

ЭЛЕКТРОДИНАМИКА  
И РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН

УДК 537.874;621.396

УПРАВЛЕНИЕ ЧАСТОТОЙ СОГЛАСОВАНИЯ РЕЗОНАНСНОГО  
РАДИОПОГЛОТИТЕЛЯ СО СВОБОДНЫМ ПРОСТРАНСТВОМ

© 2021 г. Ю. Н. Казанцев<sup>а, \*</sup>, В. А. Бабаян<sup>б</sup>, Н. Е. Казанцева<sup>а, б</sup>,  
Г. А. Крафтмахер<sup>а</sup>, В. П. Мальцев<sup>а</sup>, В. С. Солосин<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,  
пл. Введенского, 1, Фрязино Московской обл., 141190 Российская Федерация

<sup>б</sup>Центр Полимерных Систем университета им. Томаша Бати,  
ул. Томаша Бати 5678, 760 01 Злин, Чешская Республика

\*E-mail: yukazantsev@mail.ru

Поступила в редакцию 25.02.2020 г.

После доработки 25.02.2020 г.

Принята к публикации 05.04.2020 г.

Численные расчеты согласования резонансного радиопоглотителя (РП) подтвердили, что идеальное согласование такого РП со свободным пространством может быть реализовано при использовании практически любых диэлектриков с потерями на любой нужной частоте. Рассмотрены условия, обеспечивающие наиболее широкую полосу согласования РП, причем показано, что отношение ширины полосы по уровню отражения  $-10$  дБ к толщине РП (bandwidth to thickness ratio) составляет около 3.7, т.е. больше, чем для обычного однослойного РП Далленбаха (около 3.2).

DOI: 10.31857/S0033849421040057

ВВЕДЕНИЕ

Среди большого разнообразия радиопоглотителей (РП) различного назначения широкое распространение получили однослойные РП Далленбаха ввиду их надежности и простоты реализации. РП этого типа представляет собой слой диэлектрика (магнетодиэлектрика) с потерями, расположенный на металлическом экране [1–7]. Частотная зависимость коэффициента отражения от такого РП характеризуется рядом минимумов на так называемых частотах согласования [4]. Глубина этих минимумов и их расположение на шкале частот зависит от электромагнитных свойств и толщины слоя. Управляя этими свойствами и толщиной слоя, возможно минимизировать коэффициенты отражения в рабочем диапазоне РП, хотя добиться идеального согласования даже на центральной частоте этого диапазона таким способом обычно не удается. В работе [5] предложен иной способ решения проблемы идеального согласования в середине рабочего диапазона однослойного РП с помощью решетки из проводящих квадратных элементов на слое диэлектрика с потерями, металлизированном с противоположной стороны. Эффект радиопоглощения обусловлен резонансами в объемах, образованных элементами решетки и электропроводящим экраном. Было по-

казано, что, изменяя размеры решетки и толщину диэлектрического слоя, возможно решить проблему идеального согласования РП на заданной (резонансной) частоте для самых различных диэлектрических материалов.

Цель статьи – определить факторы, обеспечивающие наиболее широкую полосу согласования резонансного РП.

1. ВОЛНОВОДНАЯ МОДЕЛЬ ЩЕЛИ  
МЕЖДУ СОСЕДНИМИ ЭЛЕМЕНТАМИ  
РЕШЕТКИ РЕЗОНАНСНОГО  
РАДИОПОГЛОТИТЕЛЯ

Конструкция резонансного РП представляет собой слой диэлектрика с потерями толщиной  $d$ , на одной стороне которого расположена решетка с периодом  $P$  из металлических квадратов размером  $2a \times 2a$ , а другая сторона слоя металлизирована (рис. 1а). При выполнении условий  $d \ll 2a$  и  $d \ll \lambda$  ( $\lambda$  – длина волны) поле в объеме между элементом решетки и электропроводящей поверхностью имеет вид  $ТЕМ$ -волны, способной резонировать, отражаясь от открытых границ этого объема. Радиопоглощающие свойства этой структуры обусловлены резонансным поглощением мощности в диэлектрике внутри резонато-

