

УДК 621.396

*А. А. КОНТАРЬ*, канд. техн. наук,  
*А. И. ТЕРЕЩЕНКО*, д-р техн. наук,  
*Н. Г. ШАБАНОВ*

### **РАДИОПОГЛОЩАЮЩИЕ МАТЕРИАЛЫ: ТЕРМИНОЛОГИЯ И ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ ТРЕБОВАНИЯ**

---

Вопросы, связанные с поглощением электромагнитных волн (ЭМВ), интенсивно обсуждаются в научной литературе в течение почти сорока лет. За это время опубликованы сотни оригинальных, а также обзорные статьи, ряд монографий, сделаны десятки изобретений. И все же проблема далеко не исчерпана: авторы монографии [1, с. 3], изданной в 1982 г., имели основания заявить, что «в отечественной и зарубежной литературе практически отсутствуют труды, обобщающие исследования в области создания материалов, предназначенных для поглощения СВЧ-излучений». Скорее всего, такое положение объясняется разнообразием и широтой круга вопросов, касающихся поглощения ЭМВ. Сфера исследований включает электродинамические задачи, завершающиеся созданием математических моделей и алгоритмов для расчета изучаемых систем; вопросы применения поглотителей электромагнитных волн (ПЭВ) и вытекающие отсюда требования к подобным устройствам; определение и измерение параметров этих устройств; наконец, пути практической реализации ПЭВ и применяемые для их создания радиопоглощающие материалы (РПМ).

Перечисленные группы вопросов рассмотрены в литературе не одинаково. В одних работах строгий теоретический подход приводит к выводам слишком общего характера, мало пригодном для практического использования; в других ценность результатов снижается, из-за недостаточно обоснованных, упрощающих допущений; немало работ заявочного или рекламного типа, почти не содержащих научной информации. При таком объеме имеющихся сведений их систематизация, анализ и использование в значительной степени затруднены из-за нечеткости ряда определений и формулировок.

Считаем необходимым обсуждение и уточнение таких вопросов, учитывая их важность. При этом ограничимся терминологией и требованиями, предъявляемыми к радиопоглощающим материалам.

Как следует из самого термина, РПМ работают в диапазоне радиочастот. Сюда не должны включаться используемые в радиоэлектронных средствах субмиллиметровые волны, инфракрасноволновое и оптическое излучения. Практически же радиочастотный диапазон для подавляющего большинства РПМ еще более сужается, охватывая только дециметровые, сантиметровые и миллиметровые волны, т. е. то, что в зарубежной литературе принято называть микроволнами.

Начнем с задачи макроскопической электродинамики о распространении ЭМВ в материальных средах, обладающих определенными электрическими и магнитными свойствами. Анализ ее решения при заданных граничных условиях и параметрах, характеризующих свойства среды ( $\epsilon$  — диэлектрическая,  $\mu$  — магнитная проницаемости), показывает, что в некоторых случаях в среде имеют место потери, т. е. преобразование энергии ЭМВ в другие виды энергии. Во многих источниках, очевидно для строгости изложения, подчеркивается, что преобразование происходит, «в основном», в тепловую энергию, но другие виды энергии не называются. Вероятно, имеется в виду химическая энергия. Но такое преобразование означает настолько сильные изменения среды, что они должны быть исключены из рассмотрения. Итак, предлагается рассматривать только условия, при которых поглощение энергии ЭМВ не приводит к фазовым переходам и, тем более, к изменению химического состава вещества, образующего среду. В противном случае это будет переход к другой задаче — с иными значениями величин и характеристик параметров среды.

Теперь конкретизируем задачу (рис. 1, а): плоская волна, идущая из свободного пространства (среда I с параметрами  $\epsilon_1, \mu_1$ ), распространяется в направлении  $z$ , нормальном к плоскости раздела, через слои толщины  $d$  (среда II с параметрами  $\epsilon_2, \mu_2$ ) в среду III (с параметрами  $\epsilon_3, \mu_3$ ). Такую систему можно охарак-

например, коэффициентами отражения  $K_{отр}$ , прохождения  $K_{прох}$  и поглощения  $K_{погл}$ , где

$$K_{отр} = \frac{P_{отр}}{P_{пад}}; \quad K_{прох} = \frac{P_{прох}}{P_{пад}}; \quad K_{погл} = 1 - \frac{P_{отр}}{P_{пад}} - \frac{P_{прох}}{P_{пад}};$$

$P_{пад}$ ,  $P_{отр}$ ,  $P_{прох}$  — падающая, отраженная и прошедшая мощности соответственно.

