

DOI: 10.17516/1999-494X-0220

УДК 621.396

## **Methods for Substantiating the Electrodynamic and Design Parameters of Absorbing Materials of Waveguide Type**

**Andrey A. Ivenskiy\***

*Military Education and Research Centre of Military-Air Forces  
«Military-Air Academy  
Named After Professor N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin»  
Voronezh, Russian Federation*

Received 22.03.2019, received in revised form 15.06.2019, accepted 21.01.2020

---

*Abstract.* The paper considers the issues related to the microwave diffraction on periodic structures of waveguide type. An approach used for assessing the reflective characteristics of absorbing material is proposed. This approach is based on the assumption that in accordance with the energy conservation law, the entire power of the incident microwave radiation on the absorbing material is distributed into two components. One of them characterizes electromagnetic radiation reflection from material surface and is determined through wave impedance at the interface “medium – absorbing material”, and the other, obeying the law of electromagnetic waves diffraction on non-perfectly conducting closed surfaces of waveguide type, propagates into the lattice, then it is partially absorbed in the bulk of the material and reflected from the object (metal substrate), after which it is summed with the first component at the output. A feature of the proposed technique is the design ratios, allowing to determine rational values of dielectric permeability of material, lattice elements conductivity as well as the period and thickness of the lattice which enable to achieve “a semi-infinite layer” at which the minimum value of material reflection coefficient is observed and its no longer depends on the presence or absence of an object (metal substrate).

*Keywords:* algorithm, attenuation of microwave radiation, structural absorbing material, reflection coefficient.

---

Citation: Ivenskiy A.A. Methods for substantiating the electrodynamic and design parameters of absorbing materials of waveguide type, J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2020, 13(3), 272-283. DOI: 10.17516/1999-494X-0220

---

---

© Siberian Federal University. All rights reserved

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0).

\* Corresponding author E-mail address: [iaa974@mail.ru](mailto:iaa974@mail.ru)

## **Методика обоснования электродинамических и конструктивных параметров поглощающих материалов волноводного типа**

**А.А. Ивенский**

*Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил  
«Военно-воздушная академия  
имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»  
Российская Федерация, Воронеж*

*Аннотация.* В работе рассмотрены вопросы, связанные с дифракцией СВЧ-излучения на периодических структурах волноводного типа. Предложен подход для оценки отражательных характеристик поглощающего материала, основанный на допущении, что в соответствии с законом сохранения энергии вся мощность падающего СВЧ-излучения на поглощающий материал распределяется на две составляющие, одна из которых характеризует отражение электромагнитного излучения от поверхности материала и определяется через волновое сопротивление на границе раздела «среда – поглощающий материал», а другая часть, подчиняясь законам дифракции электромагнитных волн на неидеально проводящих замкнутых поверхностях волноводного типа, проходит внутрь решетки, частично поглощается в толще материала, отражается от объекта (металлической подложки) и на выходе суммируется с первой составляющей. Особенностью предлагаемой методики являются расчетные соотношения, позволяющие определять рациональные значения диэлектрической проницаемости материала, проводимости элементов решетки, а также периода и толщины решетки, обуславливающих достижение «полубесконечного слоя», при котором наблюдается минимальное значение коэффициента отражения материала, который уже не зависит от наличия или отсутствия объекта (металлической подложки).

*Ключевые слова:* алгоритм, ослабление СВЧ-излучения, конструкционный поглощающий материал, коэффициент отражения.

Цитирование: Ивенский, А.А. Методика обоснования электродинамических и конструктивных параметров поглощающих материалов волноводного типа / А.А. Ивенский // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2020. 13(3). С. 272-283. DOI: 10.17516/1999-494X-0220

Проблемам создания материалов, предназначенных для ослабления коэффициента отражения при нормальном падении монохроматической электромагнитной волны на плоскую металлическую поверхность, посвящено большое количество работ [1-4].

С точки зрения радиофизики такие материалы характеризуются толщиной и отражательными характеристиками в заданном диапазоне длин волн. Здесь используется комплексный коэффициент отражения, определяемый как отношение амплитуд отраженной и падающей волн.

Задачей при разработке поглощающих материалов (ПМ) является обоснование их рациональных электродинамических и конструктивных параметров и получение минимального коэффициента отражения в максимально широком диапазоне длин волн.

