

**ЭФФЕКТ ЭКРАНИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН ПЛОСКИМ  
ОДНОСЛОЙНЫМ ЭКРАНОМ ИЗ МАТЕРИАЛОВ С ПРОСТРАНСТВЕННОЙ  
ДИСПЕРСИЕЙ СО СФЕРОИДАЛЬНЫМИ ЧАСТИЦАМИ**

**Ерофеенко В.Т.<sup>1</sup>, Бондаренко В.Ф.<sup>2</sup>, Урбанович А.И.<sup>3</sup>**

*Учреждение Белорусского государственного университета*

*«НИИ прикладных проблем математики и информатики»*

*220030, пр. Независимости, 4, г. Минск, Беларусь;*

*e-mail: bsu\_erofeenko@tut.by*

<sup>1</sup> *Учреждение образования «Белорусская государственная академия связи»  
220114, ул. Ф.Скорины 8, корп. 2, г. Минск, Беларусь;*

*e-mail: valbond1949@yandex.ru*

<sup>2</sup> *Учреждение образования «Белорусский государственный университет»  
220030, пр. Независимости, 4, г. Минск, Беларусь;*

*e-mail: urbanovich@gmail.com*

Как известно, материалы, используемые в современной технике, являются сложными как по составу, так и по разнообразию структуры. Появление композитных материалов, состоящих из двух или более разнородных компонентов, объединенных одной основной матрицей, привело к созданию качественно новых веществ. Варьируя состав матрицы и наполнителей, их соотношение, удалось получить широкий спектр материалов с заданными свойствами.

Разработка математических методов моделирования распространения электромагнитных волн в композитных материалах является актуальным направлением исследований по изучению свойств этих материалов [1]. Одним из направлений конструирования композитов является проблема создания и исследования искусственных сред с пространственной дисперсией – так называемых киральных сред, которые проявляют киральные свойства в радиодиапазоне на сантиметровых и миллиметровых волнах [2, 3].

В настоящем докладе на основе математической модели, разработанной в [4 – 5], решена краевая задача прохождения электромагнитных волн через плоский экран из материала с пространственной дисперсией, содержащей сфероидальные частицы.

Для аналитического решения краевой задачи экранирования использована система линейно независимых базисных плоских электромагнитных полей [4], распространяющихся в слое экрана с пространственной дисперсией, число которых вдвое больше, чем в обычных магнитоэлектрических средах. Введены дополнительные граничные условия, накладываемые на магнитное поле на плоскостях экрана, которые обеспечивают единственность решения краевой задачи. Численно исследовано электромагнитное поле, проникающее через экран при воздействии внешнего  $TE$ -поляризованного поля.

Пусть в пространстве  $E_3$  с электрической и магнитной постоянными  $\epsilon_0, \mu_0$  размещен плоский экран  $D(0 < z < \Delta, -\infty < x, y < \infty)$  толщины  $\Delta$ ,  $Oxyz$  - декартова система координат. Экран  $D$  ограничен плоскостями  $\Gamma_1(z=0), \Gamma_2(z=\Delta)$ . Слой экрана выполнен из материала с пространственной дисперсией со сфероидальными частицами. В матрице экрана случайным образом распределены частицы двух сортов в виде вытянутых сфероидов  $(x^2 + y^2)/a_j^2 + z^2/b_j^2 = 1$ , направленных вдоль координаты  $Oz$ ;  $a_j, b_j$  – малая и большая оси сфероидов ( $j=1, 2$ ). В полупространстве  $D_1(z < 0)$  возбуждается первичное монохроматическое

электромагнитное поле  $\vec{E}_0, \vec{H}_0$  с временной зависимостью  $\exp(-i\omega t)$ ,  $\omega = 2\pi f$  – круговая частота,  $f$  – частота поля.

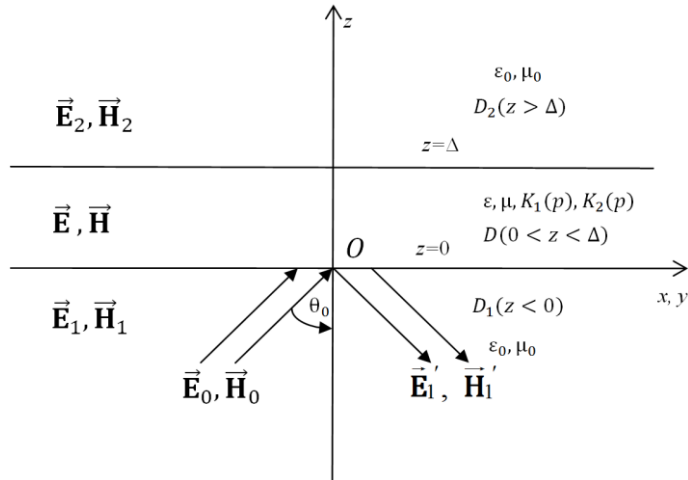


Рисунок - Плоский экран со сфероидальными вытянутыми вдоль оси  $Oz$  частицами под воздействием плоской монохроматической волны