Здесь  $K_{отр}$ ,  $K_{прох}$  учитывают отражения от плоскостей раздела I—II и II—III, а также поглощение в слое II, а точнее — бо-

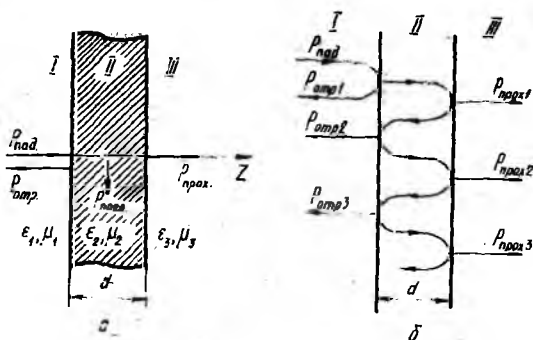


Рис. 1

лее сложную картину с многочисленными переотражениями в слое II (рис. 1, б). Теоретический анализ данной задачи вполне возможен, хотя для многослойной системы потребовалось бы применение ЭВМ (авторы работы [1, с. 36] считают подобный путь затруднительным и упрощают задачу).

Возможны и другие подходы к анализу структуры, представленной на рис. 1, а — например, методами теории цепей. Но, по сути, это только различные способы записи, не меняющие сущности задачи и получаемых результатов — разделения энергии падающей ЭМВ на отраженную, прошедшую и поглощенную.

Для дальнейшего исследования целесообразно выделить основные области применения РПМ. В первом из отечественных обзоров, посвященных РПМ [2], названы следующие: 1) радиолокационная маскировка; 2) облицовка внутренней поверхности безэховых камер (БЭК); 3) экранирование радиосредств от помех, вызванных нежелательным отражением сигналов; 4) экранирование персонала от вредного излучения радиосредств; 5) поглощающие вставки в волноведущих трактах.

Нам представляется, что включать пп. 3, 4 в этот перечень нет оснований, так как наиболее эффективное экранирование осуществляется не с помощью РПМ, а леем проводника — металла, полностью отражающего ЭМВ (за исключением, может быть, случаев, когда необходимо обеспечить эластичность — при создании средств индивидуальной защиты от излучения, а также

средств радиолокационной маскировки наземных объектов). С другой стороны, к приведенному перечню можно добавить поглотители, устраняющие переотражения ЭМВ внутри экранированных радиосредств и помещений; поглотители, служащие для подавления нежелательных титов колебаний в резонансных структурах электровакуумных приборов; поглощающие элементы калориметрических измерителей мощности.

Во всех названных случаях применения к РПМ предъявляется первое основное требование: полное и реально максимально возможное поглощение энергии ЭМВ. При этом в структуре (рис. 1, а) для обеспечения непрохождения ЭМВ в среду III необходимо, чтобы она была идеально (достаточно хорошо) проводящей и отражала ЭМВ, прошедшую через слой II. В таком случае задача приводится к рассмотрению поглотителя толщины  $d$  на металлической подложке. Последняя может и отсутствовать, если толщина поглотителя достаточно велика и обеспечивает непрохождение волны через границу сред II—III.

Второе основное требование к РПМ: полное отсутствие отражения, реально-минимальное отражение ЭМВ от границы раздела I—II в среду I (учитывая, как было сказано выше, и результат переотражений в среде II).

Выполнение первого из этих требований обеспечивается за счет параметров среды II — омических, диэлектрических и магнитных потерь, приводящих к преобразованию энергии ЭМВ в тепловую. Для выполнения второго необходимы не только определенные параметры среды II, но и соответствующий закон их изменения вдоль направления распространения волны, т. е. структура поглощающей среды, обеспечивающая согласование на границе раздела I—II — вхождение ЭМВ без отражения в среду II (поглотитель). Это может быть осуществлено тремя способами, которые представлены на рис. 2. Первый реализуется в поглотителе, параметры которого вдоль оси  $z$  плавно изменяются по не-



Рис. 2

которому закону от значений  $\epsilon_1$ ,  $\mu_1$  (среда I, свободное пространство). Такая структура РПМ (рис. 2, а) называется градиентной. Ввиду больших трудностей ее практического осуществления она

может быть заменена слоистой структурой (рис. 2, б), где требуемый результат получается при некотором числе слоев  $N$  и соответствующих толщине каждого слоя  $d_i$  и его параметрах  $\epsilon_i, \mu_i$ . Однако возможен и третий вариант — согласование поглощающего материала с параметрами  $\epsilon_2, \mu_2$  (существенно отличающимися от  $\epsilon_1, \mu_1$ ) со свободным пространством посредством выбора формы границы раздела I и II. Частный случай — клиновидная форма границы раздела — показан на рис. 2, в.