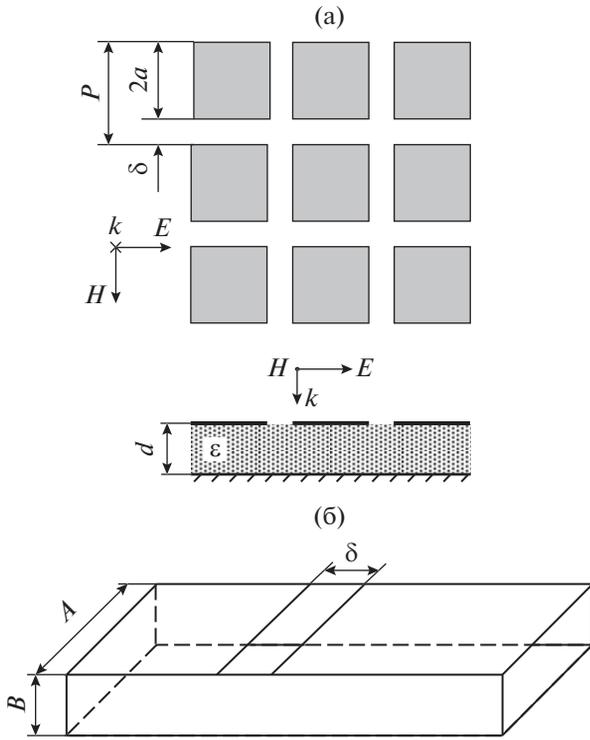


Рис. 1. Резонансный радиопоглотитель: а – схема, б – волноводная модель щели между элементами решетки.

ров. Поглощение мощности в отдельном резонаторе на резонансной частоте максимально, когда потери на излучение (определяющие связь с внешним пространством) равны тепловым потерям при двойном пробеге  $TEM$ -волны в резонаторе [6]. При этом ширина полосы поглощения тем больше, чем больше эти потери. Численная оценка потерь на излучение в зависимости от ширины щели между соседними резонаторами  $\delta$  ( $\delta = P - 2a$ ) была проведена на волноводной модели.

В качестве расчетной модели был взят прямоугольный волновод сечением  $A \times B$  ( $A = 2\lambda$ ,  $B = 4\lambda/75$ ,  $\lambda = 75$  мм) с поперечной щелью шириной  $\delta$  в одной из широких стенок (рис. 1б). Рассчитывались коэффициенты отражения  $|S_{11}|^2$  и прохождения  $|S_{12}|^2$  (по мощности). Коэффициент излучения из щели  $|S_{13}|^2$  определяется как

$$|S_{13}|^2 = 1 - |S_{11}|^2 - |S_{12}|^2. \quad (1)$$

На рис. 2 приведены зависимости этих коэффициентов от ширины щели  $\delta$  для двух значений диэлектрической проницаемости среды внутри волновода,  $\epsilon = 1$  и 4. Как следует из рис. 2а и 2б, при увеличении ширины щели коэффициенты