Как известно, основными электродинамическими параметрами любого вещества, характеризующими взаимодействие электромагнитной волны с материалами, являются диэлектрическая ( $\varepsilon = \varepsilon' + \varepsilon''$ ) и магнитная ( $\mu = \mu' + \mu''$ ) проницаемости.

При этом параметры  $\varepsilon'$  и  $\mu'$  связаны с передачей энергии ЭМИ, а  $\varepsilon''$  и  $\mu''$  – с ее потерей или энергетическим рассеиванием в материалах за счет проводимости и резонансных механизмов.

Свойства поглощающих материалов могут быть улучшены за счет их магнитной проницаемости  $\mu'$ . Однако известные магнитные материалы имеют значительный удельный вес и ограниченный рабочий диапазон температур, что снижает возможность их практического применения.

В связи с этим для расширения рабочего диапазона рассматриваются методы, где используются материалы с дисперсией диэлектрической проницаемости и структуры, в которых физическим механизмом поглощения электромагнитной волны является преобразование падающей плоской волны в поверхностную с последующим ее поглощением в толще материала.

Целью исследования выступает разработка методики обоснования электродинамических и конструктивных параметров поглощающих материалов волноводного типа.

Как известно, при разработке поглощающих структур приходится сталкиваться с разрешением следующего противоречия: стремление, с одной стороны, использовать материалы с максимально высокими значениями коэффициента поглощения, а с другой – обеспечить требования по согласованию электродинамических характеристик структуры материала с соответствующими характеристиками свободного пространства.

Для разрешения указанного противоречия в известной литературе [1] рассматривается подбор специальных сред и распределение их электродинамических и электрофизических характеристик по фазовому пространству материала. Обычно в поглотителе электромагнитных волн применяется градиентный рост проводимости в направлении задней стенки материала за счет увеличения концентрации и плотности поглотителя, который обеспечивает минимум отражения на передней кромке и максимум поглощения в толще.

Для создания поглощающих материалов с малым коэффициентом отражения ( $R_{omp} < 10$  дБ) в широкой полосе частот в данной работе используется другой подход, основанный на выборе электродинамических и конструктивных параметров материала при решении задачи оптимизации в многомерном пространстве, где необходимо обеспечить максимальную широкополосность при заданном уровне отражательных характеристик материала.

Для разрешения указанной проблемы в качестве поглощающего материала в работе рассматривается конструкция, представляющая собой решетку – систему взаимно перпендикулярных полосковых элементов, изготовленных из диэлектрика и покрытых радиопоглощающим составом, которые располагаются на одинаковых расстояниях друг от друга (с постоянным шагом) (рис. 1).

Взаимная ориентация элементов решетки и всего ПМ относительно вектора поляризации падающего излучения дополнительно усложняет решение задачи оптимизации. Поэтому нами был избран путь поэтапного поиска экстремума с попеременной фиксацией ряда параметров и последовательного сужения диапазона изменения указанных переменных.

Многопараметрическую задачу оптимизации ПМ с точки зрения обеспечения минимума коэффициента отражения  $R_{omp}$  можно свести к исследованию его дифракционных свойств в зависимости от электродинамических характеристик при фиксированных геометрических параметрах решетки, обеспечивающих максимальное поглощение энергии электромагнитных

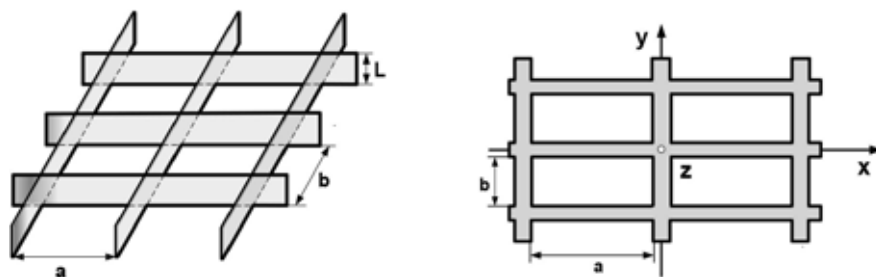


Рис. 1. Структура конструкционного поглощающего материала волноводного типа:  $L$  – ширина элемента (высота решетки);  $a$ ,  $b$  – расстояние между элементами

Fig. 1. Structure of the structural absorbing material of waveguide type:  $L$  – element width (lattice height);  $a$ ,  $b$  – distance between elements

волн. Поиск экстремума осуществляли методом последовательных приближений [5], который позволяет достаточно быстро сформировать функционал от конструктивных и электродинамических параметров.

