

---

УДК 621.396.96

И.Е. Ряполов, В.А. Василец, О.И. Сухаревский

*Харьковский университет Воздушных Сил имени Ивана Кожедуба, Харьков*

## РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК РАССЕЯНИЯ ИДЕАЛЬНО ПРОВОДЯЩЕГО ШАРА ПОД СФЕРИЧЕСКОЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКОЙ

*В статье представлены результаты расчета характеристик рассеяния радиолокационного идеально отражающего шара под сферической диэлектрической оболочкой и способы снижения радиолокационной заметности данной конструкции.*

**Ключевые слова:** диэлектрическая оболочка, беспилотный летательный аппарат.

### Введение

**Постановка проблемы.** Анализ локальных войн и вооруженных конфликтов современности свидетельствует о тенденции увеличения масштабов применения в них беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) и расширения спектра задач, который на них возложены. Военные специалисты ведущих стран мира считают, что в боевой обстановке БПЛА являются наиболее эффективными по сравнению с самолетами-разведчиками при выполнении задач воздушной разведки, радиоэлектронной борьбы, целеуказания, корректировки огня артиллерии, боевого управления, радиационной, бактериологической, биологической разведки и других специализированных задач.

Увеличения масштабов применения БПЛА при выполнении ими боевых задач влечет за собой разработку методов расчета полей рассеяния и поиск путей снижения радиолокационной заметности данных летательных аппаратов для средств обнаруже-

ния противника, которая определяется эффективной поверхностью рассеяния (ЭПР).

**Анализ литературы.** Как правило, планер БПЛА имеет смешанную конструкцию, центральная часть крыла (центроплан) и хвостовые балки выполнены из металла, остальные части изготовлены из трехслойного стеклопластика с наполнителем из пенопласта. В средней части фюзеляжа находится оборудование (бортовое и целевое), которое может быть промоделировано металлическими (идеально проводящими) ящиками разной формы, также, как и находящийся в задней части фюзеляжа отсек силовой установки. Таким образом, можно считать, что основными рассеивающими элементами модели БПЛА являются идеально проводящие объемные объекты, находящиеся под диэлектрической оболочкой, идеально проводящий центроплан и элементы, существенно слабее рассеивающие электромагнитное излучение – консоли крыльев, хвостовое оперение и другие части

БПЛА, целиком выполненные из трехслойного стеклопластика. В [2] проведен анализ построения типового БПЛА и предложен асимптотический метод расчета вторичного излучения модели фюзеляжа беспилотного летательного аппарата. Метод основан на интегральных представлениях классической электродинамики (которые могут быть получены с помощью леммы Лоренца) и коротковолновых асимптотик, входящих в них полей. При этом разрабатываемый метод учитывает электродинамические взаимодействия между диэлектрической оболочкой и находящимся внутри нее идеально проводящим объектом.

На основании разработанного метода в данной статье решена модельная задача по расчету характеристик рассеяния металлическим шаром, находящимся под диэлектрической оболочкой.

Данная задача является модельной для расчета характеристик рассеяния фюзеляжа БПЛА.

**Целью статьи** является анализ влияния диэлектрической оболочки на металлический шар, находящийся внутри нее, а также способы снижения радиолокационной заметности данной конструкции.

### Основная часть

На рис. 1 представлен идеально проводящий шар больших электрических размеров (радиус 1 м при длине зондирующего сигнала  $\lambda = 0,03$  м) находящийся под диэлектрической оболочкой.

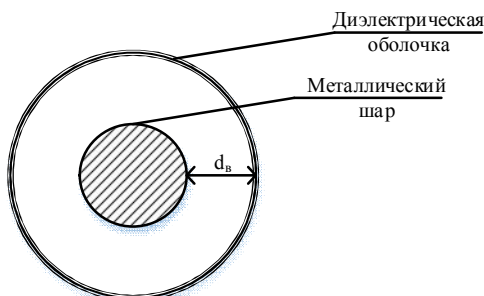


Рис. 1. Идеально проводящий шар, находящийся под диэлектрической оболочкой

Решение задачи рассеяния электромагнитной волны на указанном объекте позволяет применять асимптотические методы коротковолновой дифракции, такие как методы физической и геометрической оптики в их классической интерпретации. ЭПР в приближении физической оптики такого шара составляет  $\pi$  (м<sup>2</sup>) [1].

