

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
**«ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ» (ТУСУР)**

Кафедра конструирования узлов и деталей РЭА (КУДР)

**Методические указания к лабораторному занятию
по дисциплине "Радиопрозрачные материалы и
обтекатели"**

Для студентов специальности 160905 – Техническая эксплуатация транспортного
оборудования.

**Тема: «Проектирование радиопрозрачных стенок
обтекателей антенн летательных аппаратов».**
(часть вторая)

Разработчик:
проф. каф. КУДР
_____ Еханин С.Г.

ВВЕДЕНИЕ

Процесс разработки радиопрозрачных изделий включает в себя несколько этапов. На первом этапе, учитывая условия работы изделия (силовые нагрузки, температура эксплуатации, климатические факторы и т.п.), выбирают конструкцию стенки (однослойная, многослойная и т.п.) и материалы, из которых она должна изготавливаться. При этом, учитывают, в первом приближении, основные радиотехнические особенности стенки и осуществляют предварительные расчеты радиотехнических и прочностных характеристик изделия, определяют приемлемые пределы по массе, по толщине слоев.

Первый этап часто называют «синтезом» радиопрозрачной стенки.

На втором этапе для выбранных конструкции, материалов, предварительных размеров (толщины) стенки и ее отдельных элементов проводят стадию анализа, осуществляют уточненные электродинамические и прочностные расчеты для определения оптимальных размеров элементов стенки с учетом возможных ограничений. Определяют коэффициенты прохождения электромагнитной энергии (ЭМЭ) и фазовые характеристики заданном диапазоне радиоволн и углов падения электромагнитной волны (ЭМВ), зависящих от конфигурации радиопрозрачного изделия (РПИ) и углов сканирования антенны.

Электродинамические расчеты однослойных радиопрозрачных стенок

Как отмечалось выше, проектирование РПИ целесообразно проводить в два этапа. На первом этапе — стадии синтеза — чаще всего бывает достаточно использовать приближенные, более простые формулы для оценки толщины стенки РПИ и показателя радиопрозрачности.

В случае использования стенок малой толщины относительно длины волны, практически при $d < 0,05\lambda$, приближенное значение коэффициента прохождения ЭМЭ по мощности через стенку из идеального диэлектрика ($\text{tg}\delta = 0$) может быть рассчитано по следующему уравнению [1]:

$$|T|_0^2 = 1 - |R|^2 = 1 - \left[(\varepsilon - 1) \frac{\pi \cdot d}{\lambda} \right]^2. \quad (1)$$

Как отмечалось выше, однослойные обтекатели не всегда могут быть выполнены тонкостенными, так как их толщина может оказаться недостаточной для эффективной защиты антенны, особенно для малых длин волн. Более приемлемыми в таких случаях являются согласованные полуволновые стенки (1-го, 2-го... порядка). Толщину полуволновой стенки из идеального диэлектрика можно определить по ранее уже приведенному уравнению (21 [2]):

$$d = \frac{\lambda}{2 \sqrt{\varepsilon - \sin^2 \theta}} N.$$

Для стенок, толщина которых мало отличается от полуволновых, примерное значение коэффициента прохождения можно рассчитать по уравнению, сходному с формулой (1):

$$|T|_0^2 = 1 - |R|^2 = 1 - \left[(\varepsilon - 1) \frac{\pi \Delta d}{\lambda} \right]^2, \quad (2)$$

где Δd — разность между реальной толщиной стенки и толщиной полуволновой стенки, ближайшей к реальной толщине стенки и рассчитываемой по соотношению (21[2]).

В наиболее простом случае — для падения ЭМВ на стенку из идеального диэлектрика ($\text{tg} \delta = 0$) — коэффициент прохождения ЭМЭ по мощности может быть определен из следующего уравнения [1]:

$$|T|_0^2 = \frac{(1 - r^2)^2}{(1 - r^2)^2 + 4r^2 \cdot \sin^2 \varphi}. \quad (3)$$

Где $|T|^2$ — Коэффициент прохождения ЭМЭ по мощности через стенку, выполненную из диэлектрика без потерь; r — коэффициент Френеля.

На рис. 1 уравнение (3) представлено в графическом виде.