Исходными данными при решении задачи оптимизации параметров ПМ являются следующие:

по условиям наблюдения РЛС: длина волны падающего ЭМИ ( $\lambda$ ), поляризация падающей волны;

по электродинамическим параметрам: проводимость элементов решетки ( $\sigma$ ) и их толщина ( $d$ ); проводимость ( $\sigma_d$ ), диэлектрическая ( $\epsilon$ ) проницаемость среды, заполняющей решетку;

по конструктивным параметрам: геометрические размеры ячейки ПМ (длина –  $a$ , ширина –  $b$ , высота –  $L$ ,  $d$  – толщина).

При описании взаимодействия ЭМИ с ПМ за основу взят механизм распространения монохроматического электромагнитного поля в прямоугольной ячейке ПМ как по прямоугольным волноводам с импедансными стенками, заполненными диэлектриком. При этом источник ЭМИ находится за пределами рассматриваемой части линии передачи и создаваемая им волна распространяется вдоль оси  $Z$  (рис. 2).

Определим значения критической длины волны, зависящей от типа волны, формы и размера поперечного сечения ячейки волноводного типа по формуле [6]

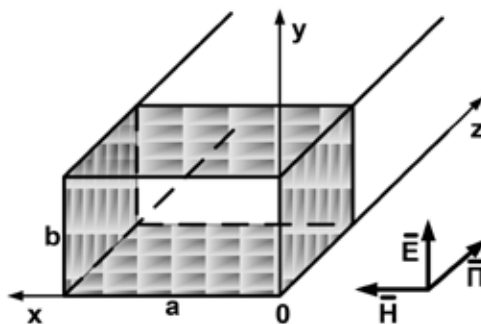


Рис. 2. Схема взаимодействия ЭМИ с ячейкой поглощающей решетки с поперечным сечением  $a$  и  $b$

Fig. 2. The scheme of interaction of EMI with a cell of the absorbing lattice with cross section  $a$  and  $b$

$$\lambda_{\text{кр}}^{mn} = \frac{2}{\sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2}}. \quad (1)$$

Как известно, низшей волной, для которой  $\lambda_{\text{кр}}$  имеет наибольшую величину, в прямоугольной ячейке при  $a > b$  является волна типа  $H_{10}$ . Это основной тип волны в прямоугольной ячейке, так как он обеспечивает одномодовый (одноволновый) режим работы. При условии (1)

$$\lambda_{\text{кр}}^{mn} = \frac{2}{\sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2}} = \frac{2}{\sqrt{\left(\frac{1}{a}\right)^2 + \left(\frac{0}{b}\right)^2}} = 2a. \quad (2)$$

При распространении электромагнитного поля в толще ПМ учитывали, что амплитуда вектора напряженности электрического поля  $E$  уменьшается по экспоненциальному закону и характеризуется коэффициентом затухания (вдоль оси  $OZ$ ):

$$E(z) = E_0 \cdot e^{-h''z}. \quad (3)$$

Тогда выражение для мощности, переносимой через поперечное сечение ячейки, будет иметь вид

$$P(z) = P_0 \cdot e^{-2h''z}. \quad (4)$$

В связи с тем, что поглощение (затухание) электромагнитных волн в линиях передачи обусловлено потерями мощности, которые возникают вследствие конечной проводимости элементов решетки ( $\sigma \neq \infty$ )  $h''$ , и потерями в диэлектрике  $h''_d$ , заполняющем ячейку ( $\sigma_d \neq 0$ ), показатель затухания волны в ячейке ПМ

$$h''(H_{10}) = \frac{R_s}{Z_{H10}b} \left[ 1 - \left( \frac{\lambda}{2a} \right)^2 \right]^{-1/2} \cdot \left[ 1 + \frac{2b}{a} \left( \frac{\lambda}{2a} \right)^2 \right], \quad (5)$$

где  $R_s$  – поверхностное сопротивление полоскового элемента ячейки определяем с использованием выражения

$$R_s = \sqrt{\omega\mu\mu_0/2\sigma}, \quad (6)$$

где  $\mu = 4\pi \cdot 10^{-7}$  – магнитная постоянная;  $\omega = 2\pi f$  – круговая частота;  $f$  – рабочая частота;  $\sigma$  – проводимость элементов решетки;  $Z_{H10}$  – характеристическое сопротивление ячейки ПМ, которое вычисляем по формуле

$$Z_{H10} = \frac{Z_c}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2}}, \quad (7)$$

где  $Z_c$  – сопротивление среды, заполняющей ячейку, которое находим из выражения

$$Z_c = \frac{120\pi\mu_d}{\sqrt{\varepsilon_d}}, \quad (8)$$

где  $\varepsilon_d, \mu_d$  – диэлектрическая и магнитная проницаемости среды в ячейке соответственно.

