

ПОГЛОТИТЕЛИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ СВЧ-ДИАПАЗОНА НА ОСНОВЕ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ И КИРАЛЬНЫХ СТРУКТУР

Цянь Сонгсонг¹, В.А. Банний², А.Л. Самофалов³,
И.В. Семченко³, С.А. Хахомов³

¹Нанкинский университет науки и технологии, Нанкин, Китай

²Гомельский государственный медицинский университет, Гомель, Беларусь

³Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины, Гомель, Беларусь

ABSORBERS OF MICROWAVES BASED ON POLYMER COMPOSITES AND CHIRAL STRUCTURES

Qian Songsong¹, V.A. Bannyi², A.L. Samofalov³,
I.V. Semchenko³, S.A. Khakhomov³

¹Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, China

²Gomel State Medical University, Gomel, Belarus

³F. Scorina Gomel State University, Gomel, Belarus

Обоснована возможность использования киральных структур как компонентов поглотителей электромагнитного излучения СВЧ-диапазона. Экспериментально исследованы отражающие и поглощающие свойства полимерных композитов без киральных микроэлементов и при их наличии.

Ключевые слова: киральные микроэлементы, полимерные композиты, электромагнитное излучение СВЧ-диапазона, поглощающие покрытия, радиопоглощающие материалы, электромагнитные экраны.

The opportunity of using chiral structures as components of absorbers of microwaves has been proved. The reflecting and absorbing properties of polymer composites without chiral microelements and at their existence have been experimentally investigated.

Keywords: chiral microelements, polymer composites, microwaves, absorbing coating, radar-absorbing materials, electromagnetic screens.

Введение

В XXI веке значительно возросло количество разнообразных источников электромагнитного излучения (ЭМИ) и расширился используемый частотный диапазон. Воздействие ЭМИ на биологические и технические объекты является существенным фактором, влияющим на их жизнедеятельность и функционирование. Разработка систем защиты, экранирования и поглощения широкополосного ЭМИ является сложной теоретической и практической задачей. Технические требования, предъявляемые к таким системам, обуславливают необходимость поиска комплексных решений задачи защиты от ЭМИ, а также защиты информации, содержащейся в ЭМИ. Такие решения включают использование специальных радиопоглощающих материалов (РПМ) и покрытий, учет распространения радиоволн, оценку электродинамических свойств компонентов поглотителей и окружающей среды, конструктивных особенностей РПМ и электромагнитных экранов (ЭМЭ) и т. п. Многообразие компонентов, связующих, типов и конструкций РПМ и ЭМЭ приводит к необходимости определения целесообразности применения тех или иных устройств для решения конкретных задач.

Цель данной работы состояла в теоретическом обосновании возможности использования киральных структур как компонентов поглотителей ЭМИ СВЧ-диапазона, исследовании закономерностей взаимодействия СВЧ-излучения с киральными микроэлементами, разработке РПМ и ЭМЭ на основе полимерных композитов и киральных структур.

Вопросы создания поглощающих покрытий на основе однородных киральных структур изучены в работе [1]. В монографии под редакцией Л.М. Лынькова «Поглотители электромагнитного излучения. Применение в вооруженных силах» [2] рассмотрены методы обнаружения вооружения и военной техники, описаны виды маскировки военной техники, технология изготовления поглотителей ЭМИ, в том числе и на основе киральных сред. Например, в [3] описывается поглотитель, принцип действия которого основан на особых свойствах киральных сред. Киральность создается либо за счет геометрии включений (внутренняя), либо за счет структуры материала (созданием анизотропной многослойной конструкции) [4]. Киральные включения диспергированы в диэлектрическом материале с отличающейся комплексной диэлектрической

проницаемостью, в качестве которого могут применяться проводящие полимеры [5]. Характеристики материалов исследовались в диапазоне частот 8–18 ГГц [2].

В [6] предлагается использовать в качестве экранирующего покрытия искусственную среду, обладающую свойством киральности. Покрытие для защиты от ЭМИ может наноситься на объекты произвольной формы и не требует специального изменения форм конструкций. Покрытие представляет собой слой однородного диэлектрика, на поверхность которого нанесены полосковые металлические элементы в виде букв *S*. Причём элементы, размещённые на верхней и нижней поверхностях слоя, повернуты друг относительно друга на некоторый угол. Расстояние между соседними полосковыми элементами соотносится с длиной волны падающего ЭМИ. Результат заключается в возможности создания частотно- и поляризационно-селективного покрытия на основе полосковых элементов киральной формы. Покрытие является экранирующим для определённых полос частот, а для волн других частот является прозрачным. Полоса частот поглощения (или отражения) определяется размерами и формой киральных элементов, нанесённых на поверхности, а также расстоянием между ними [6].

