

УДК 692.829

*Ю.А. ХОХЛОВ, канд. техн. наук, А.Г. КРЫНИН, П.П. КИСЛЯКОВ, инженеры,
Г.Ю. ЮРКОВ, д-р техн. наук, Всероссийский научно-исследовательский институт
авиационных материалов (ФГУП «ВИАМ»), Москва*

Проектирование стеклопакетов, экранирующих радиочастотное излучение

Рассмотрена расчетная модель прохождения радиоволн через стеклопакет в приближении распространения плоской линейно-поляризованной монохроматической волны в слоистой среде с переменной диэлектрической проницаемостью с учетом интерференционных эффектов. Приведены расчетные значения коэффициентов пропускания и отражения электромагнитного излучения одно- и двухкамерных стеклопакетов с прозрачными электропроводящими покрытиями для рабочих диапазонов частот беспроводных средств связи. Показана возможность создания стеклопакетов, поглощающих радиоволны.

Ключевые слова: стеклопакет, радиочастотное излучение, прозрачное электропроводящее покрытие.

Развитие мобильной телефонии и средств беспроводной передачи данных привело к значительному росту уровня электромагнитного излучения (ЭМИ) дециметрового диапазона в крупных населенных пунктах по сравнению с природным фоном (GSM 900 – 0,89–0,96 ГГц; GSM 1800 – 1,71–1,88 ГГц; UMTS – 1,92–2,17 ГГц; Wi-Fi – 2,4 ГГц и др.). ЭМИ в данном диапазоне частот является биологически активным фактором, оказывающим влияние на окружающую среду и здоровье человека. Данная проблема отнесена к разряду серьезных экологических проблем современности. В выводах государственного доклада «О состоянии окружающей природной среды Российской Федерации в 1998 году» (разд. 8. Государственная комиссия РФ по охране окружающей среды. М., 1999. 573 с.) для защиты населения от воздействия электромагнитных полей рекомендовано наряду с обеспечением санитарных норм и правил при размещении и эксплуатации радиотехнических средств предусматривать соответствующую защиту жилых и производственных зданий.

В настоящее время разработан ряд материалов, поглощающих электромагнитное излучение дециметрового диапазо-

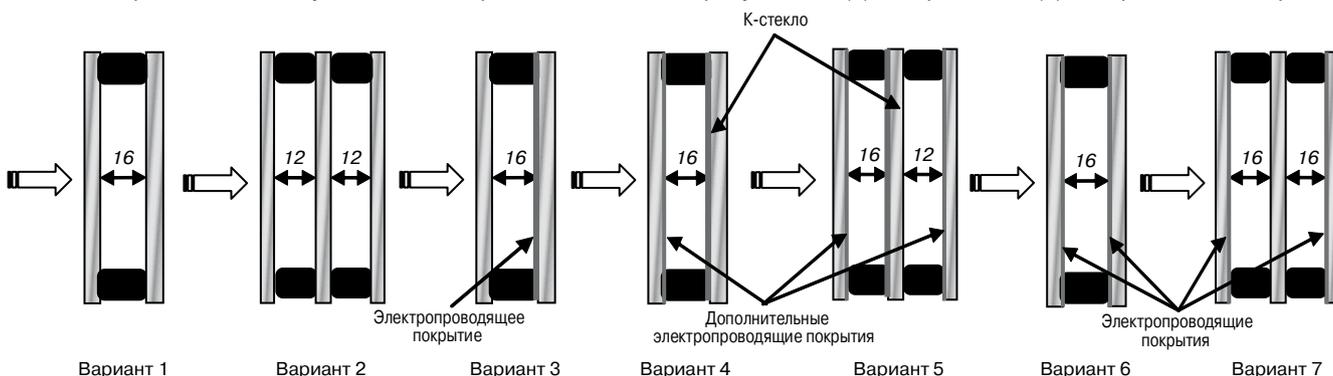
на [1–4]. Однако прозрачные ограждения (оконные конструкции) остаются наиболее уязвимым местом при защите зданий.

В данной статье проанализирована возможность создания стеклопакетов, поглощающих ЭМИ, и выполнены расчеты коэффициентов пропускания и отражения ЭМИ дециметрового диапазона для разных вариантов одно- и двухкамерных стеклопакетов (см. рисунок).

Расчеты проводили в приближении распространения плоской линейно-поляризованной монохроматической волны в слоистой среде с переменной диэлектрической проницаемостью с учетом интерференционных эффектов. Каждый слой считали плоским и изотропным. Дифракционные эффекты не учитывали.

В данном приближении решение уравнений Максвелла позволяет однозначно определить электрическое и магнитное поля в любой точке слоя, а также рассчитать амплитудные коэффициенты пропускания и отражения от любой границы раздела слоистой среды с учетом интерференции электромагнитных волн.