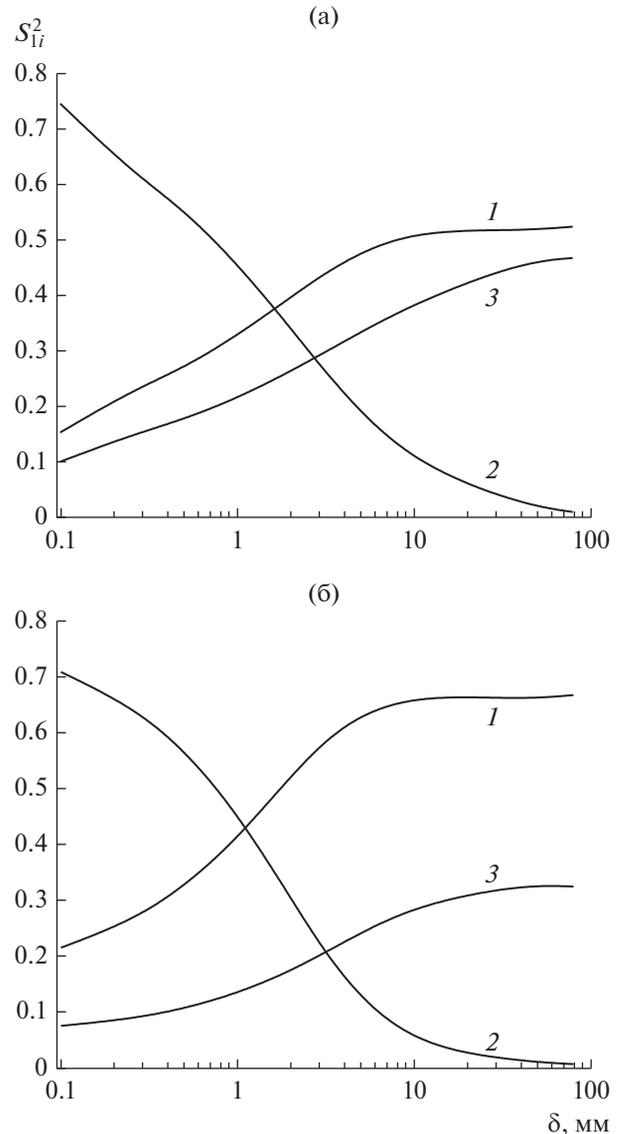


Рис. 2. Зависимость коэффициентов отражения  $S_{11}^2$  (кривая 1), прохождения  $S_{12}^2$  (кривая 2) и излучения  $S_{13}^2$  (кривая 3) от ширины щели  $\delta$  при  $\epsilon = 1$  (а) и 4 (б).

$|S_{11}|^2$  и  $|S_{13}|^2$  монотонно возрастают, а коэффициент  $|S_{12}|^2$  монотонно убывает.

Таким образом, при увеличении ширины щелей между элементами решетки РП ширина полосы поглощения отдельного резонатора должна увеличиваться (вследствие увеличения излучения во внешнее пространство), однако число резонаторов на единицу площади РП при этом уменьшается, что, наоборот, должно уменьшать полосу поглощения РП. Результатом действия этих двух факторов является существование некоторой оптимальной ширины щели, при которой обеспечивается наиболее широкая полоса поглощения РП.

## 2. ЗАВИСИМОСТЬ ПОЛОСЫ ПОГЛОЩЕНИЯ ОТ ШИРИНЫ ЩЕЛЕЙ МЕЖДУ ЭЛЕМЕНТАМИ РЕШЕТКИ РАДИОПОГЛОТИТЕЛЯ

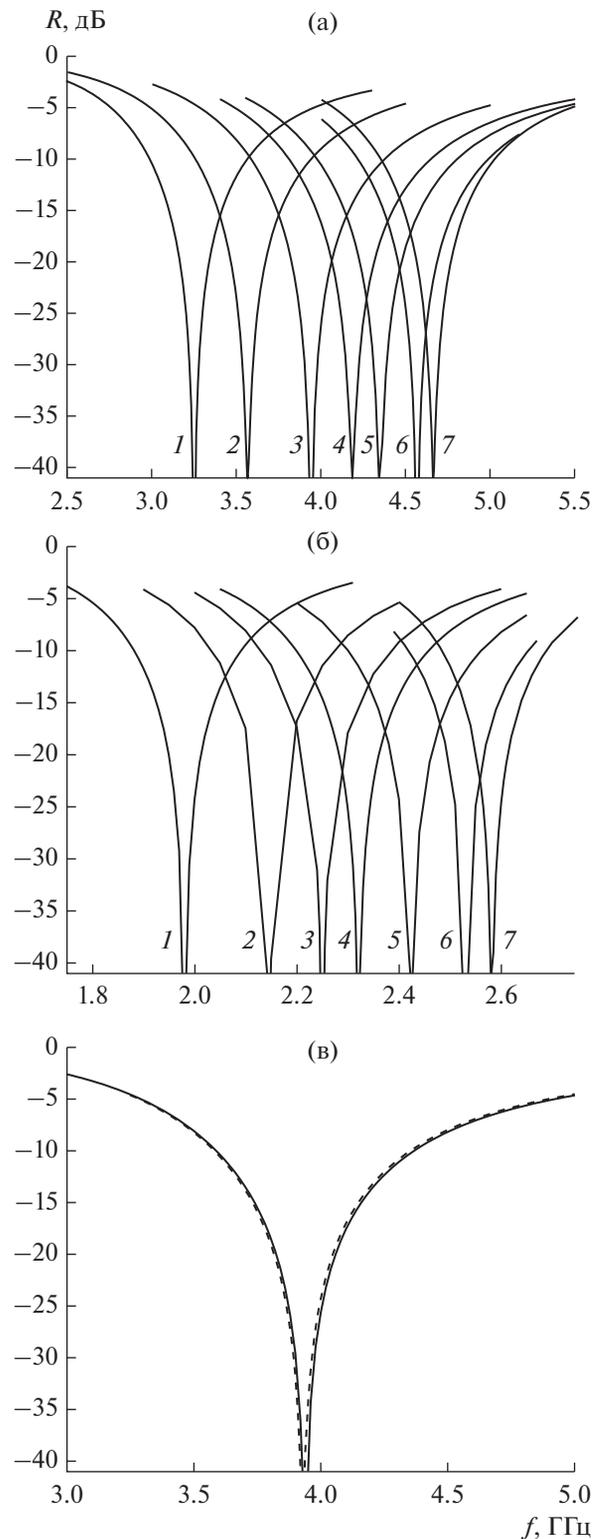
Целью численного расчета зависимости полосы поглощения РП от ширины щелей  $\delta$  является оценка оптимального значения этой ширины. Для этого рассчитывали частотные зависимости коэффициента отражения от РП в широком интервале значений  $\delta$ . В качестве расчетных моделей взяты структуры со следующими характеристиками:

