

УДК 61.61.09::29.35.19

**А. Г. Любимов<sup>1</sup>, Н. А. Авраменко<sup>1</sup>, О. М. Касперович<sup>1</sup>, Л. А. Ленартович<sup>1</sup>,  
А. Ф. Петрушеня<sup>1</sup>, Г. В. Горохов<sup>2</sup>, Д. С. Быченко<sup>2</sup>, П. П. Кужир<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Белорусский государственный технологический университет

<sup>2</sup>Научно-исследовательское учреждение «Институт ядерных проблем»  
Белорусского государственного университета

### **ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА РЕШЕТОК ЭШБИ, ПОЛУЧЕННЫХ ПО FDM ТЕХНОЛОГИИ, В МИКРОВОЛНОВОМ ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ**

Основной задачей работы являлось создание экранирующих элементов на основе наполненных углеродным микроволокном (производства ОАО «СветлогорскХимволокно») полимеров. В качестве полимерных матриц выбраны марки PLA 05B и ABS MG47F. Материалы для печати были получены экструзией филамента номинальным диаметром 1,75 мм. Экранирующие элементы в виде решеток Эшби изготовлены методом 3D-печати на принтере Creatbot F430. Исследованы электромагнитные свойства в микроволновом частотном диапазоне (26–37 ГГц). Установлено, что структура, полученная из PLA, наполненного углеродным микроволокном (20 мас. %), обладает коэффициентом поглощения 0,6 на частоте 30 ГГц.

**Ключевые слова:** решетки Эшби, электромагнитное излучение, 3D-печать.

**A. G. Liubimau<sup>1</sup>, N. A. Avramenko<sup>1</sup>, O. M. Kasperovich<sup>1</sup>,  
L. A. Lenartovich<sup>1</sup>, A. F. Petrushenya<sup>1</sup>,  
G. V. Gorokhov<sup>2</sup>, D. S. Bychanok<sup>2</sup>, P. P. Kuzhir<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Belarusian State Technological University

<sup>2</sup>Research Institute for Nuclear Problems of Belarusian State University

### **ELECTROMAGNETIC PROPERTIES OF LATTICES ASHBY RECEIVED ON FDM TECHNOLOGY IN THE MICROWAVE FREQUENCY RANGE**

The main objective of the work was the creation of shielding elements based on polymers filled with carbon microfiber (manufactured by SvetlogorskKhimvolokno OJSC). Commercial PLA 05B and ABS MG47F polymers were used as a matrix. Printing materials were obtained by extrusion of a filament with a nominal diameter of 1.75 mm. Ashby lattice were prepared using by 3D-printing on a Creatbot F430 printer. The electromagnetic properties in the microwave frequency range (26 – 37 GHz) were investigated. It was found that the structure obtained from PLA filled with carbon microfibre (20 wt.%) has an absorption coefficient of 0.6 at a frequency of 30 GHz.

**Key words:** Ashby lattices, electromagnetic radiation, 3D printing.

**Введение.** Ввиду привлекательных электромагнитных свойств, позволяющих достигать высоких значений спектрального коэффициента поглощения в сверхвысококачастотной области, полимерные композиционные материалы с проводящими нано- и микроскопическими включениями представляют широкий интерес для применений, связанных с изготовлением конструктивных элементов приемопередающей аппаратуры, таких как антенны и элементы волноводного тракта. Актуальной задачей является также изготовление радиопоглощающих структур на основе таких композитов, поскольку современный рост числа малых приемопередающих устройств требует увеличения пропускной способности технологий беспроводной передачи данных [1]. Радиопоглощающие материалы и структуры являются ключевым элементом решения проблемы электромагнитного загрязнения окружающей среды, обусловленной увеличением числа устройств, использующих беспроводную связь.

