальном материале. Созданы модели ППАН с электропроводностью 72 и 180 См/м, шириной слоя 2,0, 1,5, 1,0, 0,5, 0,25 и 0,15 мм, а также содержащие и несодержащие металлическую плоскость. В результате простроено 28 моделей ППАН.

2.5

Для исследования радиопоглощающих характеристик ППАН использован программный комплекс COMSOL Multiphysics. В нем создана модель поглощения электромагнитной волны (ЭМВ), проходящей через слой ППАН. Геометрия модели

Модель

# Результаты и их обсуждение

На рис. 2 представлен показатель отражения для слоев ППАН с различной толщиной и электро-

0

0



0

0

0

*а* — геометрия модели поглощения электромагнитного излучения слоем ППАН; б — расположение металлических кругов в слое ППАН

Fig. 1. PPAN model: (a) geometry of the model of absorption of electromagnetic radiation by the PPAN layer; (6) arrangement of metal circles in the PPAN layer



Рис. 2. Графики показателя отражения волны в диапазоне частот 3—50 ГГц для слоев ППАН, содержащих (*a*) и не содержащих (б) металлы

Fig. 2. Graph of the wave reflection index in the frequency range of 3–50 GHz PPAN: (a) containing metals; (δ) free of metals

проводностью (72 и 180 См/м), содержащих слой из металлов и без него. Анализ данных показал, что зависимостью значения отражения от частоты обладает ППАН с толщиной слоя не менее 0,3 мм. Так, для слоя ППАН толщиной 0,15 мм и с электропроводностью 72 См/м показатель отражения практически не меняется и составляет 45 % Добавление плоскости с металлом в ППАН никак не повлияло на эту зависимость для слоев, толщина которых лежит в диапазоне 0,15—0,5 мм. Для ППАН с толщиной слоя от 1 мм наблюдается увеличение отражения. Например, величина отражения для слоя 2 мм с электропроводностью 72 См/м увеличилась с 88 до 92 % на частоте 3 ГГц. Такие параметры материала характерны для металлических пластин, экранирующих волны. Следовательно, добавление плоскости из металла в слой ППАН значительно влияет на свойства модели только для слоя ППАН толщиной от 0,5 мм.

На рис. 3 представлен график показателя поглощения электромагнитного излучения. Анализ данных всех построенных моделей показал, что ППАН проявляет в большей степени экранирующие свойства. Так, падая на слой ППАН, волна отражается от него, если толщина слоя достаточно велика. Слой толщиной 0,5 мм и электропроводностью 72 См/м отражает от 60 до 80 % падающего излучения и пропускает всего 0,5 % излучения. Отражающие способности слоя ППАН с электропроводностью 180 См/м превосходят аналогичные



Рис. 3. Графики показателя поглощения в диапазоне частот 3—50 ГГц для слоев ППАН, содержащих (*a*) и не содержащих (б) металлы

Fig. 3. Graph of the absorption index in the frequency range of 3–50 GHz PPAN: (a) containing metals; (b) not containing metals

модели с электропроводностью 72 См/м. Так моделируемый ППАН с толщиной слоя 2 мм и электропроводностью 180 См/м способен отражать от 70 до 90 % падающего на него излучения. Таким образом, излучение отражается не от поверхности материала, как это происходит в металлах, а от его значительного слоя.

Анализ показателя прохождения волны через слой ППАН показал, что он незначителен. Модели ППАН с толщиной слоя 0,5 мм и более имеют показатель прохождения менее 1,5 %. Для слоя ППАН толщиной 0,15 мм и электропроводностью 72 См/м он составляет порядка 10 %. С увеличением частоты показатель прохождения незначительно меняется во всех моделях. Столь низкие показатели прохождения излучения и высокие показатели прохождения излучения и высокие показатели отражения характерны для металлов. Обнаружено незначительное уменьшение показателя прохождения по мере увеличения частоты электромагнитной волны. Это связано в первую очередь с тем, что изначально структура во всех случаях моделирования показывает малые значения показателя прохождения.

