

УДК 621.396.67

## АНАЛИТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ НА ИЗЛУЧЕНИЕ АПЕРТУРНЫХ АНТЕНН

**А. Р. Бестугин,**

канд. техн. наук, доцент

**В. В. Горбацкий,**

канд. техн. наук, ст. преподаватель

**В. Н. Красюк,**

доктор техн. наук, профессор

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

*Исследовано влияние различных диэлектрических покрытий разных толщин и свойств на формирование диаграммы направленности излучения апертурных антенн. Исследования проводились для диэлектриков, располагаемых непосредственно в раскрыве антенны.*

*The influence of various dielectric coatings of different thickness and properties on the construction of the orientation diagram of aperture aerials radiation is investigated. A research was carried out for the dielectric coatings placed directly in the aperture of the aerial.*

Для защиты антенных систем летательных аппаратов от воздействия внешней среды применяют диэлектрические покрытия, обтекатели. Их форма при размещении на борту определяется конфигурацией антенн, местом их расположения и внешними обводами аппарата [1–3]. При заданной форме и прочностных характеристиках диэлектрической защиты необходимо такое решение электродинамической задачи, которое дает возможность минимизировать влияние диэлектрика на характеристики излучения антенн [4].

### Расчет влияния диэлектрического покрытия на диаграмму направленности апертурной антенны

Электромагнитная энергия, излучаемая или принимаемая антенной, частично проходит через диэлектрик, а частично поглощается и отражается им. Следует стремиться к достижению максимального коэффициента прохождения и к минимальным искажениям фазового фронта прошедшей волны. При расположении покрытия в дальней зоне поля излучения антенны защита представляет собой плоский слой полупроводящего материала, на который под углом падения  $\theta$  падает плоская электромагнитная волна (рис. 1) [5].

Формулы для расчета коэффициентов прохождения и отражения имеют вид:

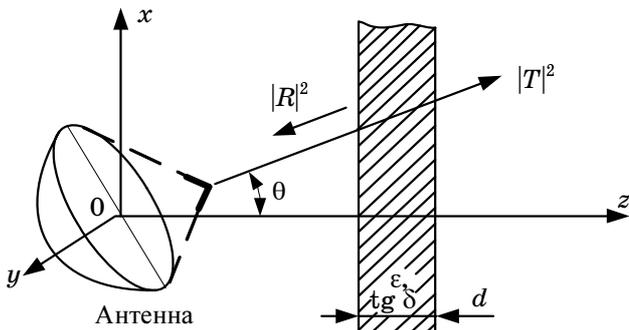
$$|T|^2 = \frac{\left[ \left(1 - |r|^2\right)^2 + 4r^2 \sin^2 \frac{\gamma d}{\cos \theta} \right] e^{-\frac{2\alpha d}{\cos \theta}}}{\left[ 1 - |r|^2 e^{-\frac{2\alpha d}{\cos \theta}} \right]^2 + 4|r|^2 \sin^2 \frac{\gamma d}{\cos \theta} e^{-\frac{2\alpha d}{\cos \theta}}}; \quad (1)$$

$$|R|^2 = \frac{|r|^2 \left[ \left(1 - e^{-\frac{2\alpha d}{\cos \theta}}\right)^2 \right] + 4 \sin^2 \frac{\gamma d}{\cos \theta} e^{-\frac{2\alpha d}{\cos \theta}}}{\left(1 - |r|^2 e^{-\frac{2\alpha d}{\cos \theta}}\right)^2 + 4|r|^2 \sin^2 \frac{\gamma d}{\cos \theta} e^{-\frac{2\alpha d}{\cos \theta}}}, \quad (2)$$

где коэффициент отражения Френеля соответственно для параллельной и перпендикулярной поляризации:

$$r = \frac{\epsilon \cos \theta - \sqrt{\epsilon - \sin^2 \theta}}{\cos \theta + \sqrt{\epsilon - \sin^2 \theta}}, \quad r_{\perp} = \frac{\cos \theta - \sqrt{\epsilon - \sin^2 \theta}}{\cos \theta + \sqrt{\epsilon - \sin^2 \theta}};$$