Возможность изготовления конечного изделия из композита обеспечивается, в значительной мере, свойствами его полимерной матрицы. В зависимости от ее типа возможно использование композита для литья в формы, в качестве связующего в стекло- и углепластиковых изделиях, а также для 3D-печати методами FDM [2] и SLS [3]. Перспективные аддитивные технологии привлекательны для прототипирования и изготовления элементов приемопередающей аппаратуры сложной геометрической конфигурации, недостижимой с помощью актуальных технологий переработки полимеров. За последние годы было представлено множество работ по получению проводящих полимерных композитов (ППК), поскольку такие композиты обладают низкой плотностью, низкой стоимостью, технологичны для переработки, коррозионно стойки. Дополнительным преимуществом является возможность перестраивания электрических или электромагнитных свойств в зависимости

от структуры композита. Ввиду таких свойств ППК являются объектом исследований в области экранирования микроволновых частот для применения в военной отрасли, в электронике для снижения электромагнитного фона, в радиотехнике и др. Задача защиты от электромагнитных помех требует от термопластичных композитов хорошей электропроводности, которая может быть достигнута с помощью металлических включений, диэлектрических и углеродистых наполнителей, таких как сажа, графит, одно- и многостенные углеродные нанотрубки, графен, углеродные волокна и др. [4]. В частности, углеродные нанотрубки, графен и технический углерод привлекательны за счет сочетания высоких механических, магнитных, оптических и теплофизических свойств, что делает эти вещества идеальными добавками для создания перколяционных (проводящих) сетей внутри композита. Формирование перколяционной сети в полимерной матрице может значительно улучшить электрические и экранирующие свойства композита. Однако недостаточная сила межмолекулярного взаимодействия между полимерными доменами, которые образуются в процессе переработки, серьезно снижает механические свойства конечного материала. 3D-печать позволяет использовать более продвинутые концепции для изготовления геометрически сложных объектов. Как правило, все методы 3D-печати следуют базовому процессу аддитивного производства, в основе которого лежит создание цифровой модели, разбиение модели на слои и трансляция кода с заданным алгоритмом производства детали в принтер. FDM (Fused Deposition Modelling) – является наиболее широко распространенной разновидностью 3D-печати, при которой происходит послойное наплавление термопластичного материала, подаваемого в виде филамента. Благодаря добавлению различных наполнителей в филамент, данный метод может быть легко использован для печати различными композитными материалами [5]. В работе [6] описывается создание проводящего материала «Карбоморф» и его применение для печати функциональных объектов на примере датчиков. «Карбоморф» создается с использованием технического углерода (CB – carbon black) в качестве наполнителя для обеспечения проводимости и смешивается с поликапролактоном. Измеренное удельное сопротивление распечатанных кубических блоков размером 5 мм составило  $(9,0 \pm 1,0) \Omega\text{-см}$  и  $(12,0 \pm 1,0) \Omega\text{-см}$  для плоскости и перпендикуляра к слоям соответственно. Тем не менее необходимы дальнейшие исследования, чтобы выяснить, поддерживается ли удельное сопротивление при изменениях размера блока в направлениях  $x$ ,  $y$  и  $z$ , поскольку из-за

особенностей FDM-печати в произведенных образцах всегда наблюдается анизотропия свойств. Это вытекает из огромного количества вариантов разбиения объекта на слои, «слайсинга», выбора направления выкладки расплава полимера и вариантов заполнения объема детали. Кроме того, решающее значение имеет равномерная плотность материала для получения точных значений электропроводности. Сами готовые детали могут различаться по уровням адгезии между слоями, а также иметь внутренние воздушные зазоры внутри напечатанной структуры. Важно понимать, что экструдированная нить филамента может быть неоднородной и подвергаться разрывам во время экструзии. Эти нарушения во время процесса производства могут привести к изменениям в объемном сопротивлении модели для 3D-печати [7]. Использование пористых проводящих структур в качестве поглотителей электромагнитного излучения привлекает значительное внимание исследователей [8–11]. Рассматриваются как регулярные структуры [10, 11], так и структуры со случайным распределением пор [12]. Варьируя характерные геометрические параметры таких структур, можно оптимизировать характер электромагнитного отклика для конкретных практических нужд.

**Основная часть.** Ранее [13] исследовались решетки Эшби. Было показано, что необходимо увеличивать содержание углеродного волокна, при этом следует заменить марку PLA Ingeo 4043D на полимер с более высоким показателем текучести расплава (ПТР), поскольку увеличение содержания волокна приводит к невозможности получения филамента.

*Материалы:* для изготовления композита, пригодного для 3D-печати методом FDM, использовались полимеры Regranulat PLA 5 B (ПТР 8,0 г/10 мин), ABS MG47F (ПТР 5,6 г/10 мин), микроуглеродные волокна производства ОАО «СветлогорскХимволокно», ТУ ВУ 400031289. 127-2010. Микрофотографии волокна представлены на рис. 1.

