

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.11.37>

УДК: 537.874, 621.3.09

## ВЛИЯНИЕ КАЧЕСТВА ПИРАМИДАЛЬНОГО ПОГЛОТИТЕЛЯ НА ПОРОГ ПРОЯВЛЕНИЯ РАЗМЕРНОГО ЭФФЕКТА

А.М. Лебедев, Т.А. Фурманова, А.Д. Семизбаев, В.Н. Семененко

Институт теоретической и прикладной электродинамики РАН,  
125412, г. Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 6

Статья поступила в редакцию 8 октября 2025 г.

**Аннотация.** Пористые пирамидальные поглотители обеспечивают радиомаскировку укрываемой поверхности в широкой полосе частот. Размерный эффект проявляется как пороговое значительное снижение эффективности маскировки при уменьшении размеров маскируемой поверхности в длинах волн. Исследовано влияние размерного эффекта на коэффициент отражения по мощности от металлической пластины, закрытой поглотителем в форме двумерной решётки пирамид, в условиях вариации качества пирамидального поглотителя. Коэффициент отражения вычислялся как отношение моностатических эффективных поверхностей рассеяния пластины в направлении нормали к её поверхности при наличии на пластине поглотителя и без него. Качество пирамидального поглотителя характеризовалось коэффициентом отражения от бесконечной плоской поверхности металлического объекта с таким поглотителем при облучении поверхности по нормали. Действие размерного эффекта проявлялось как заметное превышение коэффициента отражения от пластины с поглотителем над коэффициентом отражения от бесконечной плоской поверхности металла с тем же поглотителем. Для улучшения качества поглотителя уменьшались

размеры оснований пирамид, и вводился магнитный подслой переменной толщины. Расчёты показали, что улучшение качества пирамидального поглотителя, помимо общего уменьшения отражения от пластины с поглотителем, приводит к принципиальному изменению хода зависимости коэффициента отражения от размеров укрываемой пластины: с ростом размеров пластины до значений, близких к длине волны, имеет место быстрое уменьшение коэффициента отражения до уровня, характерного для бесконечной плоской поверхности металла с таким же поглотителем, а далее наблюдаются затухающие осцилляции около этого уровня. Фактически это означает снижение порога проявления размерного эффекта до приблизительно длины волны с улучшением качества поглотителя. Материалы статьи были доложены на Всероссийской научной конференции «Излучение и рассеяние электромагнитных волн ИРЭМВ-2025», 23-27 июня 2025, пос. Дивноморское, Краснодарский край, Россия.

**Ключевые слова:** размерный эффект, коэффициент отражения, пирамидальный поглотитель, уменьшение размеров в длинах волн

**Автор для переписки:** Семизбаев Асан Дюсюмбаевич, [as22107@yandex.ru](mailto:as22107@yandex.ru)

## Введение

При радиомаскировке объекта или его части нанесением радиопоглощающего покрытия (РПП) размерный эффект проявляется при уменьшении размеров маскируемой поверхности в длинах волн как пороговое значительное снижение эффективности применения РПП [1].

Пирамидальные поглотители, выполненные из пористых материалов с достаточно большими диэлектрическими потерями, находят широкое применение, поскольку характеризуются малыми коэффициентами отражения в широкой полосе частот. Проведённые расчёты показали, что размерный эффект проявляется сильнее для пирамидальных поглотителей, по сравнению с РПП постоянной толщины, при сопоставимых коэффициентах отражения. Задача понижения порога проявления размерного эффекта по размерам

маскируемой поверхности или по частоте при использовании пирамидального поглотителя актуальна для ряда приложений, например, при решении задач электромагнитной совместимости и при проведении измерений характеристик рассеяния. В последнем случае в дополнение к маскировке измерительного стенда зачастую нужно значительно снизить интенсивность рассеяния частью элементов конструкции путём их укрытия пирамидальным поглотителем для оценки интенсивности рассеяния остальными элементами. Понижение порога проявления размерного эффекта особенно актуально в метровом диапазоне длин волн, когда интенсивность рассеяния элементами конструкции, имеющими, казалось бы, большие, порядка метра, размеры не может быть снижена с ожидаемой эффективностью путём укрытия их пирамидальным поглотителем, при том, что этот же поглотитель достаточно эффективно работает в метровом диапазоне, будучи помещённым на большие поверхности стен безэховой камеры. Заметим, что при исследовании проявлений размерного эффекта вблизи низкочастотной границы применения пирамидальных поглотителей необходимо учитывать ухудшение свойств поглотителей из-за уменьшения толщины поглощающего материала в длинах волн и увеличения тангенса диэлектрических потерь в материале пирамид до порядка 1 и более.