$\gamma = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\epsilon}$  — коэффициент фазы;  $\alpha = \frac{\pi \operatorname{tg} \delta \sqrt{\epsilon}}{\lambda}$  — коэффициент затухания;  $\lambda$  — длина волны в свобод-



■ Рис. 1. Расположение покрытия в дальней зоне поля излучения антенны

ном пространстве;  $\epsilon$  — относительная диэлектрическая проницаемость материала покрытия толщиной  $d$ ;  $\text{tg} \delta$  — тангенс диэлектрических потерь этого материала.

Для обеспечения максимального прохождения электромагнитной волны через покрытие (обтекатель) электрическая толщина его стенки должна быть равной или кратной половине волны в диэлектрике:

$$d = \frac{n\lambda}{2\sqrt{\epsilon - \sin^2 \theta}}, \quad n = 1, 2, \dots$$

Потери заметно уменьшаются, если геометрическую стенку выбрать значительно меньше длины волны  $\lambda$ , т. е.  $d \leq 0,1\lambda$ . Но в этом случае покрытие (обтекатель) обладает низкой механической прочностью по сравнению с «полуволновым».

Выражения (1) и (2) являются основополагающими для аналитических оценок радиопрозрачности плоской диэлектрической защиты антенны, находящейся в дальней зоне поля излучения. В случае более сложной формы обтекателя необходимо пользоваться формулами (1) и (2) для фиксированных углов  $\theta$  сканирования луча относительно диэлектрика.

При расположении диэлектрических покрытий в области раскрытия антенны приведенные формулы неприменимы. В этом случае имеет место сложное электродинамическое воздействие поля антенны с диэлектриком, появление многократных переотражений и поверхностных волн значительной интенсивности. Так, если антенна рассчитывается для излучения в направлении нормали к раскрытию, то энергия поверхностной волны будет определять потери и уменьшит коэффициент усиления антенны. Кроме того, она может быть причиной паразитных излучений, возникающих вследствие дифракции поля на покрытии конечных размеров.

При проектировании антенн с диэлектрическими покрытиями основной задачей является расчет их характеристик излучения. Задача о расчете поля антенны сводится к нахождению решения

уравнения Максвелла, удовлетворяющего граничным условиям и заданному распределению сторонних источников. Как правило, антенны с диэлектрическими покрытиями представляют собой различные волноводные излучатели, апертуры которых в проводящем экране покрыты слоем диэлектрика.

Антенну с диэлектрическим покрытием рассмотрим в виде излучающей апертуры в бесконечном проводящем экране, покрытом слоем диэлектрика (рис. 2).

Предположим, что электрическое поле в излучающей апертуре  $D$  направлено во всех точках вдоль оси  $y$ , т. е.  $E = E_y(x, z)$ . Метод преобразования Фурье от распределения поля в раскрытии антенны с последующим применением граничных условий на поверхности раздела сред часто применяется для исследования характеристики излучения апертур, расположенных на бесконечном проводящем экране, покрытом слоем диэлектрика.

Используя преобразование Фурье, записываем

$$E_y(x, z) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G(h, x) e^{ihz} dh, \quad (3)$$

где

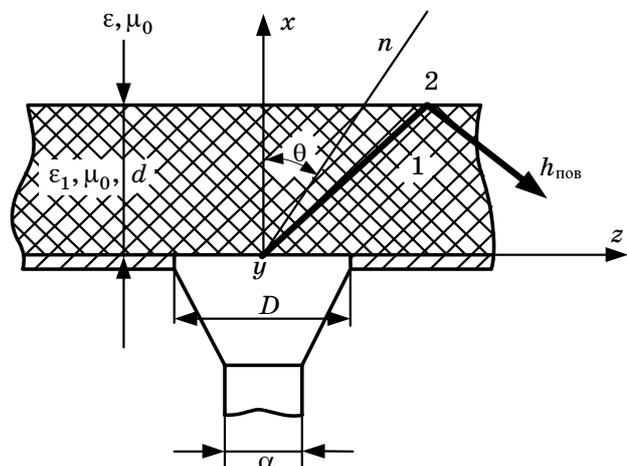
$$G(h, x) = \int_{-\infty}^{\infty} E_y(x, z) e^{-ihz} dz; \quad (4)$$

$h$  — постоянная распространения парциальной волны в направлении оси  $z$ .

