

УДК 621.3.01:537.212

## Расчет прохождения электромагнитных полей различной физической природы в многослойных композитных корпусах летательных аппаратов

А. В. ОСТРИК, д-р техн. наук

Институт проблем химической физики РАН, г. Черноголовка, Московская обл., Россия

В. А. ГУЛИН

АО "НПК "Конструкторское бюро машиностроения", г. Коломна, Московская обл., Россия

*Приведены параметры электромагнитных полей разрядов молний, электромагнитных импульсов мощных взрывов и других генераторов полей искусственного происхождения. Рассмотрены современные методы защиты, применяемые в композитных конструкциях летательных аппаратов (ЛА). Предлагается метод расчета коэффициента экранирования электромагнитного излучения многослойного композитного корпуса, имеющего проводящие прослойки. Обсуждаются результаты сравнения полученных экспериментальных и расчетных данных.*

*Ключевые слова:* электромагнитное поле, многослойные композитные конструкции, экранирование помех, коэффициент экранирования.

Экранирование нестационарных электромагнитных полей (ЭМП) защитными слоями многослойного корпуса является основой предотвращения утечки информации по техническим каналам [1] и защиты аппаратуры от помех, генерируемых ЭМП различной физической природы [2—5]. Предварительный расчет экранирующих свойств проектируемых конструкций необходим для оптимального выбора средств защиты от ЭМП и обоснования достаточности принятых конструктивных мер для обеспечения безопасности функционирования защищаемой аппаратуры.

Имеется набор программных комплексов, предназначенных для многомерных расчетов отражения, поглощения и частичного прохождения ЭМП через конструкции сложных форм и структур (например, ANSYS, Microwave Studio, FemLab, OPERA). Однако при наличии в корпусах малоразмерных включений с высокой проводимостью применение этих комплексов становится проблематичным [4]. Кроме того, расчетное время на ЭВМ велико (не позволяет проводить многовариантные расчеты для одновременной оптимизации конструкции и средств защиты), а требования к вычислительным средствам зачастую обременительны для конструкторских организаций. В то же время для высоких частот (когда длина волны излучения мала по сравнению с характерным разме-

ром конструкции) и при отсутствии отверстий в корпусах (неоднородностей с размерами, сравнимыми с длиной волны) во многих случаях на предварительной стадии проектирования вполне достаточно одномерного приближения. В случае низких частот это приближение может рассматриваться как средство сравнительной оценки эффективности введения различных защитных слоев в конструкцию.

### Факторы, вызывающие нарушение работы аппаратуры электронных полей

Источниками опасных для аппаратуры ЭМП являются прежде всего разряды молний [3, 4], электромагнитное излучение мощных взрывов [2, 6], а также другие генераторы полей искусственного происхождения [7].

Представляющие интерес диапазоны изменения частот и амплитуд ЭМП достаточно широки. Для молний спектр основного разряда простирается до 30 кГц с максимальной амплитудой  $E \leq 10$  В/м. Для спектра предразряда молнии характерны более высокие частоты, от 10 до 100 кГц, но на порядок меньшие амплитуды электрического поля.

Спектр и амплитуда электромагнитного импульса мощного взрыва зависят от его типа, мощности и расстояния до объекта воздействия [6]. Большая часть энергии импульса распределена в области частот от 300 кГц до 0,1 ГГц. Сам же спектр простирается до 0,3 ГГц. Амплитуды полей на разумных расстояниях от источника (расстояниях, на которых другие поражающие факторы опасности не представляют) могут достигать значений  $E = 100$  В/м. Однако при космических взрывах мегатонного класса даже на расстояниях по-

Острик Афанасий Викторович, профессор, главный научный сотрудник.

E-mail: ostrik@icp.ac.ru

Гулин Владимир Анатольевич, начальник лаборатории.

E-mail: gulinv@rambler.ru

Статья поступила в редакцию 5 декабря 2016 г.