#### Результаты расчета характеристик рассеяния идеально проводящего шара под диэлектрической оболочкой

Для оценки влияния диэлектрической оболочки на ЭПР шара рассмотрим такие виды конструкций:

1. Идеально проводящий шар находится внутри однослойной диэлектрической оболочки с относи-

тельной диэлектрической проницаемостью  $\epsilon'$  и толщиной оболочки  $d$  (модель №1).

2. Идеально проводящий шар находится внутри трехслойной диэлектрической оболочки. Причем, относительная диэлектрическая проницаемость внешних слоев оболочки  $\epsilon' = \epsilon'_1 = \epsilon'_3$ , а толщина этих слоев  $d_{\text{внеш}} = d_1 = d_3$ . Проницаемость внутреннего слоя (пенопласта) -  $\epsilon'_2 = 1,05$ . Его толщина составляет  $d_2 = 3$  мм. (Модель №2).

Рассмотрим рассеяние электромагнитной волны на металлическом шаре, окруженного однослойной сферической диэлектрической оболочкой с меняющейся относительной диэлектрической проницаемостью  $\epsilon'$ .

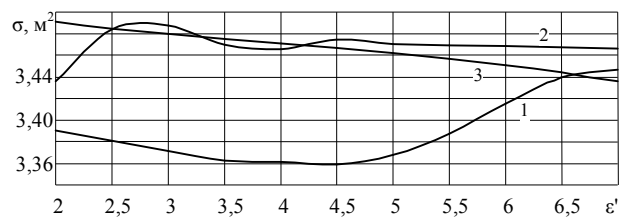


Рис. 2. Зависимость ЭПР модели № 1 от относительной диэлектрической проницаемости сферической оболочки (кривая 1 –  $d = 3$  мм, кривая 2 –  $d = 5$  мм, кривая 3 –  $d = 7$  мм)

Для данной конструкции были проведены расчеты зависимостей ЭПР металлического шара, окруженного однослойной сферической диэлектрической оболочкой, от относительной диэлектрической проницаемостью  $\epsilon'$ .

При этом, между сферической оболочкой и металлическим шаром находится воздушная прослойка толщины  $d_b = 0,1$  м.

Результаты расчетов (рис. 2) показали, что минимальное значение ЭПР для кривой 1 достигается при  $\epsilon' = 4,4$ , для кривой 2 — при  $\epsilon' = 2$  и для кривой 3 — при  $\epsilon' = 7$ .

На рис. 3 представлены зависимости ЭПР металлического шара под однослойной сферической оболочкой от толщины слоя  $d$  при фиксированной  $\epsilon'$ . Между сферической оболочкой и металлическим шаром также находится воздушная прослойка толщины  $d_b = 0,1$  м.

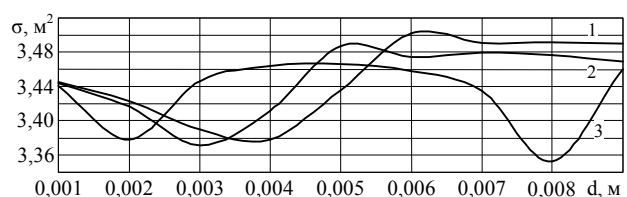


Рис. 3. Зависимость ЭПР модели №1 от толщины слоя сферической оболочки (кривая 1 –  $\epsilon' = 2$ , кривая 2 –  $\epsilon' = 3,5$ , кривая 3 –  $\epsilon' = 7$ )

Анализ полученных результатов (рис. 3) позволяет сделать вывод о том, что существуют оптимальные (с точки зрения минимизации ЭПР) толщины диэлектрического слоя  $d$ .