Варианты рис. 2, а, б отличаются структурой материала, тогда как на рис. 2, в показан поглотитель электромагнитных волн (ПЭВ), т. е. устройство, выполненное из однородного по структуре РПМ. Поэтому целесообразно уточнить терминологию, отличая радиопоглощающий материал (РПМ) от поглотителя электромагнитных волн (ПЭВ) как устройства, сделанного из РПМ и выполняющего функции поглотителя.

К сожалению, по этим вопросам в литературе нет четких формулировок. Например, дается следующая классификация РПМ: 1) узкодиапазонные материалы интерференционного типа; 2) широкодиапазонные многослойные материалы; 3) широкодиапазонные шиповидные материалы; 4) ферритовые материалы. Здесь в п. 1 определяется физическое явление, обуславливающее поглощение; в п. 2 — структура РПМ; в п. 3 — форма поверхности РПМ, обеспечивающая его согласование со средой, откуда падает излучение; наконец, в п. 4 — химический состав материала. Таким образом, делается нелогичная попытка классификации по разным признакам. Заметим, что шиповидный «материал» может быть в то же время ферритовым, да и в многослойном могут быть слои из феррита [3].

В работе [4], посвященной новым РПМ для противорадиолокационной маскировки, рассматриваются 1) покрытия; 2) конструкционные материалы; 3) управляемые структуры. При этом в п. 1 включены покрытия из ферритов, покрытия из пластмасс и радиоизотопные покрытия. Если ферритовые или пластмассовые покрытия представляют собой РПМ, нанесенный на металл, то радиоизотопное покрытие — это лишь средство для создания плазменного слоя, поглощающего ЭМВ. Именно этот слой (а отнюдь не создающий его радиоизотоп) и выполняет функции РПМ. Иной вопрос — насколько правомерно называть плазму материалом (но об этом будет сказано ниже). Далее, управляемые структуры — это тоже материалы, свойства которых меняются из-за некоторых внешних воздействий. Такой материал может быть нанесен и как радиопоглощающее покрытие. С другой стороны, вводя (без необходимости) термин «покрытие», автор [4] не отмечает, что материал для выполнения покрытия тоже должен иметь определенную структуру, в частности, градиентную или сложную.

Можно было бы привести и другие примеры из источников, где нет четкости в определении термина «материал». Не выход из положения и попытка в новейшей работе [5] употреблять

то о «РПМ и ПЭВ», то о «РПМ или ПЭВ», то без каких-либо оснований заменять один термин другим. Дополнительная неясность вносится добавлением слова «композиционный» («композиционные РПМ и ПЭВ»), что заслуживает специального суждения.

Так, в работе [6] со ссылкой на работу [7] дается следующее определение: «Композиционными называются материалы, обладающие следующей совокупностью признаков: не встречаются в природе, поскольку созданы человеком; состоят из двух или более компонентов, различающихся по своему химическому составу и разделенных выраженной границей; имеют новые свойства, отличающиеся от свойств составляющих их компонентов; неоднородны в микромасштабе и однородны в макромасштабе; состав, форма и распределение компонентов «запроектированы» заранее; свойства определяются каждым из компонентов, которые в связи с этим должны быть в материале в достаточно больших количествах (больше некоторого критического содержания).

Такое определение вполне подходит для большинства РПМ, за исключением признака «неоднородны в микромасштабе и однородны в макромасштабе». Ему не соответствует, например, РПМ из какого-либо термопласта со все увеличивающимся вдоль направления распространения ЭМВ содержанием поглощающей компоненты (угольного или ферритового порошка). С одной стороны, это, несомненно, композиционный РПМ — но при этом неоднородный и в микро-, и в макромасштабе. С другой стороны, его можно рассматривать как ПЭВ — устройство для поглощения ЭМВ (но тогда — выполненное из какого или каких материалов?). Впрочем, согласно работе [6] существуют и слоистые композиционные материалы (КМ), структура которых образует явную неоднородность в макромасштабе.