© Острик А. В., Гулин В. А., 2017

рядка тысячи километров наблюдались электрические поля в несколько десятков кВ/м (например, при взрыве в космосе 9 июля 1962 г. США по программе "Starfish" с тротиловым эквивалентом 1,4 Мт).

Одним из источников направленных ЭМП являются радиолокационные станции (РЛС) [8]. Обычно в наземных и надводных (корабельных) РЛС используются деци- и сантиметровые длины волн (область частот  $\nu = (3-30)$  ГГц). В зависимости от назначения РЛС мощность излучаемых импульсов составляет от единиц до тысяч киловатт. При таких мощностях для расстояний порядка километра напряженность электрического поля не превысит  $E = 10$  В/м.

Отметим большие успехи, достигнутые в разработке сверхмощных твердотельных генераторов сверхкоротких (субнаносекундных) импульсов ЭМП [7]. Поскольку изначально эти генераторы разрабатывались для моделирования электромагнитного импульса мощного взрыва, их частотные характеристики близки к характеристикам последнего или превышают их. Однако амплитудные характеристики могут достигать  $E = 100$  кВ/м и более [7].

Таким образом, представляющий практический интерес диапазон изменения частот ЭМП составляет  $\nu = (10-30)$  ГГц. Амплитуды ЭМП изменяются в зависимости от мощности и типа источника, а также расстояния до него от единиц В/м до сотен кВ/м.

### Конструктивные средства защиты от электромагнитных полей

Исторически средства защиты начали разрабатываться от ЭМП разряда молнии, которые не являются, основной угрозой средствам информационных технологий и аппаратуре ЛА. Далее в качестве конструктивных средств защиты рассматриваются [5] металлические сетки, проводящие углеродные покрытия, напыляемые металлические пленки и токопроводящие эмали.

**Металлические сетки.** В авиационной технике широкое применение получили армирующие трикотажные сетки из медной проволоки диаметром 50—150 мкм [9] (рис. 1). Сетчатое полотно требуемых ширины и строения изготавливается на специальном вязальном оборудовании. Варьируя параметры сетки (размеры ячейки, диаметр и количество проволочек, форму петель и регуляр-

ность их расположения в полотне), можно управлять в некоторых пределах анизотропией механических и электрофизических свойств. Характеристики полотен из медной микропроволоки представлены в табл. 1.

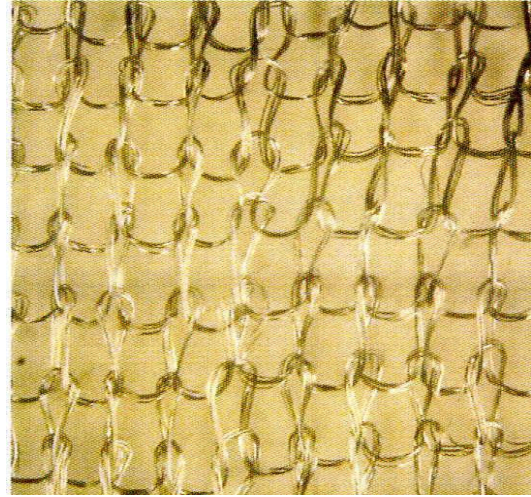


Рис. 1. Полотно из микропроволоки [1]

Таблица 1

Характеристики защитных полотен из медных микропроволок

Наименование показателей	Норма	
	ПМ-0,08	ПМ-0,12
Диаметр проволоки, мм	0,08	0,12
Ширина полотна, мм	600 ± 15	400 ± 15
Поверхностная плотность, г/м <sup>2</sup>	85 ± 5	155 ± 5
Количество петель на 10 см полотна:		
по вертикали	54 ± 2	60 ± 2
по горизонтали	32 ± 2	35 ± 2
Толщина полотна, мм	0,3 ± 0,05	0,4 ± 0,05
Удельная поверхностная электропроводность, См		
по вертикали	205 ± 5	375 ± 5
по горизонтали	130 ± 5	240 ± 5

Известны и альтернативные технологии изготовления защитных микросеток из высокопроводящих металлов (меди, алюминия, бронзы, латуни [10, 11] и т. д.), характеристики которых представлены в табл. 2 [12]. По утверждению специалистов компании-производителя Dexmet (США) [12], эти микросетки превосходят по своим качествам тканые и позволяют защитить композитные элементы конструкции самолета от ударов молнии с силой тока до 200 кА.