Причиной существования размерного эффекта для поглотителей вообще и пирамидальных поглотителей в частности являются дифракционные эффекты разного рода, связанные с конечностью размеров маскируемой поверхности [2]. Действительно, доля дифракционных полей в составе рассеянного поля возрастает с уменьшением размеров маскируемой поверхности. Однако возможности влиять на проявления дифракционных эффектов локальным нанесением ещё какого-либо поглотителя либо малым изменением формы поглотителя или укрываемой поверхности ограничены из-за действия самого размерного эффекта и слабой чувствительности решения дифракционной задачи к изменениям формы рассеивателя на масштабах, малых по сравнению с длиной волны. Поэтому в данной работе и поставлена задача в численных экспериментах определить наличие связи между качеством пирамидального поглотителя,

применяемым для укрытия образца, с одной стороны, и характером проявления размерного эффекта, включая возможное изменение порогового значения в длинах волн, с другой стороны.

## 1. Условия, принятые при проведении расчётов

Основываясь на численном решении значительного числа дифракционных задач с использованием программы электродинамического моделирования FEKO [3], в работе прослеживалось изменение коэффициента отражения по мощности  $R_p$  от металлической пластины, укрытой пирамидальным поглотителем, в зависимости от размеров пластины и при вариации качества пирамидального поглотителя. Коэффициент отражения  $R_p$  определялся как отношение моностатических эффективных поверхностей рассеяния (ЭПР, см. [4,5]) замаскированной и незамаскированной пластины по нормали к её поверхности. Бралась круглая и квадратная металлические пластины, в качестве характерного размера круглой пластины брался её диаметр, квадратной пластины – длина стороны. ЭПР незамаскированной пластины вычислялась в приближении физической оптики [4,5], что позволило уйти от влияния на  $R_p$  со стороны дифракционных эффектов при рассеянии на металлической пластине как таковой с уменьшением её размеров в длинах волн.

Качество пирамидального поглотителя характеризовалось коэффициентом отражения по мощности  $R_{p\infty}$  от бесконечной плоской поверхности металла с этим поглотителем при облучении поверхности по нормали. Разумеется, в этом случае отсутствуют дифракционные эффекты, приводящие к размерному эффекту при конечных размерах укрываемой поверхности. Превышение коэффициента отражения по мощности  $R_p$  от укрытой пластины над  $R_{p\infty}$  является количественной мерой проявления размерного эффекта. Расчёт  $R_{p\infty}$  производился также с помощью программы FEKO, в этом случае расчётная модель состояла из единственной пирамидки на металлической подложке, заключённой в ячейку, на гранях которой задавались периодические граничные условия.

В связи с особым вниманием к решению задачи понижения порога проявления размерного эффекта в длинноволновой части спектра все расчёты были выполнены на частоте метрового диапазона 0.2 ГГц (длина волны  $\lambda = 1.5$  м).

При расчётах пирамидальный поглотитель был взят в виде двумерной решётки остроконечных пирамид с квадратными поперечными сечениями на общем основании постоянной толщины из того же материала, из которого выполнены пирамиды. Для учёта роста уровня потерь в метровом диапазоне для материала пирамид было принято реалистичное значение диэлектрической проницаемости  $\varepsilon = 1.5 - i \times 23$  при равной единице магнитной проницаемости  $\mu = 1$ , здесь  $i$  – мнимая единица. Исходные размеры для пирамидального поглотителя были взяты как для реального образца: высота пирамид 520 мм, что составляет приблизительно треть длины волны, стороны квадратных оснований пирамид равны 175 мм, что много меньше длины волны, толщина общего основания под пирамидами 95 мм. Качество пирамидального поглотителя варьировалось путём изменения размеров оснований пирамид и введения магнитного подслоя под общим основанием, на котором находятся пирамиды.

## 2. Примеры проявления размерного эффекта

Проявление размерного эффекта для пирамидального поглотителя иллюстрируют представленные на рис. 1 зависимости коэффициентов отражения  $R_p$  от квадратной и круглой пластин с пирамидальным поглотителем в зависимости от размера пластины (красная и синяя кривые).