При прохождении ЭМВ через стенку из материала с внутренними диэлектрическими потерями ($\text{tg} \delta > 0$) общая картина остается принципиально такой же, как и у стенки из диэлектрика без потерь. Однако необходимо учесть, что вследствие внутренних потерь энергия ЭМВ, проходящих через реальный материал, затухает. В этом случае отраженные потоки не могут полностью

скомпенсировать напряженность электрического вектора первичной отраженной волны, и отраженная энергия всегда больше 0 даже у полуволновой стенки.

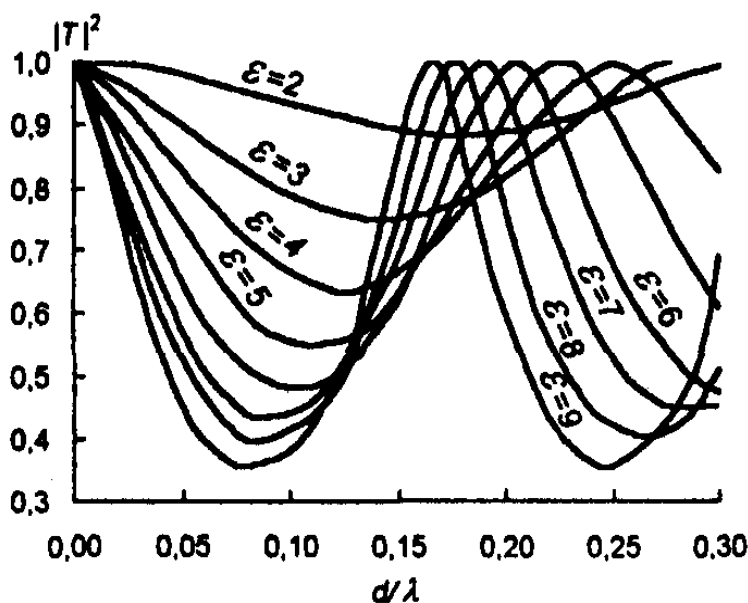


Рис.1. Зависимость коэффициента прохождения ЭМЭ по мощности $|T|^2$ от определяющих параметров для нормального падения ЭМВ на стенку из идеального диэлектрика. Значения ϵ указаны на кривых.

Для приближенной оценки влияния внутренних потерь на коэффициент прохождения $|T|^2$ в рассмотренных случаях [(уравнения (1) и (2)] следует использовать следующее приближенное соотношение:

$$|T|^2 = A^2 \cdot |T|_0^2, \quad (4)$$

где корректирующий множитель A^2 рассчитывается по уравнению [3]:

$$A^2 = e^{-\frac{2\pi d \cdot \epsilon \cdot \tan \delta}{\lambda \cdot \sqrt{\epsilon - \sin^2 \theta}}}. \quad (5)$$

Для уточненных расчетов на стадии анализа стенки необходимо использовать более сложные и одновременно более точные уравнения [1]*:

$$|T|^2 = \frac{A^2 \left| (1-r^2)^2 + 4r^2 \cdot \sin^2 \chi \right|}{(1-A^2 \cdot r^2)^2 + 4A^2 \cdot r^2 \cdot \sin^2(\varphi + \chi)}, \quad (6)$$

* Приведенное уравнение справедливо и для стенок малой толщины относительно длины волны.

где

$$\chi = \operatorname{arctg} \frac{\sqrt{\varepsilon} \cdot \operatorname{tg} \delta}{\varepsilon - 1}. \quad (7)$$

Коэффициенты однократного отражения $/r^2$ по мощности находятся в зависимости от типа поляризации ЭМВ по уравнениям [(9), (10) и (11)[2]].

Электрическую толщину стенки определяют из соотношения (17[2])

$$\varphi = 2\pi \frac{d}{\lambda} \sqrt{\varepsilon - \sin^2 \theta},$$

а значение комплекса A^2 рассчитывают по уравнению (5).

Сопоставление расчетных и опытных значений радиопрозрачности свидетельствует о хорошем совпадении результатов при изменении углов падения вплоть до углов Брюстера $\theta_{\text{Бр}}$ [3] для данного материала стенки, определяемого соотношением

$$\operatorname{tg} \theta_{\text{Бр}} = \sqrt{\varepsilon}.$$

При прохождении ЭМВ через диэлектрическую стенку помимо изменения амплитудного показателя и мощности частично искажается и фазовая характеристика, во многом предопределяющая возможное искажение диаграммы направленности, точности пеленгации. Изменение фазовой характеристики $\Delta\psi$ (набег фаз) на выходе ЭМВ из диэлектрической стенки по сравнению с характеристикой ЭМВ в отсутствие обтекателя выражается следующим соотношением:

$$\Delta\psi = \psi_{\text{возд}} - \psi_{\text{ст}}, \quad (8)$$

где $\psi_{\text{ст}}$ — фаза волны, прошедшей через стенку; $\psi_{\text{возд}}$ — фаза волны в той же точке пространства при отсутствии диэлектрической стенки (при замене ее воздухом).