Так, для значения относительной диэлектрической проницаемости  $\epsilon' = 2$  (кривая 1) толщина слоя составляет  $d = 3,8$  мм, для значения  $\epsilon' = 3,5$  (кривая 2) –  $d = 3$  мм, а для  $\epsilon' = 7$  (кривая 3) график имеет два минимума: при  $d = 2$  мм (ЭПР около  $3,4$  м<sup>2</sup>) и при  $d = 8$  мм (ЭПР около  $3,35$  м<sup>2</sup>).

В точках минимумов приведенных кривых 1 и 2 значение ЭПР имеют значения меньше  $3,4$  м<sup>2</sup>.

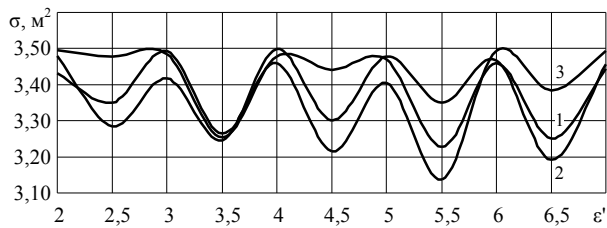


Рис. 4. Зависимость ЭПР модели №2 от относительной диэлектрической проницаемости сферической трехслойной оболочки (кривая 1 –  $d_{\text{внеш}} = 3$  мм, кривая 2 –  $d_{\text{внеш}} = 5$  мм, кривая 3 –  $d_{\text{внеш}} = 7$  мм)

Для модели №2 были проведены расчеты зависимостей эффективной поверхности рассеяния металлического шара, окруженного трехслойной сферической диэлектрической оболочкой.

При этом, между оболочкой и металлическим шаром находится воздушная прослойка толщины  $d_v = 0,1$  м.

Результаты расчетов (рис. 4) показали, что зависимости имеют переколебательный характер. При относительной проницаемости внешних слоев  $\epsilon' = 5,5$  найдено наименьшее значение ЭПР, которое для  $d_{\text{внеш}} = 3$  мм (кривая 1) составляет  $3,24$  м<sup>2</sup>, для  $d_{\text{внеш}} = 5$  мм (кривая 2) –  $3,15$  м<sup>2</sup>, для  $d_{\text{внеш}} = 7$  мм (кривая 3) –  $3,35$  м<sup>2</sup>.

На рис. 5 представлены зависимости ЭПР металлического шара под трехслойной сферической оболочкой от толщины слоя  $d_{\text{внеш}}$  при фиксированной  $\epsilon'$ .

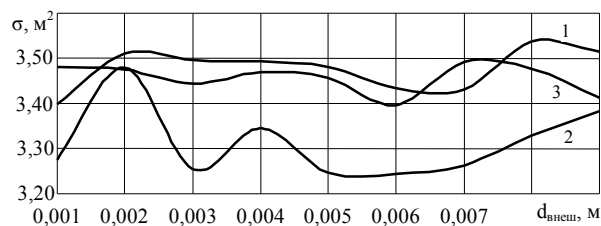


Рис. 5. Зависимость ЭПР модели №2 от толщины слоя сферической оболочки (кривая 1 –  $\epsilon' = 2$ , кривая 2 –  $\epsilon' = 3,5$ , кривая 3 –  $\epsilon' = 7$ )

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод о том, что существуют оптимальные (с точки зрения минимизации ЭПР) толщины внешних слоев  $d_{\text{внеш}}$ .

Так для значения относительной диэлектрической проницаемости  $\epsilon' = 2$  (кривая 1) составляет  $d_{\text{внеш}} = 6,7$  мм, для  $\epsilon' = 3,5$  (кривая 2) –  $d_{\text{внеш}} = 5,2$  мм, для  $\epsilon' = 7$  (кривая 3) –  $d_{\text{внеш}} = 6$  мм.

Представляют интерес результаты исследования зависимости ЭПР металлического шара под трехслойной сферической оболочкой от толщины воздушной прослойки  $d_v$  при фиксированной диэлектрической проницаемости внешних слоев  $\epsilon'$  рассматриваемой оболочки.

