

## Способ оптимизации параметров покрытия внутренней поверхности металлической полости

В.Н. Кисель \*<sup>1</sup>, А.С. Маслов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теоретической и прикладной электродинамики Российской академии наук, Москва, Россия

<sup>2</sup> Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования “Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)”, Москва, Россия

Статья поступила в редакцию 09.04.2025

Одобрена после рецензирования 14.04.2025

Принята к публикации 22.04.2025

### Аннотация

Отражение от полостей часто определяет максимальный уровень поля обратного рассеяния различных объектов. Снизить это рассеяние можно путем нанесения покрытия на стенки полости, поэтому важное практическое значение имеет задача оптимального выбора параметров покрытий. Соответствующие теоретические и расчетные исследования сопряжены с высокими затратами ресурсов ЭВМ, снизить которые можно, применяя подходящие аппроксимации и специальные методики. Например, поглощающее магнетодиэлектрическое покрытие обычно хорошо описывается эквивалентным поверхностным импедансом, использование которого значительно снижает трудоемкость расчетов и упрощает оптимизацию. В статье рассмотрен способ выбора поверхностного импеданса покрытия стенок полости, применение которого позволяет добиться максимального поглощения энергии в материале покрытия и, соответственно, минимизировать уровень обратного излучения.

**Ключевые слова:** дифракция, энергия, полость, радиопоглощающее покрытие, коэффициент отражения

EDN ЕКРМРР

doi:[10.24412/2949-0553-2025-216-21-29](https://doi.org/10.24412/2949-0553-2025-216-21-29)

## A method for optimizing coating parameters of the inner surface of a metal cavity

V.N. Kisel\*<sup>1</sup>, A.S. Maslov<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Institute for Theoretical and Applied Electromagnetics of RAS, Moscow, Russia

<sup>2</sup> Moscow Institute of Physics and Technologies, Moscow, Russia

\* kis\_v@mail.ru

### Abstract

Reflection from cavities often determines the maximum level of the backscatter field of various objects. This scattering can be reduced by deploying coating over the walls of the cavity, so the optimal choice of coating parameters is of great practical importance. The corresponding theoretical and computational studies involve significant computer resources, which can be reduced by applying suitable approximations and special techniques. For example, an absorbing magnetodielectric coating is usually well described by an equivalent surface impedance, the use of which drastically reduces the complexity of calculations and simplifies optimization. The article discusses a method for selecting the surface impedance of the coating of cavity walls, the use of which allows for maximum energy absorption in the coating material and corresponding minimization of the level of backward radiation.

**Key words:** diffraction, energy, cavity, radar absorbing coating, reflection coefficient

\* Автор, ответственный за переписку: Владимир Николаевич Кисель, kis\_v@mail.ru

## Введение

Известно, что отражение от полостей может быть определяющим фактором при формировании поля обратного рассеяния различных объектов [1, 2], и поэтому задача оптимального выбора параметров покрытий стенок полости имеет важное практическое значение. Ее решение нетривиально, что объясняется особенностями распространения электромагнитной волны в полости, в частности, сложными дифракционными эффектами. Соответствующие теоретические и расчетные исследования с применением строгих вычислительных методов сопряжены с высокими затратами ресурсов ЭВМ, снизить которые можно, применяя подходящие аппроксимации и специальные методики.

Разработку и применение таких методик целесообразно разбить на два этапа. На первом этапе, исходя из общих физических особенностей задачи, применяется быстросействующий и экономичный алгоритм выбора хорошего приближения к оптимальным свойствам материала покрытия, и только на втором этапе привлекаются достаточно точные, но громоздкие и ресурсоемкие электродинамические и вычислительные модели, позволяющие рассчитать диаграммы отражения (рассеяния) от конкретной полости и уточнить требования к покрытиям.

Пример подхода к предварительному выбору параметров покрытий представлен в [3, 4]. Он основан на энергетических соображениях, критерием оптимальности является максимальная величина мощности, передаваемой от электромагнитной волны в объем покрытия. В качестве источника поля в [3, 4] рассматривается нить магнитного тока, она служит моделью эквивалентного поверхностного тока на элементе апертуры полости. В результате выбора подходящих параметров можно добиться наибольшего оттока энергии от электромагнитной волны, распространяющейся вдоль модельной плоскости с покрытием. Если нанести такое оптимизированное покрытие на стенки полости, то лишь оставшаяся после поглощения небольшая часть энергии волны будет создавать обратное излучение в окружающее пространство, что обеспечит минимальные уровни полей рассеяния от полости.

Как показала практика расчетов, для использования на втором, уточняющем, этапе хорошо подходят модели, основанные на интегральных соотношениях для полей [4–7]. Они дают возможность не только рассчитать с высокой точностью требуемые характеристики, такие как угловая или частотная зависимость эффективной поверхности рассеяния, но и выявить особенности волновых процессов, происходящих внутри полости [8, 9]. Учет этих особенностей позволяет обоснованно подойти к построению алгоритмов оптимизации параметров покрытия, исходя из таких его характеристик, как коэффициент отражения и поверхностный импеданс, т. е. дает необходимую информацию для построения моделей первого этапа. Продемонстрируем это на следующем примере.