В [7] рассматривается достоверность публикаций, заявляющих об использовании киральных сред (точнее комплексных микроволновых поглощающих материалов с киральными включениями) в качестве микроволновых поглотителей. Проведено сравнение киральных и некиральных поглотителей относительно поглощающих диэлектриков. Результатом является вывод о том, что авторы не обнаружили никакого физического механизма, позволявшего бы утверждать, что киральные включения улучшают характеристики микроволновых поглотителей. Обнаружено, что включения композитных материалов, состоящих из тонких металлических нитей, внесённых в сильно поглощающий диэлектрик, позволяют получить полуволновый резонанс, причиной которого не является геометрическая форма этих включений (являющаяся основным фактором поглощения).

1 Физическая модель полимерного слоистого ЭМЭ

Разработана физическая модель полимерного слоистого ЭМЭ (рисунок 1.1) [8]. В нем реализуются основные механизмы преобразования энергии ЭМИ. Предложено уравнение для описания потерь энергии ЭМИ, проходящего через этот экран.

Экран моделируется тремя слоями: диэлектрическим наружным (*D*), который обеспечивает согласование волнового сопротивления экрана и атмосферы, магнитным (*M*) и электропроводящим (*C*).

Потери энергии ЭМИ, прошедшего через него, складываются из потерь в слоях – диэлектрических E_D , магнитных E_M и вызванных электропроводностью E_C , а также ослабления энергии на границе раздела слоев E_{DM} и E_{MC} .

$$\Delta E = E_0 - E_h = E_D + E_M + E_C + E_{DM} + E_{MC}. \quad (1.1)$$

С учетом физических параметров слоев (ε и μ – диэлектрическая и магнитная проницаемости, γ – удельная электропроводность), их толщины (h) и межфазного взаимодействия выражение (1.1) можно представить в виде суммы функций:

$$\Delta E = F_D(\varepsilon_D, h_D) + F_M(\mu_M, h_M) + F_C(\gamma_C, h_C) + F_{DM}(\varepsilon_{DM}, \mu_{DM}) + F_{MC}(\mu_{MC}, \gamma_{MC}). \quad (1.2)$$

Функции F_{DM} и F_{MC} определяют ослабление энергии вследствие поглощения и рассеяния электромагнитных волн (ЭМВ) на границах слоев. Оно зависит от диэлектрических (ε_{DM}) и магнитных (μ_{DM} , μ_{MC}) параметров границ раздела, являющихся функцией межфазного взаимодействия слоев и электропроводности (γ_{MC}) границы *MC*.

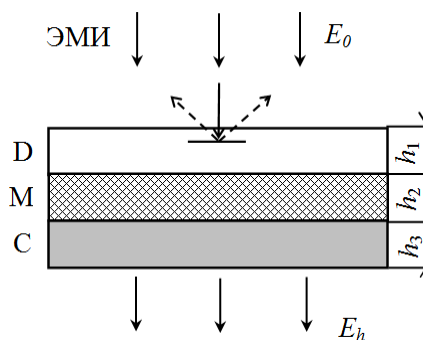


Рисунок 1.1 – Модель полимерного слоистого ЭМЭ

Модель показывает, что при разработке ЭМЭ необходимо учитывать как электромагнитные параметры каждого из слоев, так и их физико-химическое взаимодействие.

2 Способы формирования экспериментальных образцов РПМ и ЭМЭ

При проведении технологических экспериментов полиэтиленовое связующее механически смешивали с функциональным наполнителем (ФН) и затем подвергали гранулированию на экструзионной линии ЭК-75/1200, снабженной двухшнековым экструдером. Гранулят перерабатывали в листовые конструкционные РПМ с использованием типовых технологий формирования изделий из термопластов. Листовые монолитные РПМ формировали методами «горячего» прессования, волокнистые РПМ в виде нетканых полотен и конструктивных элементов – методом экструзии с пневматическим напылением полимерного расплава на формообразующую подложку (метод melt blowing) [8], [9]. В состав

полимерной матрицы в процессе их производства были введены углеродные и металлические нити, металлические спирали, углеродные ткани и металлические сетки (рисунок 2.1) различной структуры и электропроводности. Указанные операции были объединены в технологическом цикле и не требовали дополнительных приемов по скреплению волокон с компонентами.