Функция  $G(h, x)$ , определяемая выражением (4), удовлетворяет одномерному волновому уравнению

$$\frac{d^2 G(h, x)}{dx^2} + \beta^2 G(h, x) = 0, \quad (5)$$

где  $\beta = \sqrt{k^2 - h^2}$  — постоянная распространения парциальной волны внутри слоя.



■ Рис. 2. Антенна с диэлектрическим покрытием

Постоянная распространения парциальной волны над слоем  $\beta_0 = \sqrt{k_0^2 - h^2}$ .

Волновое число свободного пространства  $k_0 = \omega\sqrt{\mu_0\epsilon_0} = \frac{\omega}{c}$ .

Волновое число для слоя  $k = \omega\sqrt{\mu_0\epsilon_0\epsilon}$ , где  $\epsilon$  — относительная диэлектрическая проницаемость слоя;  $\mu_0$  — магнитная постоянная.

Граничные условия для рассматриваемой задачи представляются в виде  $G(h, 0) = G_0(h)$  при  $x = 0$ ;

$G$  и  $\frac{\partial G}{\partial x}$  непрерывны при  $x = d$ . Здесь  $G_0(h)$  — преобразование Фурье от функции распределения электромагнитного поля в излучающей апертуре.

Решение волнового уравнения (5) для областей 1 и 2 рассматриваемого пространства (см. рис. 2) можно представить в виде

$$G_1(h, x) = B(h)e^{i\beta x} + C(h)e^{-i\beta x}; \quad (6)$$

$$G_2(h, x) = A(h)e^{i\beta_0 x}. \quad (7)$$

Подстановка выражений (6), (7) в граничные условия позволяет написать

$$G_0(h) = B(h) + c(h);$$

$$A(h)e^{i\beta_0 d} = B(h)e^{i\beta d} + C(h)e^{-i\beta d};$$

$$A(h)e^{i\beta_0 d}\beta_0 = B(h)e^{i\beta d}\beta - C(h)e^{-i\beta d}\beta.$$

Из полученных соотношений путем несложных преобразований определяем величины  $A(h)$ ,  $B(h)$ ,  $C(h)$ , необходимые для расчета электрического поля по формуле (3):

$$A(h) = \frac{G_0(h)e^{-i\beta_0 d}}{\cos\beta d - i\frac{\beta_0}{\beta}\sin\beta d}; \quad (8)$$

$$B(h) = \frac{\beta + \beta_0}{2\beta} \frac{G_0(h)e^{-i\beta d}}{\cos\beta d - i\frac{\beta_0}{\beta}\sin\beta d}; \quad (9)$$

$$C(h) = \frac{\beta - \beta_0}{\beta} \frac{G_0(h)e^{i\beta d}}{\cos\beta d - i\frac{\beta_0}{\beta}\sin\beta d}. \quad (10)$$

Подстановка выражения (8) в (7) и (3) позволяет найти электромагнитное поле в свободном пространстве:

$$E_y(x, z) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{G_0(h)e^{-i\beta_0 d}}{\cos\beta d - i\frac{\beta_0}{\beta}\sin\beta d} e^{i(\beta_0 x + hz)} dh. \quad (11)$$

При определении поля излучения антенн, защищаемых от внешних воздействий диэлектрическими покрытиями, необходимо учитывать возникающие поверхностные электромагнитные волны на таких покрытиях. Причем при достаточно большой электрической толщине диэлектрика поверхностные волны могут включать в себя до 50% подводимой мощности. Условия их возникновения определяются при вычислении полюсов подынтегральной функции выражения (11). Эти полюса соответствуют решению уравнения

$$\cos\beta d - i\frac{\beta_0}{\beta}\sin\beta d = 0. \quad (12)$$

Нахождение действительных корней этого уравнения производится графически и сводится к следующему. Так как  $k > h > k_0$ , то  $\beta_0$  — чисто мнимая величина и ее можно обозначить как  $\beta_0 = ig$ .