Уровень коэффициента отражения от идеально проводящей плоскости с тем же пирамидальным поглотителем представлен на рис. 1 красной пунктирной линией. Как следует из рисунка, при размерах пластины, равных длине волны, наблюдаемое превышение  $R_p$  над  $R_{p\infty}$  для пластины с пирамидальным поглотителем является значительным и составляет 12 дБ для круглой пластины, 6 дБ для квадратной пластины. С дальнейшим увеличением размеров пластины максимальные отклонения  $R_p$  от  $R_{p\infty}$  достигают 5 дБ при размерах пластины

около двух длин волн, 3 дБ - около четырёх длин волн. Отсюда пороговый размер поверхности, укрываемой пирамидальным РПП, можно оценить как четыре длины волны.

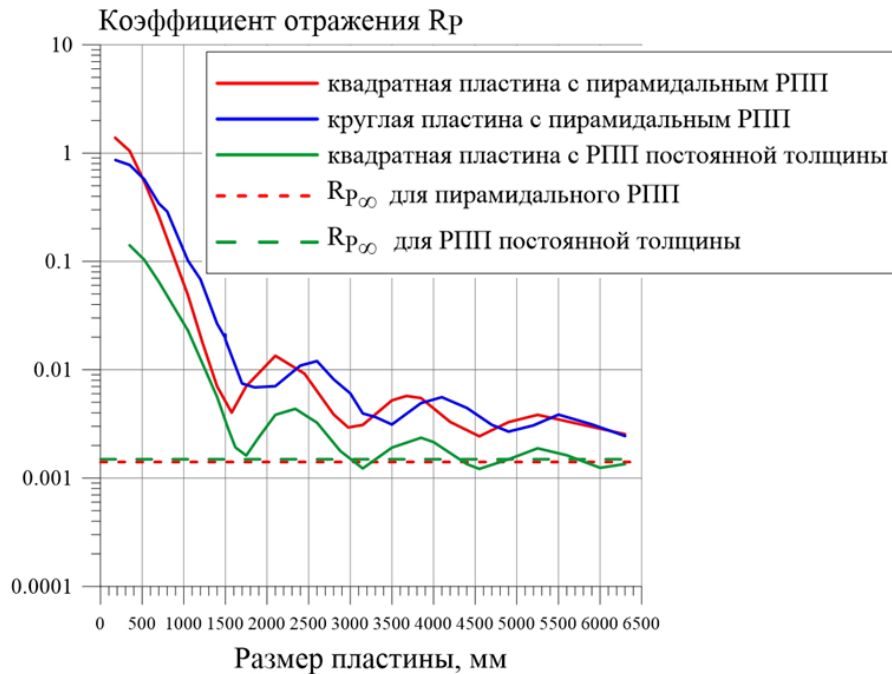


Рис. 1. Коэффициент отражения  $R_p$  от квадратной и круглой металлических пластин с пирамидальным поглотителем в зависимости от размеров пластины.

Отметим, что в целом графики зависимостей, представленные на рис. 1 для квадратной и круглой пластин, отличаются в деталях, но имеют общую "огибающую", то есть приводят к единой оценке масштабов проявления размерного эффекта в зависимости от размеров укрываемой поверхности в длинах волн, что говорит об общем характере получаемых результатов.

Также для сравнения на рис. 1 зелёной кривой показана зависимость коэффициента отражения  $R_p$  от размера квадратной пластины, укрытой РПП постоянной толщины. Уровень коэффициента отражения от бесконечной поверхности металла с РПП постоянной толщины  $R_{p\infty}$  обозначен на рисунке зелёной пунктирной линией, которая идёт весьма близко к красной пунктирной линии. Действительно, материал этого РПП был специально подобран так, чтобы коэффициенты отражения  $R_{p\infty}$  от плоского и пирамидального РПП были близки. Видно, что размерный эффект для пирамидального поглотителя существенно более выражен — очевидно, вследствие дополнительных дифракционных

эффектов, возникающих при ограничении размеров поглотителя с периодически меняющейся формой поверхности, по сравнению с поглотителем постоянной толщины.

### 3. Изменение характера проявления и порога размерного эффекта при улучшении качества пирамидальных РПП

Рассмотрим результаты расчётов, показывающие как с улучшением качества поглотителя меняются, во-первых, характер проявления размерного эффекта, и, во-вторых, пороговое значение размера укрываемой поверхности для заметного проявления этого эффекта.