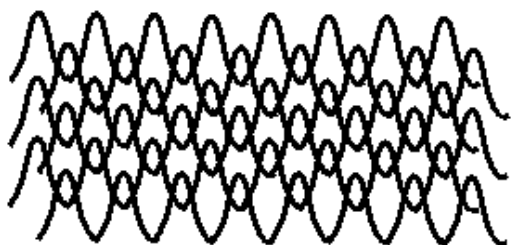


Рисунок 2.1 – Структура металлической сетки, введенной в состав комбинированного волокнистого РПМ

На рисунке 2.2 приведена схема расположения слоев в комбинированном волокнистом материале и изображения участков образцов волокнистых РПМ, армированных углеродными нитями (рисунок 2.3 а) и углеродной тканью (рисунок 2.3 б).

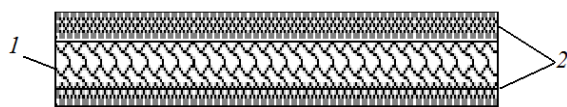


Рисунок 2.2 – Схема расположения слоев в комбинированном волокнистом материале:
1 – металлическая сетка;
2 – нетканый полимерный melt-blown материал

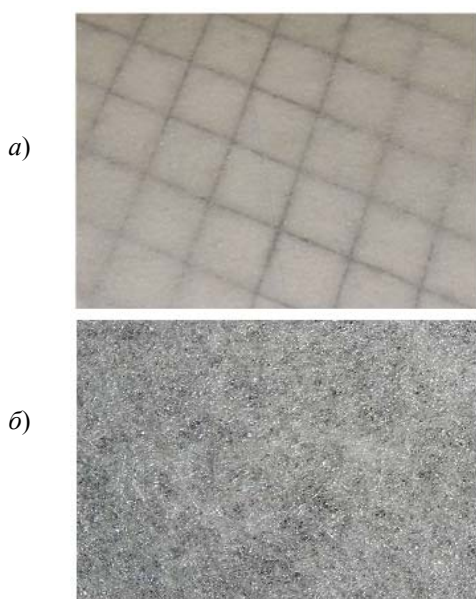


Рисунок 2.3 – Оптические изображения участков образцов волокнистых РПМ, армированных углеродными нитями (а) и углеродной тканью Бусофит ТР 3/2 (б) (масштаб 2:1)

Изготовлены комбинированные РПМ, типа «сэндвич», состоящие из чередующихся слоев волокнистого термопласта и углеродных тканей различной структуры и электропроводности. Толщина полимерных волокнистых слоев выбиралась кратной четверти средней длины волны из диапазона воздействующего ЭМИ. Слои адгезионно склеены или прошиты в многослойный композитный лист толщиной, не превышающей 14 мм.

3 Экспериментальное исследование

Частотные зависимости коэффициентов отражения (R) и ослабления (S) энергии нормально падающей плоской ЭМВ для экспериментальных образцов РПМ измерены в волноводных линиях в диапазоне частот 2–27 ГГц (рисунок 3.1).

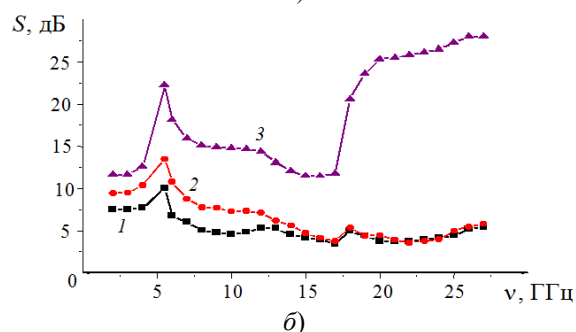
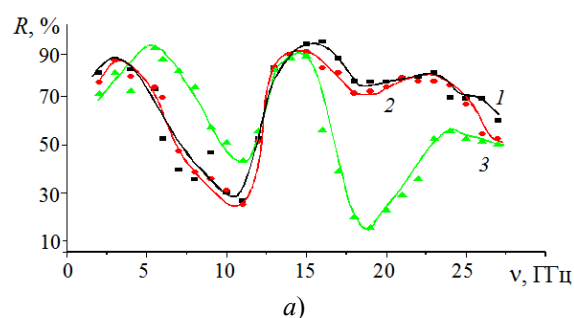