## 1. Особенности поглощения энергии плоской волны в стенках цилиндрической полости с покрытием

Рассмотрим круговую цилиндрическую полость с металлической плоской заглушкой на торце, длина цилиндрической части 2,7 м, диаметр 1,0 м, стенки полости укрыты изнутри радиопоглощающим материалом (рисунок 1). Плоская электромагнитная волна параллельной поляризации падает под углом  $\alpha = 30^\circ$  к оси полости, длина волны  $\lambda = 10$  см.

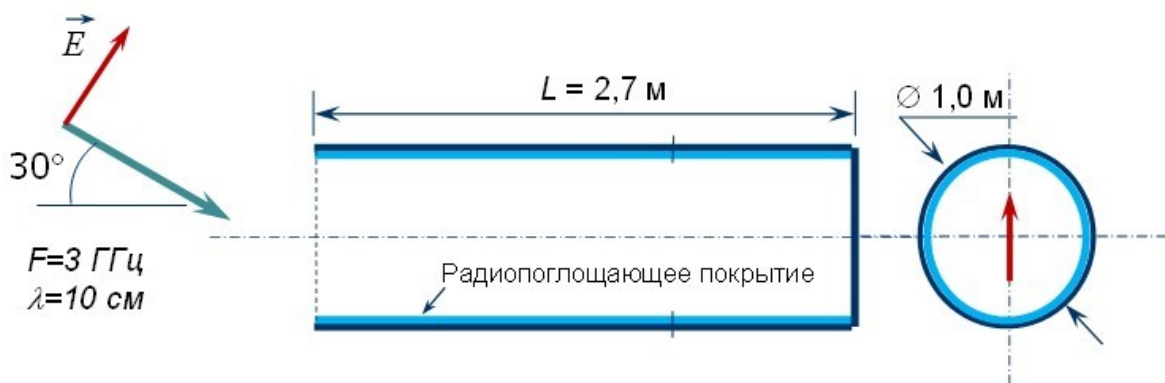


Рисунок 1 – Постановка задачи об электромагнитном возбуждении цилиндрической полости

Аналогичная полость была рассмотрена в [9], где были представлены характерные диаграммы поглощения энергии в покрытии, рассчитанные с применением интегральных соотношений для полей [4–7]. Расчеты показали, что поглощение энергии при распространении волны от апертуры к торцу полости

(«прямой ход») и обратно, от торца к апертуре («обратный ход»), происходит по-разному. Рассмотрим этот вопрос подробнее.

Пусть  $\vec{k}$  – волновой вектор распространяющейся в полости электромагнитной волны,  $\vec{n}$  – нормаль к стенке полости в некоторой точке,  $\theta$  – угол падения волны в данной точке стенки,  $\theta = (\vec{k} \wedge \vec{n})$ , рассчитанный с учетом отражения от стенок полости. Очевидно, в разных точках внутренней поверхности полости углы  $\theta$  будут различными. Рассмотрим поглощение энергии в материале покрытия стенок полости во всех ее внутренних точках. Для этого построим гистограммы относительной доли поглощаемой мощности, приходящейся на секторы углов  $\theta$  шириной 10 градусов для каждой из основных видов линейной поляризации поля. Вид поляризации (параллельная, перпендикулярная) определяется локально, по отношению к вектору  $\vec{k}$  и к плоскости, касательной к стенке полости в точке наблюдения.

Сначала рассмотрим особенности поглощения энергии волны, распространяющейся от апертуры к торцу, соответствующая гистограмма представлена на рисунке 2, на этом же рисунке приведена и типичная угловая зависимость коэффициента отражения покрытия стенок  $R = R(\theta)$ , для наглядности при перпендикулярной поляризации углом  $\theta$  на оси абсцисс присвоен отрицательный знак «-».

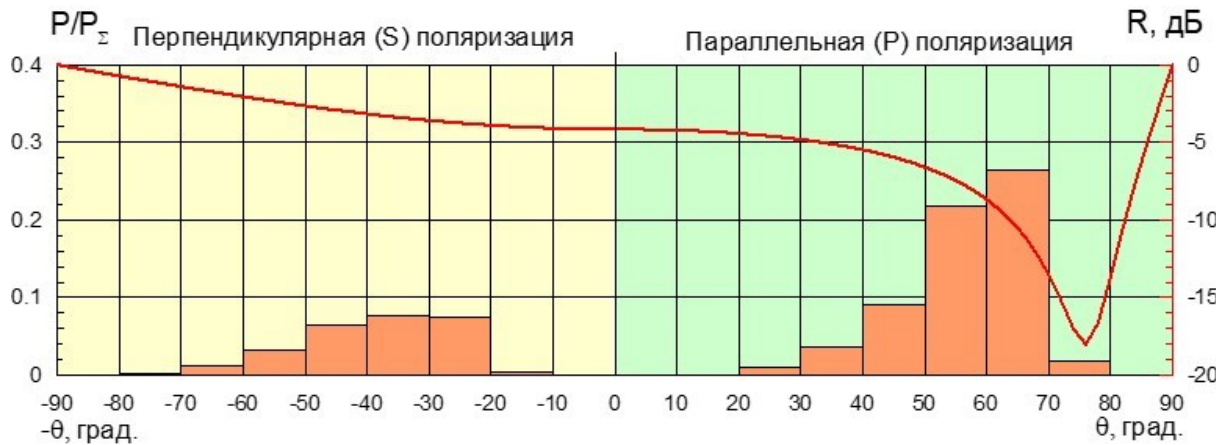


Рисунок 2 – Гистограмма распределения поглощаемой мощности по углам падения волны на стенку полости при локально перпендикулярной и параллельной поляризациях, «прямой ход»

Видно, что для «прямого хода» характерно наибольшее поглощение энергии под углами падения  $\theta$  из диапазона  $\theta = 50 \dots 70$  градусов, что согласуется с лучевыми представлениями об облучении, в основном, нижней поверхности полости (рисунок 3а), при этом значение угла падения плоской волны  $\alpha = 30$  градусов соответствует середине углового диапазона максимального поглощения энергии, т. е. углу  $\theta = 90 - \alpha = 60$  градусов.