Проходя через тонкий слой ППАН толщиной 0,15 мм, излучение в значительной мере поглощается материалом. Наилучшие показатели для самого тонкого слоя ППАН объясняются тем, что он пропускает наибольшее количество электромагнитной волны — порядка 10 % для слоя толщиной 0,5 мм с электропроводностью 72 См/м. С увеличением толщины слоя количество отраженного излучения возрастает, а пропускаемого уменьшается. Латентность характеристик ППАН с толщиной слоя менее 0,25 мм к частоте падающего излучения объясняется малым значением толщины слоя. Такая толщина слоя выходит за пределы диапазона СВЧ-излучения с длиной волны от 1 до 10 см (100 и 3 ГГц соответственно), в котором проявляются релятивистский эффект в структуре. С увеличением частоты показатель прохождения незначительно меняется во всех моделях.



В работе [11] представлены экспериментально определенные показатели отражения, прохождения и поглощения металлокомпозитов Fe-Co/ППАН, полученных из разных прекурсоров. Они представлены на рис. 4. Использовали следующие прекурсоры: ацетилацетонат железа ( $C_{15}H_{21}FeO_6$ ) (Fe<sub>au,au</sub>) (Fe<sup>+3</sup>), ферроцен (Fe(CH<sub>5</sub>)<sub>2</sub>) (Fe<sub>ф.</sub>) (Fe<sup>+2</sup>), ацетат кобальта четырехводный (Co(CH<sub>3</sub>COO)<sub>2</sub>•4H<sub>2</sub>O) (Co<sub>au</sub>). Для нахождения параметров использовали векторный анализатор цепей AnritsuWiltron 37369А в объемном резонаторе (28WCAK, KCBH = 1,30).

Сопоставление результатов моделирования показателей отражения, прохождения и поглощения моделей с данными, представленными на рис. 4, показало, что композит на основе ППАН, полученный из прекурсора Fe<sub>ф</sub>.-Co<sub>ац</sub>./ПАН (700 °C, 40 % (мас.) Ме), сопоставим с характеристиками смоделированного слоя ППАН толщиной 0,15 и 0,2 мм и электропроводностью 72 См/м. Таким образом, наихудшие результаты для реального образца сопоставимы с наилучшими показателями модели.

Значение показателя пропускания электромагнитной волны реальных образцов говорит об их полной непрозрачности, что сопоставимо со слоем ППАН толщиной от 0,5 мм и электропроводностью 180 См/м. Показатель поглощения синтезированных материалов сопоставим с наилучшими



Рис. 4. Показатели отражения (*a*), прохождения (б) и поглощения (*b*) нанокомпозитов FeCo/C, синтезированных из различных прекурсор:

1 — прекурсор Fe<sub>ф.</sub>–Co<sub>ац.</sub>/ПАН (700 °C, 40 % (мас.) Ме); 2 — прекурсор Fe<sub>ф.</sub>–Co<sub>ац.</sub>/ПАН (800 °C, 20 % (мас.) Ме); 3 — прекурсор Fe<sub>ац.ац.</sub>–Co<sub>ац.</sub>/ПАН (800 °C, 20 % (мас.) Ме) Ме)

Fig. 4. Reflectivity (a), transmission (6) and absorption (c) of FeCo/C nanocomposites synthesized from different precursors: (1) Fe<sub>f</sub>-Co<sub>ats.</sub>/PAN precursor (700 °C, 40 wt.% Me); (2) Fe<sub>f</sub>-Co<sub>ats.</sub>/PAN precursor (800 °C, 20 wt % Me); (3) Fe<sub>ats.ats.</sub>-Co<sub>ats.</sub>/PAN precursor (800 °C, 20 wt % Me)

показателями модели ППАН с толщиной 0,15 мм и электропроводностью 72 См/м.

