



УДК 621.396.969.34

Б. А. Панченко, А. М. Мусин  
Уральский федеральный университет  
им. первого Президента России Б. Н. Ельцина

## Влияние теплозащитного покрытия выпуклых тел на радиолокационные характеристики<sup>1</sup>

Рассчитаны коэффициенты рассеяния для сферы диаметром 500 мм с теплозащитным покрытием, имитирующей летательный аппарат выпуклой формы. Приведены результаты для четырех значений электрических размеров сферы.

### Дифракция, защитное укрытие, радиолокационные характеристики, защитные материалы

При обнаружении летательных аппаратов радиотехническими средствами существенное влияние оказывает теплозащитное покрытие (ТЗП), нанесенное на элементы конструкции аппарата с целью защиты от теплового и механического воздействий во время полета на больших скоростях [1]. В этой связи в настоящей статье приведены результаты исследования влияния ТЗП на рассеяние электромагнитных волн выпуклым телом, которое аппрок-

симулируется сферой. Падающая электромагнитная волна линейной поляризации  $\mathbf{E} = E_0 \mathbf{a}_\theta$  ( $E_0$  – амплитуда напряженности падающей электромагнитной волны) рассеивается металлической сферой радиусом  $r_1 = 500$  мм с диэлектрическим покрытием толщиной  $r_2 - r_1$  с относительной диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_2$ .

Таблица 1

Параметр	Материал покрытия		
	ТЗМКТ-8	ТЗМКТ-8КН- $\text{Al}_2\text{O}_3$	ТЗМКТО-8К-ТЭАТ-МС
Толщина покрытия, мм	3.5	4	3.75
Относительная комплексная диэлектрическая проницаемость $\epsilon_2$	$3.05 - 0.0823i$	$3.46 - 0.0969i$	$2.89 - 0.0665i$

симируется сферой. Расчетным путем определены диаграммы рассеяния, значения радиолокационных и попутных коэффициентов рассеяния. Выполнено сравнение гладкого и защищенного образцов.

#### Характеристики теплозащитных покрытий.

В качестве защитных материалов рассмотрены наноструктурированные полимерные композиционные материалы, армированные тугоплавким наполнителем [2]. Результаты измерения относительной диэлектрической проницаемости полученных образцов приведены в табл. 1. Характеристики материалов измерены прибором ИДХ 7003.

#### Метод решения электродинамической задачи.

На рис. 1 изображена геометрия задачи, решаемой электродинамическим методом в сферической системе координат  $(r, \theta, \varphi)$  с единичными

Параметром модели является величина  $b = k_0 r_1$ , где  $k_0 = 2\pi/\lambda_0$  – волновое число в свободном пространстве, причем  $\lambda_0$  – длина волны в нем же.

Радиолокационный коэффициент рассеяния металлической сферы без покрытия определяется следующим образом [3]:

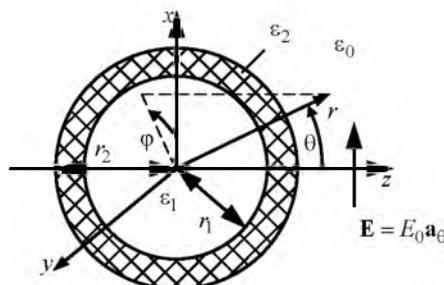


Рис. 1

<sup>1</sup> Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №14-19-01396).

$$\sigma_r(b) = 4/b^2 \times \left| \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n (2n+1) \left\{ \frac{j_n}{h_n^{(1)}} - \frac{d}{db} \left[ \frac{bj_n(b)}{bh_n^{(1)}(b)} \right] \right\} \right|^2, \quad (1)$$

где  $j_n(\cdot)$  и  $h_n^{(1)}(\cdot)$  – сферическая функция Бесселя  $n$ -го порядка и сферическая функция Ханкеля 1-го рода  $n$ -го порядка соответственно.

Для решения задачи с многослойными покрытиями используется аппарат тензорных функций Грина [4]. Рассеянное поле имеет вид

$$\mathbf{E}_s(r) = iE_0 \frac{e^{-ik_0 r}}{k_0 r} [\mathbf{a}_\theta S_{\parallel}(\theta) \cos \varphi - \mathbf{a}_\varphi S_{\perp}(\theta) \sin \varphi], \quad (2)$$

где

$$S_{\parallel}(\theta) = \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ (-1)^n \frac{2n+1}{n(n+1)} [\tau_n(\theta) M_n - \pi_n(\theta) N_n] \right\};$$

$$S_{\perp}(\theta) = \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ (-1)^n \frac{2n+1}{n(n+1)} [\pi_n(\theta) M_n - \tau_n(\theta) N_n] \right\};$$

причем

$$\tau_n(\theta) = \partial P_n^{(1)}(\cos \theta) / \partial \theta; \quad \pi_n(\theta) = P_n^{(1)}(\cos \theta) / \sin \theta,$$

а  $P_n^{(1)}(\cdot)$  – функция Лежандра  $n$ -й степени 1-го порядка.