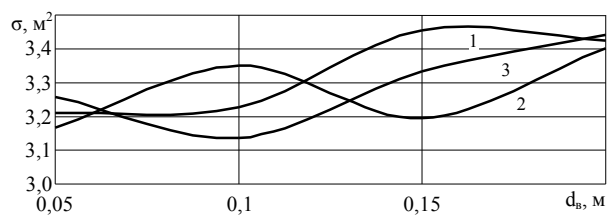


Рис. 6. Зависимость ЭПР модели №2 от толщины воздушной прослойки при  $\epsilon' = 5,5$  (кривая 1 –  $d_{\text{внеш}} = 3$  мм, кривая 2 –  $d_{\text{внеш}} = 5$  мм, кривая 3 –  $d_{\text{внеш}} = 7$  мм)

Результаты расчетов (рис. 6) при относительной проницаемости внешних слоев  $\epsilon' = 5,5$  показали, что зависимости имеют немонотонный характер. Найдено наименьшее значение ЭПР, которое для  $d_{\text{внеш}} = 3$  мм (кривая 1) составляет  $3,19$  м<sup>2</sup> при толщине воздушной прослойки  $d_v = 5,1$  мм; для  $d_{\text{внеш}} = 5$  мм (кривая 2) –  $3,16$  м<sup>2</sup> при  $d_v = 5$  мм; для  $d_{\text{внеш}} = 7$  мм (кривая 3) –  $3,13$  м<sup>2</sup> при  $d_v = 10$  мм.

Анализ графиков (рис. 2 - 6) показывает, что использование диэлектрической оболочки над идеально проводящим шаром в среднем приводит к увеличению ЭПР конструкции.

Для того, чтобы снизить ЭПР всей конструкции можно воспользоваться следующими двумя способами:

- во-первых, с помощью непосредственного снижения ЭПР металлического шара;
- во-вторых, с помощью подбора геометрических и электродинамических параметров диэлектрической оболочки, которые приводят к снижению общей ЭПР.

### Способы снижения радиолокационной заметности металлического объекта под диэлектрической оболочкой

Рассмотрим первый из указанных выше способов снижения радиолокационной заметности и проведем расчет рассеянного поля идеально проводящим шаром покрытым радиопоглощающим мате-

риалом (РПМ) внутри трехслойной диэлектрической оболочки.

Для рассматриваемого диапазона длин волн ( $\lambda = 0,03$  м) можно использовать следующие виды РПМ:

– никель кобальтовый оксид  $NiCo_2O_4$ , связующей основой, которого является смола ЭД-20, имеющий следующую относительную диэлектрическую и магнитную проницаемости:

$$\epsilon' = 5,85 + j1,836 ;$$

и

$$\mu' = 1,23 + j2,97 \cdot 10^{-5} \text{ (РПМ №1);}$$

– углерод, покрытый железом, связующей основой, которого является акрил-оксид, имеющий следующую относительную диэлектрическую и магнитную проницаемости:

$$\epsilon' = 1,68 + j16,038$$

и

$$\mu' = 0,67 + j1,26 \cdot 10^{-7} \text{ (РПМ №2);}$$

– радиопоглощающий материал резонансного типа ВРП - 3, связующей основой, которого является каучуковое покрытие с наполнителем из карбонильного железа, имеющий следующую относительную диэлектрическую и магнитную проницаемости:

$$\epsilon' = 20 + j0,1$$

и

$$\mu' = 1,35 + j0,8 \text{ (РПМ №3).}$$

ЭПР металлического шара радиусом 1 м с нанесенным на него указанных РПМ оптимальной толщины (с точки зрения максимального поглощения) в отсутствие диэлектрической оболочки приведены в табл. 1.

Таблица 1

ЭПР металлического шара при использовании различных радиопоглощающих материалов на его поверхности

$\delta$ , мм	$NiCo_2O_4$	Углерод, покрытый железом	ВРП - 3
1,3	-	-	0,10
3	0,22	-	-
3,1	-	1,61	-

Результаты исследований (табл. 1) показывают, что максимальное снижение радиолокационной заметности металлического шара достигается при использовании РПМ ВРП-3 с толщиной слоя 1,3 мм до  $0,1 \text{ м}^2$ .