Условием действительности корней уравнения (12) считается

$$(\beta d)^2 + (gd)^2 = \left(\frac{2\pi}{\lambda} d\sqrt{\epsilon - 1}\right)^2 = R^2 = \text{const}, \quad (13)$$

и его решение строится в координатах  $\beta d$  и  $gd$ . Уравнение (12) преобразуется к виду

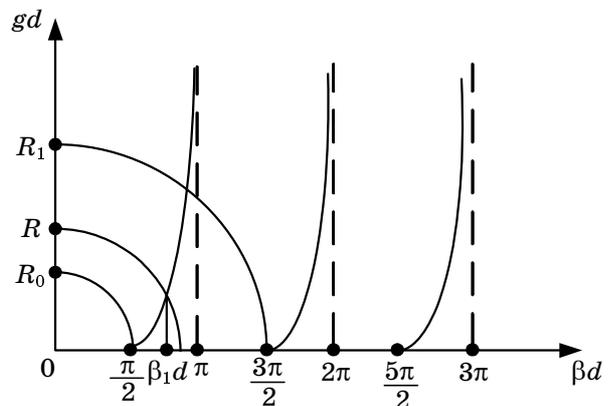
$$gd = -\beta d \text{ctg}\beta d. \quad (14)$$

Из построенных графиков для выражений (13) и (14) (рис. 3) видно, что граничными точками возникновения общих корней этих уравнений являются

$$gd = 0, \beta d = n\pi + \frac{\pi}{2}, n = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (15)$$

При постепенном увеличении  $R^2$  значение корней изменяется; так, например, при  $R_1 > R > R_0$  значение корня равно  $\beta_1 d$ .

Распределение поля поверхностной волны характеризуется экспоненциальным уменьшением



■ Рис. 3. Графики для выражений (13) и (14)

его амплитуды при удалении от диэлектрического покрытия вдоль координаты  $x$ . Поверхностная волна распространяется вдоль диэлектрика (координата  $z$ ) с коэффициентом замедления  $\eta = \frac{c}{\vartheta}$ , локализуясь у границы раздела покрытия со свободным пространством.

Название «поверхностная волна» выражает то, что поле подобных волн сосредоточено вблизи поверхности. Распространение поверхностных волн связано с явлением полного внутреннего отражения при падении плоской волны из диэлектрика 1 на плоскую границу раздела с воздухом 2 (см. рис. 2). Эта волна  $h_{\text{пов}}$  отражается от границы раздела диэлектрика со свободным пространством и проводящего экрана с диэлектриком. В соответствии с концепцией парциальных плоских волн они не проходят в воздух, а лишь индуцируют в нем поля, экспоненциально убывающие от поверхности из-за того, что угол падения на границу раздела больше угла полного внутреннего отражения. Поле локализуется у границы раздела при  $\eta > 1$  (медленные волны), при  $\eta < 1$  поле представляет собой плоскую волну, распространяющуюся под углом  $\theta$  ( $\cos\theta = \eta$ ) к границе раздела. Возбужденная поверхностная волна существенно влияет на характеристики излучения антенн с диэлектрическими покрытиями. Она может отражаться от различных неоднородностей в структуре покрытия, от деталей крепления покрытий и попадать на раскрыв антенны. При конечных размерах покрытия поверхностная волна, переизлучаясь вследствие дифракции на краях, изменяет диаграмму направленности антенны. Количество типов волн, возбуждаемых на покрытии, можно определить из выражений  $d < n\lambda/2\sqrt{\epsilon-1}$  для волн типа  $E$  и  $d < (2n+1)\lambda/4\sqrt{\epsilon-1}$  для волн типа  $H$ , где  $n$  — индекс при типе волны.