Как известно, потери в диэлектрическом заполнении описывают с помощью выражения [6]:

$$h''_d = \frac{\pi}{\lambda} \frac{\varepsilon_d \tan \delta}{\sqrt{\varepsilon_d - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2}}, \quad (9)$$

где тангенс угла диэлектрических потерь определяем с помощью выражения

$$\tan \delta = \frac{\sigma_d}{\omega \varepsilon_d \varepsilon_0}, \quad (10)$$

где  $\varepsilon_0 = 10^{-9}/36\pi$  – диэлектрическая постоянная;  $\sigma_d$  – проводимость среды;  $\varepsilon_d$  – диэлектрическая проницаемость наполнителя в ячейках.

Таким образом, суммарная постоянная затухания волны в ячейке с учетом выражений (5) и (9) имеет вид

$$h''_{\Sigma} = \frac{R_s}{Z_{H_{10}} b} \left[ 1 - \left( \frac{\lambda}{2a} \right)^2 \right]^{-1/2} \cdot \left[ 1 + \frac{2b}{a} \left( \frac{\lambda}{2a} \right)^2 \right] + \frac{\pi}{\lambda} \frac{\varepsilon_d \tan \delta}{\sqrt{\varepsilon_d - \left( \frac{\lambda}{2a} \right)^2}}. \quad (11)$$

Для описания отражательных характеристик ПМ на основе поглощающих решеток в работе принято следующее допущение: вся мощность падающей электромагнитной волны распределяется на две составляющие, одна из которых отражается сразу от поверхности ПМ, а другая проходит внутрь решетки, поглощается в толще ПМ, отражается от металлического объекта (подложки) и также выходит наружу. Затем эти составляющие с учетом фазы суммируются.

Для определения коэффициентов отражения от решетки ПМ  $K_1$  и прохождения электромагнитных волн в его толщу  $K_2$  воспользуемся выражениями, описывающими отражательные характеристики идеально проводящих периодических структур [8]:

$$K_1 = \frac{-1 + \left( \frac{a}{\lambda} \right)^2 \ln \left( sh \frac{\pi d}{a} \right)^{-1} \ln ch \frac{\pi d}{a}}{-1 + \left( \frac{a}{\lambda} \right)^2 \ln \left( sh \frac{\pi d}{a} \right)^{-1} \ln ch \frac{\pi d}{a} - i \frac{a}{\lambda} \ln 2 \left( sh \frac{\pi d}{a} \right)^{-1}}, \quad (12)$$

$$K_2 = \frac{-i \frac{a}{\lambda} \ln 2 \left( sh \frac{\pi d}{a} \right)^{-1}}{1 + \left( \frac{a}{\lambda} \right)^2 \ln \left( sh \frac{\pi d}{a} \right)^{-1} \ln ch \frac{\pi d}{a} - i \frac{a}{\lambda} \ln 2 \left( sh \frac{\pi d}{a} \right)^{-1}}. \quad (13)$$

Для описания поглощения ЭМИ на элементах решетки в работе предложено учесть ослабление мощности в толще ПМ (4). С учетом выражений (4), (11) – (13) суммарный коэффициент отражения по мощности  $R_{отр}$  для элементов решетки с импедансным покрытием имеет вид

$$R_{отр} = \frac{-1 + \left( \frac{a}{\lambda} \right)^2 \ln \left( sh \frac{\pi d}{a} \right)^{-1} \ln ch \frac{\pi d}{a}}{-1 + \left( \frac{a}{\lambda} \right)^2 \ln \left( sh \frac{\pi d}{a} \right)^{-1} \ln ch \frac{\pi d}{a} - i \frac{a}{\lambda} \ln 2 \left( sh \frac{\pi d}{a} \right)^{-1}} + \frac{-i \frac{a}{\lambda} \ln 2 \left( sh \frac{\pi d}{a} \right)^{-1}}{1 + \left( \frac{a}{\lambda} \right)^2 \ln \left( sh \frac{\pi d}{a} \right)^{-1} \ln ch \frac{\pi d}{a} - i \frac{a}{\lambda} \ln 2 \left( sh \frac{\pi d}{a} \right)^{-1}} \cdot e^{-2h''z}, \quad (14)$$

где  $z$  принимаем за ширину (высоту) решетки  $L$ .