В работе [12] был проведен ряд экспериментальных исследований показателя поглощения электромагнитной волны в зависимости от толщины слоя для нанокомпозитов на основе Ni–Co/ ППАН в диапазоне частот от 3 до 12 ГГц. Этот нанокомпозит синтезировали при температуре 700 и 800 °C с содержанием металла 20 и 40 % (мас.). Толщина слоя варьировалась в пределах от 0,1 до 3 мм. На рис. 5 представлены результаты экспериментов.

Сравнительный анализ результатов моделирования и данных, представленных на рис. 5, показал схожесть результатов моделирования для слоев шириной 1 и 1,5 мм с электропроводностью 72 См/м с результатами, представленными на рис. 5, б и в, в диапазоне частот от 10 ГГц.

Таким образом, модели ППАН демонстрируют более высокий показатель отражения по сравнению с образцами, полученными в реальных экспериментах. Расхождение результатов моделирования и экспериментальных результатов объясняется идеально гладкой поверхностью ППАН в модели, а также ее однородностью. Это приводит к повышению показателя отражения от поверхности изучаемого материала. При этом в статье [12] делается вывод, что необходимо использовать менее электропроводный ППАН с содержанием частиц металла 20 % (мас.). Это связано с тем, что



рост объемной доли металлической фазы в композите и температуры его получения приводит к увеличению показателя отражения и снижению показателя поглощения. Выводы, полученные в результате анализа данных моделирования, совпадают с результатами практических экспериментов. Анализ модели показал сходимость результатов моделирования с экспериментальными данными на качественном уровне.

#### Заключение

Эффективность поглощения электромагнитной волны в первую очередь зависит от электропроводности ППАН. Эффективность экранирования может быть увеличена за счет снижения проводящей способности ППАН. Добавление плоскости, содержащий металлы, увеличило показатель отражения. Так, величина отражения для слоя толщиной 2 мм с электропроводностью 72 См/м увеличилась с 88 до 92 % на частоте 3 ГГц. В таких условиях моделирования волна не проходит в толщу ППАН, слабо взаимодействует с частицами металлов и отражается от незначительного по глубине слоя ППАН. Эффективность экранирования может быть увеличена за счет снижения прово-



Рис. 5. Частотные зависимости коэффициента поглощения для образцов слоев нанокомпозитов NiCo/C разной толщины, с различным содержанием металлов и температурой синтеза: *a* — *T* = 700 °C, *C*<sub>Me</sub> = 20 % (мас.); *б* — 800 °C, 20 % (мас.);

B — 700 °C, 40 % (Mac.)
Fig. 5. Frequency dependences of the absorption coefficient depending on the layer thickness for NiCo/C nanocomposite samples with different metal content and synthesis temperature: (a) T = 700 °C, C<sub>Me</sub> = 20 wt.%; (b) T = 700 °C, C<sub>Me</sub> = 40 wt.%

дящей способности ППАН. В этом случае волна будет проходить через весь материал, поглощаясь преимущественно частицами металлических сплавов, и, таким образом, значительно ослабевать. Распределенные в углеродной матрице микрочастицы сплавов не позволят отразится от них электромагнитной волне. В случае высокого значения электропроводности ППАН волна не проходит в толщу и не взаимодействует с частичками металлов, а отражается от незначительного по глубине слоя ППАН. Сопоставление экспериментальных результатов с результатами моделирования показало их некоторое расхождение. Это в первую очередь связано с начальными параметрами моделируемого ППАН. Данные параметры были определены для более низкого диапазона частот 1—3 ГГц [10]. Дальнейшее изучение характеристик ППАН при пропускании через него электромагнитного излучения более высоких частот позволит приблизить характеристики модели к реальным экспериментам. Тем не менее, можно утверждать, что использование подобных моделей в рамках программного комплекса COMSOL Multiphysics дает качественно верную картину процесса и может быть использовано для прогностических исследований поглощающих способностей новых материалов.