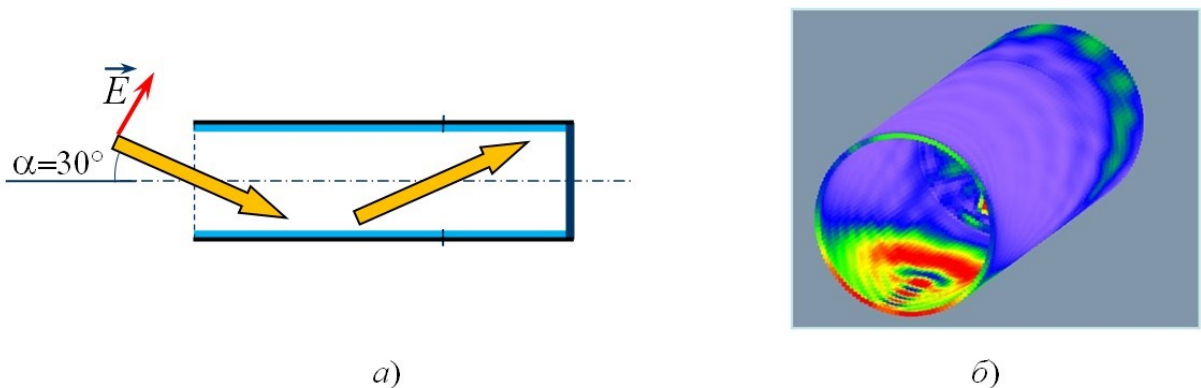


Рисунок 3 – Направления преимущественного распространения волны (а) и полная поглощаемая мощность (б), «прямой ход»

Детальный анализ показывает, что большая часть энергии поглощается при локально параллельной поляризации волны (см. рисунок 2 и рисунок 4), что вполне соответствует интуитивным (лучевым) представлениям.

Иная ситуация складывается при прохождении волны, отраженной от торца по направлению к апертуре, рисунок 5. Видно, что и на параллельной, и на перпендикулярной поляризациях поглощаются

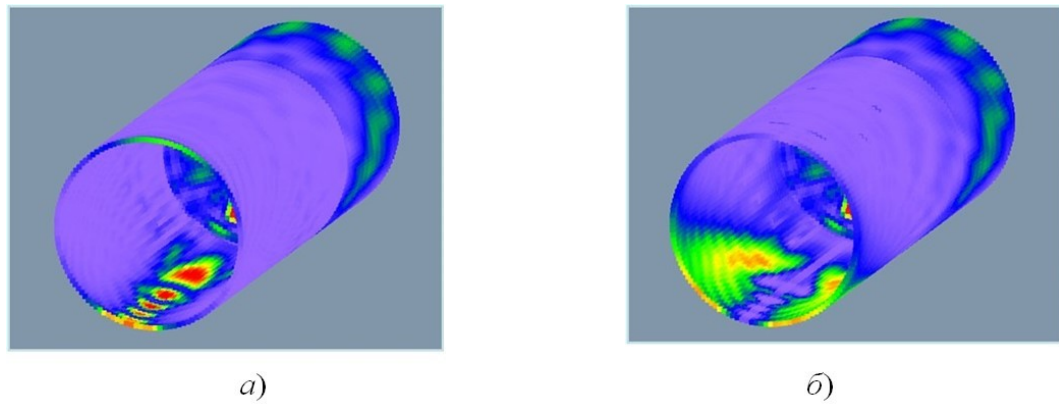


Рисунок 4 – Полная поглощаемая мощность при локально параллельной (а) и перпендикулярной (б) поляризациях поля, «прямой ход»

сопоставимые доли энергии распространяющейся волны. Таким образом, уже после первого отражения начинают сказываться эффекты дифракции, свою роль играет и сложная геометрия отражателя (искривленные стенки), в результате чего происходит интенсивная деполаризация падающей волны.