*Получение филаментов* осуществлялось на двухшнековом экструдере Rondol. Параметры экструдера: диаметр шнеков 10 мм, сонаправленно вращающиеся,  $L/D = 25$ , две смесительные зоны. Для равномерного распределения волокна в полимере первоначально изготавливался компаунд, из которого затем получался филамент. Параметры процесса переработки: температура расплава 160–190°C, давление в фильтре 12 бар, скорость вращения шнеков 30 мм/мин. Были получены филаменты номинальным диаметром  $(1,75 \pm 0,2)$  мм, содержащие 20 мас. % микроуглеродного волокна. Принимаем допущение, что углеродное волокно равномерно распределено по всему объему полимера.

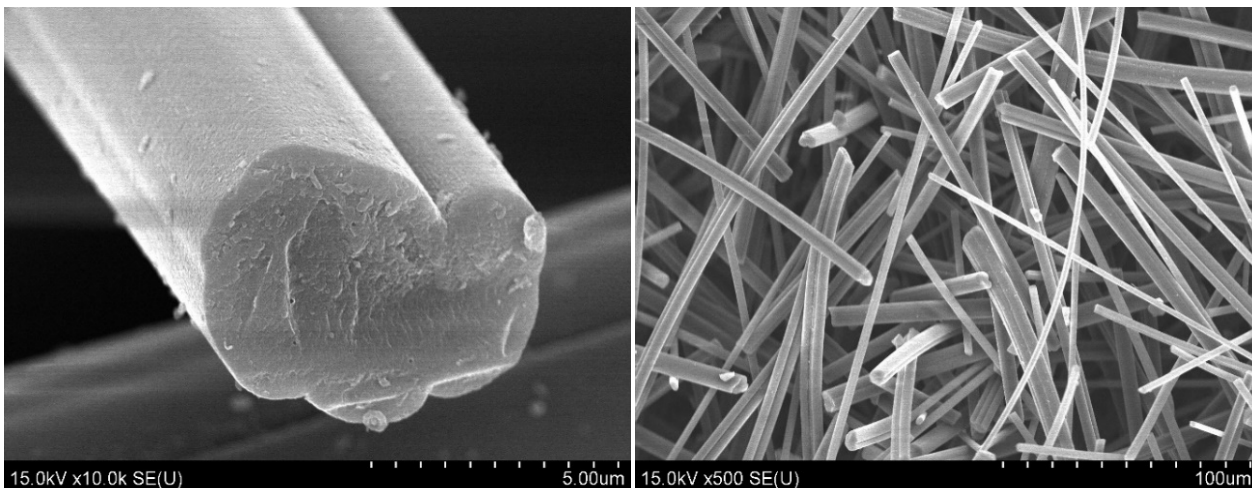


Рис. 1. Структура микроуглеродного волокна

Методом 3D-печати на принтере Creabot F430 были получены решетки Эшби (рис. 2). Параметры печати: диаметр сопла – 0,4 мм; высота слоя – 0,1 мм; ширина слоя ABS – 0,4 мм; (PLA – 0,35 мм); скорость печати – 10 мм/с; откат материала отключен; печать без подложки; скорость экструзии ABS – 100% (PLA – 110%); температура экструдера ABS – 235°C (PLA – 215°C); температура стола ABS – 80°C (PLA – 40°C); температура камеры ABS – 60°C (PLA – 30°C).

*Методика измерения электромагнитного отклика.* Под электромагнитным откликом принято понимать свойства, присущие непосредственно рассматриваемому объекту, обла-

дающему собственной структурой и геометрическими размерами, в частности спектральные коэффициенты отражения, пропускания и поглощения. Знание параметров электромагнитного отклика однородного плоскопараллельного слоя материала позволяет установить значение его диэлектрической проницаемости [14].

Согласно определению, S-параметры представляют собой отношение амплитуд падающего и отраженного образцом (прошедшего сквозь образец) излучения. Квадраты параметров  $S_{11}$  и  $S_{21}$  соответствуют коэффициентам отражения  $R$  и пропускания  $T$  соответственно. Тогда спектральный коэффициент поглощения рассчитывается как  $A = 1 - R - T$  [9, 10].