Таким образом, на основе приведенных выражений и с учетом требований к параметрам ПМ, обеспечивающим заданный коэффициент отражения  $R_{отр} < 10$  дБ, разработан алгоритм определения электродинамических и конструктивных параметров ПМ, представленный на рис. 3.



Рис. 3. Алгоритм определения электродинамических и конструктивных параметров поглощающего материала

Fig. 3. Algorithm of determination of electrodynamic and design data of the absorbing material

Алгоритм определения параметров ПМ заключается в следующем:

1. Задаем исходные данные: длина волны  $\lambda$ ; проводимость элемента решетки  $\sigma_0$ ; проводимость среды  $\sigma_{д0}$ ; диэлектрическая проницаемость среды  $\epsilon_0$ , заполняющей решетку; геометрические размеры ячейки:  $a_0$  – широкая сторона,  $L_0$  – высота,  $d_0$  – толщина.

2. Находим значения критической длины волны  $\lambda_{кр}$  по формуле (2) для заданных размеров прямоугольной ячейки ПМ.

3. Рассчитываем значения постоянной затухания волны  $h_{H10}''$  в ячейке (5), для этого находим значения поверхностного сопротивления полоскового элемента ячейки  $R_s$  (6), характеристического сопротивления ячейки  $Z_{H10}$  (7) и среды  $Z_c$  (8), заполняющей ячейку.

4. Определяем потери диэлектрического заполнения ячейки  $h_d''$  по формуле (9), для этого рассчитываем тангенс угла диэлектрических потерь  $\tan\delta$  по формуле (10).

5. С помощью выражения (11) вычисляем значения суммарного показателя затухания в ячейке  $h_{\Sigma}$ .

6. На основе выражения (14) находим коэффициент отражения  $R_{отр}$ .

Если полученное значение коэффициента отражения ЭМИ по мощности не удовлетворяет критерию  $\Delta R_{отр} \leq \Delta R_{отр\text{ пор}}$ , то осуществляется варьирование параметров ПМ с шагом  $\Delta$ : проводимость элемента решетки  $\Delta\sigma$ ; проводимость среды  $\Delta\sigma_d$ ; диэлектрическая проницаемость  $\Delta\epsilon$  среды, заполняющей решетку; геометрические размеры ячейки:  $\Delta a$  – широкая сторона,  $\Delta L$  – высота,  $\Delta d$  – толщина. Рассчитанные параметры, при которых  $\Delta R_{отр} \leq \Delta R_{отр\text{ пор}}$ , принимают для разработки ПМ, удовлетворяющих данному условию.

На основе представленного алгоритма была разработана программа и получены частотные зависимости суммарной постоянной затухания  $h_{\Sigma}''$  и суммарного коэффициента отражения  $R_{отр}$  от параметров предложенного выше ПМ: проводимости материала ячейки, диэлектрической проницаемости и проводимости среды, геометрических параметров ячейки (длины, высоты и толщины).

На рис. 4, 5 приведены результаты исследований коэффициента затухания  $h_{\Sigma}''$  и коэффициента отражения по мощности  $R_{отр}$  для различных поперечных сечений ячейки волноводного типа в диапазоне длин волн  $\lambda = 1 \dots 10$  см.

Как было отмечено ранее, условием распространения в ячейке ПМ основного типа волны  $H_{10}$  является  $a < \lambda < 2a$ . Анализ приведенных зависимостей показал, что при значениях  $\lambda$ , близких к  $\lambda_{кр}^{10} = 2a$ , ПМ может пропускать очень малую мощность, что приводит к росту коэффициента затухания основной волны. Если  $\lambda$  приближается к  $\lambda_{кр}^{20} = a$ , уменьшается затухание высших типов волн, возникающих на нерегулярностях в реальном тракте.

Результаты исследования влияния удельной проводимости элементов ячейки на коэффициент отражения  $R_{отр}$  в диапазоне длин волн  $\lambda = 1 \dots 10$  см изображены на рис. 6.