В первой серии расчётов при маскировке круглой металлической пластины пирамидальным поглотителем качество поглотителя улучшалось за счёт сгущения пирамид путём уменьшения их квадратных оснований, которые были последовательно взяты равными  $(215 \times 215)$  мм,  $(175 \times 175)$  мм и  $(90 \times 90)$  мм, рис. 2.

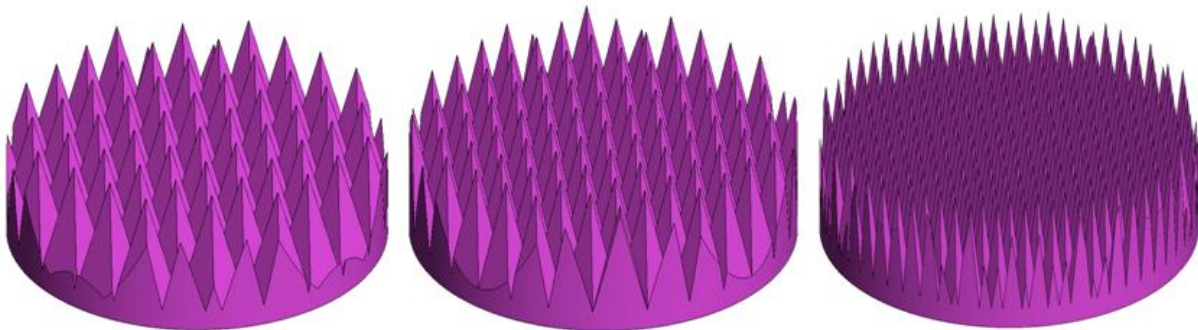


Рис. 2. Пирамидальные поглотители с разными размерами квадратных оснований пирамид  $(215 \times 215)$  мм (слева),  $(175 \times 175)$  мм (в центре) и  $(90 \times 90)$  мм (справа) на круглой пластине.

Зависимости коэффициента отражения  $R_p$  от размера пластины для указанных выше оснований пирамид представлены на рис. 3 в виде красной, синей и голубой кривых. Отметим, что здесь синяя кривая повторяет кривую того же цвета на рис. 1. Уровни  $R_{p\infty}$  для тех же оснований пирамид представлены на рис. 3 пунктирными прямыми соответствующего цвета.

Улучшение качества поглотителя при уменьшении оснований пирамид, которое наглядно видно из рис. 3, объясняется уменьшением чувствительности падающей волны к поперечной неоднородности поглотителя. Отметим, что формально эффективная плотность вещества пирамид, усреднённая по поперечному сечению, параллельному основаниям пирамид, меняется по высоте пирамид по одному и тому же квадратичному закону независимо от размера их основания. Здесь же имеется ввиду, что падающая волна в возрастающей степени «осредняет» поперечную неоднородность пирамидального поглотителя при уменьшении отношения длины стороны основания пирамид к длине волны, а всё более полное «осреднение» поперечной неоднородности является одним из факторов повышения качества пирамидального поглотителя.