Вполне очевидно, что в отсутствие диэлектрической стенки сдвиг фазы волны в воздухе составляет:

$$\psi_{\text{возд}} = \frac{2\pi}{\lambda} d \cdot \cos \theta, \quad (9)$$

где d — толщина стенки по нормали.

Вторая составляющая набега фазы ЭМВ в диэлектрической стенке $\psi_{см}$ обусловлена разными длинами путей ЭМВ (S_1, S_2, S_3) в стенке РПИ, а также разными значениями углов падения ЭМВ на стенку ($\theta_1, \theta_2, \theta_3$) в различных зонах, в общем случае, криволинейного изделия (рис. 2). Дополнительное искажение фазы может происходить также вследствие возможной неоднородности материала стенки РПИ.

Следует отметить, что для практического учета эффекта набега фазы ЭМВ, проходящих через РПИ, важными являются не абсолютные значения $\Delta\psi$, а разность этих значений по апертуре приемопередающей антенны.

Для расчета величины набега фазы ЭМВ в конкретных случаях следует учитывать основные характеристики радиоволны (частоту, тип поляризации), конкретную конструкцию используемой стенки, конфигурацию РПИ, взаимное расположение стенок РПИ и антенны, угол поворота последней и другие параметры приемо-передающего комплекса.

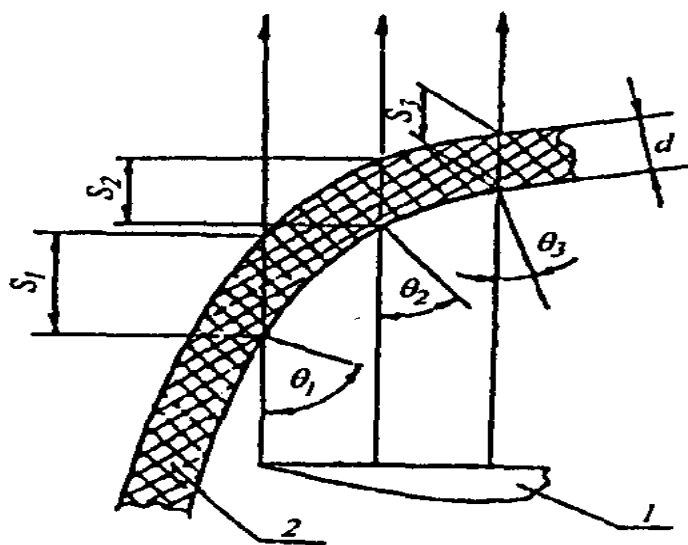


Рис. 2. Прохождение радиолучей через криволинейную стенку РПИ:

1 – антенна, 2 – фрагмент стенки РПИ.

Рассмотрим, например, работу РПУ для сканирующих антенн при фиксированной длине волны и переменных углах падения (рис.3) Из рисунка видно, что в представленном диапазоне сканирования антенны второй вариант

предпочтительнее, поскольку обеспечивает приемлемую радиопрозрачность во всем диапазоне рабочих углов сканирования.