Решение интеграла (11) методом перевала позволяет записать выражение для расчета диаграммы направленности антенны с покрытием в предположении, что распределение электромагнитного поля в раскрыве рупора постоянно, т. е.  $E_y(0, z) = E_0 = \text{const}$ :

$$E_y(r, \theta) = \frac{1}{\sqrt{r}} e^{ik_0(r-d)} e^{-i\frac{\pi}{4}} \sqrt{k_0 D \cos\theta} \frac{\sin\left(\frac{k_0 D}{2} \sin\theta\right)}{\frac{k_0 D}{2} \sin\theta} \cos\left(k_0 d \sqrt{\epsilon - \sin^2\theta}\right) - i \frac{\cos\theta}{\sqrt{\epsilon - \sin^2\theta}} \sin\left(k_0 d \sqrt{\epsilon - \sin^2\theta}\right) \quad (16)$$

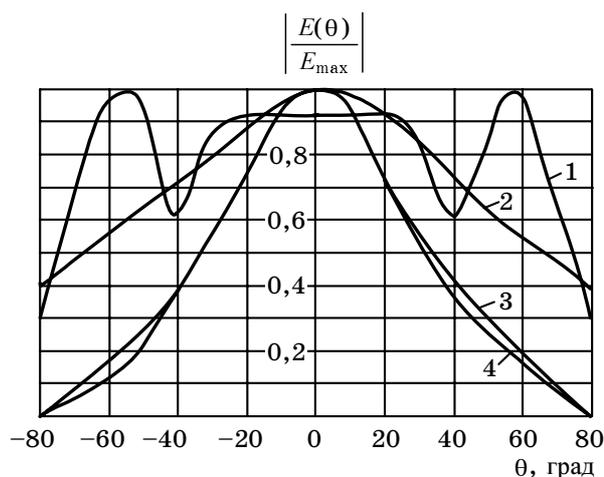
Квадрат модуля рассчитываемой напряженности электрического поля будет

$$|E_y(r, \theta)|^2 = \frac{k_0}{r} \frac{\cos^2\theta D^2 \left[ \frac{\sin\left(\frac{k_0 D}{2} \sin\theta\right)}{\frac{k_0 D}{2} \sin\theta} \right]^2}{1 + \frac{1-\epsilon}{\epsilon - \sin^2\theta} \sin^2\left(k_0 d \sqrt{\epsilon - \sin^2\theta}\right)} \quad (17)$$

Рассчитанные нормированные диаграммы направленности излучающей антенны ( $\lambda = 8$  мм) с однородным диэлектрическим покрытием показаны на рис. 4.

Для антенны 4 постоянные распространения поверхностных волн  $h_{\text{пов}4} = 1,52k_0$ , для антенн 1, 2, 3 соответственно  $h_{\text{пов}1} = 1,95k_0$ ,  $h_{\text{пов}2} = 1,75k_0$ ,  $h_{\text{пов}3} = 1,58k_0$ . Очевидно, что с увеличением толщины диэлектрического слоя число поверхностных волн растет. Постоянные распространения определены из решения дисперсионного уравнения (14).

Из сравнения кривых 3 и 4 (см. рис. 4) следует, что наличие тонкой диэлектрической пластины перед излучающим раскрывом приводит к несущественному сужению диаграммы направленности. Кривые 1 и 2 показывают, что наличие достаточно толстого диэлектрического слоя перед излучающим раскрывом вызывает значительные осцилляции в диаграмме направленности. При дальнейшем увеличении электрической толщины диэлектрического слоя частота осцилляции будет увеличиваться с одновременным ростом глубины провала в диаграмме направленности излучающей апертуры. Полученные теоретические результаты подтверждаются экспериментально на установке.