*I случай*  $\epsilon = 1 - j\epsilon''$ ,  $2a = 26$  мм,  $d = 4$  мм,  $\delta = 1; 2; 4; 6; 8; 12; \text{ и } 16$  мм,

*II случай*  $\epsilon = 4 - j\epsilon''$ ,  $2a = 26$  мм,  $d = 4$  мм,  $\delta = 1; 2; 3; 4; 6; 10 \text{ и } 14$  мм.

Значение  $\epsilon''$  подбиралось так, чтобы на резонансных частотах имело место полное согласование РП со свободным пространством (коэффициент отражения меньше  $-40$  дБ).

На рис. 3 представлены частотные зависимости коэффициента отражения от РП для случаев I и II, а в табл. 1 приведены соответствующие этим зависимостям характеристики. Из табл. 1 следует, что максимальные величины полос поглощения  $\Delta f/f_p = 20\%$  в случае I и  $\Delta f/f_p = 11.6\%$  в случае II достигаются при значениях  $\delta = 4$  и  $3$  мм соответственно (см. рис. 3а и 3б, кривые 3), т.е. при значениях, равных или близких к толщине  $d$  слоя диэлектрика. Существенно меньшая ширина полосы поглощения в случае II связана с меньшим значением резонансной частоты. Поэтому корректное сравнение обоих случаев проведено при одинаковых резонансных частотах. С этой целью для случая  $\epsilon' = 4$ ,  $d = 4$  мм,  $\delta = 3$  мм рассчитана частотная зависимость коэффициента отражения от РП при таком размере элемента  $2a = 12.7$  мм решетки, при котором резонансная частота совпадает с резонансной частотой  $f_p = 3.94$  ГГц (см. рис. 3а, кривая 3). На рис. 3в демонстрируется, что рассчитанные частотные зависимости (штриховая и сплошная кривые) практически совпадают и идентичны кривой 3 на рис. 3а. Таким образом, ширина полосы поглощения в обоих случаях одинакова и равна  $20\%$ , что подтверждает эффективность применения в конструкции РП материалов с достаточно широким интервалом значений  $\epsilon'$ . При этом настройка на требуемую частоту реализуется путем изменения размера  $2a$  элементов решетки при неизменной (близкой к оптимальной) ширине  $\delta$  щели между элементами. Так, на рис. 4 показаны частотные зависимости коэффициента отражения от РП с параметрами  $d = 4$  мм,  $\delta = 4$  мм,  $\epsilon = 1 - j\epsilon''$  и различных значениях размера  $2a$ , а в табл. 2 приведены их характеристики.