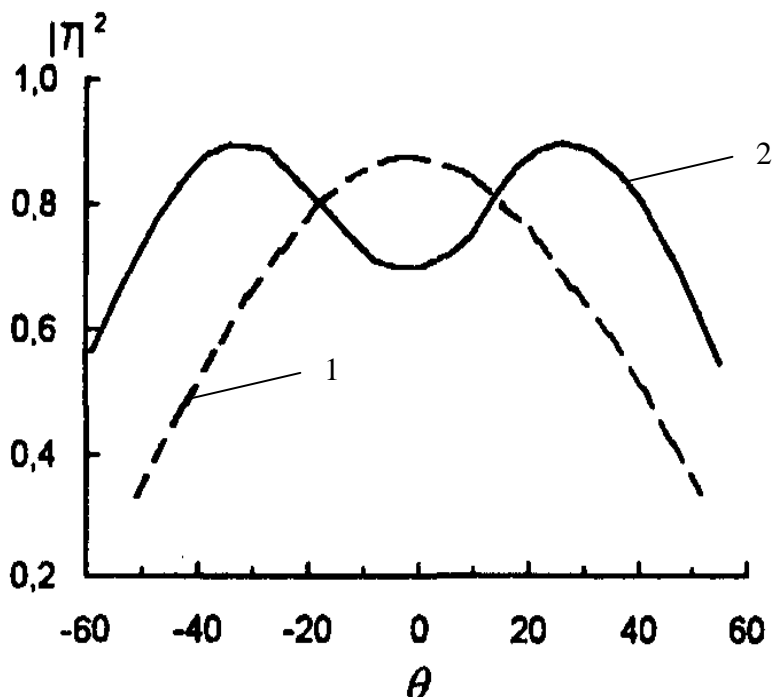


Рис.3. Зависимость радио-прозрачности плоского РПИ с полуволновой одно-слойной стенкой от угла сканирования, совпадающим с углом падения: 1 – стенка толщиной d_1 при угле падения $\theta = 0^\circ$; 2 – то же для стенки толщиной d_2 при $\theta = 30^\circ$.

Углы, при которых радиопрозрачность является максимальной (минимум отражения ЭМВ), принято называть углами компенсации отраженных волн или согласования. В представленном на рис.3 варианте такими углами являются для кривой 1 - $\theta = 0^\circ$, для кривой 2 - $\theta = 30^\circ$. При выбранном значении d определяется единственное значение угла компенсации, при котором отражение будет минимальным. Так, например, для стенок из идеального диэлектрика в соответствии с уравнением (21[2]) указанный угол для полуволновых однослойных стенок может быть найден с помощью уравнения:

$$\sin \theta_k = \sqrt{\epsilon - \frac{4d^2}{\lambda^2 \cdot N^2}},$$

где N – порядок полуволновой стенки.

В случае переменных углов падения необходимо выбирать такую толщину стенки РПИ, которая обеспечивала бы наилучшие радиотехнические показатели во всем диапазоне углов падения.

Использование формулы (6) позволяет решать такого рода задачи. Для оценки фазового набега $\Delta\psi$, возникающего при прохождении ЭМВ через однослойную стенку, следует использовать уравнение [3]:

$$\Delta\psi = \arctg\left[\frac{1+r^2}{1-r^2} \cdot \operatorname{tg}\varphi\right] - \frac{2\pi \cdot d}{\lambda} \cos\Theta [\text{rad}]$$

Таким образом, для обеспечения максимальных значений коэффициентов прохождения ЭМВ через диэлектрические стенки следует учитывать следующее:

1) стенки РПИ должны изготавливаться из материалов, характеризующихся наименьшими значениями $\operatorname{tg}\delta$ — для минимизации внутренних потерь энергии;

2) толщина стенок должна быть либо минимально возможной ($d/\lambda \ll 1$) — см. рис. 1, либо соответствовать полуволновой в целях компенсации и минимизации результирующих отраженных волн.

Кроме указанных рекомендаций в ряде случаев для снижения от отражающей способности поверхности диэлектрической стенки может использоваться эффект просветления оптики [3]. Указанный эффект наблюдается в том случае, если на переднюю поверхность стенки, выполненную из материала с диэлектрической проницаемостью ε , поместить «просветляющий» слой материала, диэлектрическая проницаемость которого $\varepsilon_{\text{пр}}$ отвечает условию $\varepsilon > \varepsilon_{\text{пр}} > 1$. Коэффициент отражения ЭМЭ от такой составной стенки, в соответствии с уравнением, аналогичным формуле (18 [2]), составит:

$$R = r_{01} + r_{12} \cdot e^{-j \cdot 2\varphi}.$$

Анализ этого уравнения показывает, что отражение у двухслойной стенки будет минимальным, если:

$$\varepsilon_{\text{пр}} = \sqrt{\varepsilon}; \quad \varphi_{\text{пр}} = (2N - 1) \frac{\pi}{2}, \quad (10)$$

где $N = 1, 2, 3, \dots$

Тогда толщина «просветляющего» слоя составит:

$$d_{np} = \frac{\lambda}{4 \sqrt{\epsilon_{np} - \sin^2 \theta}} (2N - 1). \quad (11)$$

Из последнего уравнения видно, что толщина просветляющего слоя должна быть кратной нечетному числу четвертей длины волны в диэлектрике.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

РПИ с монолитной однослойной конструкцией стенки находят широкое применение благодаря простоте конструкции и технологии их изготовления, надежности эксплуатации.