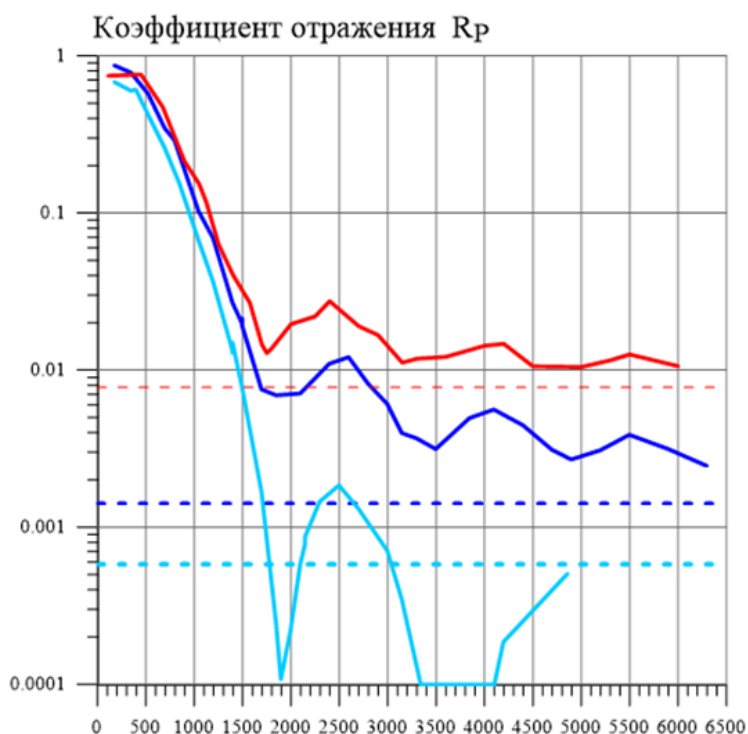


Рис. 3. Коэффициент отражения  $R_p$  от круглой металлической пластины с пирамидальным поглотителем в зависимости от размера пластины при размерах квадратных оснований пирамид ( $215 \times 215$ ) мм (красная кривая), ( $175 \times 175$ ) мм (синяя кривая) и ( $90 \times 90$ ) мм (голубая кривая)

Во второй серии расчётов улучшение качества пирамидального поглотителя по сравнению с поглотителем исходной конфигурации (те же материал и высота пирамид, длина стороны квадратных оснований пирамид 175 мм) было

достигнуто введением магнитного подслоя. Для материала подслоя были взяты большие значения действительных частей диэлектрической и магнитной проницаемостей и умеренно большие уровни диэлектрических и магнитных потерь. Толщины магнитного подслоя и общего основания под пирамидами были подобраны из условия минимизации параметра  $R_{p\infty}$ , характеризующего качество поглотителя. Оказалось, что для исходной толщины общего основания под пирамидами 95 мм введение магнитного подслоя практически не меняло параметр  $R_{p\infty}$ . Однако при сильном сокращении толщины общего основания под пирамидами влияние толщины магнитного подслоя на  $R_{p\infty}$  наблюдалось. Например, при толщине основания 2 мм была получена зависимость  $R_{p\infty}$  от толщины магнитного подслоя, имеющая выраженный минимум при толщине подслоя 7 мм, смотри рис. 4.



Рис. 4. Коэффициент отражения по мощности  $R_{p\infty}$  от бесконечной плоской поверхности металла с пирамидальным покрытием в зависимости от толщины магнитного подслоя.

Для пирамидального поглотителя с толщиной общего основания под пирамидами 2 мм, имеющего магнитный подслой толщиной 1, 3, 5, 7, 10 и 15 мм и помещённого на квадратную металлическую пластину, были рассчитаны

зависимости коэффициента отражения по мощности  $R_p$  от размеров пластины. Квадраты на графике на рис. 4 соответствуют толщинам магнитного подслоя, для которых выполнялись расчёты. Общий вид пластины с пирамидальным поглотителем, имеющим общее основание малой толщины под пирамидами и магнитный подслой, представлен на рис. 5.

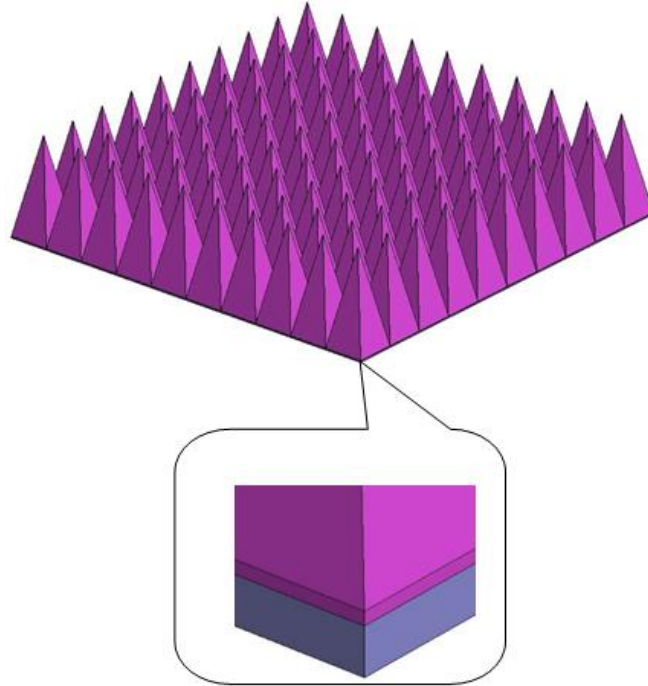


Рис. 5. Пирамидальный поглотитель с уменьшенной до 2 мм толщиной общего основания под пирамидами и магнитным подслоем на квадратной металлической пластине.