Из приведенных зависимостей следует, что при значении  $\sigma = 0,4$  см/м коэффициент отражения  $R_{отр}$  не превышает порогового значения.

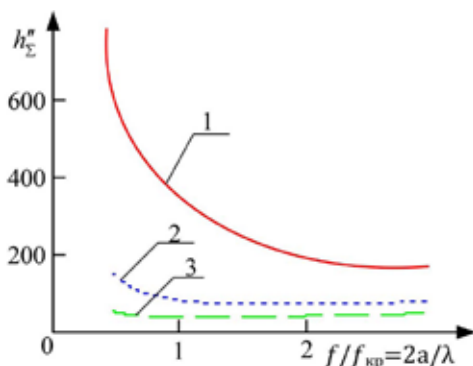


Рис. 4. Частотная зависимость коэффициента суммарного затухания  $h_{\Sigma}''$  при  $\sigma = 0,4$  см/м для различных значений стороны ячейки  $a$ : 1 – 1,3 см; 2 – 2,3 см; 3 – 3,5 см

Fig. 4. Frequency dependence of coefficient of total attenuation of  $h_{\Sigma}''$  at  $\sigma = 0.4$  cm/m for various values of the party of a cell  $a$ : 1 – 1.3 cm; 2 – 2.3 cm; 3 – 3.5 cm



Исследования влияния потерь в диэлектрике на коэффициент отражения ПМ  $R_{отр}$  в диапазоне длин волн  $\lambda = 1 \dots 10$  см (рис. 7) показали, что проводимость среды  $\sigma_d$  существенно влияет на уровень отраженного излучения. Так, при значении  $\sigma_d = 10^{-15} \dots 10^{-2}$  коэффициент отражения  $R_{отр}$  не превышает порогового значения.

Исследования влияния на коэффициент отражения  $R_{отр}$  различных относительных диэлектрических проницаемостей среды  $\epsilon$  в диапазоне длин волн  $\lambda = 1 \dots 10$  см отражены на рис. 8.

Анализ этих зависимостей показал, что с уменьшением относительной диэлектрической проницаемости наполнителя в ячейках ПМ изменяется частотный диапазон коэффициента отражения  $R_{отр}$ . Установлено, что наибольшей широкополосностью обладает ПМ с диэлектрическим заполнением  $\epsilon = 2$ , что соответствует материалам типа полиэтилен, полистирол, пенополиуретан и т.п.

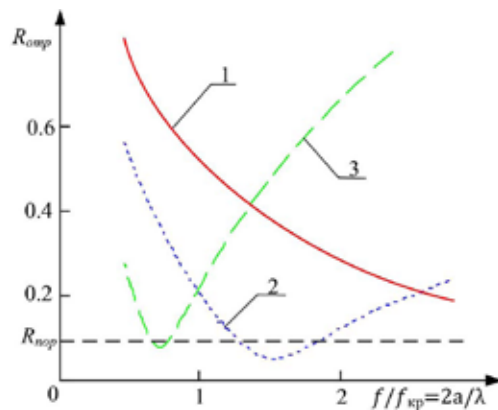


Рис. 5. Частотная зависимость коэффициента отражения по мощности  $R_{отр}$  при  $\sigma = 0,4$  см/м для различных значений стороны ячейки  $a$ : 1 – 1,3 см; 2 – 2,3 см; 3 – 3,5 см

Fig. 5. Frequency dependence of coefficient of reflection on  $R_{reflec}$  power at  $\sigma = 0.4$  cm/m for various values of the party of a cell  $a$ : 1 – 1.3 cm; 2 – 2.3 cm; 3 – 3.5 cm

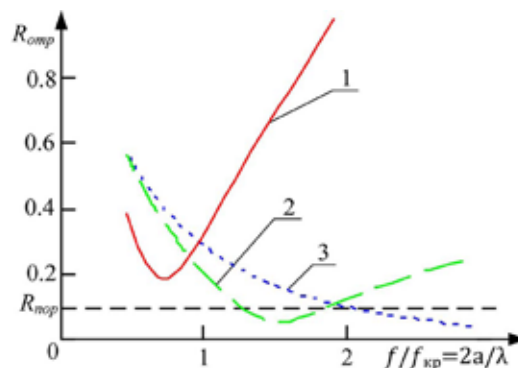


Рис. 6. Частотная зависимость коэффициента отражения по мощности  $R_{отр}$  для разной удельной проводимости элементов ячейки  $\sigma$ : 1 –  $10^7$  см/м; 2 – 0,4 см/м; 3 – 0,1 см/м