### Библиографический список

1. Кербер М.Л., Виноградов В.М., Головкин Г.С., Горбаткина Ю.А., Крыжановский В.К., Куперман А.М., Симонов–Емельянов И.Д., Халиулин В.И., Бунаков В.А. Под ред. А.А. Берлина. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология. СПб.: Профессия; 2008. 560 с.

2. Патент (РФ) № 1721634 SU11, МПК Н01В 1/04, H01В 1/18, H01В 1/20, H01В 1/22. Зализная Н.Ф., Земцов Л.М., Карпачева Г.П., Давыдов Б.Э., Козлов Ю.Г., Хрекин А.В., Щекин И.А. Способ получения проводящих покрытий. Заявл.: 01.11.1989; опубл. 23.03.1992. URL: https:// yandex.ru/patents/doc/SU1721634A1\_19920323

3. Берлин А.А., Гейдерих М.А., Давыдов Б.Э., Каргин В.А., Карпачева Г.П., Кренцель Б.А., Хутарева Г.В. Химия полисопряженных систем. М.: Химия; 1972. 272 с.

4. Давыдов Б.Э. Некоторые химические особенности и полупроводниковые свойства полисопряженных систем. Дисс. ... д-ра хим. наук. М.; 1965. 487 с.

5. Ghorpade R.V., Cho D.W., Hong S.C. Effect of controlled tacticity of polyacrylonitrile (co)polymers on their thermal oxidative stabilization behaviors and the properties of resulting carbon films. *Carbon.* 2017; 121: 502—511. https://doi.org/10.1016/j.carbon.2017.06.015

6. Obraztsov A.N., Volkov A.P., Petrushenko Y.V., Satanovskaya O.P. Application of nanocarbon cold cathodes in lighting elements. *Surface and Interface Analysis*. 2004; 36(5–6): 470—473. https://doi.org/10.1002/sia.1711

7. Han Q., Wang F., Wang Z., Yi Z., Na Z., Wang X., Wang L. PAN–based carbon fiber@SnO<sub>2</sub> for highly revers-

1. Berlin A.A. (ed.). Kerber M.L., Vinogradov V.M., Golovkin G.S., Gorbatkina Yu.A., Kryzhanovskii V.K., Kuperman A.M., Simonov–Emel'yanov I.D., Khaliulin V.I., Bunakov V.A. Polymer composite materials: structure, properties, technology. Polymer composite materials. St. Petersburg: Professiya; 2008. 560 p. (In Russ.)

2. Patent (RU) No 1721634 SU11, MPC H01B 1/04, H01B 1/18, H01B 1/20, H01B 1/22. Zaliznaya N.F., Zemtsov L.M., Karpacheva G.P., Davydov B.E., Kozlov Yu.G., Khrekin A.V., Shchekin I.A. Method of obtaining conductive coatings. Appl.: 01.11.1989; publ.: 23.03.1992. (In Russ.). URL: https://yandex.ru/patents/doc/SU1721634A1\_19920323

3. Berlin A.A., Geiderikh M.A., Davydov B.E., Kargin V.A., Karpacheva G.P., Krentsel' B.A., Khutareva G.V. Chemistry of polysynthetic systems. Moscow: Khimiya; 1972. 272 p. (In Russ.)

4. Davydov B.E. Some chemical features and semiconductor properties of polyconjugated systems thesis. Diss. Dr. Sci. (Chem.). Moscow; 1965. 487 p. (In Russ.)

