

УДК 621.369.9

## РАДИОВОЛНОВОЙ КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРОВ ОБРАЗЦОВ МНОГОСЛОЙНЫХ СТЕНОК РАДИОПРОЗРАЧНЫХ УКРЫТИЙ

К. М. Басков, А. А. Политико, В. Н. Семенов, В. А. Чистяев,  
Д. И. Акимов, И. И. Краснолобов

Институт теоретической и прикладной электродинамики РАН,  
25412, г. Москва, ул. Ижорская, 13

Статья поступила в редакцию 24 октября 2019 г., после доработки – 1 ноября 2019 г.

**Аннотация.** Представлена методика радиоволнового контроля качества изготовления стенок радиопрозрачных укрытий пятислойной конструкции. Методика основана на высокоточном измерении S-параметров в широком диапазоне частот плоских образцов стенок радиопрозрачных укрытий и последующем численном определении электродинамических параметров их слоев. Приводится пример определения параметров пятислойного образца стенки радиопрозрачного укрытия. Представлены результаты измерений частотных зависимостей коэффициента пропускания при наклонном падении электромагнитной волны плоского образца стенки радиопрозрачного укрытия.

**Ключевые слова:** радиопрозрачное укрытие, S-параметры, коэффициент пропускания, коэффициент отражения, диэлектрическая проницаемость, метод измерения в свободном пространстве.

**Abstract.** The design of radomes, frequency selective surfaces, different kinds of filters and other radiotransparent products is an urgent task that has to be solved at the stage of the development of modern aircraft for various purposes. It is obvious that for a reasonable and purposeful selection of materials that are part of the structures of radiotransparent products, it is necessary to carry out high-precision measurements of radiotechnical characteristics of these materials in a wide band of microwave range. The technique of the radio wave quality control of the production of the five-layer radome walls is presented. It is based on the following steps: 1) high-precision measurement of S-parameters of flat samples of radome walls in free space in a wide frequency band; 2) subsequent numerical calculation of the electromagnetic

parameters of the layers. High measuring accuracy is provided by the measurement system developed by ITAE RAS, in which the procedure of spatial signal processing (Time Domain) with a suppression of the Gibbs phenomena when measuring S-parameters of flat samples of structural materials is used. High-precision measurements of S-parameters in a wide bandwidth allow to calculate the parameters of the layers of flat samples of the radome wall with a complex five-layer structure. Thus, it is possible to analyze the quality of radome production technology and to develop recommendations for its improvement. An example of calculating of the radiotechnical parameters of the five-layer radome wall and the measurement results of frequency dependences of transmissivity of the flat sample of radome at an oblique incidence of electromagnetic wave are presented. In total, the presented measurement technique allows to estimate radiotechnical quality of various structural materials used in the production of radomes and to correct technology of their production.

**Key words:** radome, S-parameters, transmission coefficient, reflection coefficient, permittivity, free space method.

## **Введение**

Требования к характеристикам излучения бортовых антенных систем повышаются с каждым годом. При этом бортовые антенные системы не могут использоваться без радиопрозрачных укрытий (РПУ), которые защищают антенны от внешних воздействующих факторов. Наличие перед антенной РПУ существенно изменяет характеристики ее излучения и часто не в лучшую сторону, поэтому повышение радиотехнического качества РПУ является одной из важнейших задач, стоящих перед разработчиками антенных систем.

Для создания РПУ с многослойной стенкой с высоким технологическим качеством необходимо определить оптимальные параметры её слоёв, т.е. решить задачу синтеза. Задача синтеза многослойной диэлектрической структуры с большим количеством слоёв с заданными спектральными характеристиками в оптическом диапазоне наиболее успешно решается методом игольчатых вариаций впервые предложенным в [1]. Для определения

оптимальных параметров слоёв стенок РПУ возможно применение и более простых методов [2—4].

При производстве РПУ существенное значение имеет возможность учета технологических отклонений от оптимальных параметров конструкции стенки РПУ, а также контроль качества используемых материалов по плоским образцам стенки РПУ. В [5, 6] разработана методика локального радиоволнового контроля стенки РПУ однослойной конструкции непосредственно на поверхности готового РПУ с помощью СВЧ-датчиков. Способы радиоволнового контроля, которые исследовались в этих работах, основаны на измерениях либо только коэффициента прохождения, либо только коэффициента отражения, т.е. они не позволяют точно определить параметры всех слоёв многослойной стенки РПУ, а значит не позволяют эффективно корректировать технологию производства РПУ с многослойной стенкой.

В [7] представлен метод измерений коэффициента пропускания стенки РПУ, в котором предложен способ компенсации мешающих переотражений волны между приёмной антенной и стенкой РПУ. Указанный метод демонстрирует результаты измерений с достаточно высокой точностью, но при этом при испытаниях требуется использовать образцы с большими размерами (пять длин волн). Кроме этого, представленный метод не позволяет определить точность воспроизведения параметров слоёв в многослойной стенке.