Формулы для расчета амплитудных коэффициентов пропускания $t(\lambda)$ и отражения $r(\lambda)$ на произвольной грани-



Расчетные схемы стеклопакетов: вариант 1 – однокамерный стеклопакет с обычным силикатным стеклом; вариант 2 – двухкамерный стеклопакет с обычным силикатным стеклом; вариант 3 – энергосберегающий стеклопакет; варианты 4 и 5 – однокамерный и двухкамерный энергосберегающие стеклопакеты с низкоэмиссионным стеклом и дополнительными электропроводящими покрытиями соответственно; варианты 6 и 7 – однокамерный и двухкамерный стеклопакеты с электропроводящими покрытиями, оптимизированными для обеспечения заданного коэффициента пропускания и максимального поглощения ЭМИ дециметрового диапазона соответственно

це раздела двух слоев с разными коэффициентами преломления при нормальном падении плоской волны имеют вид:

$$t_{i-1}^*(\lambda) = \frac{t_{i-1}(\lambda) \cdot t_i^*(\lambda) \cdot \exp(-i\varphi_i)}{1 + r_{i-1}(\lambda) \cdot r_i^*(\lambda) \cdot \exp(-2i\varphi_i)}$$

$$r_{i-1}^*(\lambda) = \frac{r_{i-1}(\lambda) \cdot r_i^*(\lambda) \cdot \exp(-2i\varphi_i)}{1 + r_{i-1}(\lambda) \cdot r_i^*(\lambda) \cdot \exp(-2i\varphi_i)} \quad (1)$$

где $t_{i-1}(\lambda) = \frac{2 \cdot n_{i-1}(\lambda)}{n_{i-1}(\lambda) + n_i(\lambda)}$; $r_{i-1}(\lambda) = \frac{n_{i-1}(\lambda) - n_i(\lambda)}{n_{i-1}(\lambda) + n_i(\lambda)}$ – амплитудные (френелевские) коэффициенты пропускания и отражения i -й границы раздела (см. рисунок) слоистой среды соответственно; $\varphi_i = \frac{2\pi \cdot n_i(\lambda) \cdot d_i}{\lambda}$ – фазовая толщина слоя; $n_i(\lambda)$ – коэффициент преломления i -го слоя; λ – длина волны излучения; d_i – толщина i -го слоя; i – индекс слоя; i – комплексная единица. Знак * обозначает эффективное значение амплитудного коэффициента (пропускания или отражения) всех слоев, расположенных между подложкой и расчетным слоем.

Амплитудные коэффициенты пропускания и отражения всей слоистой среды находят с использованием рекуррентной процедуры расчета. Расчет начинают со слоя, прилегающего к подложке, для которого определены френелевские коэффициенты на обеих границах раздела. Используя формулы (1), определяют амплитудные коэффициенты пропускания и отражения от подложки с находящимся на ней слоем. Затем, используя эти коэффициенты как новые граничные условия, проводят расчет для следующего слоя. Данную процедуру повторяют до тех пор, пока не будет добавлен последний слой, граничащий с внешней средой, из которой падает свет.

Полученные в результате расчета амплитудные коэффициенты отражения $r_0(\lambda)$ и пропускания $t_0(\lambda)$ позволяют определить энергетические коэффициенты отражения $R(\lambda)$ и пропускания $T(\lambda)$ слоистой среды, а также изменение фазы волны при отражении $\rho(\lambda)$ и пропускании $\tau(\lambda)$:

$$R(\lambda) = |r_0(\lambda)|^2; T(\lambda) = \frac{n_s}{n_0} \cdot |t_0(\lambda)|^2; \rho(\lambda) = \arg r_0(\lambda);$$

$$\tau(\lambda) = \arg t_0(\lambda). \quad (2)$$

На основе рекуррентной процедуры разработаны методы решения задач математического анализа и синтеза покрытий, которые успешно применяются для расчета и отработки технологии получения тонких пленок и многослойных покрытий [5–9] оптического диапазона спектра.

В силу единой (электромагнитной) природы оптического и радиочастотного излучения рассмотренная выше модель должна правильно описывать процесс прохождения ЭМИ дециметрового диапазона через стеклопакет оконной конструкции.

Исходными данными для расчета коэффициентов пропускания и отражения ЭМИ являются показатели преломления материалов стеклопакета. Силикатное стекло и воздушные промежутки не поглощают ЭМИ радиочастотного диапазона и характеризуются действительными значениями величины показателя преломления n , которая связана с диэлектрической проницаемостью соотношением $n = \sqrt{\varepsilon}$. Значение диэлектрической проницаемости силикатного стекла для радиочастотного диапазона принималось равным 7, что соответствует показателю преломления 2,65. Для воздуха показатель преломления равен 1.