Рисунок 3.1 – Частотные зависимости для экспериментальных образцов РПМ:

а – коэффициентов отражения (R) и б – ослабления (S) энергии нормально падающей плоской ЭМВ (в волноводе) для образцов РПМ, толщиной $h = 3$ мм

Состав образцов:

- 1 – полиэтилен (ПЭ) + марганец-цинковый феррит (ММФ) (50% масс, $d = 50-200$ мкм);
- 2 – ПЭ + ММФ (50% масс, $d = 50-200$ мкм) + стеклосферы (10% масс, $d = 200-500$ мкм);
- 3 – ПЭ + ММФ (50% масс, $d = 50-200$ мкм) + углеродная ткань Бусофит ТР3/2.

Из графика на рисунке 3.1 видно, что замена части полимерного связующего стеклосферами и армирование композитного РПМ углеродной тканью улучшает параметры R и S . Это объясняется, во-первых, увеличением общего количества ФН, обеспечивающих магнитные, диэлектрические и джоулевы потери падающего на

композит СВЧ-излучения (при соблюдении оптимизированной по критерию минимального отражения ЭМВ степени наполнения); во-вторых, сочетанием разных механизмов потерь и, наконец, улучшением условий рассеяния ЭМИ на структурных неоднородностях композита. Введение в полимерную композицию углеродных или металлических волокон, разной длины и диаметра, позволяет расширить полосу и увеличить коэффициент поглощения РПМ [10], что аналогично введению полидисперсных наполнителей.

В безэховой камере в диапазоне частот ЭМИ 2–4 ГГц измерены радиофизические характеристики R и S некоторых листовых монолитных, волокнистых и комбинированных РПМ (размер образцов 40×30 см) (рисунок 3.2 и 3.3).

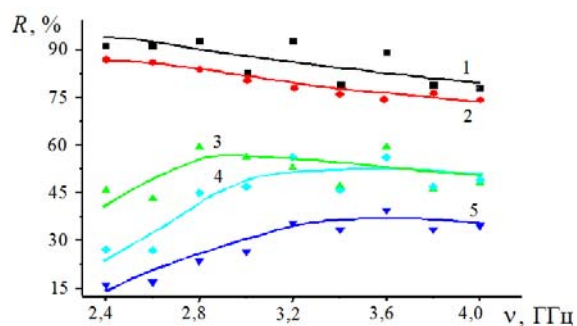


Рисунок 3.2 – Частотные зависимости коэффициентов отражения (R) нормально падающей плоской ЭМВ (в безэховой камере) для листовых образцов волокнистых комбинированных ($h = 3–3,5$ мм) и монолитных ($h = 10$ мм) РПМ:

- 1 – волокнистый ПЭ + металлическая сетка;
- 2 – волокнистый ПЭ + углеродные нити;
- 3 – волокнистый ПЭ + углеродная ткань Бусофит ТР3/2;
- 4 – монолитный ПЭ + ММФ (40% масс, $d = 50–200$ мкм);
- 5 – блочный ПЭ + ММФ (40% масс, $d = 50–200$ мкм) + стеклосферы (10% масс, $d = 200–500$ мкм)

Из рисунков 3.2 и 3.3. видно, что образцы 1 и 2 относятся к ЭМЭ отражающего типа: значение R велико и сравнимо с отражением от металлического листа. Чем толще углеродная нить, выше ее электропроводность и масса углеродных нитей, приходящаяся на единицу длины образца, тем характернее приближение свойств композитного материала к металлическому листу. Для сравнения, на рисунках 3.2, 3.3 приведены радиофизические характеристики монолитных образцов РПМ. Образцы 4, 5 можно рассматривать в качестве поглотителей ЭМИ в исследуемом частотном диапазоне. Эти образцы содержат в значительном количестве ММФ, обеспечивающий магнитные потери. По радиофизическим характеристикам образец 3 занимает промежуточное

положение между экранами поглощающего и отражающего типов.