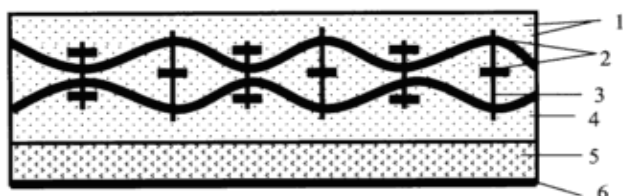
Таблица 2

Характеристики защитных микросеток

Код продукта Dexamet	Масса, фунт/см (±10 %)	Толщина стенки ячейки, дюйм/мм (±10 %)	Размер ячейки по диагонали, дюйм/мм (±5 %)	Толщина сетки, дюйм/мм (±0,001 дюйм/±0,025 мм)	Открытая площадь, % (±5 %)
Алюминиевые микросетки					
2AL8-075F	0,013	0,002/0,051	0,075/1,905	0,002/0,051	52
2AL8-080	0,016	0,004/0,102	0,080/2,032	0,006/0,152	71
4AL8-080F	0,016	0,004/0,102	0,080/2,032	0,004/0,102	71
5AL10-080	0,028	0,005/0,127	0,080/2,032	0,006/0,152	60
Медные микросетки					
2CU4-100A	0,015	0,002/0,051	0,100/2,54	0,004/0,102	84
2CU6-100A	0,022	0,002/0,051	0,100/2,54	0,005/0,127	76
3CU7-125A	0,029	0,003/0,076	0,125/3,175	0,005/0,127	79
3CU7-100A	0,040	0,003/0,076	0,100/2,54	0,005/0,127	70
Медные выровненные микросетки					
2CU4-100FA	0,015	0,002/0,051	0,100/2,54	0,002/0,051	84
2CU6-100FA	0,022	0,002/0,051	0,100/2,54	0,002/0,051	76
3CU7-125FA	0,029	0,003/0,076	0,125/3,175	0,003/0,076	79
3CU7-100FA	0,040	0,003/0,076	0,100/2,54	0,003/0,076	70

**Углеродные защитные покрытия для углепластиков.** Основная особенность углеродных защитных покрытий для углепластиков заключается в использовании в их составе компонентов защищаемого углепластика, что позволяет повысить прочность последнего [13]. В качестве токопроводящего слоя используется материал на основе высокопрочных углеродных волокон.

Для более быстрого отвода энергии при воздействии молнии применяют специальное ориентирование слоев углеродной ткани в токопроводящем слое под углами  $-30$  и  $+60^\circ$  друг относительно друга. Между слоями углеродной ткани располагают трансверсально-армирующие углеродные волокна, связывающие отдельные слои путем многослойного ткачества или прошивки, причем количество трансверсально-армирующих волокон составляет 1—5 на  $1 \text{ см}^2$  (рис. 2).



**Рис. 2. Схема углеродного молниезащитного покрытия [14]:** 1 — углеродные наномодификаторы; 2 — углеродные волокна на токопроводящем слое; 3 — трансверсально-армирующие углеродные волокна; 4 — полимерное связующее токопроводящего слоя; 5 — диэлектрический слой (полимерное связующее углепластиковой конструкции); 6 — углепластиковая конструкция

Поскольку основной причиной разрушения углепластиковых материалов является взрыв про-

дуктов деструкции связующего (эффект взрывающихся проволочек), в межволоконное пространство углеродного защитного покрытия вводится полимерное связующее с высокой температурой деструкции ( $T > 250 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Кроме того, для повышения контактной электропроводности между отдельными слоями углеродной ткани в полимерное связующее токопроводящего слоя вводят углеродные наномодификаторы (фуллерены и их производные) в количестве 3—25 мас. % [13]. Диэлектрический и токопроводящий слои молниезащитного покрытия могут изготавливаться в едином технологическом цикле с углепластиковой конструкцией методом прямого прессования.