Рассмотрим рассеяние электромагнитной волны на металлическом шаре, покрытом РПМ указанной толщины, который окружен сферической трехслойной диэлектрической оболочкой. Внешние слои оболочки имеют толщину  $d_{\text{внеш}} = 1$  мм и одинаковые

вые  $\epsilon'_{1,3} = 3$ , проницаемость внутреннего слоя (пенопласта) -  $\epsilon'_2 = 1,05$ . Его толщина составляет  $d_2 = 3$  мм (модель №3).

Для данной конструкции были проведены расчеты зависимостей ЭПР металлического шара, покрытом РПМ указанной толщины, который окружен сферической трехслойной диэлектрической оболочкой, от толщины воздушной прослойки между сферической оболочкой и внутренним объектом.

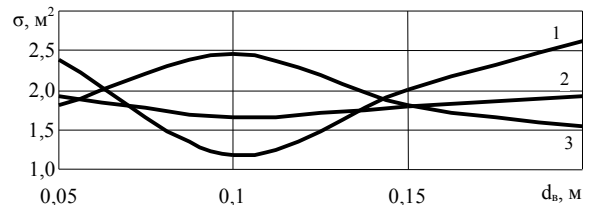


Рис. 7. Зависимость ЭПР модели №3 от толщины воздушной прослойки при (кривая 1 – РПМ №1, кривая 2 – РПМ №2, кривая 3 – РПМ №3)

Можем заметить (рис. 7), что для покрытия РПМ №3 (ВРП-3) значения ЭПР достаточно сильно отличаются от значений для металлического шара с РПМ без трехслойной сферической оболочки. При использовании РПМ таких как РПМ №1 и РПМ №2 значения приблизительно соответствуют значениям ЭПР для металлического шара с РПМ без трехслойной сферической оболочки.

В качестве альтернативного способа снижения радиолокационной заметности можно предложить следующее: металлический шар, который окружен трехслойной диэлектрической оболочкой, внешние слои которой имеют относительную диэлектрическую проницаемость толщину  $\epsilon'_{1,3} = 3$  с одинаковой толщиной  $d_{\text{внеш}} = 1$  мм.

Вместо внутреннего слоя (пенопласта) предлагается использовать РПМ указанной толщины (модель №4).

Для этой конструкции были проведены расчеты зависимостей ЭПР металлического шара со сферической трехслойной диэлектрической оболочкой, внутренним слоем которой является РПМ указанной толщины, от толщины воздушной прослойки между сферической оболочкой и внутренним объектом.

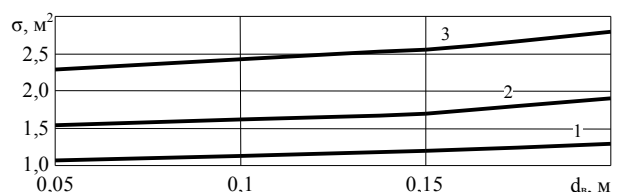


Рис. 8. Зависимость ЭПР модели №4 от толщины воздушной прослойки, в качестве среднего слоя которой используется РПМ (кривая 1 – РПМ №1, кривая 2 – РПМ №2, кривая 3 – РПМ №3)

Покриття резонансного типу (ВРП-3) розроблено для нанесення на метал, і, як видно (рис. 8), не дає такого ефекта, як при нанесенні його на метал. А інші два матеріали дають позитивний ефект, причому нікель кобальтовий оксид (РПМ №1) дає нам деякий вигріш.

Викликає інтерес аналіз впливу товщини внутрішнього шару трьохшарової сферичної діелектричної оболонки (в якості якого пропонується використовувати РПМ) на ЕПР металічного шара під вказаною оболонкою.