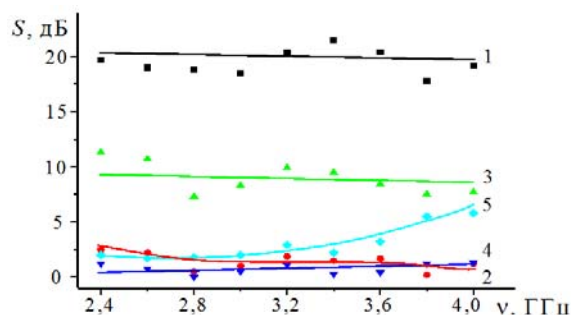


Рисунок 3.3 – Частотные зависимости ослабления (S) энергии ЭМИ, проходящего (в безэховой камере) через листовые образцы волокнистых комбинированных ($h = 3–3,5$ мм) и монолитных ($h = 10$ мм) РПМ:

- 1 – волокнистый ПЭ + металлическая сетка;
- 2 – волокнистый ПЭ + углеродные нити;
- 3 – волокнистый ПЭ + углеродная ткань Бусофит ТР3/2;
- 4 – монолитный ПЭ + ММФ (40% масс, $d = 50–200$ мкм);
- 5 – монолитный ПЭ + ММФ (40% масс, $d = 50–200$ мкм) + стеклосферы (10% масс, $d = 200–500$ мкм)

Эффективная площадь рассеяния (ЭПР) является важной характеристикой отражательной способности тела и рассчитывается по формуле (3.1):

$$\text{ЭПР} = R \times S_{\Pi} \text{ (м}^2\text{)}, \quad (3.1)$$

где S_{Π} – площадь поверхности образца, обращенной к падающему ЭМИ.

Значения ЭПР для образцов РПМ, содержащих в качестве ФН ММФ или металлические спирали, представлены в таблице 3.1, а содержащих в составе углеродные нити, углеродные ткани или металлические сетки, представлены в таблице 3.2.

Из таблицы 3.1 видно, что при замене металлической подложки на исследуемые образцы композитных РПМ на основе термопластов, ЭПР уменьшается в 3–6 раз. Из данных таблицы 3.2 следует, что ЭПР уменьшается в 1,1–2,3 раза при замене металлической подложки на исследуемые образцы композитных волокнистых РПМ. Во многих случаях такое уменьшение значения ЭПР достаточно, чтобы дезинформировать электронную систему радиолокационного наведения объектов военной техники.

Измерения радиофизических параметров экспериментальных образцов РПМ и ЭМЭ, содержащих различные по природе, размерам и форме ФН, показали, что практически все механизмы поглощения энергии ЭМИ (диэлектрические, магнитные, джоулевы потери и т. д.) могут быть реализованы в полимерных композитах.

Таблица 3.1 – Значения ЭПР листовых образцов РПМ, толщиной 10 мм, площадью $12 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2$, изготовленных методом термического прессования, в сравнении с металлическим экраном

Частота, ГГц	ЭПР, $\cdot 10^{-2} \text{ м}^2$, для образцов РПМ			
	Металлическая подложка	ПЭ + металлические спирали (10% масс)	ПЭ + ММФ (40% масс)	ПЭ + ММФ (40%) + металлические спирали (10%)
2,45	12,0	2,6	2,0	3,0
3,0	12,0	4,8	3,2	5,6

Таблица 3.2 – Значения ЭПР листовых образцов комбинированных РПМ, толщиной 3,5 мм, площадью $12 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2$, изготовленных методом melt blowing в сравнении с металлическим экраном

Частота, ГГц	ЭПР, $\cdot 10^{-2} \text{ м}^2$, для образцов			
	Металлическая подложка	Комбинированные волокнистые РПМ		
		ПЭ+металлическая сетка	ПЭ + углеродные нити	ПЭ + углеродная ткань
2,45	12,0	11,0	10,3	5,2
3,0	12,0	9,5	10,1	6,7

Хаотично распределенные в полимерном композите металлические спирали также вносят вклад в общую величину ослабления энергии СВЧ-излучения. Их вклад может быть более весомым при оптимизации размеров спиралей, направления и угла закрутки витков, количества витков, упорядочении их расположения в полимерной матрице и т. п. В каждой из этих спиралей под действием ЭМВ индуцируются одинаково значимые электрический дипольный момент и магнитный момент, направленные вдоль оси спирали. Поэтому материал, созданный на основе оптимальных спиралей, проявляет не только диэлектрические, но и магнитные свойства. Вблизи резонансной частоты относительная диэлектрическая проницаемость и относительная магнитная проницаемость метаматериала имеют приблизительно равные значения. Это равенство обеспечивает согласование входного импеданса поглотителя с волновым импедансом свободного пространства, то есть отсутствие отраженной волны. В этих условиях необходимо выбрать материал, из которого изготавливаются спирали, чтобы достичь поглощения СВЧ волны внутри искусственной структуры. Преимуществом оптимальных спиралей является их одинаково результативная активация как электрическим, так и магнитным полем. В результате поглощающие свойства структуры не будут зависеть от поляризации падающей волны. Кроме того, оптимальные свойства спиралей проявляются не только во внешних полях, но и при взаимном влиянии спиралей. Поэтому необходимые свойства поглотителя будут сохраняться и при высокой концентрации спиралей в материале.