С точки зрения электродинамики следует различать РПИ с согласованной (полуволновой) толщиной стенки и РПИ «тонкостенные» т.е. с толщиной стенок, не критичной к длине волны ($d/\lambda \ll 1$). Радиопрозрачные изделия последнего типа имеют достаточно хорошие радиотехнические показатели, они обеспечивают возможность работы на нескольких разнесенных частотах или в непрерывной, довольно широкой полосе в относительно большом диапазоне углов падения. Факторами, ограничивающими область применения тонкостенных РПИ, являются длина рабочих радиоволн и прочностные характеристики изделия. При малых длинах волн толщина стенки, обеспечивающая приемлемую радиопрозрачность, становится очень малой и может не обеспечить требования к прочности изделия.

Другой тип однослойных стенок — полуволновых — заметно расширяет область применения однослойных конструкций, особенно в СВЧ - диапазоне. Использование стенок 1-го, 2-го, а иногда и более высокого порядка часто позволяет обеспечить достаточную прочность, хорошие радиотехнические характеристики.

Однако, применение таких конструкций для РПИ, предназначенных для работы в дециметровом диапазоне радиоволн, вряд ли целесообразно, кроме

отдельных специфических объектов, в связи с избыточной массой. В самом деле, уже при $\lambda = 10$ см толщина полуволновой стенки даже 1-го порядка составляет в соответствии с уравнением (21 [2]) примерно 25 мм (при $\epsilon = 4,0$). Кроме того, в случае использования полуволновых стенок не всегда удается подобрать компромиссную толщину для обеспечения приемлемой радиопрозрачности при работе на нескольких частотах.

Несмотря на большое многообразие диэлектрических материалов с различными механическими и диэлектрическими свойствами, часто бывает невозможно спроектировать обтекатель с однослойной конструкцией стенки, удовлетворяющий одновременно всем радио техническим, механическим, весовым, габаритным и иным требованиям. В связи с этим были разработаны и широко используются другие конструкции радиопрозрачных стенок.

Хорошие результаты по радиопрозрачности могут быть достигнуты при использовании многослойных конструкций, содержащих два (или более) тонких листа, разделенных легким наполнителем с низкими значениями ϵ и $\text{tg}\delta$. В этом случае компенсация отраженных радиоволн обеспечивается тонкими листами плотного диэлектрика при соответствующем выборе толщин легкого наполнителя расстояния между листами).

Трехслойные обтекатели обладают малой массой, хорошими прочностными показателями и имеют высокие радиотехнические характеристики. Следует отметить также хорошие теплоизоляционные свойства трехслойных стенок. Таким образом, обтекатели трехслойной конструкции с легкими наполнителями имеют целый ряд положительных качеств. Именно поэтому они находят в настоящее время широкое применение в наземных и судовых станциях, а также для гражданских и некоторых военных самолетов. Для обеспечения хорошей радиопрозрачности толщину наружных слоев (обшивок) выбирают, как правило, весьма малой по сравнению с длиной волны. Поэтому границы применения трехслойных стенок с легким наполнителем определяются, в первую очередь, именно рабочим диапазоном частот.

В современных самолетах трехслойные сотовые обтекатели нашли широкое применение в трех и более сантиметровом диапазоне, так как они сочетают удовлетворительные радиотехнические свойства в достаточно большом интервале углов падения ЭМВ (до $65\text{—}70^\circ$) с высокой механической прочностью и малой массой. При переходе к более коротким волнам создание трехслойной стенки первого порядка становится в большинстве случаев нецелесообразным — стенки получаются очень тонкими и, соответственно, прочность изделия резко падает.