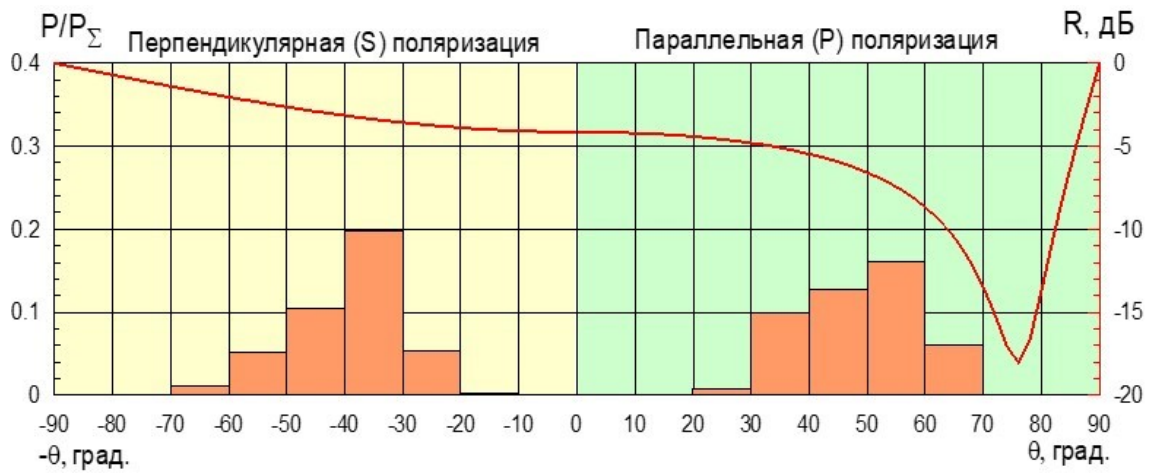


Рисунок 5 – Гистограмма распределения поглощаемой мощности по углам падения волны на стенки полости при локально перпендикулярной и параллельной поляризациях, «обратный ход»

Сказанное иллюстрируется визуализированными данными расчетов поглощаемой мощности при локально параллельной и перпендикулярной поляризациях (рисунок 6).

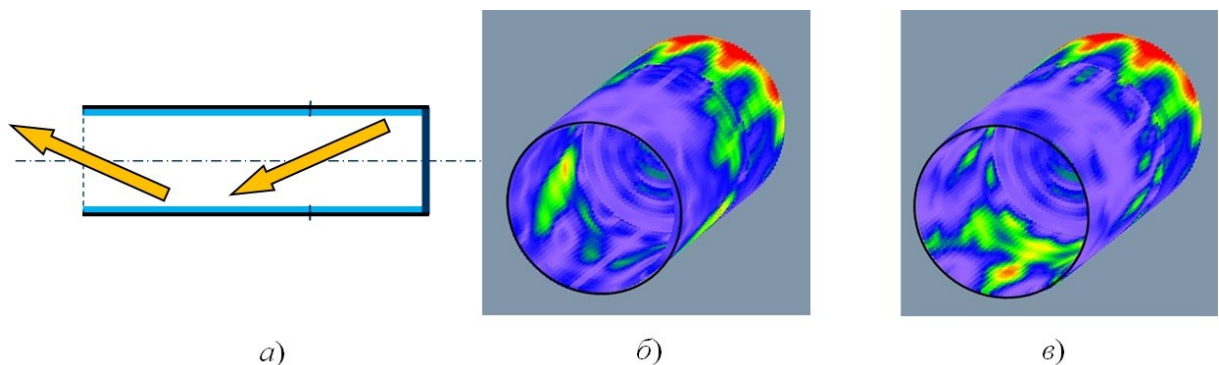


Рисунок 6 – Направления преимущественного распространения волны (а) и поглощаемая мощность при локально параллельной (б) и перпендикулярной (в) поляризациях поля, «обратный ход»

В [9] применительно к большим плоским поверхностям было предложено характеризовать совокупную эффективность покрытия интегралом от квадрата коэффициента отражения в некотором угловом диапазоне  $\theta = \theta_1 \dots \theta_2$  (рисунок 7). Эта величина соответствует энергии рассеянного поля, и с учетом условий облучения объекта (угловой диапазон падения волны, ее поляризация) можно так

подобрать параметры покрытия, чтобы минимизировать интегральное рассеяние, например, выбором оптимального положения угла Брюстера и/или определенного значения коэффициента отражения по нормали.

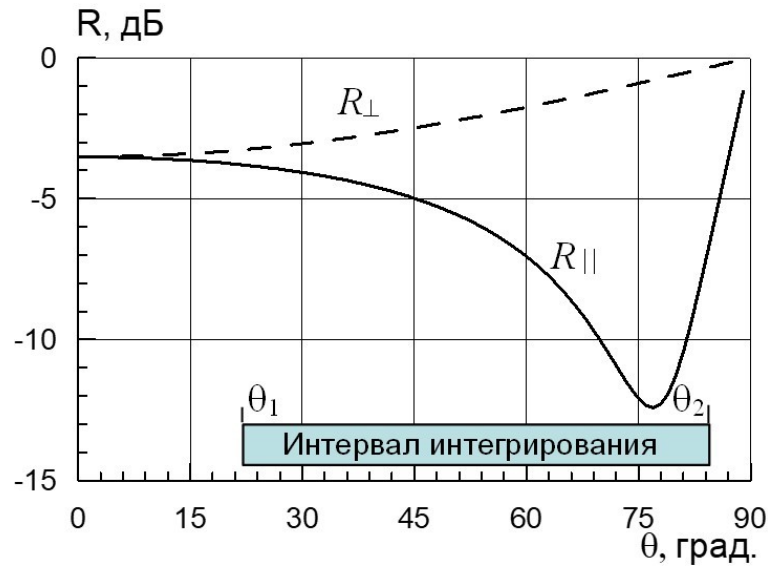


Рисунок 7 – Пример выбора интервала интегрирования для минимизации энергии рассеянного поля