Экспериментальная проверка ряда теоретических закономерностей распространения ЭМВ в

искусственных киральных средах проводится в Гомельском государственном университете имени Ф. Скорины [11], [12]. Научная гипотеза работы состоит в возможности создания «совершенного» или «идеального» поглотителя, не отражающего ЭМВ.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Mariotte, F.* Application of heterogeneous chiral materials to the design of radar absorbing materials / F. Mariotte, B. Sauviac, D. Gogny // Conf. Journées Maxwell' 95 : Proc. Journées Maxwell Int. Workshop, Bordeaux (France), 6–9 Jun 1995. – Bordeaux, 1995. – poster 16.
2. *Поглотители электромагнитного излучения. Применение в вооруженных силах: монография* / Т.В. Бороботько [и др.]; под ред. Л.М. Лынькова. – Минск : Бестпринт, 2006. – 228 с.
3. *Electromagnetic shield* : пат. 6001282, США, МПК Н 05 F 03/00 / Kanase; K. Rick, (Salem, OR); Electro K., Inc. (Los Angeles, CA). – № 312085; заявл. 15.05.1999; опубл. 14.12.1999.
4. *Electromagnetic shielding and absorptive materials* : пат. 4948922, США, МПК Н 05 К 09/00 / V.K. Varadan, K. Vijay (State College, PA); V.V. Varadan; V. Vasundara (State College, PA); The Pennsylvania State University (State College, PA). – № 252516; заявл. 30.09.1988; опубл. 14.08.1990.
5. *Apparatus and method for shielding electromagnetic wave* : пат. 6426457 США, МПК7 Н 05 К 09/00 / Toyoda, Junichi (Tokyo, JP); Iwashita, Sakan (Kanagawa, JP); Sony Corporation (Tokyo, JP). – № 292833, заявл. 16.04.1999; опубл. 30.07.2002.
6. *Неганов, В.А.* Селективное покрытие для защиты от электромагнитного излучения / В.А. Неганов, О.В. Осипов, А.А. Долбичкин // Физика и

технические приложения волновых процессов: тез. докл. и сообщ. 3 междунар. науч.-техн. конф., Волгоград, 6–12 сент. 2004 г. – Волгоград : Автор. перо, 2004. – С. 295–296.

7. Cloete, J.H. Scattering and absorption by thin metal wires in rectangular waveguide – chiral cranks versus non-chiral staples / J.H. Cloete; M. Bingle, D.B. Davidson // 8-th International Conference on Electromagnetics of Complex Media, Lisbon, 27–29 Sept. 2000. – Lisbon, 2000. – P. 353–359.

8. Банный, В.А. Взаимодействие радиоволн СВЧ диапазона с полимерными гетерогенными системами и разработка электромагнитных экранов на основе полиэтилена : дис. ... канд. техн. наук : 01.04.07 / В.А. Банный. – Гомель, 2005. – 132 л.

9. Банный, В.А. Физико-химические и технологические особенности формирования полимерных композитных радиопоглощающих материалов

/ В.А. Банный, Л.С. Пинчук, В.А. Гольдаде // Материаловедение. – 2007. – № 6. – С. 17–24.

10. Гибкие конструкции экранов электромагнитного излучения / Л.М. Лыньков [и др.]; под ред. Л.М. Лынькова. – Минск : БГУИР, 2000. – 284 с.

11. Семченко, И.В. Использование парных спиралей оптимальной формы для создания слабо отражающих покрытий в СВЧ диапазоне / И.В. Семченко, С.А. Хахомов, А.Л. Самофалов // Проблемы физики, математики и техники. – 2009. – № 1. – P. 33–39.

12. Semchenko, I.V. Helices of optimal shape for nonreflecting covering / I.V. Semchenko, S.A. Khakhomov, A.L. Samofalov // The European Physical Journal. Applied Physics. – 2010. – Vol. 49. – P. 33002.

Поступила в редакцию 06.09.14.