Fig. 6. Frequency dependence of coefficient of reflection on  $R_{reflec}$  power for different specific conductivity of elements of a cell  $\sigma$ : 1 –  $10^7$  cm/m; 2 – 0.4 cm/m; 3 – 0.1 cm/m

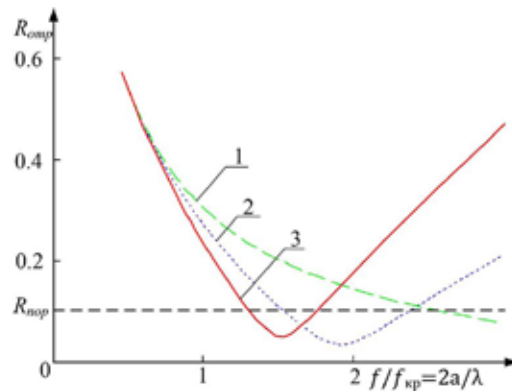


Рис. 7. Частотная зависимость коэффициента отражения по мощности  $R_{отр}$  при  $\sigma = 0,4$  см/м для различной проводимости среды  $\sigma_d$ : 1 – 1 см/м; 2 –  $10^{-2}$  см/м; 3 –  $10^{-15}$  см/м

Fig. 7. Frequency dependence of coefficient of reflection on  $R_{reflec}$  power at  $\sigma = 0.4$  cm/m for various conductivity of the environment  $\sigma_d$ : 1 – 1 cm/m; 2 –  $10^{-2}$  cm/m; 3 –  $10^{-15}$  cm/m

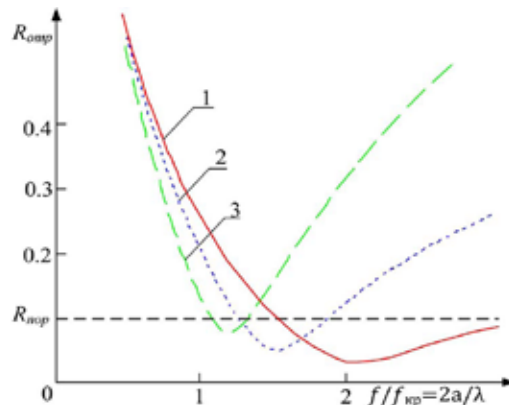


Рис. 8. Частотная зависимость коэффициента отражения по мощности  $R_{отр}$  при  $\sigma = 0,4$  см/м для различных относительных диэлектрических проницаемостей среды  $\epsilon$ : 1 – 1; 2 – 2; 3 – 6

Fig. 8. Frequency dependence of coefficient of reflection on  $R_{reflec}$  power at  $\sigma = 0.4$  cm/m for various relative dielectric pronsayemost of the environment  $\epsilon$ : 1 – 1; 2 – 2; 3 – 6

Результаты исследования влияния различной высоты радиопоглощающей решетки (глубины ячейки) ПМ на коэффициент отражения  $R_{отр}$  приведены на рис. 9.

Из приведенных зависимостей следует, что при значении  $L = 1$  см коэффициент отражения  $R_{отр}$  в широком диапазоне длин волн не превышает порогового значения.

Результаты исследования влияния на коэффициент отражения  $R_{отр}$  различной толщины поглощающего покрытия на элементах решетки ( $d = 1 \times 10^{-3}$ ;  $1 \times 10^{-2}$ ;  $1 \times 10^{-1}$  см) в диапазоне длин волн  $\lambda = 1 \dots 10$  см можно видеть на рис. 10.

Из приведенных зависимостей следует, что значение порогового коэффициента отражения  $R_{отр}$  достигается при  $d < 10^{-2}$  см.