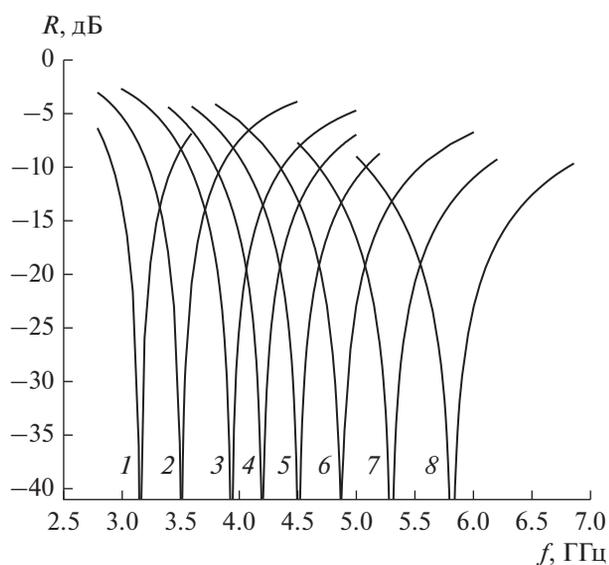
**Рис. 3.** Частотные зависимости коэффициента отражения от РП для  $2a = 26$  мм (а–в) и  $12.7$  мм (в),  $d = 4$  мм и разных  $\epsilon$  и  $\delta$ : а)  $\epsilon = 1 - j\epsilon''$ ,  $\delta = 1, 2, 4, 6, 8, 12, 16$  мм (кривые 1...7 соответственно, см. табл. 1); б)  $\epsilon = 4 - j\epsilon''$ ,  $\delta = 1, 2, 3, 4, 6, 10, 14$  мм (1...7 соответственно, см. табл. 1); в)  $\epsilon = 1 - j0.49$ ,  $2a = 26$  мм (сплошная),  $\epsilon = 4 - j1.36$ ,  $2a = 12.7$  мм (штриховая).

**Таблица 1.** Характеристики частотных зависимостей коэффициента отражения от РП для случая  $2a = 26$  мм,  $d = 4$  мм и разных  $\epsilon''$

Номер кривой	$\delta$ , мм	$\epsilon''$	$f_p$ , ГГц	$\Delta f/f_p$ , %
$\epsilon = 1 - j\epsilon''$ (см. рис. 3а)				
1	1	0.47	3.25	17.8
2	2	0.50	3.565	19.3
3	4	0.49	3.94	20.0
4	6	0.47	4.18	19.85
5	8	0.42	4.34	19.1
6	12	0.36	4.565	17.1
7	16	0.30	4.66	14.4
$\epsilon = 4 - j\epsilon''$ (см. рис. 3б)				
1	1	0.73	1.98	10.6
2	2	0.76	2.148	11.2
3	3	0.77	2.25	11.6
4	4	0.76	2.32	11.2
5	6	0.72	2.425	10.7
6	10	0.60	2.53	9.1
7	14	0.51	2.58	8.1

Примечание:  $\delta$  – ширина щели,  $f_p$  – резонансная частота,  $\Delta f/f_p$ , % – ширина полосы поглощения по уровню отражения  $-10$  дБ,  $\epsilon''$  – оптимальные значения.

Из рис. 4 и данных табл. 2 следует, что при повышении резонансной частоты  $f_p$  монотонно увеличивается ширина полосы поглощения



**Рис. 4.** Частотные зависимости коэффициента отражения от РП для  $\epsilon = 1 - j\epsilon''$ ,  $\delta = 4$  мм,  $d = 4$  мм,  $2a = 34, 30, 26, 24, 22, 20, 18, 16$  мм (кривые 1...8 соответственно, см. табл. 2).

**Таблица 2.** Характеристики частотных зависимостей коэффициента отражения от РП для случая  $\epsilon = 1 - j\epsilon''$ ,  $\delta = 4$  мм,  $d = 4$  мм

Номер кривой (см. рис. 4)	$2a$ , мм	$\epsilon''$	$f_p$ , ГГц	$\Delta f/f_p$ , %
1	34	0.38	3.16	16.1
2	30	0.42	3.515	17.9
3	26	0.49	3.94	20.0
4	24	0.53	4.20	21.4
5	22	0.56	4.51	23.1
6	20	0.60	4.87	24.4
7	18	0.67	5.30	26.8
8	16	0.73	5.81	31.0

Примечание: отношение  $\Delta\lambda/d$  для всех кривых равно 3.7.

$\Delta f/f_p$ , % достигая 31% при  $2a = 16$  мм, что объясняется увеличением связи с внешним пространством резонаторов, образованных элементами решетки и электропроводящим экраном. В то же время величина  $\Delta\lambda/d$  остается практически неизменной.