Обозначим поля:  $\vec{E}'_1, \vec{H}'_1$  – отраженное поле в области  $D_1$ ;  $\vec{E}_1 = \vec{E}_0 + \vec{E}'_1$ ,  $\vec{H}_1 = \vec{H}_0 + \vec{H}'_1$  – суммарное поле в области  $D_1$ ;  $\vec{E}_2, \vec{H}_2$  – поле, проникшее в полупространство  $D_2(z > \Delta)$ ;  $\vec{E}, \vec{H}$  – поле в слое;

$$\vec{E}_j = \text{Re}(\vec{E}_j \exp(-i\omega t)), \quad \vec{H}_j = \text{Re}(\vec{H}_j \exp(-i\omega t));$$

$$\vec{E} = \text{Re}(\vec{E} \exp(-i\omega t)), \quad \vec{H} = \text{Re}(\vec{H} \exp(-i\omega t)).$$

Комплексные амплитуды  $\vec{E}, \vec{H}$  в среде с пространственной дисперсией подчиняются уравнениям

$$\text{rot } \vec{H} = -i\omega(\varepsilon \vec{E} + \vec{P}), \quad \text{rot } \vec{E} = i\omega(\mu \vec{H} + \vec{m}), \quad (1)$$

где  $\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$ ,  $\mu = \mu_0 \mu_r$  – диэлектрическая и магнитная проницаемости матрицы экрана, электрическая и магнитная поляризации определяются объемными интегралами по пространственным переменным  $\vec{r}_0 = (x_0, y_0, z_0)$

$$\vec{P}(\vec{r}) = \frac{\varepsilon_0}{V_1} \int_{D_{1M}} K_1(F(x-x_0, y-y_0, z-z_0; \vec{f}_1)) \vec{E}(\vec{r}_0) d\vec{r}_0, \quad (2)$$

$$\vec{m}(\vec{r}) = \frac{\mu_0}{V_2} \int_{D_{2M}} K_2(F(x-x_0, y-y_0, z-z_0; \vec{f}_2)) \vec{H}(\vec{r}_0) d\vec{r}_0. \quad (3)$$

где  $D_{jM}$  – вытянутый сфероид с осями  $a_j, b_j$ , и центром в точке  $M(x, y, z)$ , точка  $M_0(x_0, y_0, z_0) \in D_{jM}$ ,  $\vec{r} = (x, y, z)$ ;  $V_j = \frac{4}{3} \pi b_j a_j^2$  – объем сфероида  $D_{jM}$ ,  $K_j(\xi)$  – заданные функции, определяющие характер пространственной дисперсии. В матрице экрана расположены частицы двух сортов: вытянутые сфероиды с осями  $a_1, b_1$ , и электрической поляризацией (2), а также вытянутые сфероиды с осями  $a_2, b_2$ , и магнитной поляризацией (3). Система интегро-дифференциальных уравнений (1) - (3)

описывает распространение электромагнитных волн в произвольной анизотропной среде с пространственной дисперсией, содержащей сфероидальные частицы, размеры которых значительно меньше длины волны электромагнитного излучения.

Задача (1)–(3) решалась аналитически путем преобразования интегро-дифференциальной модели к более простой дифференциальной модели уравнений с частными производными второго порядка. Для формулировки краевой задачи экранирования использовались классические граничные условия непрерывности тангенциальных составляющих полей на граничных плоскостях  $\Gamma_1$  и  $\Gamma_2$ . Получены выражения для амплитуд электромагнитных полей, определяющих решение краевой задачи экранирования. На практике для оценки экранирующих свойств экранов используется величина - эффективность экранирования  $Y$ , определяющая отношение амплитуды  $TE$ -поляризованного поля, падающего на экран, к величине амплитуды поля, проникшего через экран. Для оценки экранирующих свойств материала экрана проведено исследование эффективности экранирования  $Y$  в зависимости от частоты поля в диапазоне частот  $10^8 \text{ Гц} \leq f \leq 3 \cdot 10^{10} \text{ Гц}$  при различных значениях угла падения электромагнитного излучения на экран. Определен диапазон частот и углов, где величина  $Y$  максимальна. Проведен учет влияния на эффективность экранирования формы частиц. В частности, рассмотрены сферические и сфероидальные частицы. Показано, что для сферических и сфероидальных частиц одинаковых объемов эффективность экрана со сферическими частицами превосходит эффективность экрана со сфероидальными частицами. Проведено также исследование влияния на эффективность экранирования проводимости материала экрана в различных диапазонах частот.

### Список литературы

1. Виноградов, А. П. Электродинамика композитных материалов / А. П. Виноградов. – М.: Эдиториал УРСС, 2001. – 206 с.
2. Ерофеевко, В. Т. Моделирование распространения электромагнитных волн в средах с пространственной дисперсией / В. Т. Ерофеевко // Информатика. – 2017. – № 3. – С.5-12.
3. Ерофеевко, В. Т. Экранирование электромагнитных волн плоским однослойным экраном из материалов с пространственной дисперсией / В. Т. Ерофеевко, В. Ф. Бондаренко // Информатика. – 2017. – № 4. – С.5-15.
4. Ерофеевко, В. Т. Математическая модель распространения электромагнитных волн в композитных средах со сфероидальными частицами / В. Т. Ерофеевко, А. И. Урбанович / Информатика. - 2018. - Т.15, № 3. - С.102-112.
5. Ерофеевко, В. Т. Моделирование взаимодействия электромагнитного излучения со средой с пространственной дисперсией, содержащей сфероидальные частицы / В. Т. Ерофеевко, А. И. Урбанович // Труды XXVIII Международной конференции "Радиационная физика твердого тела" (Севастополь, 9 июля – 14 июля 2018 г.), под ред. Г. Г. Бондаренко. М., ФГБНУ "НИИ ПМТ", 2018 г. - С. 481-490.