Расчет зависимости коэффициентов пропускания и отражения от частоты ЭМИ для однокамерного (вариант 1) и двухкамерного (вариант 2) стеклопакетов с обычным силикатным стеклом показал, что основная доля электромагнитного излучения беспрепятственно проникает в помещение.

В современных оконных конструкциях применяют энергосберегающие стеклопакеты [10] с низкоэмиссионными электропроводящими покрытиями [11–12]. На строительном рынке наиболее широко представлены два вида низкоэмиссионных стекол: К-стекло с электропроводящим покрытием оксида олова и I-стекло с интерференционным многослойным покрытием на основе серебра. Наличие электропроводящего покрытия теоретически дает возможность в значительной мере ослабить поток ЭМИ, проникающий в помещение. Практическая реализация такой возможности потребует внесения изменений в конструкцию стеклопакета и оконного блока, обеспечивающих электрическое заземление электропроводящего покрытия.

Для расчетов коэффициентов пропускания и отражения таких стеклопакетов необходимо знать значения диэлектрической проницаемости или показателя преломления материала электропроводящего покрытия и его толщины. В дециметровом диапазоне ЭМИ показатели преломления и поглощения электропроводящих покрытий могут быть рассчитаны по формуле:

$$n = k = \sqrt{\frac{\sigma_0 \cdot \lambda}{4 \cdot \pi \cdot c \cdot \varepsilon_0}},$$

где $\sigma_0 = \frac{1}{R_s \cdot \delta}$ – удельная электропроводность на постоянном токе; ε_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума; λ – дли-

Расчетные значения коэффициентов пропускания T , отражения с внешней R_n и внутренней R_s сторон для разных вариантов стеклопакетов с электропроводящими покрытиями в частотных диапазонах работы средств беспроводной связи

Вариант (см. рисунок)	Частотный диапазон, ГГц					
	0,8–1		1,7–2		2–2,4	
	T , %	R_n/R_s , %	T , %	R_n/R_s , %	T , %	R_n/R_s , %
1	86	14/14	88	12/12	95	5/5
2	80	20/20	97	3/3	93	7/7
3 с низкоэмиссионным К-стеклом	0,7	82/–	1,1	73/–	1	77/–
3 с низкоэмиссионным I-стеклом	0,2	90/–	0,3	85/–	0,3	87/–
4	0,4	51/87	0,3	4/84	0,2	1,5/83
5	0,3	54/54	0,2	4/3	0,1	1,7/1,4
6	25	25/25	26	12/12	22	7/7
7	24	16/16	20	16/16	22	20/20

на волны излучения; c – скорость света; R_s – поверхностное сопротивление покрытия; δ – толщина покрытия.

В данной работе величину поверхностного сопротивления определяли методом «квадрата». Толщину покрытия определяли по результатам спектрофотометрических и эллипсометрических измерений оптических характеристик образцов низкоэмиссионных стекол.

Усредненные по десяти образцам значения толщины и удельной проводимости покрытия составили: для К-стекла $\delta=740$ нм; $\sigma_0=6,5 \cdot 10^4$ (Ом·м)⁻¹; для I-стекла $\delta=16$ нм; $\sigma_0=6,3 \cdot 10^6$ (Ом·м)⁻¹.

В процессе исследования было установлено, что значения коэффициентов пропускания и отражения ЭМИ зависят только от величины поверхностного сопротивления электропроводящих покрытий.

Результаты расчетного исследования зависимостей коэффициентов пропускания и отражения для разных вариантов стеклопакетов приведены в таблице.

Расчеты показали, что однокамерные стеклопакеты с К-стеклом и I-стеклом (вариант 3) позволяют хорошо экранировать помещение за счет отражения ЭМИ, но не решают задачу снижения электромагнитного загрязнения окружающей среды. Расчетная оптимизация величины поверхностного сопротивления R_s дополнительного электропроводящего покрытия ($R_s=460$ Ом/кв.) энергосберегающего однокамерного стеклопакета с К-стеклом (вариант 4) показала возможность уменьшения среднего значения коэффициента отражения с внешней стороны энергосберегающих стеклопакетов в диапазоне частот от 1,6 до 3 ГГц более чем в 10 раз. Однако коэффициент отражения со стороны помещения остается высоким (более 80%).

В двухкамерном стеклопакете (вариант 5) с двумя дополнительными электропроводящими покрытиями ($R_s=320$ Ом/кв.) можно обеспечить низкие коэффициенты отражения с двух сторон окна.

Коэффициент пропускания дециметрового ЭМИ энергосберегающими стеклопакетами (варианты 3–5) составляет от 0,1 до 0,5%. Это может привести к невозможности использования беспроводных средств передачи данных и соевой связи в помещениях с таким остеклением.