Коэффициенты  $M_n$  и  $N_n$  определяют зависимости от размеров и от структуры сферического тела с покрытием [5]:

$$M_n = \frac{i\tilde{Z}_n(r_2) \nu_n(k_0 r_2) - \nu'_n(k_0 r_2)}{i\tilde{Z}_n(r_2) \chi_n^{(2)}(k_0 r_2)};$$

$$N_n = \frac{i\tilde{Y}_n(r_2) \nu_n(k_0 r_2) - \nu'_n(k_0 r_2)}{i\tilde{Y}_n(r_2) \chi_n^{(2)}(k_0 r_2)},$$

где  $\tilde{Z}(r_2)$  и  $\tilde{Y}(r_2)$  – ориентированные импеданс и адмитанс соответственно, отсчитываемые от границы между покрытием и свободным пространством в направлении начала координат (см. рис. 1);  $\nu_n(\cdot)$ ,  $\chi_n^{(2)}(\cdot)$  – функция Риккати–Бесселя  $n$ -го порядка и функция Риккати–Ханкеля 2-го рода  $n$ -го порядка [6] соответственно;

$$\tilde{Z}(r_2) = \tilde{Z}(r_2) + \tilde{Z}(r_2); \quad \tilde{Y}(r_2) = \tilde{Y}(r_2) + \tilde{Y}(r_2),$$

причем  $\tilde{Z}(r_2)$  и  $\tilde{Y}(r_2)$  – ориентированные импеданс и адмитанс соответственно, отсчитываемые

от границы между покрытием и свободным пространством в направлении свободного пространства; знаком " $\sim$ " обозначена нормировка к импедансу и адмитансу свободного пространства, а штрихами – производные функций.

В качестве проверки математической модели рассмотрена дифракция электромагнитной волны линейной поляризации на проводящей сфере без покрытия. Результаты проверки совпали с данными [7].

Выражение (2) содержит два векторных компонента:  $\theta$ -й (основную поляризационную составляющую) и  $\varphi$ -й (кроссполяризационную составляющую). Рассеяние энергии характеризуется рядом коэффициентов [7]: общим коэффициентом рассеяния  $\sigma_s$ , радиолокационным  $\sigma_r$  и попутным  $\sigma_{\Pi}$  коэффициентами рассеяния. Для рассеивателя сферической формы сечение связывается с общим коэффициентом рассеяния следующим образом [3], [4]:

$$\sigma_s = S_s / (\pi r_1^2),$$

где  $S_s$  – эффективная площадь рассеяния. Если направление падающей волны и направление приема рассеянной волны произвольные, то коэффициент рассеяния называется двухпозиционным. Для случая падающей волны линейной поляризации двухпозиционный коэффициент рассеяния для основной поляризационной составляющей поля ( $\varphi = 0$ ) имеет вид

$$\sigma(\theta) = 4/b^2 \times \left| \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ (-1)^n \frac{2n+1}{n(n+1)} [\tau_n(\theta) M_n - \pi_n(\theta) N_n] \right\} \right|^2.$$