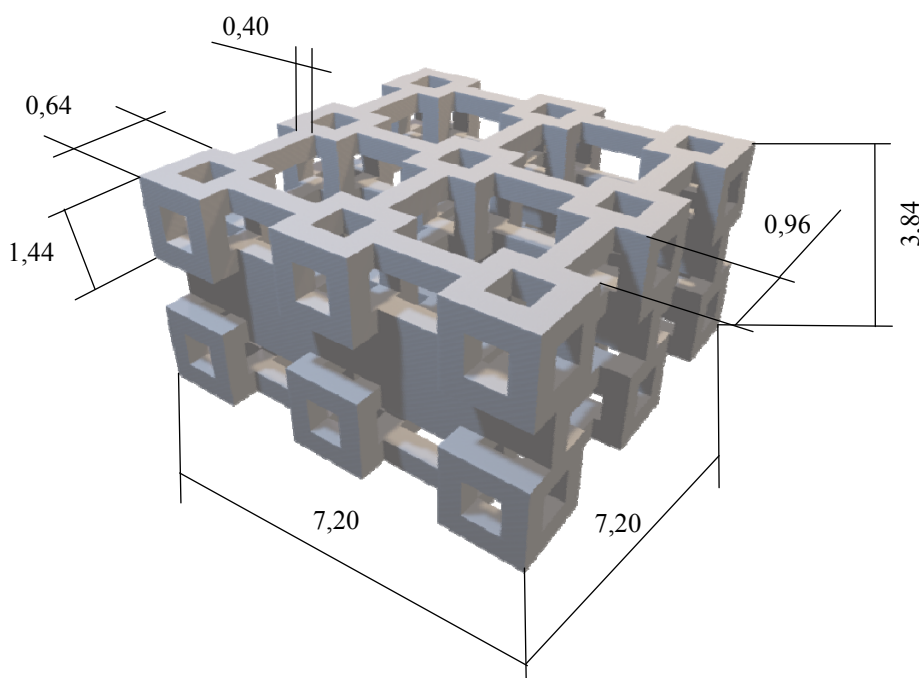


Рис. 2. Параметры решетки Эшби для 3D-печати

Измерение электромагнитного отклика регулярных структур, изготовленных методом FDM-печати, осуществлялось в диапазоне 26–37 ГГц с помощью скалярного анализатора цепей Elmika R2-408R в прямоугольном волноводе размером  $(7,2 \times 3,4)$  мм. Образец размещался нормально к оси волновода (рис. 3) полностью перекрывая его сечение.

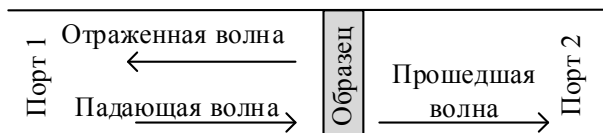


Рис. 3. Схема размещения образца в волноводном тракте скалярного анализатора цепей

**Обсуждение результатов.** Геометрические параметры всех исследованных решеток были идентичны, характерные размеры выбирались оптимальными для полного перекрытия сечения волновода двумя элементарными ячейками решетки. Спектральные коэффициенты исследованных структур, изготовленных методом FDM-печати из чистых и наполненных микроуглеродным волокном ABS и PLA, показаны на рис. 4, 5.

Анализируя данные частотные зависимости, можно отметить существенно меньшую прозрачность и больший коэффициент поглощения решетчатой структуры, изготовленной из наполненного PLA по сравнению с остальными исследованными структурами.

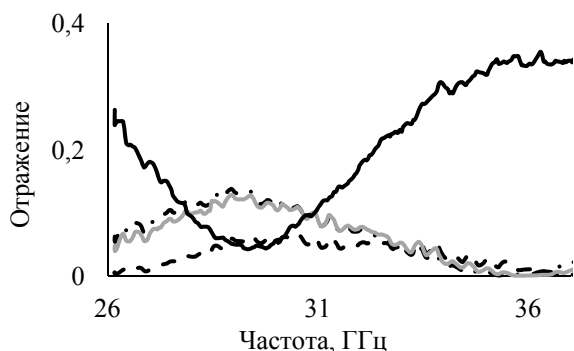


Рис. 4. Спектральный коэффициент отражения решетчатых структур, изготовленных из чистых и наполненных PLA и ABS

Указанный образец обладает наименьшим коэффициентом пропускания (соответственно, наибольшей экранирующей способностью) за счет

поглощения и отражения. Последнее указывает на то, что наполненный PLA характеризуется наибольшей среди всех рассмотренных материалов проводимостью. В то же время структура, изготовленная из наполненного ABS, демонстрирует несколько более высокие по сравнению с изготовленными из чистых полимеров (пусть и ниже таковых для структур из наполненного PLA) значения коэффициента поглощения при отсутствии роста отражательной компоненты электромагнитного отклика. Из этого можно заключить, что проводимость полимерного композита на основе ABS ниже таковой для PLA ввиду различия характера распределения наполнителя в рассматриваемых полимерах.