Таким образом, на основе разработанной методики, заданных условий наблюдения и характеристик зондирующего ЭМИ может быть обоснован выбор электродинамических

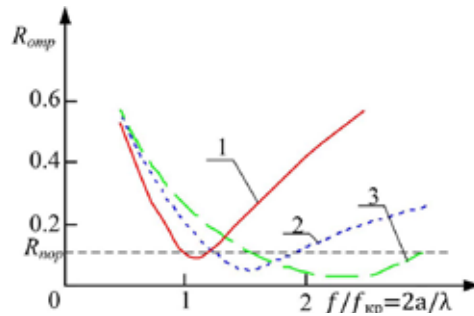


Рис. 9. Частотная зависимость коэффициента отражения по мощности  $R_{отр}$  при  $\sigma = 0,4$  см/м,  $\sigma_d = 10^{-15}$  см/м,  $\varepsilon = 2$  для различной высоты элементов ячейки поглощающего материала  $L$ : 1 – 0,5 см; 2 – 1 см; 3 – 1,5 см

Fig. 9. Frequency dependence of coefficient of reflection on  $R_{reflec}$  power at  $\sigma = 0.4$  cm/m,  $\sigma_d = 10^{-15}$  cm/m,  $\varepsilon = 2$  for various height of elements of a cell of the absorbing material  $L$ : 1 – 0.5 cm; 2 – 1 cm; 3 – 1.5 cm

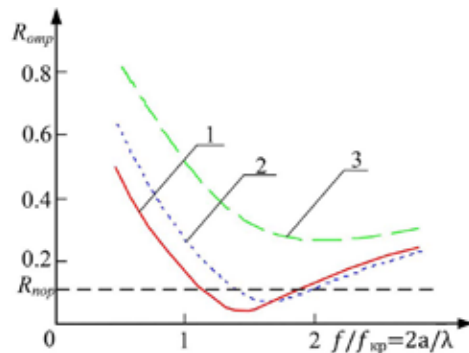


Рис. 10. Частотная зависимость коэффициента отражения по мощности  $R_{отр}$  при  $\sigma = 0,4$  см/м,  $\sigma_d = 10^{-15}$  см/м,  $\varepsilon = 2$ ,  $L = 1$  см для различной толщины поглощающего покрытия на элементах решетки  $d$ : 1 –  $10^{-3}$  см; 2 –  $10^{-2}$  см; 3 –  $10^{-1}$  см

Fig. 10. Frequency dependence of coefficient of reflection on  $R_{reflec}$  power at  $\sigma = 0.4$  cm/m,  $\sigma_d = 10^{-15}$  cm/m,  $\varepsilon = 2$ ,  $L = 1$  cm for various thickness of the absorbing covering on lattice elements  $d$ : 1 –  $10^{-3}$  cm; 2 –  $10^{-2}$  cm; 3 –  $10^{-1}$  cm

и конструктивных параметров поглощающих материалов волноводного типа: поперечного сечения ячейки, проводимости и толщины покрытия радиопоглощающей решетки, диэлектрической проницаемости среды, заполняющей решетку, толщины поглощающего материала.

### Список литературы / References

- [1] Ковнеристый Ю.К., Лазарева И.Ю., Раваев А.А. Материалы, поглощающие СВЧ-излучения. М.: Наука, 1982. 164 с. [Kovneristy Yu.K., Lazareva I.Yu., Ravayev A.A. *Materials, the absorbing Microwave radiations*. М.: Science, 1982. 164 p. (in Russian)]
- [2] Ruck G. *Radar Cross-Section Handbook*. N.Y.: Plenum Press, 1970.
- [3] Knott E.F., Shaeffer J.A., Tuley M.T. *Radar Cross-Section: Its Prediction, Measurement and Reduction*. Dedham: Actech House, 1985.
- [4] Harteman P., Labeirie M. *Revue Technique Thomson-CSF*, 1987, 19(3-4), 413.

[5] Поляк Б.Т. Введение в оптимизацию. М.: Наука, 1983. 384 с. [Poliak B.T. *Introduktion in optimization*. М.: Science, 1983. 384 p. (in Russian)]

[6] Никольский В.В. Электродинамика и распространение радиоволн. М.: Наука, 1978. 544 с. [Nikolsky V.V. *Electrodynamics and distribution of radio waves*. М.: Science, 1978. 544 p. (in Russian)]

[7] Гольдштейн Л.Д., Зернов Н.В. Электромагнитные поля и волны. М.: Советское радио, 1971. 664 с. [Goldstein L.D., Zernov N.V. *Electromagnetic fields and waves*. М.: Soviet radio, 1971. 664 p. (in Russian)]

[8] Вайнштейн Л.А. К электродинамической теории решеток. Электроника больших мощностей: сб. М.: АН СССР, 1963. С. 26 [Weinstein L.A. To the electrodynamic theory of lattices. *Electronics of big capacities*. М.: Academy of Sciences of the USSR, 1963. P. 26 (in Russian)]