Некоторые характеристики молниезащитного покрытия приведены в табл. 3.

Из результатов проведенных авторами патента [5] экспериментов следует, что предлагаемое углеродное молниезащитное покрытие эффективно защищает углепластиковые конструкции внешнего контура летательных аппаратов от воздействия смещающихся разрядов молнии с максимальным значением тока  $I = 200 \text{ кА}$  и зарядом  $Q = 20 \text{ Кл}$ .

**Напыляемые металлические пленки и токопроводящие эмали.** Различные способы газотермического напыления (газопламенное, высокоскоростное газопламенное, детонационное, плазменное и т. д.) металлов на поверхность конструкционных материалов интенсивно развиваются [14]. Поверхностная металлическая пленка или клейкая фольга толщиной в десятки микрон эффективно защищают композитные элементы конструкций от прожигающего действия дугового пятна при прямом ударе молнии.

Таблица 3

Характеристики углеродного молниезащитного покрытия (равнопрочная углеродная ткань + термостойкая эпоксидная композиция + углеродные наночастицы)\*

$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	$\delta$ , мм	$\sigma$ , кСм/м	$\lambda_{\perp}$ , Вт/(м·К)	$\sigma^{+11}$ , МПа	$\sigma^{+22}$ , МПа	$E^{+11}$ , ГПа	$E^{+22}$ , ГПа	$\sigma_{11}$ , МПа	$\sigma_{22}$ , МПа	$\tau_{xz}$ , МПа	$\mu$
1,58	0,19	18	1,23	670	600	73	60	720	600	47	0,07

\*  $\rho$  — плотность;  $\sigma$  — удельная электрическая проводимость;  $\lambda_{\perp}$  — коэффициент теплопроводности перпендикулярно слоям ткани;  $E_{11}$ ,  $E_{22}$ ,  $\sigma_{11}$ ,  $\sigma_{22}$  — модули Юнга и разрушающие напряжения (знак "плюс" означает растяжение, "минус" — сжатие; индекс "11" — направление вдоль основы, "22" — вдоль утка);  $\tau_{xz}$  — разрушающее напряжение сдвига;  $\mu$  — коэффициент Пуассона.

Токопроводящие эмали используют для выравнивания потенциала на поверхности композитной конструкции. Кроме того, они, как и металлические пленки, могут служить в качестве экранирующего слоя.

Метод расчета экранирования корпусом электромагнитного поля

Расчет прохождения, отражения и затухания плоских электромагнитных волн в многослойных композитных корпусах, имеющих токопроводящие покрытия и защитные металлические сетки, делается в одномерном приближении. Предположение об одномерности процесса прохождения волн через корпус ограничивает область применимости метода расчета частотами  $\nu > 300$  МГц (для характерных размеров  $R \approx 1$  м:  $\nu > c/R = 3 \cdot 10^8$  (м/с)/м = 300 МГц). При более низких частотах результаты расчетов могут рассматриваться как оценочные.

Расчет проводится путем решения одномерных уравнений Максвелла в многослойной среде. Решение строится для гармонических волн. Для каждого слоя уравнения Максвелла записываются в виде (индекс слоя  $j$  опущен)

$$\begin{cases} \frac{d\tilde{E}}{dz} = -i\omega\mu_0\tilde{\mu}\tilde{H}, \\ \frac{d\tilde{H}}{dz} = -i\omega\epsilon_0\tilde{\epsilon}\tilde{E}, \end{cases} \quad (1)$$

где  $\tilde{E}$ ,  $\tilde{H}$  — комплексные амплитуды электрической и магнитной напряженностей;

$\omega$  — круговая частота гармонической волны;

$\tilde{\epsilon}$ ,  $\tilde{\mu}$  — комплексные диэлектрические и магнитные проницаемости;

$z$  — координата по толщине корпуса.