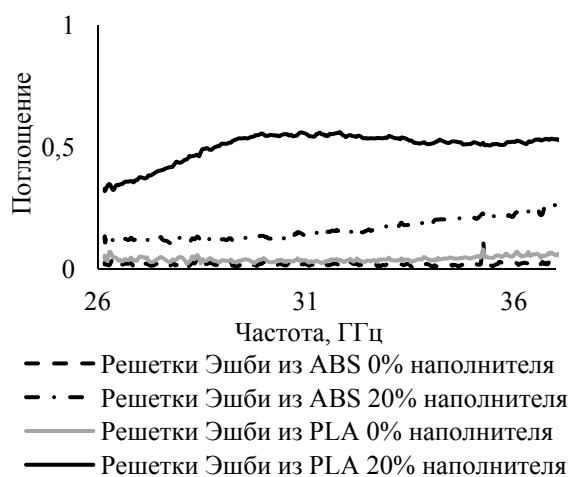


Рис. 5. Спектральный коэффициент поглощения решетчатых структур, изготовленных из чистых и наполненных PLA и ABS

**Заключение.** Структура, состоящая из композита на основе PLA, продемонстрировала наибольший среди всех рассмотренных образцов спектральный коэффициент поглощения во всем исследованном диапазоне. Различия в электромагнитных откликах решеток, изготовленных из наполненных композитов, указывает на более высокую проводимость наполненного PLA по сравнению с ABS ввиду различия характеров распределения частиц наполнителя в рассмотренных полимерах. Разница в удельной проводимости композитов в зависимости от материала диэлектрической матрицы может объясняться как непосредственно различием характера распределения наполнителей, связанным с ПТР полимеров, так и лучшей изоляцией отдельных частиц наполнителя полимером ABS.

## Литература

1. Qualcomm Delivers Breakthrough 5G NR mmWave and Sub-6 GHz RF Modules for Mobile Devices / Qualcomm. URL: <https://www.qualcomm.com/news/releases/2018/07/23/qualcomm-delivers-breakthrough-5g-nr-mmwave-and-sub-6-ghz-rf-modules-mobile> (accessed 13.12.2018).

2. Carbon nanotubes vs graphene nanoplatelets for 3D-printable composites / G. Gorokhov [et al.] // *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 2019. Vol. 503. P. 012010.
3. Selective Laser Sintering Fabricated Thermoplastic Polyurethane/Graphene Cellular Structures with Tailorable Properties and High Strain Sensitivity / A. Ronca [et al.] // *Appl. Sci.* 2019. Vol. 9, no 5. P. 864.
4. Joseph J., Paul J., Sidpara A. Thermoplastic Composites for EMI Shielding Applications. 2017. 16 p.
5. Guo H., Lv R., Bai S. Recent advances on 3D printing graphene-based composites // *Nano Mater. Sci.* 2019. March. P. 1350–1375.
6. A Simple, Low-Cost Conductive Composite Material for 3D Printing of Electronic Sensors / S. J. Leigh [et al.] // *PLoS One*. 2012. Vol. 7, no. 11. P. 1–6.
7. 3D printing electronic components and circuits with conductive thermoplastic filament / P. F. Flowers [et al.] // *Addit. Manuf.* 2017. Vol. 18. P. 156–163.
8. Du Toit L. J. The design of Jauman absorbers // *IEEE Antennas Propag. Mag.* 1994. Vol. 36, no. 6. P. 17–25.
9. Electromagnetic and thermal properties of three-dimensional printed multilayered nano-carbon/poly(lactic) acid structures / A. Paddubskaya [et al.] // *J. Appl. Phys.* 2016. Vol. 119, no. 13. P. 135102.
10. Carbon periodic cellular architectures / A. Szczurek [et al.] // *Carbon*. 2015. Vol. 88. P. 70–85.
11. Electromagnetic properties of periodic carbon architectures at high frequencies / D. Bychanok [et al.] // *Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA): International Conference*. 2015. P. 43–46.
12. Electromagnetic properties of polyurethane template-based carbon foams in Ka-band / D. Bychanok [et al.] // *Phys. Scr.* 2015. Vol. 90, no. 9. P. 094019.
13. Материалы для 3D печати и их электромагнитные свойства в СВЧ диапазоне / А. Г. Любимов [и др.] // *Технология органических веществ: материалы докл. 83-й науч.-техн. конф. проф.-преподават. состава, науч. сотрудников и аспирантов (с междунар. участием), Минск, 4–15 февраля 2019 г. Минск: БГТУ, 2019. С. 47–48.*
14. Baker-Jarvis J., Vanzura E. J., Kissick W. A. Improved technique for determining complex permittivity with the transmission/reflection method // *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* 1990. Vol. 38, no 8. P. 1096–1103.