■ Рис. 4. Диаграммы направленности излучающей антенны с однородным диэлектрическим покрытием: 1 — раскрыв  $D = 2$  мм с покрытием  $\epsilon = 4$  толщиной  $d = 10$  мм; 2 — раскрыв  $D = 2$  мм без покрытия; 3 — раскрыв  $D = 8$  мм без покрытия; 4 — раскрыв  $D = 8$  мм с покрытием  $\epsilon = 4$  толщиной  $d = 10$  мм

Произведенная оценка влияния однородного диэлектрического покрытия на излучение из апертуры в проводящем экране показывает, что за счет излучения в сложную среду происходит рассогласование антенны, уменьшение КПД, а также значительное изменение формы диаграммы направленности.

### Материалы, применяемые для СВЧ-диэлектрических покрытий антенн

В зависимости от условий эксплуатации антенн применяются различные сверхвысокочастотные диэлектрические покрытия. Как известно, электрическими параметрами СВЧ-диэлектриков являются диэлектрическая проницаемость  $\epsilon$  и тангенс диэлектрических потерь  $\text{tg}\delta$ . Широкое распространение в настоящее время получили стеклопластики, которые по своим физико-механическим свойствам превосходят другие пластмассы, такие как метакрилат, полистирол, полиуретан, и составляют первую группу покрытий [4]. Наполнителем этого материала является неорганическое вещество, а связующее имеет органическое происхождение. Стеклопластик имеет пористую структуру и характеризуется неоднородными свойствами. При работе его в условиях морской воды, дождей со временем происходит заполнение пор влагой, что ведет к изменениям  $\epsilon$  и  $\text{tg}\delta$  материала. Влагостойкость стеклопластика определяется главным образом свойствами связующего. Стеклопластики обладают сравнительно хорошими  $\epsilon$  и  $\text{tg}\delta$  в сантиметровом диапазоне длин волн. В качестве связующих в них используются фенолформальдегидная, эпоксинокремнийорганическая и эпоксинофенольная смолы, сополимеры дивинила со стиролом и т. д. Наполнителями здесь являются различные типы стеклотканей. Диэлектрическая проницаемость таких стеклопластиков лежит в пределах 3–8. С увеличением объемного содержания стекла проницаемость  $\epsilon$  покрытия растет, а  $\text{tg}\delta$  незначительно падает. Была установлена зависимость изменения водопоглощения стеклопластиков на основе эпоксинокремнийорганической смолы и дивинила со стиролом от времени пребывания их в воде  $T$  при различных значениях объемного содержания стекла  $V_c$ . С ростом  $T$  водопоглощение растет, пока не достигнет определенного уровня насыщения [4].

Использование стеклопластиков при высоких температурах ограничено из-за нестабильности их электрических характеристик:  $\epsilon$  и  $\text{tg}\delta$  изменяются в значительных пределах. С возрастанием температуры и относительной влажности атмосферы проникновение водяных паров и влаги внутрь диэлектрического покрытия растет. Основной способ борьбы с проникновением влаги — нанесение специальных покрытий (например, эпоксиноаминной грунтовки и фторопластовой эмали) в несколько слоев. Толщина защитных покрытий при этом меняется от 0,14–0,15 мм (5 слоев) до 0,25–

0,26 мм (11 слоев). Количество слоев грунтовки и эмали определяется состоянием поверхности (пористость, раковины, недопропитка, механические повреждения и т. д.). Изменение  $\epsilon$  и  $\text{tg}\delta$  материала с влагозащитными покрытиями незначительно, а водопоглощение может снижаться в 20 раз.

При воздействии атмосферных осадков на диэлектрическом покрытии антенн могут конденсироваться различные гидрообразования с иными электрическими свойствами. В результате происходит искажение пространственно-поляризационной структуры проходящей электромагнитной волны, уменьшается соотношение сигнал/шум. Существуют гидрофобные кремнийорганические полимеры в виде жидкостей, смол, лаков, адгезия льда с которыми в 2 раза меньше, чем у обычных покрытий. Эффективность использования покрытий из таких полимеров зависит от состояния защищаемой поверхности и гидрометеорологических условий и снижается из-за высокой чувствительности их к солнечной радиации и слабого сцепления с покрываемой поверхностью. Срок их эксплуатации колеблется от 1 до 5 мес.