Решение системы уравнений (1) для напряженности электрического поля имеет вид ( $j = 0, \dots, n + 1$ ):

$$\tilde{E}_j = \tilde{A}_j \exp(-ik_j z) + \tilde{B}_j \exp(ik_j z), \quad k_j = \frac{\omega}{c} \sqrt{\tilde{\mu}\tilde{\epsilon}},$$

где  $n$  — число слоев преграды;

$j = 0$  — среда перед преградой;

$j = n + 1$  — среда за преградой;

$c$  — скорость света в вакууме;

$\tilde{A}_j$ ,  $\tilde{B}_j$  — комплексные константы, определяемые из граничных условий.

На границах различных сред ставятся условия непрерывности тангенциальных составляющих электрической и магнитной напряженностей. Предполагается, что на преграду падает единичная волна ( $\tilde{A}_1 = 1$ ), а с тыльной стороны источник радиоволн отсутствует ( $\tilde{B}_{n+1} = 0$ ).

Получающаяся из граничных условий линейная система  $2(n+1)$  уравнений для коэффициентов  $\tilde{A}_j$ ,  $\tilde{B}_j$  решается методом прогонки. Коэффициент экранирования радиоволн (в децибелах) определяется по формуле  $L = -20 \lg |\tilde{A}_{n+1}|$ .

При расчете комплексной диэлектрической проницаемости металлической сетки предполагается, что она описывается соотношением, аналогичным соотношению (в единицах СГСЭ) для сплошного металла:

$$\tilde{\epsilon} = 1 - \sigma_{eff} / \gamma - \frac{4\pi\sigma}{\omega} i, \quad (2)$$

где  $\sigma_{eff}$  — эффективная проводимость сетки (размерность в СГСЭ 1/с);  $\gamma \approx 10^{14} \text{ с}^{-1}$  — частота столкновений электрона в металле. Соотношение (2) справедливо при условии  $\omega \ll \gamma$ , что в данном случае ( $\nu \leq 3 \cdot 10^{10}$ ) выполняется.

Эффективное значение проводимости сетки оценивается по формуле

$$\sigma_{eff} = \frac{\pi}{4} \frac{d}{d+l} \sigma, \quad (3)$$

где  $\sigma$  — проводимость сплошного материала, из которого изготовлена сетка;

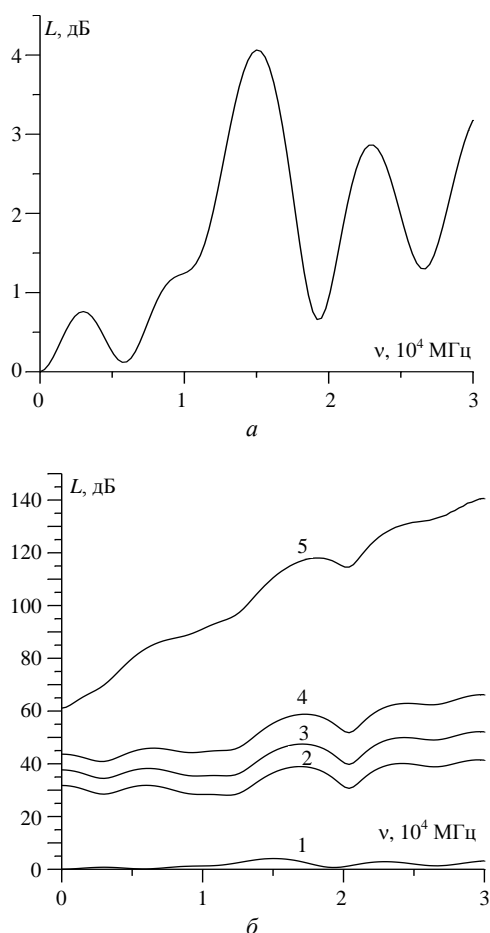
$d$  — диаметр проволоки сетки;  
 $l$  — длина стороны ячейки.