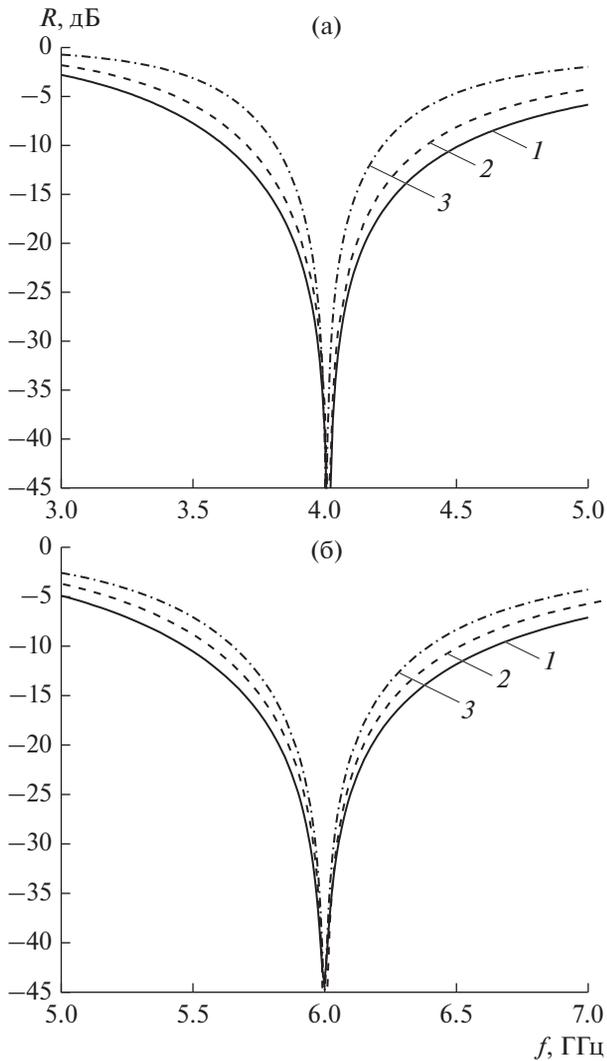
### 3. РАСЧЕТ ОБРАЗЦОВ РАДИОПОГЛОТИТЕЛЯ С РЕАЛЬНЫМИ МАТЕРИАЛАМИ

В качестве диэлектриков с потерями для резонансных РП рассмотрены композиты двух типов.

*Тип I* – слоистая структура из чередующихся слоев пенополистирола толщиной 6 мм и углеродсодержащей бумаги. Толщина слоя углеродсодержащей бумаги в разных образцах была различна и составляла 0.07; 0.14 и 0.21 мм. Комплексная диэлектрическая проницаемость бумаги, измеренная на частоте 4 ГГц, равна  $\epsilon = 20 - j15$ , а расчетные значения диэлектрической проницаемости композитов  $\epsilon_k$  приблизительно равны:  $1.2 - j0.25$ ,  $1.4 - j0.5$  и  $1.6 - j0.75$ , соответственно.

*Тип II* – полиуретановый эластомер, наполненный сажей с концентрацией 2, 4 и 6 об. %. Диэлектрические проницаемости композитов  $\epsilon_k$ , измеренные на частоте 6 ГГц, равны  $5 - j1$ ,  $6.4 - j1.6$  и  $9 - j2.7$  соответственно.

На рис. 5 представлены расчетные частотные зависимости коэффициента отражения от РП на основе композитов I и II типа, а в табл. 3 – их характеристики. При расчете характеристик РП были заданы резонансные частоты  $f_p = 4$  и 6 ГГц в случае I и II типа соответственно. Из результатов расчета, приведенных в табл. 3, следует, что при увеличении мнимой части диэлектрической проницаемости материала растет полоса рабочих



**Рис. 5.** Частотные зависимости коэффициента отражения от РП на основе композитов I и II типа: а)  $\epsilon = 1.2 - j0.25$  (кривая 1),  $\epsilon = 1.4 - j0.5$  (кривая 2),  $\epsilon = 1.6 - j0.75$  (кривая 3) (см. табл. 3), б)  $\epsilon = 5 - j1$  (кривая 1),  $\epsilon = 6.4 - j1.6$  (кривая 2),  $\epsilon = 9 - j2.7$  (кривая 3) (см. табл. 3).