## 2. Минимизация интегральной отраженной мощности

Предложенный в [9] подход можно распространить на случай полости. Для этого введем минимизируемую функцию, которая имеет смысл интегральной отраженной мощности, и определим способ ее расчета так, чтобы учитывались основные особенности распространения волны внутри объема полости:

$$P = \frac{1}{\theta_2 - \theta_1} \int_{\theta_1}^{\theta_2} H(\theta) \left(R_{\perp, \parallel}^2\right)^m \left(R_{\perp}^2 + R_{\parallel}^2\right)^n d\theta,$$

где:

множитель  $H(\theta)$  – весовая функция, которая учитывает особенности распределения углов падения волны на стенки полости, она может соответствовать форме гистограммы (см. рисунок 5), а для неопределенного или равномерного углового распределения можно считать  $H(\theta) = 1$ ;

множитель вида  $\left(R_{\perp, \parallel}^2\right)^m$  учитывает первое «отражение» в соответствии с лучевыми представлениями и данными о поляризации падающей волны, здесь  $R_{\perp, \parallel}^2$  – квадрат коэффициента отражения покрытия при перпендикулярной или параллельной поляризации соответственно, показатель степени  $m$  принимает значение 0 или 1, случай  $m = 0$  соответствует ситуации, когда поляризация падающей волны не определена или с равной вероятностью может быть как параллельной, так и перпендикулярной;

множитель вида  $\left(R_{\perp}^2 + R_{\parallel}^2\right)^n$  учитывает последующее взаимодействие электромагнитной волны со стенками полости, сопровождающееся дифракцией и деполаризацией волны, показатель степени  $n$  – целое число,  $n \geq 1$ , имеет смысл количества учитываемых «отражений». При хороших поглощающих свойствах покрытия влияние каждого последующего «отражения» на конечный результат резко уменьшается, поэтому на практике значение  $n$  может быть выбрано небольшим, например, из интервала  $n = 1 \dots 3$ , что подтверждается расчетами.

Значения коэффициентов отражения  $R_{\perp}$ ,  $R_{\parallel}$  для перпендикулярной и параллельной поляризации соответственно могут быть рассчитаны из решения задачи о падении плоской волны на бесконечную плоскость с магнетодиэлектрическим покрытием, в соответствующие выражения войдут электрофизические и геометрические параметры (диэлектрическая и магнитная проницаемости материалов  $\epsilon$  и  $\mu$ , значения толщины слоев). Оптимизировать функцию  $P$  при этом довольно сложно из-за наличия большого количества варьируемых параметров, ведь даже в случае однородного однослойного покрытия таких параметров пять: действительная и мнимая части  $\epsilon$  и  $\mu$ , толщина слоя. Гораздо удобнее в качестве свободного параметра использовать значение поверхностного импеданса покрытия, который определяется как отношение касательных компонент напряженностей электрического и магнитного полей на

поверхности и обычно нормируется к характеристическому сопротивлению свободного пространства  $W_0 = 120\pi$ , Ом. При этом имеем всего две варьируемые величины: вещественную и мнимую части  $Z$ . Преимущества такого способа обеспечиваются в том случае, когда значение  $Z$  почти не зависит от угла падения волны и ее поляризации. Отметим, что это условие, как правило, выполняется в большинстве практически важных случаев, когда применяются покрытия с высокой электрической плотностью (большими значениями  $|\varepsilon\mu|$ ) и существенными электромагнитными потерями.

Таким образом, для выявления оптимальных параметров покрытия нужно найти минимум интегральной отраженной мощности как функции от значения комплексного поверхностного импеданса покрытия  $P = P(Z)$ . Коэффициенты отражения, входящие в выражение для  $P(Z)$ , можно рассчитать с помощью соотношений

$$R_{\perp} = \frac{Z \cos \theta - 1}{Z \cos \theta + 1}, \quad R_{\parallel} = \frac{Z - \cos \theta}{Z + \cos \theta},$$

где  $Z$  – нормированный к  $W_0$  импеданс покрытия,  $\theta$  – угол падения волны, считая от нормали к покрытию.

### 3. Результаты расчетов

Рассмотрим результаты расчета зависимостей  $P(Z)$  (в дБ), которые представлены в виде двухмерных карт (контурных диаграмм), вдоль горизонтальной и вертикальной осей которых отложены значения действительной и мнимой частей  $Z$  соответственно (рисунок 8).