Для расширения области применения радиопрозрачных устройств с легким наполнителем, улучшения их радиотехнических характеристик и, в частности, для обеспечения работы многоволновых (широкополосных) приемопередающих комплексов разработаны более сложные стенки: пяти-, семислойные и т.п. Повышенная прочность, жесткость и радиопрозрачность позволяют применять многослойные стенки с ячеистым наполнителем для обтекателей остроконечной формы с углом при вершине до $\sim 35^\circ$. Кроме того, такие стенки расширяют возможность получения многоволновых обтекателей, хорошо работающих при различных длинах волн и в относительно широком диапазоне углов падения. Однако изготовление пяти-, семислойных и т.п. обтекателей с ячеистым наполнителем требует больших затрат ручного труда, и поэтому они применяются лишь в отдельных, наиболее ответственных объектах морской, авиационной и ракетной техники.

Разновидностью радиопрозрачных стенок многослойной конструкции являются стенки с «усредненной» диэлектрической проницаемостью, в которых чередуются слои армирующих материалов с низкой и высокой диэлектрической проницаемостью [3]. При изготовлении таких конструкций для наружных обшивок используют стеклоткани сатинового или полотняного переплетения, а в качестве внутренних слоев — стеклоткани разреженных структур (стеклосетки).

В обтекателях, работающих в широком диапазоне волн, могут также применяться стенки, имеющие плавное изменение диэлектрической прони-

цаемости по толщине. Повышение уровня радиопрозрачности (снижения уровня отражения ЭМЭ) может быть обеспечено также и при использовании известного эффекта «просветления оптики» [3]. Для реализации этого эффекта на основном (силовом) слое диэлектрика должен располагаться дополнительный «просветляющий» слой. Однако последние варианты, широко используемые для оптических приборов, не нашли широкого практического применения для изделий радиотехнического назначения. Наибольшие трудности при практической реализации этих вариантов возникают в процессе подбора материалов с соответствующими показателями диэлектрической проницаемости, а также при защите наружных слоев, особенно, в случае их малой плотности.

Весьма перспективными являются диэлектрические стенки с введенными в них реактивными компенсирующими элементами в виде металлических проводов. Указанные элементы создают отраженную волну, равную по мощности и обратную по знаку волне, отраженной от диэлектрической стенки. В данном случае появляется возможность выбирать толщину стенки из условий обеспечения механической прочности. Возможно размещение одной, двух, трех и более реактивных сеток по толщине диэлектрика на определенном расстоянии друг от друга.

Компенсирующие металлические сетки могут быть использованы и в многослойных конструкциях. В этом случае сетки вводят в обшивки. Применение компенсационных сеток в многослойных стенках с ячеистым наполнителем позволяет при хорошей радиопрозрачности повысить механическую прочность за счет возможности увеличения толщин обшивок.

Каждый тип радиопрозрачных стенок обладает присущим только ему сочетанием радиотехнических, прочностных, эксплуатационных и др. специфических свойств, поэтому в каждом конкретном случае при выборе оптимальной конструкции следует отдавать предпочтение такому варианту, который в максимальной степени отвечает предъявляемым требованиям.

ЗАДАНИЕ НА ЛАБОРАТОРНУЮ РАБОТУ

1. Провести уточненные расчеты коэффициента радиопрозрачности при прохождении ЭМВ через стенки с внутренними потерями ($\operatorname{tg}\delta = 0,009 - 0,18$), при соотношении $d/\lambda = 0 - 10$ и диапазоне изменения $\varepsilon = 2 - 10$.

2. Провести расчеты коэффициента радиопрозрачности для случая с переменными углами падения ЭМВ с перпендикулярной поляризацией на стенку обтекателя ($\theta = 0 - 60^\circ$), при $\lambda = 100$ мм, $\varepsilon - 4,5$, $\operatorname{tg}\delta = 0,014$.

3. Определить величину набега фаз и фазовые искажения при прохождении ЭМВ через обтекатель из стеклопластика, если радиоволна длиной 10 мм падает на плоскую стенку под углом 45° . Диэлектрическая проницаемость стеклопластика $\varepsilon = 4,5$, $\operatorname{tg}\delta = 0,01$.

Литература

1. Гуртовник И.Г., Спортсмен В.Н. Стеклопластики радиотехнического назначения. М.: Химия, 1987. – С.109 – 128.
2. Еханин С.Г. Проектирование радиопрозрачных стенок обтекателей антенн летательных аппаратов, часть 1 (в печати).
3. Радиопрозрачные изделия из стеклопластиков/ Гуртовник И.Г., Соколов В.И., Трофимов Н.Н., Шалгунов С.Г. – М.: Мир, 2002. – 368с.