Рассчитанные зависимости  $R_p$  от размера пластины представлены на рис. 6 а,б сплошными кривыми разных цветов, рядом с каждой кривой указана толщина магнитного подслоя. Пунктирными прямыми соответствующего цвета показаны уровни коэффициента отражения по мощности  $R_{p\infty}$  от бесконечной плоской поверхности металлического объекта с пирамидальным поглотителем. Для наглядности на рис. 6а представлены все зависимости для толщин подслоя меньше оптимальной и для оптимальной толщины 7 мм, на рис. 6б – зависимости для толщин подслоя больше оптимальной и вновь для оптимальной толщины.

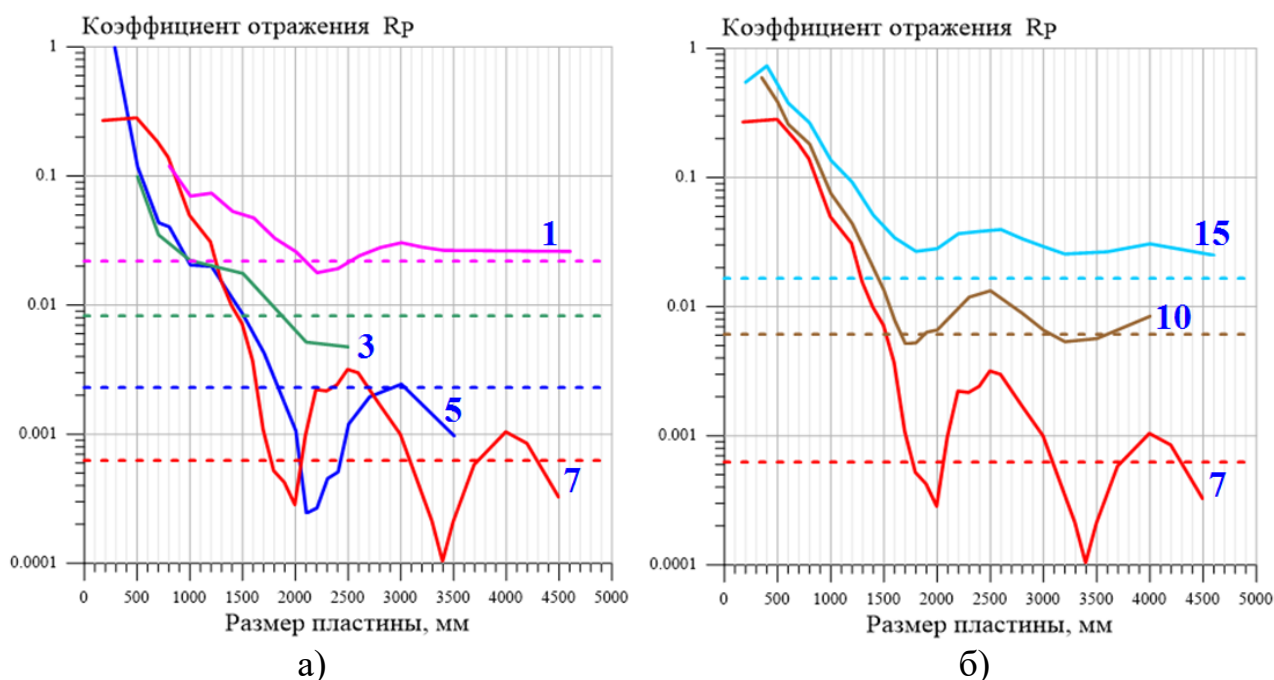


Рис. 6. Коэффициент отражения  $R_p$  от квадратной металлической пластины с пирамидальным поглотителем в зависимости от размера пластины при толщинах магнитного подслоя в поглотителе:  
а) 1, 3, 5 и 7 мм, б) 7, 10 и 15 мм.

Как видно из рис. 3 и рис. 6 а,б, улучшение качества пирамидального поглотителя в результате уменьшения площади основания пирамид, либо введения магнитного подслоя, помимо общего уменьшения уровней коэффициентов отражения  $R_p$  и  $R_{p\infty}$ , приводит ещё и к принципиальному изменению вида зависимости  $R_p$  от размеров укрываемой поверхности: с ростом размеров пластины вместо медленного спуска коэффициента отражения  $R_p$  к уровню  $R_{p\infty}$  при размерах пластины в несколько длин волн имеет место быстрый спуск  $R_p$  до уровня  $R_{p\infty}$  при размерах пластины, близких к длине волны, и далее затухающие осцилляции  $R_p$  вокруг значения  $R_{p\infty}$ . Наличие осцилляций приводит к тому, что коэффициент отражения  $R_p$  в достаточно протяжённых интервалах размеров пластины, в частности – в интервале с левой границей, приблизительно соответствующей длине волны, становится даже существенно меньше, чем  $R_{p\infty}$ .