Поскольку контакт проволочек сетки далек от идеального, соотношение (3), скорее всего, дает завышенное значение эффективной проводимости. В расчетах принималось значение в 20 раз меньшее, что дает запас экранирующих свойств конструкции.

### Результаты расчетов коэффициента экранирования композитного корпуса

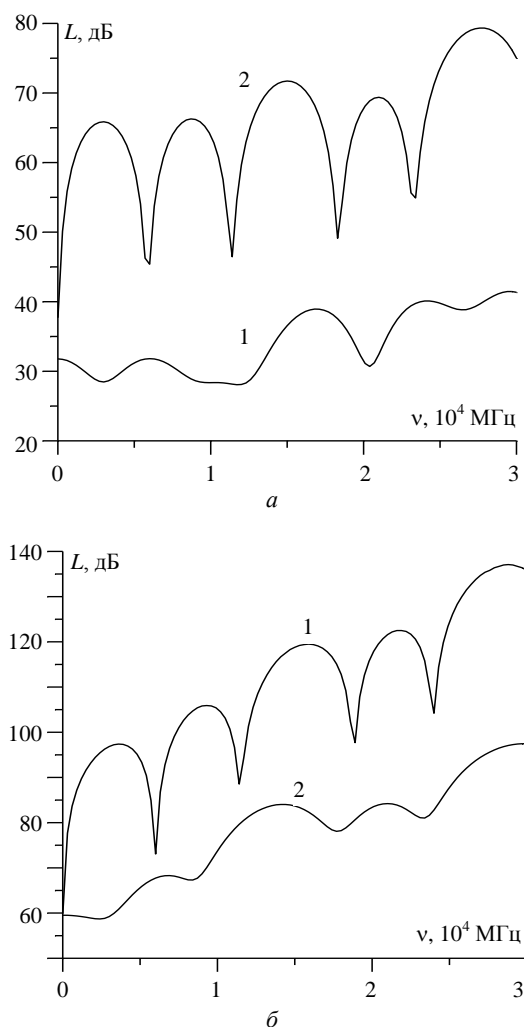
Расчет прохождения радиоволн в диапазоне частот  $\nu = (1-3) \cdot 10^4$  МГц проводился для многослойного композитного корпуса. Рассматривались два способа экранирования: нанесение токопроводящей эмали и вставка внутрь корпуса сетки размерами  $0,08 \times 0,08 \times 0,055$  полutomпаковой 008Н ГОСТ 6613-86. Результаты расчетов представлены на рис. 3 и 4.

На рис. 3, *a* показан коэффициент экранирования  $L$  без каких-либо мер экранирования. Видно, что в этом случае он не превышает 5 дБ.



**Рис. 3. Коэффициент экранирования корпуса без защиты (а) и с внешним слоем эмали толщиной 0,2 мм (б) при различных значениях ее проводимости: 1 — без эмали; 2—5 — с эмалью ( $\rho = 1; 0,5; 0,25; 0,033$  мОм·м)**

Коэффициент экранирования существенно увеличивается при нанесении токопроводящей эмали на внешнюю поверхность корпуса. Как видно из рис. 3, *б*, нанесение на поверхность токопроводящей эмали со стандартным техническим требованием  $\rho \leq 1$  мОм·м обеспечивает экранирование с  $L > 30$  дБ. Для дальнейшего увеличения коэффициента экранирования во всей рассматриваемой области частот ( $1 \text{ МГц} < \nu < 3 \cdot 10^4 \text{ МГц}$ ) необходимо нанесение токопроводящей эмали с уменьшенным значением удельного сопротивления  $\rho \leq 0,0333$  мОм·м.