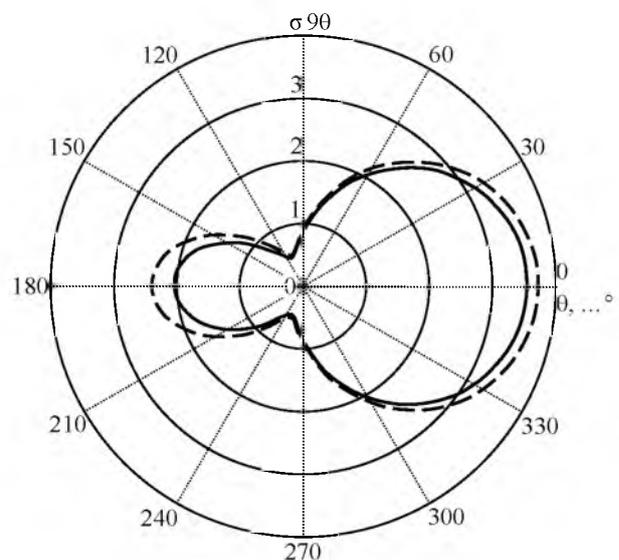


Рис. 2

Таблица 2

Образец	Параметр модели $b = k_0 r_1$			
	1.1	2.35	6.28	12.57
Радиолокационный коэффициент рассеяния $\sigma_p$				
Сфера без укрытия	3.5477	1.9675	1.0140	0.9037
ТЗМКТ-8	3.6278	2.0116	0.9977	0.8944
ТЗМКТ-8КН- $Al_2O_3$	3.6446	2.0209	0.9940	0.8924
ТЗМКТО-8К-ТЭАТ-МС	3.6302	2.0129	0.9972	0.8941
Материал [8]	3.7033	2.0538	0.9786	0.8852
Попутный коэффициент рассеяния $\sigma_n$				
Сфера без укрытия	2.0368	6.8422	43.3353	166.0029
ТЗМКТ-8	2.1950	7.1054	44.2380	168.3625
ТЗМКТ-8КН- $Al_2O_3$	2.2290	7.1616	44.4322	168.8741
ТЗМКТО-8К-ТЭАТ-МС	2.1996	7.1128	44.2637	168.4298
Материал [8]	2.3606	7.3843	45.2150	170.9634

В случае  $\theta = 0$  (направление наблюдения совпадает с направлением падающей волны) коэффициент рассеяния называется радиолокационным и определяется по (1). Если угол  $\theta = 180^\circ$  (наблюдение ведется в направлении, противоположном направлению падающей волны), коэффициент рассеяния называется попутным.

**Влияние покрытий на энергетические характеристики рассеяния.** Расчет коэффициентов рассеяния проведен для значений  $b$  1.1; 2.35; 6.28; 12.57. Также проведен расчет для сферы с покрытием из материала [8], обладающего относительной диэлектрической проницаемостью  $15 - 5i$  и толщиной покрытия 5 мм. На рис. 2 в качестве примера показаны диаграммы рассеяния гладкой сферы (сплошная линия) и сферы с покрытием

[8] (штриховая линия) при  $x = 1.1$ . В табл. 2 приведены значения радиолокационного и попутного коэффициентов рассеяния для гладкой сферы, сферы с покрытиями материалами, указанными в табл. 1, и с покрытием [8].

В результате математического моделирования установлено, что при указанных значениях  $b = k_0 r_1$  для гладкой сферы и сферы с покрытием относительная разница в значениях радиолокационного коэффициента рассеяния не превышает 10 %, а для попутного – 20 %, причем с ростом  $b$  эта разница уменьшается.

В дальнейшем представляет интерес исследовать влияние эффекта выгорания (уноса) ТЗП на характеристики рассеяния.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Львова Л. А. Радиолокационная заметность летательных аппаратов, Снежинск: Изд-во РФЯЦ-ВНИИТФ, 2003. 232 с.
2. Койтов С. А., Мельников В. Н. Разработка наноструктурированного полимерного композиционного материала, армированного тугоглавким наполнителем // Вестн. Концерна ПВО "Алмаз-Антей". 2013. № 1(9). С. 64–69.
3. Кобак В. О. Радиолокационные отражатели М.: Сов. радио, 1975. 248 с.
4. Панченко Б. А. Рассеяние и поглощение электромагнитных волн неоднородными сферическими телами. М.: Радиотехника, 2012. 292 с.
5. Фелсен Л., Маркувиц Н. Излучение и рассеяние волн: в 2 т. Т. 1. М.: Мир, 1978. 547 с.
6. Абрамовиц М., Стиган И. Справочник по специальным функциям. М.: Наука. 1979. 830 с.
7. Хенл Х., Мауэ А., Вестпфаль К. Теория дифракции. М.: Мир. 1964. 333 с.
8. Chakravarty S., Mittra R., Williams N. R. Application of a microgenetic algorithm (MGA) to the design of broadband microwave absorbers using multiple frequency selective surface screens buried in dielectrics // IEEE Trans. on ant. and prop. 2002. Vol. 50, № 3. P. 284–296.

B. A. Panchenko, A. M. Musin

Ural federal university n. a. the first President of Russia B. N. Yeltsin

### The influence of heat-resisting coating convex solid on radar characteristics

*Dispersion ratio for sphere in diameter of 500 mm with the heat-shielding covering, which approximate an aircraft, was calculated. Results for 4 values of the electric sizes of sphere are presented.*

Diffraction, protective shelter, radar-tracking characteristics, protective materials

Статья поступила в редакцию 7 октября 2014 г.