5. Ghorpade R.V., Cho D.W., Hong S.C. Effect of controlled tacticity of polyacrylonitrile (co)polymers on their thermal oxidative stabilization behaviors and the properties of resulting carbon films. *Carbon.* 2017; 121: 502—511. https://doi.org/10.1016/j.carbon.2017.06.015

6. Obraztsov A.N., Volkov A.P., Petrushenko Y.V., Satanovskaya O.P. Application of nanocarbon cold cathodes in lighting elements. *Surface and Interface Analysis*. 2004; 36(5–6): 470—473. https://doi.org/10.1002/sia.1711

7. Han Q., Wang F., Wang Z., Yi Z., Na Z., Wang X., Wang L. PAN–based carbon fiber@SnO<sub>2</sub> for highly reversible structural lithium–ion battery anode. *Jonics*. 2018; 24(4): 1049—1055. https://doi.org/10.1007/s11581-017-2261-0

8. Han Q., Shi M., Han Z., Zhang W., Li Y., Zhang X., Sheng Y. Synthesis of one-dimensional PAN-based carbon fiber/NiO composite as an anode material for structural lithium-ion batteries. *Ionics*. 2020; 26(12): 5935—5940. https://doi.org/10.1007/s11581-020-03762-8

9. Кожитов Л.В., Емельянов С.Г., Косушкин В.Г., Стрельченко С.С., Пархоменко Ю.Н., Козлов В.В., Кожитов С.Л. Технология материалов микро– и наноэлектроники. Курск: Юго–Западный государственный университет; 2012. 862 с.

10. Радченко Д.П., Запороцкова И.В., Кожитов Л.В. Радиопоглощающие свойства пиролизованного полиакрилонитрила: модель в диапазоне от 1 до 3 ГГц. Сб. трудов Междунар. науч. конф. «Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики». Воронеж, 13–15 декабря 2021 г. Воронеж: ООО «Вэлборн»; 2022. С. 701—706.

11. Запороцкова И.В., Кожитов Л.В., Аникеев Н.А., Давлетова О.А., Муратов Д.Г., Попкова А.В., Якушко Е.В. Синтез, свойства и моделирование металлоуглеродных нанокомпозитов. Волгоград: Из-во ВолГУ; 2019. 534 с.

12. Zaporotskova I.V., Kozhitov L.V., Boroznina N.P., Kakorina O.A., Boroznin S.V., Radchenko D.P., Belonenko M.B. New radar-absorbing metal composites based on pyrolyzed polyacrylonitrile containing atoms of transition metals Ni and Co. *Bulletin of the Russian Academy* of Sciences: Physics. 2021; 85(12): 1348—1353. https://doi. org/10.3103/S1062873821120376

### References

ible structural lithium–ion battery anode. *Jonics*. 2018; 24(4): 1049—1055. https://doi.org/10.1007/s11581-017-2261-0

8. Han Q., Shi M., Han Z., Zhang W., Li Y., Zhang X., Sheng Y. Synthesis of one–dimensional PAN–based carbon fiber/NiO composite as an anode material for structural lithium–ion batteries. *Ionics*. 2020; 26(12): 5935—5940. https://doi.org/10.1007/s11581-020-03762-8

9. Kozhitov L.V., Emel'yanov S.G., Kosushkin V.G., Strel'chenko S.S., Parkhomenko Yu.N., Kozlov V.V., Kozhitov S.L. Technology of materials for micro– and nanoelectronics. Kursk: Southwestern State University; 2012. 862 p. (In Russ.)

10. Radchenko D.P., Zaporotskova I.V., Kozhitov L.V. Radio absorption properties of pyrolyzed polyacrylonitrile: a model in the range from 1 to 3 GHz. Proceed. of the Inter. scient. conf. "Actual Problems of applied mathematics, informatics and mechanics": Voronezh, December 13–15, 2021. Voronezh. OOO "Velborn"; 2022. P. 701—706. (In Russ.)

11. Zaporotskova I.V., Kozhitov L.V., Anikeev N.A., Davletova O.A., Muratov D.G., Popkova A.V., Yakushko E.V. Synthesis, properties and modelling of metallocarbon nanocomposites. Volgograd; Iz–vo VolGU; 2019. 534 p. (In Russ.)