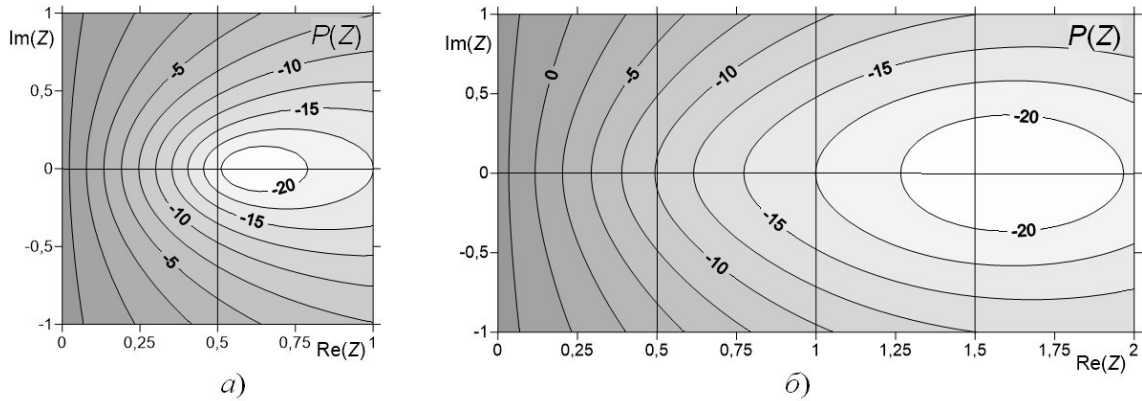


Рисунок 8 – Диаграммы зависимости интегрального коэффициента отражения (в дБ) от значения поверхностного импеданса при параллельной (а) и перпендикулярной (б) поляризациях падающего поля, интервал интегрирования  $\theta = [20^\circ \dots 70^\circ]$

Расчеты выполнены для значений параметров  $H(\theta) = 1$ ,  $\theta_1 = 20^\circ$ ,  $\theta_2 = 70^\circ$ ,  $m = 1$ ,  $n = 1$  для случаев параллельной (рисунок 8а) и перпендикулярной (рисунок 8б) поляризаций падающего поля. Визуальный анализ этих диаграмм позволяет определить оптимальное значение  $Z$ , которое составляет  $Z \approx 0,65$  в случае параллельной поляризации и  $Z \approx 1,6$  для перпендикулярной поляризации.

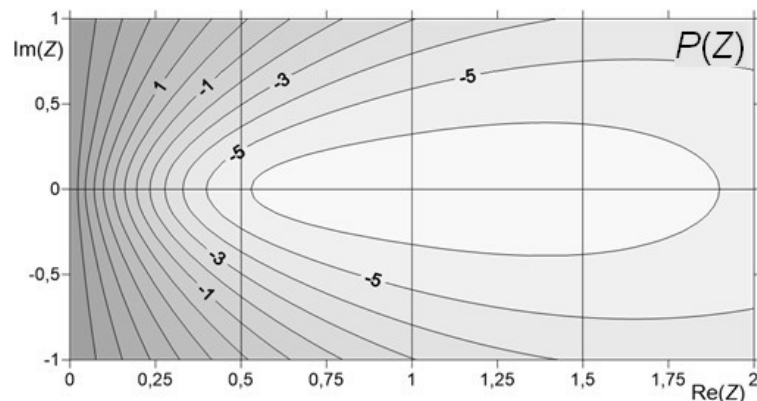


Рисунок 9 – Диаграммы зависимости интегрального коэффициента отражения (в дБ) от значения комплексного поверхностного импеданса при неопределенной поляризации падающего поля, интервал интегрирования  $\theta = [20^\circ \dots 85^\circ]$

Эти величины  $Z$  могут служить ориентиром при подборе геометрических и радиофизических параметров покрытия: толщины, диэлектрической и магнитной проницаемостей, которые обеспечивают получение необходимого поверхностного импеданса в ситуации, когда требуется снизить рассеяние от прямой цилиндрической полости при углах падения волны, близких к  $\alpha = 30^\circ$ ; именно для этого случая был выбран интервал интегрирования  $\theta = [20^\circ \dots 70^\circ]$ , см. рисунок 2 и рисунок 5.

Если покрытие должно эффективно работать при любой поляризации падающего поля, то целесообразно выбирать промежуточное значение:  $Z \approx 1,0$ . Эта ситуация иллюстрируется рисунком 9, где расчет выполнен для  $\theta_1 = 20^\circ$ ,  $\theta_2 = 85^\circ$ ,  $m = 0$ ,  $n = 2$ . В данном случае параметр  $\theta_2$  был выбран так, чтобы учесть возможность практически скользящего падения волны вдоль оси к полости ( $\theta_2 = 85^\circ$ ), а параметр  $m = 0$ , что соответствует случаю отсутствия зависимости от поляризации в выражении для  $P(Z)$ .

Выполним теперь точный расчет диаграмм обратного рассеяния цилиндрической полости с покрытием, размеры которой указаны на рисунке 1. Рассмотрим случаи параллельной (рисунок 10) и перпендикулярной (рисунок 11) поляризации падающей плоской электромагнитной волны.

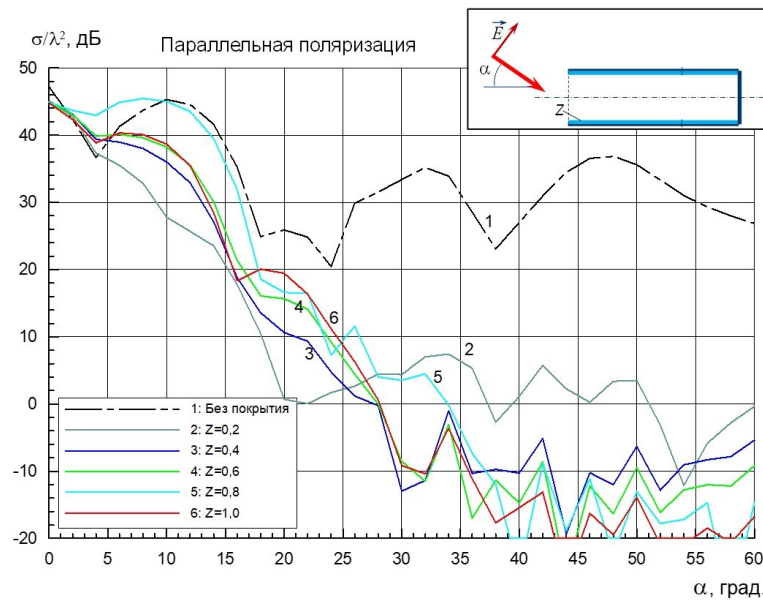


Рисунок 10 – Диаграммы обратного рассеяния цилиндрической полости при различных значениях поверхностного импеданса стенок, параллельная поляризация