частот  $\Delta f/f_p$  и толщина РП  $d$ , но отношение  $\Delta\lambda/d$  остается практически неизменным и приблизительно равным 3.7. Для сравнения укажем, что для обычного однослойного тонкого РП Далленбаха на основе диэлектрического материала без частотной дисперсии диэлектрической проницаемости это отношение в гипотетическом случае идеального согласования РП со свободным пространством равно 3.2 [7–9].

Результаты расчета также показывают, что идеальное согласование резонансного РП со свободным пространством может быть реализовано для любого диэлектрика с потерями на любой заданной частоте.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Численные расчеты показали, что наибольшее значение ширины полосы поглощения при заданной резонансной частоте резонансного РП обеспечивается при определенном отношении ширины щели  $\delta$  между соседними элементами решетки к толщине  $d$  слоя материала между решеткой и экраном, которое сравнительно слабо зависит от диэлектрической проницаемости  $\epsilon'$  материала. При  $\epsilon' = 1$  это отношение равно единице, а с увеличением до  $\epsilon' = 4$  уменьшается до 3/4.

Расчеты, проведенные для различных композитов в широком диапазоне значений  $\epsilon'$  и  $\epsilon''$  подтвердили возможность обеспечить коэффициент отражения от РП меньше  $-40$  дБ на заданной частоте только путем управления размерами структуры РП без изменения характеристик диэлектрика. При этом было показано, что по уровню коэффициента отражения  $-10$  дБ отношение ширины полосы поглощения  $\Delta\lambda$  к толщине слоя диэлектрика  $d$  составляет около 3.7, что больше аналогичного отношения для классического четвертьволнового РП Далленбаха равного 3.2. Эти расчеты показали, что идеальное согласование резонансного РП со свобод-

**Таблица 3.** Характеристики частотных зависимостей коэффициента отражения от РП для композитов I и II типа

Номер кривой	$2a$ , мм	$\delta$ , мм	$d$ , мм	$\epsilon'$	$\epsilon''$	$f_p$ , ГГц	$\Delta f/f_p$ , %	$\Delta\lambda/d$
Композит I типа (см. рис. 5а)								
1	27	2	2.05	1.2	0.25	4.01	12.5	3.71
2	23.5	4	3.45	1.4	0.5	4.01	16	3.7
3	20.1	4	4.4	1.6	0.75	4.01	19.8	3.72
Композит II типа (см. рис. 5б)								
1	8.5	1.2	1.7	5	1	6	12.5	3.65
2	6.9	2	2.15	6.4	1.6	6	6	3.7
3	4.7	2	2.6	9	2.7	6	19.8	3.78

ным пространством может быть достигнуто практически для любого диэлектрика с поглощением на любой заданной частоте.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена за счет бюджетного финансирования в рамках государственного задания ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН. Часть работы была выполнена в университете им. Томаша Бати в городе Злин (Чешская Республика) в рамках проекта FW 010100327 “Разработка перспективной технологии полимерных композиционных материалов”.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Idrisa F.M., Hashima M., Abbas Z. et al.* // J. Magn. Mater. 2016. V. 405. P. 197
2. *Choi I., Lee D., Lee D.G.* // J. Magn. Mater. 2015. V. 122. P. 23.
3. *Stergiou C.A., Koledintseva M.Y., Rozanov K.N.* // Hybrid Polymer Composite Materials: Applications. Cambridge: Elsevier Inc., 2017. P. 53.
4. *Лопатин А.В., Казанцев Ю.Н., Казанцева Н.Е. и др.* // РЭ. 2008. Т. 53. № 5. С. 517.
5. *Казанцев Ю.Н., Крафтмахер Г.А., Мальцев В.П., Солосин В.С.* // РЭ. 2020. Т. 65. № 6. С. 537.
6. *Казанцев Ю.Н.* // РЭ. 1959. Т. 4. № 9. С. 1480.
7. *Rozanov K.N.* // IEEE Trans. 2000. V. AP-48. № 8. P. 1230.
8. *Розанов К.Н.* // РЭ. 1999. Т. 44. № 5. С. 526.
9. *Rick G.* Radar Cross-Section Handbook. N.Y.: Plenum Press, 1970.