Особенно наглядно изменение вида зависимости  $R_p$  от размеров укрываемой поверхности наблюдалось при вариации толщины магнитного подслоя. Здесь при толщинах подслоя существенно меньше и больше той,

которая обеспечивает наилучшее согласование пирамидального поглотителя на металлической подложке (и, следовательно, наилучшее качество поглотителя), зависимость коэффициента отражения  $R_p$  от размеров укрываемой пластины медленно подходит к уровню  $R_{p\infty}$ . При приближении толщины подслоя к оптимальной имеет место всё более быстрый спуск графика  $R_p$  к уровню  $R_{p\infty}$  с появлением пересечения уровня  $R_{p\infty}$  графиком  $R_p$  при размерах укрываемой пластины порядка длины волны. Есть также тенденция приближения размера укрываемой пластины, при котором график  $R_p$  впервые выходит на уровень  $R_{p\infty}$ , к длине волны при улучшении качества пирамидального поглотителя.

Для пирамидального поглотителя достаточно высокого качества порог заметного проявления размерного эффекта можно считать соответствующим минимальному размеру пластины, при котором  $R_p$  подходит к уровню  $R_{p\infty}$  и становится меньше его. Таким образом, с увеличением качества пирамидального поглотителя пороговое значение размера укрываемой поверхности для проявления размерного эффекта приближается к одной длине волны.

## Заключение

1) Для пирамидального поглотителя на металлической пластине наблюдалось проявление размерного эффекта как порогового перехода к многократному превышению коэффициента отражения от пластины с поглотителем  $R_p$  над коэффициентом отражения от бесконечной плоской поверхности металла с тем же поглотителем  $R_{p\infty}$  при уменьшении размеров укрываемой поверхности. Проявление размерного эффекта для пирамидального поглотителя было существенно более выраженным, чем для поглотителя постоянной толщины с сопоставимым коэффициентом отражения  $R_{p\infty}$ .

2) Существенное улучшение качества пирамидального поглотителя было достигнуто сгущением пирамид в результате уменьшения их поперечного сечения при сохранении высоты и введением магнитного подслоя под общим основанием пирамид. В работе показано, что улучшение качества пирамидального поглотителя в дополнение к общему уменьшению отражения от

поглотителя приводит к ускорению сходимости  $R_p$  к  $R_{p\infty}$  с увеличением отношения линейных размеров укываемой этим поглотителем поверхности к длине волны. Наблюдалось снижение порога заметного проявления размерного эффекта до приблизительно длины волны. Это говорит о возможности эффективного использования пирамидальных поглотителей достаточно высокого качества вплоть до размеров укываемой поверхности в одну длину волны.

### Литература

1. Иванова В.И., Кибец С.Г., Краснолобов И.И., Семененко В.Н., Фурманова Т.А. Эффективная поверхность рассеяния малоразмерных образцов диэлектрических радиопоглощающих материалов //Труды международной научн. конф. «Излучение и рассеяние электромагнитных волн ИРЭМВ-2013» - Таганрог: Изд-во ЮФУ. 2013. С. 334-338.
2. Лебедев А.М., Семененко В.Н., Фурманова Т.А., Краснолобов И.И. Размерный эффект в метровом диапазоне длин волн при маскировке поверхности пирамидальным поглотителем //Современная электродинамика. – 2022. - №2 (2). - С. 32-37.
3. Feko, <https://www.altair.com>
4. Кобак В. О. Радиолокационные отражатели. – Советское радио, 1975.
5. Knott E. F., Schaeffer J. F., Tulley M. T. Radar cross section. – SciTech Publishing, 2004.

### Для цитирования:

Лебедев А.М., Фурманова Т.А., Семизбаев А.Д., В.Н. Семененко В.Н. Влияние качества пирамидального поглотителя на порог проявления размерного эффекта. // Журнал радиоэлектроники. – 2025. – №. 11. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.11.37>