**Рис. 4. Коэффициент экранирования корпуса с внешним (1), а также внешним и внутренним (2) слоями эмали (а) и корпуса, имеющего сетку с нанесением (1) и без нанесения (2) внешнего слоя эмали (б)**

На рис. 4, *a* показаны результаты расчетов коэффициента экранирования композитного корпуса с нанесенными внешним, а также внешним и внутренним покрытиями из токопроводящей эмали. Видно, что зависимость коэффициента экранирования от частоты имеет ярко выраженный резонансный характер, что обусловлено про-

светлением корпуса при его работе в целом как покрытия толщиной  $\lambda/4$  и соответствует эффекту просветления оптики на частотах

$$v = \frac{c}{2l} \left( k + \frac{1}{2} \right)$$

( $l$  — расстояние между внешним и внутренними слоями токопроводящей эмали;  $k = 0, 1, 2, \dots$ ).

Как уже отмечалось, экранирование можно обеспечить и вставкой металлической сетки внутрь корпуса. На рис. 4, б представлены результаты расчетов коэффициента экранирования корпуса, имеющего металлическую сетку, с токопроводящей эмалью на внешней поверхности и без нее. Видно, что и в этом случае наличие двух отражающих проводящих слоев (внешнего покрытия из эмали и сетки) приводит к частичному просветлению корпуса.

Тем не менее следует отметить, что введение в композитный корпус существенно отличающегося по проводимости сеточного металлического слоя представляет известную опасность при прямом ударе молнии, т. к. основная часть тока разряда молнии с большой вероятностью пойдет по материалу сетки, испарит его, а образовавшийся металлический пар разрушит часть композитного материала [3].

### Сравнение расчетных и экспериментальных данных

В области низких частот ( $v = (15—2500)$  МГц) коэффициент экранирования корпуса определялся и экспериментально. Передающая (П6-52) и приемная (П6-52 или TSEMF-B1) антенны были закреплены на штативах. Расстояние между антеннами составляло 10 м. Максимумы диаграмм направленности передающей и приемной антенн были направлены друг на друга. Приемной антенной сигнал измерялся в двух случаях: перед корпусом и внутри него. Этих данных достаточно для определения коэффициента экранирования корпуса.

Результаты сравнения расчетных и экспериментальных данных для двух серий опытов (кресты и ромбы) показаны на рис. 5. В области низких частот ( $v < 300$  МГц) наблюдается существенное уменьшение экспериментально определенного коэффициента экранирования и, соответственно, его отклонение от расчетных данных. Как уже отмечалось, используемое при расчетах одномерное приближение в этой области неприемлемо.

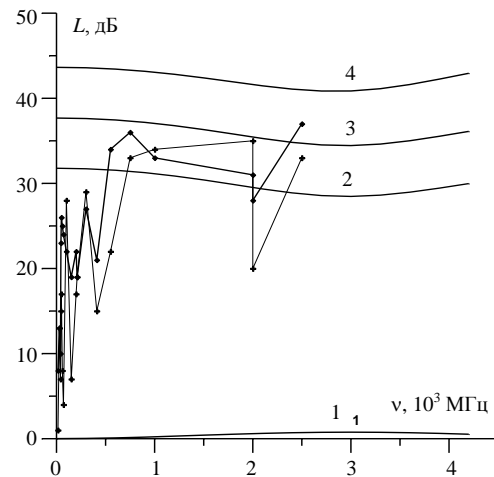


Рис. 5. Коэффициент экранирования корпуса с внешним слоем эмали толщиной 0,2 мм:  
1 — без эмали; 2—4 — с эмалью ( $\rho = 1; 0,5; 0,25$  мОм·м)

Полученные экспериментально при  $v < 300$  МГц низкие значения коэффициента экранирования, скорее всего, обусловлены неоднородными эффектами проникания электромагнитных волн внутрь корпуса, имеющего электрические неоднородности (технологические отверстия, щели, дефекты проводящей эмали) [15]. Однако это утверждение требует дальнейших исследований и экспериментального обоснования.