### References

1. Qualcomm Delivers Breakthrough 5G NR mmWave and Sub-6 GHz RF Modules for Mobile Devices. Qualcomm. Available at: <https://www.qualcomm.com/news/releases/2018/07/23/qualcomm-delivers-breakthrough-5g-nr-mmwave-and-sub-6-ghz-rf-modules-mobile> (accessed 13.12.2018).
2. Gorokhov G., Bychanok D., Meisak D., Shlyk I., Liubimau A., Angelova P., Menseidov C., Ivanov E., Kotsilkova, R., Casa, M., Ciambelli, P., Kuzhir P. Carbon nanotubes vs graphene nanoplatelets for 3D-printable composites. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, 2019, vol. 503, p. 012010.
3. Ronca A., Rollo G., Cerruti P., Fei G., Gan X., Buonocore G., Lavorgna M., Xia H., Silvestre C., Ambrosio L. Selective Laser Sintering Fabricated Thermoplastic Polyurethane/Graphene Cellular Structures with Tailorable Properties and High Strain Sensitivity. *Applied Sciences*, 2019, vol. 9, no. 5, p. 864.
4. Joseph J., Paul J., Sidpara A. Thermoplastic Composites for EMI Shielding Applications, 2017. 16 p.
5. Guo H., Lv R., Bai S. Recent advances on 3D printing graphene-based composites. *Nano Mater. Sci.*, 2019, March, pp. 1350–1375.
6. Leigh S. J., Bradley R. J., Purssell C. P., Billson D. R., Hutchins D. A. A Simple, Low-Cost Conductive Composite Material for 3D Printing of Electronic Sensors. *PLoS One*, 2012, vol. 7, no. 11, pp. 1–6.
7. Flowers P. F., Reyes C., Ye S., Kim M. J., Wiley B. J. 3D printing electronic components and circuits with conductive thermoplastic filament. *Addit. Manuf.*, 2017, vol. 18, pp. 156–163.
8. Du Toit L. J. The design of Jauman absorbers. *IEEE Antennas Propag. Mag.*, 1994, vol. 36, no 6, pp. 17–25.
9. Paddubskaya A., Valynets N., Kuzhir P., Batrakov K., Maksimenko S., Kotsilkova R., Velichkova H., Petrova I., Biró I., Kertész K., Márk G. I., Horváth Z. E., Biró L. P. Electromagnetic and thermal properties of three-dimensional printed multilayered nano-carbon/poly(lactic) acid structures. *J. Appl. Phys.*, 2016, vol. 119, no. 13, p. 135102.
10. Szczurek A., Ortona A., Ferrari L., Rezaei E., Medjahdi G., Fierro V., Bychanok D., Kuzhir P., Celzard A. Carbon periodic cellular architectures. *Carbon*, 2015, vol. 88, pp. 70–85.

11. Bychanok D., Plyushch A., Gorokhov G., Skadorov V., Kuzhir P., Maksimenko S., Macutkevich J., Ortona A., Ferrari L., Rezaei E., Szczurek A., Fierro V., Celzard A. Electromagnetic properties of periodic carbon architectures at high frequencies. *Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA): International Conference*, 2015, pp. 43–46.