12. Zaporotskova I.V., Kozhitov L.V., Boroznina N.P., Kakorina O.A., Boroznin S.V., Radchenko D.P., Belonenko M.B. New radar-absorbing metal composites based on pyrolyzed polyacrylonitrile containing atoms of transition metals Ni and Co. *Bulletin of the Russian Academy* of Sciences: Physics. 2021; 85(12): 1348—1353. https://doi. org/10.3103/S1062873821120376

### Информация об авторах / Information about the authors

Радченко Даниил Павлович — старший преподаватель кафедры информационной безопасности, Волгоградский государственный университет, Университетский просп., д. 100, Волгоград, 400062, Российская Федерация; e-mail: crystal\_steel@bk.ru

Запороцкова Ирина Владимировна — доктор физ.-мат. наук, профессор, директор института приоритетных технологий, Волгоградский государственный университет, Университетский просп., д. 100, Волгоград, 400062, Российская Федерация; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9486-2482; e-mail: irinazaporotskova@gmail.com

Кожитов Лев Васильевич — доктор техн. наук, профессор, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Ленинский просп., д. 4, стр. 1, Москва, 119049, Российская Федерация; ORCID: https://orcid. org/0000-0002-4973-1328; e-mail: kozitov@misis.ru

Запороцков Павел Александрович — канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры судебной экспертизы и физического материаловедения, Волгоградский государственный университет, Университетский просп., д. 100, Волгоград, 400062, Российская Федерация; e-mail: zaporotskov.pavel@ volsu.ru

Попкова Алёна Васильевна — канд. тех. наук, старший научный сотрудник, АО «НИИ НПО «ЛУЧ», ул. Железнодорожная, д. 24, Подольск, 142103, Российская Федерация; ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4657-9305; e-mail: popkova-alena@rambler.ru

Косушкин Виктор Григорьевич — доктор техн. наук, профессор, зав. кафедрой материаловедения, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (калужский филиал), ул. Баженова, д. 2., Калуга, 248000, Российская Федерация; e-mail: vic kos@mail.ru **Daniel P. Radchenko** — Senior Lecturer at the Department of Information Security, Volgograd State University, 100 Universitetsky Ave., Volgograd 400062, Russian Federation; e-mail: crystal\_steel@bk.ru

Irina V. Zaporotskova — Dr. Sci. (Phys.–Math.), Professor, Director of the Institute of Priority Technologies; Volgograd State University, 100 Universitetsky Ave., Volgograd 400062, Russian Federation; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9486-2482; e-mail: irinazaporotskova@gmail.com

**Lev V. Kozhitov** — Dr. Sci. (Eng.), Professor, National University of Science and Technology "MISIS", 4–1 Leninsky Ave., Moscow 119049, Russian Federation; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4973-1328; e-mail: kozitov@misis.ru

**Pavel A. Zaporotskov** — Cand. Sci. (Phys.–Math.), Associate Professor of the Department of Forensic Science and Physical Materials Science, Volgograd State University, 100 Universitetsky Ave., Volgograd 400062, Russian Federation; e-mail: zaporotskov.pavel@volsu.ru

Alena V. Popkova — Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, JSC "Research Institute NPO "LUCH", 24 Zheleznodorozhnaya Str., Podolsk 142103, Russian Federation; ORCID: https://orcid. org/0000-0003-4657-9305; e-mail: popkova-alena@rambler.ru

Victor G. Kosushkin — Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head Department of Materials Science, Bauman Moscow State Technical University (Kaluga Branch), 2 Bazhenov Str., Kaluga 248035, Russian Federation; e-mail: vic\_kos@mail.ru

Поступила в редакцию 01.06.2023; поступила после доработки 12.07.2023; принята к публикации 11.09.2023 Received 1 June 2023; Revised 12 July 2023; Accepted 11 September 2023