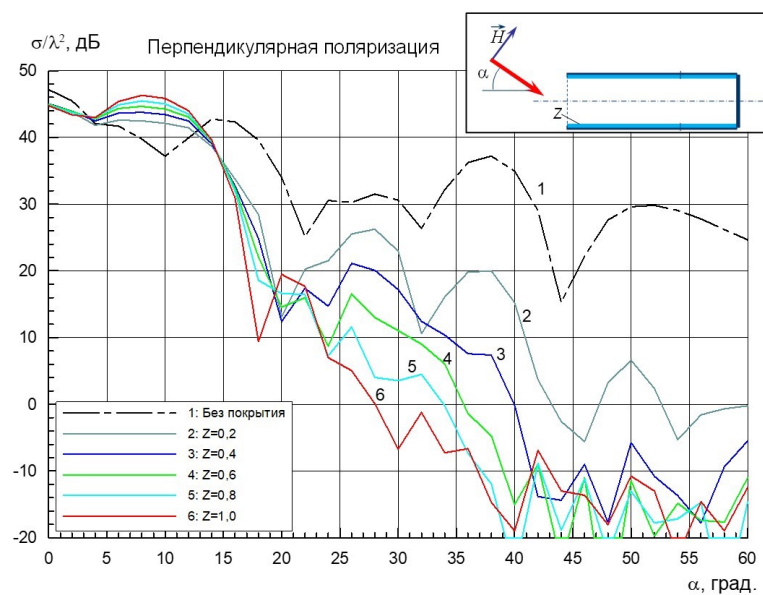


Рисунок 11 – Диаграммы обратного рассеяния цилиндрической полости при различных значениях поверхностного импеданса стенок, перпендикулярная поляризация

Эффективную поверхность рассеяния полости вычислим с использованием строгой электродинамической модели при различных значениях поверхностного импеданса покрытия, от  $Z = 0$  (покрытие отсутствует) до  $Z = 1, 0$  с интервалом  $\Delta Z = 0, 2$ , см. легенду к соответствующему графику и рисунок 12.

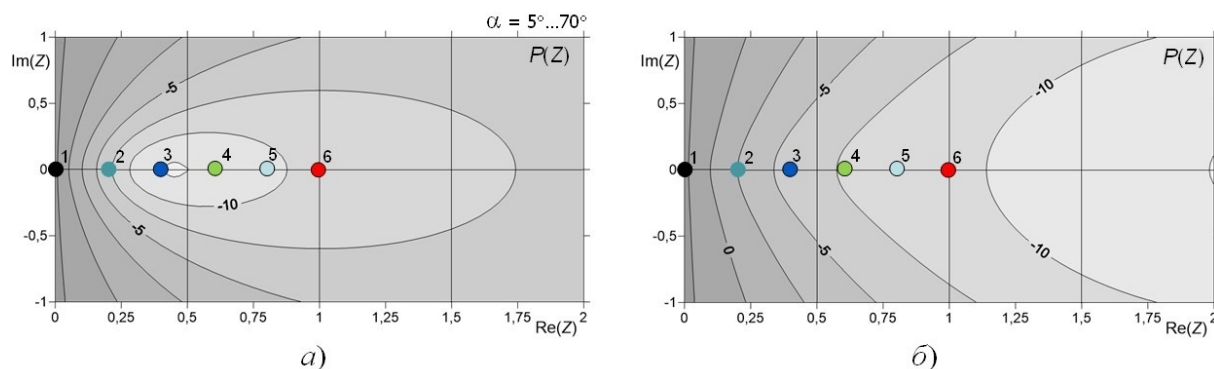


Рисунок 12 – Диаграммы зависимости интегрального коэффициента отражения (в дБ) от значения комплексного поверхностного импеданса при параллельной (а) и перпендикулярной (б) поляризациях падающего поля, интервал интегрирования  $\theta = [20^\circ \dots 85^\circ]$ , цветными точками указаны значения импеданса, для которых выполнен расчет

Из рисунка 10 видно, что в случае параллельной поляризации можно выявить оптимальное значение импеданса из выбранного диапазона  $Z = [0 \dots 1]$ , которое вполне соответствует значению, определяемому по двумерной диаграмме (рисунок 12а). При перпендикулярной же поляризации оптимальным является максимальное значение импеданса из данного диапазона (см. рисунок 11), что также соответствует результатам расчета по представленной упрощенной методике, см. рисунок 12б.