12. Bychanok D., Plyushch A., Piasotski K., Paddubskaya A., Voronovich S., Kuzhir P., Baturkin S., Klochkov A., Korovin E., Letellier M., Schaefer S., Szczurek A., Fierro V., Celzard A. Electromagnetic properties of polyurethane template-based carbon foams in Ka-band. *Phys. Scr.*, 2015, vol. 90, no. 9, p. 094019.

13. Lyubimau A. G., Petrushenya A. F., Kasperovich O. M., Lenartovich L. A., Gorokhov G. V., Bychanok D. S., Kuzhir P. P. Materials for 3D printing and their electromagnetic properties in the microwave range. *Materialy dokladov 83-y nauchno-tehnicheskoy konferentsii professorsko-prepodavatel'skogo sostava, nauchnykh sotrudnikov i aspirantov (s mezhdunarodnym uchastiyem) "Tekhnologiya organicheskikh veshchestv"* [Materials of reports of the 83rd scientific and technical conference of faculty, researchers and graduate students (with international participation) "Technology of organic substances"]. Minsk, 2019, pp. 47–48.

14. Baker-Jarvis J. Vanzura E. J., Kissick W. A. Improved technique for determining complex permittivity with the transmission/reflection method. *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, 1990, vol. 38, no. 8, pp. 1096–1103.

### Информация об авторах

**Любимов Александр Геннадьевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры полимерных композиционных материалов. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: lubimov@belstu.by

**Ленартович Лилия Алексеевна** – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры полимерных композиционных материалов. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: lenartovich@belstu.by

**Касперович Ольга Михайловна** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры полимерных композиционных материалов. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: kasperovichvolha@yandex.by

**Петрушеня Александр Федорович** – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры полимерных композиционных материалов. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: petraf@belstu.by

**Авраменко Никита Алексеевич** – студент. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: 31500003@belstu.by

**Горохов Глеб Викторович** – младший научный сотрудник лаборатории «НаноЭлектроМагнетизм». Научно-исследовательское учреждение «Институт ядерных проблем» Белорусского государственного университета (220030, г. Минск, ул. Бобруйская, 11, Республика Беларусь). E-mail: glebgorokhov@yandex.ru

**Быченко Дмитрий Сергеевич** – кандидат физико-математических наук, заведующий физико-технической лабораторией. Научно-исследовательское учреждение «Институт ядерных проблем» Белорусского государственного университета (220030, г. Минск, ул. Бобруйская, 11, Республика Беларусь). E-mail: dzmitrybychanok@yandex.by

**Кужир Полина Павловна** – кандидат физико-математических наук, заведующая лабораторией «НаноЭлектроМагнетизм». Научно-исследовательское учреждение «Институт ядерных проблем» Белорусского государственного университета (220030, г. Минск, ул. Бобруйская, 11, Республика Беларусь). E-mail: polina.kuzhir@gmail.com

### Information about the authors

**Liubimau Aliaksandr Gennadievich** – PhD (Engineering), Assistant Professor, the Department of polymer composite materials. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: lubimov@belstu.by

**Lenartovich Liliya Alekseevna** – PhD (Engineering), Senior Lecturer, the Department of polymer composite materials. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: lenartovich@belstu.by

**Kasperovich Volha Mikhailovna** – PhD (Engineering), Associate Professor, Assistant Professor, the Department of polymer composite materials. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: kasperovichvolha@yandex.by

**Petrushenya Aleksandr Phedorovich** – PhD (Engineering), Senior Lecturer, the Department of polymer composite materials. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: petraf@belstu.by

**Avramenko Nikita Alekseevich** – student. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: 31500003@belstu.by

**Gorokhov Gleb Viktorovich** – Junior Researcher, NanoElectroMagnetics laboratory. Research Institute for Nuclear Problems of Belarusian State University (11, Bobruiskaya str., 220030, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: glebgorokhov@yandex.ru

**Bychanok Dzmitry Syarheevich** – PhD (Physics), Head of Physical-technical laboratory. Research Institute for Nuclear Problems of Belarusian State University (11, Bobruiskaya str., 220030, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: dzmitrybychanok@yandex.by

**Kuzhir Polina Pavlovna** – PhD (Physics), Head of NanoElectroMagnetics laboratory. Research Institute for Nuclear Problems of Belarusian State University (11, Bobruiskaya str., 220030, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: polina.kuzhir@gmail.com

*Поступила 11.11.2019*