Отметим, что в случае подтверждения механизма протекания электромагнитных волн внутрь корпуса увеличение коэффициента экранирования в области низких частот становится принципиально затруднительным, поскольку даже тонкий металлический корпус с аналогичными неоднородностями в этом случае окажется непригодным. Поэтому необходимы дальнейшие работы по обоснованию механизма проникания ЭМП внутрь корпуса. В частности:

- проведение экспериментов с полностью металлическим тонкостенным корпусом таких же габаритов и конструкции, что и композитный корпус;
- проведение расчетов по трехмерной методике взаимодействия плоской электромагнитной волны с композитным корпусом и его металлическим аналогом в области низких частот;
- сравнение расчетных и экспериментальных данных и формулировка рекомендаций конструкторам.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Бузов Г. А., Калинин С. В., Кондратьев А. В. Защита от утечки информации по техническим каналам. — М.: Горячая линия-Телеком, 2005. — 416 с.
2. Мырова Л. О., Чепиженко А. З. Обеспечение стойкости аппаратуры связи к ионизирующим и электромагнитным излучениям. — М.: Радио и связь, 1988. — 296 с.

3. Базелян Э. М., Райзер Ю. П. Физика молнии и молниезащиты. — М.: Физматлит, 2001. — 320 с.
4. Щерба А. А., Резинкина М. М. Электромагнитные поля и их воздействие на объекты. — Киев: Наукова думка, 2009. — 192 с.
5. Острик А. В., Филипенко А. А. Молниезащита углеродных элементов конструкции самолета при тепловом и механическом действиях прямого удара молнии // Конструкции из композиционных материалов. 2010. Вып. 1. С. 34—44.
6. Балюк Н. В., Кечиев Л. Н., Степанов П. В. Мощный электромагнитный импульс: воздействие на электронные средства и методы защиты. — М.: "Группа ИДТ", 2007. — 480 с.
7. Богданов В. Н., Жуковский М. И., Ларионов С., Чванов В. Электромагнитная угроза: от мифа к реальности // Безопасность. Достоверность. Информация. 2010. № 3(89). С. 12—15.
8. Справочник по радиолокации / Пер. с англ. Под ред. Скольника М. — М.: Сов. радио, 1976—1979. — Т. 1. 456 с.; Т. 2. 408 с.; Т. 3. 528 с.; Т. 4. 376 с.
9. Вишняков Л. Р., Коханый В. А., Коханая И. Н., Андриенко Е. М. Разработка сеток для молниезащитных авиационных конструкций из полимерных материалов: Материалы XXV Межд. конф. "Композиционные материалы в промышленности". — Украинский инф. Центр "Наука. Техника. Технология", 2005. — 277 с.
10. Патент Франции 2582987, В 29 С 67/12, 1987.
11. <http://www.compositesworld.com/articles/lightning-strike-protection-strategies-for-composite-aircraft> 15.12.2016
12. <http://www.dexmet.com/lightning-strike-protection/> 15.12.2016
13. Каблов Е. Н., Гуняев Г. М., Ильченко С. И. и др. Патент РФ RU2217320. 2002. Многослойное молниезащитное покрытие. ФГУП "ВНИИАМ".
14. Хасуй А. Техника напыления: Пер. с японского Масленникова С. Л. — М.: Машиностроение, 1975. — 288 с.
15. Жихарев Д. Ю. Исследование проникновения излучаемых помех во внутренний объем конструкции бортовых приборов космических аппаратов // Технологии электромагнитной совместимости. 2016. № 2 (57). С. 38—43.

## Calculation of passing of electromagnetic fields having various physical nature in multilayered composite constructions of flight vehicle

A. V. OSTRIK

Institute for Problems of Chemical Physics RAS, Chernogolovka, Moscow region, Russia

V. A. GULIN

Design Office of Mechanical Engineering, Kolomna, Moscow region, Russia

*Parameters of electromagnetic fields of lightning discharges and electromagnetic impulses of powerful explosions and other generators of man-made fields are given. The modern methods of protection applied in composite constructions of flight vehicle are considered. The method of calculation of coefficient of electromagnetic radiation of shielding by means of the multilayered composite construction having the conducted layers is offered. Results of comparison of the obtained experimental and settlement data are discussed.*

*Keywords:* electromagnetic field, multilayered composite constructions, shielding of hindrances, shielding coefficient.