А теперь возвратимся к «шиповидному» материалу. В нем шипы выполнены из КМ, неоднородного в микро- и однородного в макромасштабе (например, пенопласта с равномерно распределенной углеродной добавкой). Если считать от плоскости, соответствующей вершинам шипов, то вдоль оси  $z$  происходит постепенное (градиентное) увеличение одной компоненты (пенопласта) и уменьшение другой (воздуха). Такая структура тоже подходит под определение композиционного материала.

В работе [2] кратко рассматривается классификация РПМ. Разделение их на диэлектрические и магнитоэлектрические понятно. Разделение по диапазону работы на узкодиапазонные и широкодиапазонные также не вызывает сомнений, хотя требуется конкретизация границы между одними и другими. Сложнее обстоит дело с разделением по принципу работы. Предлагается разбиение на две группы. «К первой группе относятся материалы интерференционного типа, вызывающие гашение электромагнитных волн за счет их интерференции... Ко второй группе относятся материалы, в которых энергия электромагнитных волн

превращается в тепловую энергию за счет наведения рассеянных слабых токов, магнитно-гистерезисных или высокочастотных диэлектрических потерь» [2]. А что означает «гашение» ЭМВ за счет интерференции?

Из закона сохранения энергии следует, что в любом РПМ поглощаемая энергия ЭМВ должна преобразовываться в тепловую. В материалах с малыми потерями для этого требуется многократное прохождение ЭМВ через РПМ в результате переотражения. В материалах с большими потерями поглощение происходит при однократном прохождении слоя толщины  $d$ , которая в данном случае не связана с длиной распространяющейся волны. Таким образом, разделение по принципу работы может быть сведено к разделению по свойствам, а именно — по величине потерь.

Выше были указаны два главных требования к РПМ: минимальное отражение и максимальное поглощение ЭМВ. Если рассматривать поглощающий слой на металле, что исключает прохождение ЭМВ, то второе из этих свойств следует из первого: если энергия не отражается, то она поглощается. В таком случае требование максимального поглощения должно рассматриваться как требование максимальной величины удельной мощности, которую может выдержать РПМ без его теплового повреждения (разрушения).

Что касается других основных требований к РПМ [2], а именно — широкого диапазона поглощаемых длин волн, высоких механических свойств, минимальных габаритов и массы, способности работать в широких пределах температур — этот перечень следовало бы несколько дополнить.

При производстве РПМ существенное значение имеет технологичность. Например, изготовление слоистой структуры с определенными параметрами каждого слоя значительно проще, чем изготовление градиентной структуры, где параметры материала должны плавно меняться по определенному закону. Изготовление большого листа РПМ, однородного по параметрам в плоскости, перпендикулярной направлению падающей волны, значительно труднее, чем изготовление такого же листа из составных частей небольшого размера.

И еще одно важнейшее требование — это малая стоимость РПМ. Можно получить исключительно хорошие значения одних параметров РПМ за счет других, но в любом случае разумный компромисс должен находиться обязательно с учетом расходов на изготовление материала.

Заканчивая обсуждение рассматриваемых вопросов, мы приходим к заключению о необходимости более детального их анализа, что выходит за пределы возможностей данной статьи. Первоочередной представляется необходимость введения четких терминов и определений.

**Список литературы:** 1. *Ковнеристый Ю. К., Лазарева И. Ю., Раваев А. А.* Материалы, поглощающие СВЧ-излучение. М., 1982. 166 с. 2. *Шнейдерман Я. А.* Радиопоглощающие материалы//Зарубеж. радиоэлектроника. 1965. № 4. С. 115—135. 3. *Торгованов В. А.* Безэховые камеры//Там же. 1974. № 12. С. 20—46. 4. *Шнейдерман Я. А.* Радиопоглощающие материалы//Там же. 1975. № 2. С. 93—113. 5. *Алимин Б. Ф.* Современные разработки поглотителей электромагнитных волн и радиопоглощающих материалов//Там же. 1989. № 2. С. 72—82. 6. *Композиционные материалы.* Справ./Под ред. Д. М. Капиноса. К., 1985. 592 с.

*Поступила в редколлегию 06.07.88*