В качестве диэлектрических покрытий антенн стеклопластики используются на подводных, надводных судах и летательных аппаратах, при полете которых температура поверхности не превышает 500 °С. До температур 500–1000 °С применяются также керамопласты — смесь синтетической слюды со стеклянным или кристаллическим связующим.

Вторую группу покрытий составляют неорганические материалы. По структуре они могут быть аморфными (кварцевое стекло), кристаллическими (алюмооксидная керамика) и кристаллическими с аморфной фазой (ситалл). По химическому составу большинство применяемых материалов — неорганические окислы (оксиды), такие как двуокись кремния  $\text{SiO}_2$  (кварцевое стекло, ситаллы, пирокерамы), окись алюминия  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (сапфирит), окись бериллия (брокерит). Применяются также материалы на основе соединений азота (нитриды), серы (сульфиды) и т. д. Эти материалы, как правило, имеют температуру плавления более 1500 °С и успешно применяются для защиты антенн в основном на летательных аппаратах при гиперзвуковых скоростях полета. Начальные значения диэлектрической проницаемости и тангенса угла потерь лежат в значительных пределах и зависят от свойств керамики. С увеличением процентного содержания пор в материалах их  $\epsilon$  падает. Материалы на основе плавленого кварца выдерживают длительное воздействие температуры до 2500 °С, имеют низкие значения  $\epsilon$  и  $\text{tg}\delta$ . Для уменьшения водопоглощения производят плазменную обработку их поверхностей [4].

Исходя из требований, предъявляемых к механической прочности, гидро- и аэродинамическим характеристикам аппаратов, используют как од-

■ Электрические параметры диэлектрика при  $t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$

Диэлектрик	$f = 100\text{ Гц}$		$f = 1\text{ МГц}$		$f = 10\text{ ГГц}$	
	$\epsilon$	$\text{tg}\delta$	$\epsilon$	$\text{tg}\delta$	$\epsilon$	$\text{tg}\delta$
Бумага	3,70	0,0090	–	–	–	–
Кварц	3,85	0,0010	3,82	0,0002	3,80	0,0002
Неопрен	6,90	0,0100	–	–	–	–
Плексиглас	3,40	0,0600	2,70	0,0150	2,50	0,0050
Полихлорвинил	3,18	0,0130	2,88	0,0160	2,84	0,0055
Полистирол	2,55	0,0004	2,54	0,0002	2,54	0,0005
Полиэтилен	2,30	0,0002	2,30	0,0002	2,30	0,0004
Слюда	5,43	0,0050	5,40	0,0004	5,40	0,0003
Стеатит	6,30	0,0015	6,20	0,0004	5,40	0,0002
Стекло пирекс	5,60	0,0100	–	–	–	–
Текстолит ВЧ	6,50	0,1350	4,75	0,0410	3,25	0,0460
Гетинакс ВЧ	5,23	0,0230	4,60	0,0340	3,55	0,0700
Шелк натуральный	4,50	–	–	0,0150	–	–
Полиамиды	3,60	0,0650	3,20	0,0380	2,85	0,0125
Полиэфир	3,50	0,0030	3,40	0,0060	–	–
Эоксиды	3,90	0,0013	3,70	0,0190	3,08	0,0230
Бакелит	5,00	0,1000	4,90	0,0300	4,70	0,0500
Стеклопластики на основе:						
ВФТ-С, АСТГ6-С2	–	–	–	–	4,25–4,50	0,0100–0,0200
ФН, АСТГ6-С2	–	–	–	–	3,80–3,95	0,0160–0,200
ЭФ32-301, АСТГ6-С2	–	–	–	–	4,50–4,70	0,0140–0,0170
ТФЭ-9, ТС8/3-250Г	–	–	–	–	4,00–5,00	–
«Диенола-с», АСТГ6-С2	–	–	–	–	3,50–4,00	–
Нитрит бора	4,15	0,0010	4,15	0,0002	4,15	0,0003
Супрамика 550	–	–	–	–	6,90	0,0025
Нитрид кремния	–	–	9,40	0,0010–0,0100	–	–