## Заключение

В работе рассмотрен способ выбора поверхностного импеданса покрытия стенок полости, применение которого позволяет добиться максимального поглощения энергии в материале покрытия и, соответственно, минимизировать уровень обратного излучения. Для выявления оптимальных параметров покрытия предложено рассчитывать интегральный коэффициент отражения от стенок полости, при этом используются выражения для коэффициента отражения от касательной импедансной плоскости в точке наблюдения на стенке. Подынтегральная функция строится так, чтобы учесть особенности существенных волновых явлений в полости: геометрикооптическое распространение волны до ее первого отражения от стенки и последующую деполаризацию волны в ходе дифракционных процессов. Интервал углов интегрирования определяется характерным угловым диапазоном падения волны на внутренние поверхности стенок, который может быть выявлен по результатам решения задачи возбуждения полости с проводящими стенками. Анализ полученных диаграмм позволяет определить оптимальное значение импеданса, которое должно быть реализовано путем выбора подходящих радиофизических и геометрических параметров покрытия. Выполнены тестовые расчеты с использованием строгой электродинамической модели металлической полости с покрытием. Вычисления показали, что представленная упрощенная методика позволяет без проведения сложных расчетов получить хорошую оценку требуемых свойств покрытия для снижения уровня полей рассеяния от полости.

## Список литературы

- [1] Справочник по радиолокации. Пер. с англ./ Под ред. М. Сколника. Т.1. М.: Сов. радио, 1977. 455 с.
- [2] Радиолокационная заметность самолетов. Обзор по материалам открытой иностранной печати/ Сост. Монин М.А., Ягудина И.М. М.: ЦАГИ, 1986. № 665. 75 с.
- [3] Lagarkov A.N., Kisel V.N. Electromagnetic Energy Absorption within Extensive Impedance Structures// Electromagnetic materials. Proc. of the Symposium P, ICMAT 2007 (International Conference on Materials for Advanced Technologies, SUNTEC, Singapore, 2007). Edited by Lim Hock, Serguei Matitsine, Gan Yeow Beng and Kong Ling Bing (World Scientific, Singapore, 2007), P. 3 - 10. doi: [10.1142/9789812709547\\_0001](https://doi.org/10.1142/9789812709547_0001)
- [4] Лагарьков А.Н., Федоренко А.И., Кисель В.Н., Кибец С.Г., Семененко В.Н. Актуальные задачи стелс-технологий // ОИВТ РАН Итоги и перспективы: Сборник статей, посвященный 50-летию

Объединенного института высоких температур Российской академии наук. М.: Издательство ОИВТ РАН, 2010 г. С. 270 - 291.

- [5] Obeleiro-Basteiro F., Rodrigues J.L., Burkholder R.J. An iterative physical optics approach for analyzing the electromagnetic scattering by large open-ended cavities // IEEE Trans. Antennas and Propag. 1995. V. AP-43. No. 4. P. 356 - 361. doi: [10.1109/8.376032](https://doi.org/10.1109/8.376032)
- [6] Kisel' V.N., Fedorenko A.I. Electromagnetic scattering from cavities with complex objects inside // Conf. Proc. 2000 Int. Conf. on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory (ММЕТ2000), Kharkov, Ukraine. Sept. 11-15, 2000. V. 2. P. 447 - 449. doi: [10.1109/MMET.2000.890460](https://doi.org/10.1109/MMET.2000.890460). EDN: [EGWGAF](https://www.edn.net/EGWGAF)
- [7] Кисель В.Н., Федоренко А.И. Разработка электродинамической модели воздухозаборника с элементами входной части двигателя // Излучение и рассеяние электромагнитных волн ИРЭМВ 2001. Материалы Всероссийской научно-технической конференции. Таганрог, Россия, 18-23 июня 2001 г. Таганрог: радиотехнический ун-т, 2001. С. 25 - 27.
- [8] Kisel V.N., Kozheko A.S. Development of a way to choose electromagnetic properties of the coating of the inner surface of a metal cavity // 2022 IEEE 8th All-Russian Microwave Conference (RMC), November 23-25, 2022, Moscow, Russian Federation, pp. 274 - 277. doi: [10.1109/RMC55984.2022.10079438](https://doi.org/10.1109/RMC55984.2022.10079438)
- [9] Кисель В.Н., Кожеко А.С. Выбор электродинамических параметров покрытия внутренней поверхности металлической полости // Современная электродинамика. 2023. N 1(3). С. 17 - 29. doi: [10.24412/2949-0553-2023-13-17-29](https://doi.org/10.24412/2949-0553-2023-13-17-29) EDN: [AZFGDK](https://www.edn.net/AZFGDK)

Ссылка для цитирования:

Кисель В.Н., Маслов А.С. Выбор электродинамических параметров покрытия внутренней поверхности металлической полости // Современная электродинамика. 2025. Т. 3, № 2(16). С. 21-29. DOI [10.24412/2949-0553-2025-216-21-29](https://doi.org/10.24412/2949-0553-2025-216-21-29). EDN [EKPMPPF](https://www.edn.net/EKPMPPF).

Citation link:

Kisel V.N., Maslov A.S. A method for optimizing coating parameters of the inner surface of a metal cavity // Modern Electrodynamics. 2025. Vol. 3, No. 2(16). P. 21-29. DOI [10.24412/2949-0553-2025-216-21-29](https://doi.org/10.24412/2949-0553-2025-216-21-29). EDN [EKPMPPF](https://www.edn.net/EKPMPPF).