Для случая, когда необходимо ослабить интенсивность ЭМИ в помещении до безопасного уровня при сохранении возможности использования средств беспроводной связи, была выполнена расчетная оптимизация электропроводящих покрытий для однокамерного (вариант 6) и двухкамерного (вариант 7) стеклопакетов.

Оптимизация проводилась с целью определения характеристик электропроводящих покрытий, обеспечивающих минимальный коэффициент отражения, при ослаблении среднего значения, проходящего через стеклопакет дециметрового ЭМИ, в четыре раза. Расчеты показали, что использование двух электропроводящих покрытий с поверхностным сопротивлением 420 Ом/кв. позволит получить стеклопакеты со средними значениями коэффициентов пропускания и отражения ЭМИ, не превышающими 25 и 20% соответственно. В отдельных поддиапазонах частот коэффициент отражения не превышает 10%. Причем частота, на которой коэффициент отражения имеет минимальное значение, определяется расстоянием между электропроводящими покрытиями.

Выполненные в данной работе расчеты показали принципиальную возможность создания радиопоглощающих оконных конструкций с минимальным коэффициентом от-

ражения в требуемом диапазоне дециметрового ЭМИ при заданном коэффициенте пропускания. Для определения погрешности выполненных расчетов потребуется провести экспериментальные исследования. Однако предварительные расчеты с применением рассмотренной математической модели позволят сократить сроки и трудоемкость работ по выбору конструкции стеклопакетов, обеспечивающих не только защиту помещений, но и снижение интенсивности отраженного в окружающую среду электромагнитного излучения.

Список литературы

1. *Беляев А.А., Кондрашов С.В., Лепешкин В.В., Романов А.М.* Радиопоглощающие материалы // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. № 5. С. 348–352.
2. *Park K., Lee S., Kim C., Han J.* Application of MWNT-added glass fabric/epoxy composites to electromagnetic wave shielding enclosures // *Composite Structures*, V. 81, № 3, December 2007. Pp. 401–406.
3. *Tong X.C.* *Advanced Materials and Design for Electromagnetic Interference Shielding*. CRC Press, Boca Raton, 2008. 344 p.
4. *Козловский В.В., Софиенко И.И.* Экранирующие свойства современных материалов // *Вісник ДУІКТ*. 2009. № 3. Т. 7. 2009. С. 233–245.
5. *Богатов В.А., Марахтанов М.К., Хохлов Ю.А.* Многофункциональные оптические покрытия, получаемые методами плазменной технологии // *Конверсия в машиностроении*. 1999. № 2. С. 53–56.
6. *Богатов В.А., Кондрашов С.В., Хохлов Ю.А.* Многофункциональные оптические покрытия и материалы // *Авиационные материалы и технологии: Юбилейный науч.-технич. сб. (приложение к журналу «Авиационные материалы и технологии»)*. М.: ВИАМ. 2012. С. 343–348.
7. *Ю.А. Хохлов, А.Г. Крынин, В.А. Богатов, Кисляков П.П.* Оптические константы тонких пленок оксида индия, легированного оловом, осажденных на полиэтилентерефталатную пленку методом реактивного магнетронного распыления (ближняя инфракрасная область спектра) // *Авиационные материалы и технологии*. 2013. № 1. С. 24–28.
8. *Богатов В.А., Кондрашов С.В., Хохлов Ю.А.* Получение градиентного покрытия оксинитрида алюминия методом реактивного магнетронного распыления // *Авиационные материалы и технологии*. 2010. № 3. С. 19–21.
9. *Богатов В.А., Захаров С.С., Кисляков П.П., Крынин А.Г., Хохлов Ю.А.* Влияние режимов магнетронного напыления на оптико-физические свойства медных нанопокровов // *Нанотехнологии и наноматериалы*. 2011. № 1. С. 45–54.
10. *Ehrmann N., Reineke-Koch R.* Selectively coated high efficiency glazing for solar-thermal flat-plate collectors // *Thin Solid Films*. 2012. № 520. Pp. 4214–4218.
11. *Yamada T., Morizane T., Arimitsu T., Miyake A., Makino H., Yamamoto N., Yamamoto T.* Application of low resistivity Ga-doped ZnO films to transparent electromagnetic interference shielding material // *Thin Solid Films*. 2008. № 3. V. 517. Pp. 1027–1031.
12. *Работкин С.В., Соловьев А.А., Сочугов Н.С., Захаров А.Н., Оскомов К.В., Ковшаров Н.Ф.* Полимерная пленка с низкоэмиссионным покрытием для снижения потерь через светопрозрачные конструкции // *Известия высших учебных заведений. Физика*. Т. 54. 2011. № 11-2. С. 169–175.