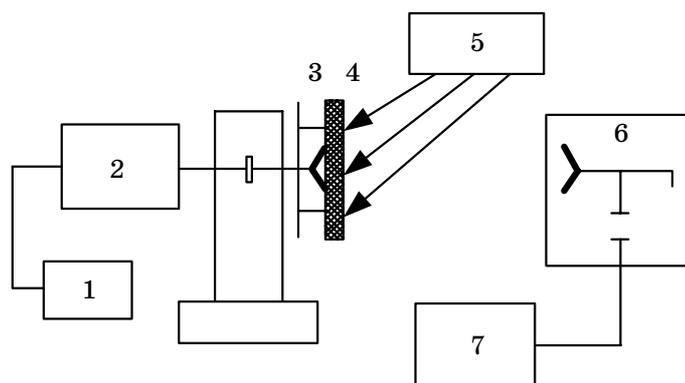
нослойные, так и многослойные диэлектрические покрытия антенн. Например, для подводных судов, корпуса которых должны выдерживать большие давления, применяют многослойные покрытия. Для фазированных антенных решеток на надводных судах используют часто однослойные однородные покрытия. На гиперзвуковых летательных аппаратах теплозащитное покрытие представляет собой многослойную неоднородную систему. Нагревостойкие диэлектрические вставки являются, как правило, однослойными с начальным однородным распределением  $\epsilon$  и  $\text{tg}\delta$  по толщине [3].

В таблице представлены значения электрических параметров некоторых материалов, используемых в диэлектрических покрытиях [4]. Вели-

чины  $\epsilon$  и  $\text{tg}\delta$  необходимо учитывать при оценке влияния материала покрытия на характеристики излучения антенн.

**Установка для экспериментальных исследований влияния различных диэлектрических покрытий на диаграммы направленности антенн**

Экспериментальные исследования предполагают снятие диаграмм направленности антенн с различными типами покрытий при разных внешних воздействиях и сравнение их с диаграммой направленности без покрытия и между собой и выпо-



■ **Рис. 5.** *Схема измерительной установки: 1 — источник питания; 2 — твердотельный генератор на диоде Ганна; 3 — излучающий H-плоскостной рупор; 4 — приспособление для установки в раскрыве антенны диэлектрических материалов; 5 — имитаторы внешних воздействий (орбитальный холод, радиационный солнечный нагрев, плазматрон и др.); 6 — приемный рупор с волноводной детекторной секцией на выходе; 7 — измерительный усилитель и комплект материалов разной толщины и диэлектрической проницаемости*

Таким образом, исследования влияния диэлектрического покрытия на характеристики излучения апертурной антенны показали, что за счет излучения в сложную среду происходит рассогласование антенны, возбуждение поверхностных волн на диэлектри-

ке и высших типов волн в апертуре, а также значительное изменение формы диаграммы направленности. Дополнительные потери в материале покрытия приводят к уменьшению КПД антенны и должны быть учтены в процессе проектирования антенн.

### Литература

1. Каплун В. А. Обтекатели СВЧ. М.: Сов. радио, 1974. 239 с.
2. Пригода В. А., Кокунько В. С. Обтекатели антенн летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1970. 288 с.

3. Красюк В. Н., Михайлов В. Ф. Бортовые антенны гиперзвуковых летательных аппаратов. СПб.: ГААП, 1996. 246 с.
4. Красюк В. Н. Антенны СВЧ с диэлектрическими покрытиями. Л.: Судостроение, 1986. 164 с.
5. Кюн Р. Микроволновые антенны. Л.: Судостроение, 1976. 660 с.