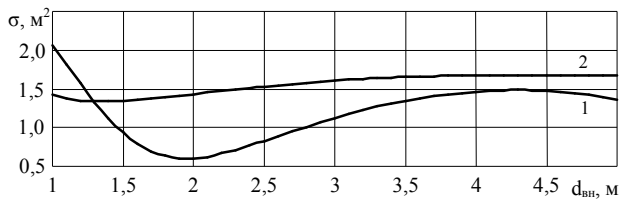


Рис. 9. Залежність ЕПР моделі №4 від товщини внутрішнього шару, в якості якого використовується РПМ (крива 1 – РПМ №1, крива 2 – РПМ №2)

Аналіз отриманих результатів (рис. 9) дозволяє зробити висновок про те, що зниження ЕПР досліджуваного об'єкта при використанні способу зниження радіолокаційної помітності шляхом впровадження в якості внутрішнього шару трьохшарової сферичної діелектричної оболонки знижується до рівня  $0,6 \text{ м}^2$ , що дозволяє здійснити вигріш в  $3,14/0,6 \approx 5,2$  рази порівняно з ЕПР металічного шара радіуса 1 м. При цьому, величина цієї залежності від товщини середнього шару, а не від відстані між діелектричною оболонкою і металом (повітряною прослойкою).

Що ж стосується РПМ №2, то мінімум досягається на рівні 1,3 мм, але для зниження ваги об'єкта найбільш вигідним є використання даного шару з товщиною 1 мм, внаслідок чого величина ЕПР змінюється незначально.

## Висновки

Проаналізовано вплив діелектричної оболонки на характеристики розсіяння металічного шара, що знаходиться всередині неї.

Показано, що використання діелектричної оболонки призводить до збільшення ЕПР ідеально провідного об'єкта, що знаходиться всередині.

Представлено спосіб зниження радіолокаційної помітності, що полягає в використанні РПМ в якості одного з шарів діелектричної оболонки.

Величина ЕПР не сильно залежить від відстані між діелектричною оболонкою і ідеально провідним об'єктом всередині. Це властивість дозволить використовувати об'єкти різних розмірів, не змінюючи параметрів і характеристик діелектричної оболонки при зміні ЕПР всієї конструкції.

Так, у випадку використання радіопоглинаючого матеріалу нікель кобальтового оксиду (РПМ №1) вдасться знизити ЕПР шара в 5,2 рази в широкому діапазоні значень величини повітряної прослойки.

## Список літератури

1. Розсіяння електромагнітних хвиль повітряними і наземними радіолокаційними об'єктами: монографія / О.І. Сухаревський, В.А. Василюк, С.В. Кукобко [і др.]; під ред. О.І. Сухаревського. – Х.: ХУПС, 2009. – 468 с.
2. Ряполов І.Є. Високочастотний метод розрахунку вторинного випромінювання моделі фюзеляжа безпілотного літального апарату / І.Є. Ряполов, В.А. Василюк, О.І. Сухаревський, К.І. Ткачук // Системи озброєння і військова техніка. – 2014. – № 1(37). – С. 177-180.

Поступила в редакцію 28.03.2014

Рецензент: д-р техн. наук проф. С.П. Лещенко, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

## РОЗРАХУНОК ХАРАКТЕРИСТИК РОЗСІЮВАННЯ КУЛЮ З ІДЕАЛЬНО ПРОВІДНІСТЮ ПІД СФЕРИЧНОЮ ДІЕЛЕКТРИЧНОЮ ОБОЛОНКОЮ

І.Є. Ряполов, В.О. Василюк, О.І. Сухаревський

У статті представлені результати розрахунку розсіювання радіолокаційної кулі з ідеальною провідністю під діелектричною оболонкою та способи зниження радіолокаційної помітності даної конструкції.

**Ключові слова:** діелектрична оболонка, безпілотний літальний апарат.

## CALCULATION OF DESCRIPTIONS OF DISPERSION OF IDEALLY CONDUCTING BALL UNDER THE SPHERICAL DIELECTRIC SHELL OF

I.E. Ryapolov, V.A. Vasilets, O.I. Sukharevsky

The results of calculation of descriptions of dispersion of radio-location ideally reflecting ball under a spherical dielectric shell and methods of decline of radio-location noticeableness of this construction are presented in the article.

**Keywords:** dielectric shell, drone.