В настоящей работе применяется метод измерения  $S$ -параметров образцов стенок, в котором все мешающие переотражения волны удалены из измеряемого сигнала. Также представлена методика радиоволнового контроля пятислойной конструкции стенки РПУ по плоским образцам его стенки, что позволяет эффективно корректировать технологию производства до изготовления готового РПУ. Для РПУ антенн, работающих в диапазонах длин волн 2...3 см, пятислойная конструкция стенки, структура которой показана на рис. 1, обеспечивает максимальный уровень радиопрозрачности РПУ в широком диапазоне частот и углов падения волны. Два менее плотных диэлектрических слоя располагаются между тремя более плотными слоями. Значения

диэлектрической проницаемости всех слоев имеют действительную  $\varepsilon'$  и мнимую  $\varepsilon''$  часть.

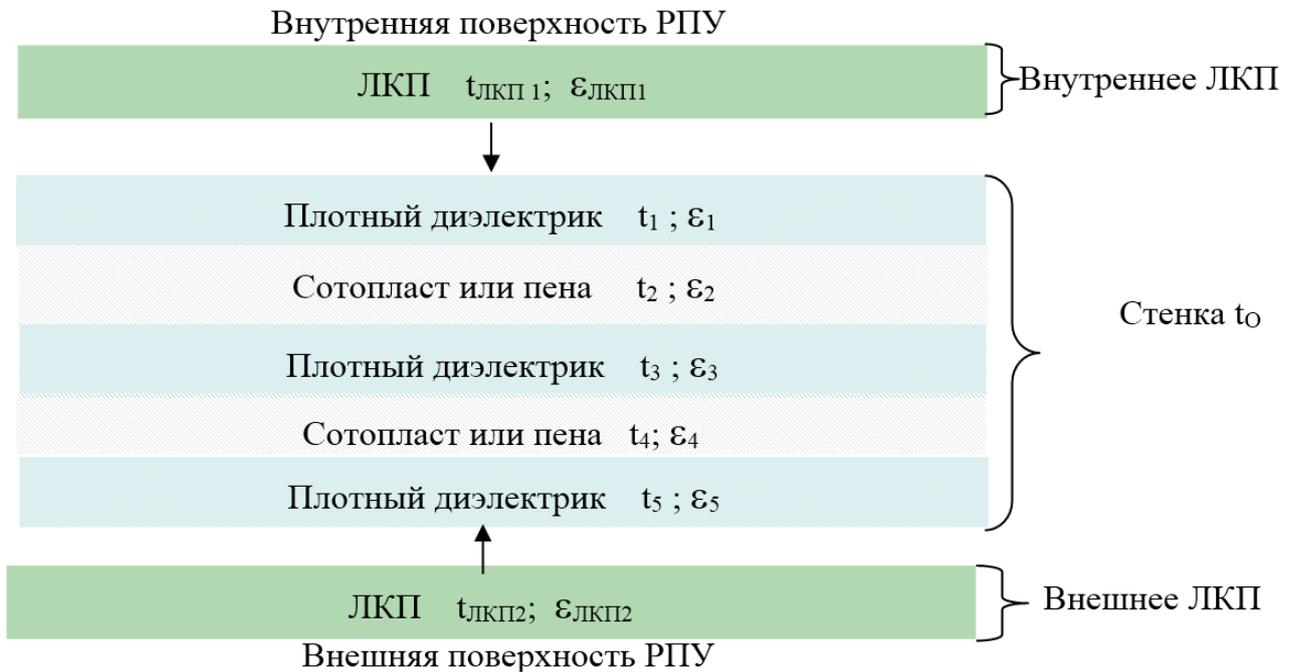


Рис.1. Структура пятислойной стенки РПУ.

## 1. Методика радиоволнового контроля пятислойных плоских образцов стенки радиопрозрачных укрытий

Нами разработана методика радиоволнового контроля производства РПУ, стенка которого имеет пятислойную конструкцию. Указанная методика основана на высокоточных измерениях в широкой полосе частот S-параметров плоских образцов стенки РПУ, а именно, параметров  $S_{11}$  (коэффициента отражения) и  $S_{12}$  (коэффициента прохождения). Высокоточные измерения S-параметров обеспечиваются измерительным комплексом (стендом), упрощенная схема которого представлена на рис. 2. На стенде проводятся измерения радиотехнических параметров образцов различных материалов и конструкций в широком диапазоне частот от 2 до 39 ГГц по аттестованной методике [8]. В основе этой методики лежит измерение S-параметров образцов материалов в свободном пространстве с помощью сверхширокополосных рупорных линзовых антенн и векторного анализатора электрических цепей. Для

устранения погрешностей и ошибок измерений, связанных с несовершенством измерительного тракта, используется набор специальных калибровок с вычитанием фона. С целью выделения полезного сигнала на фоне паразитных переотражений (помех) производится процедура временной селекции (Time Domain) с подавлением эффекта Гиббса способом, описанным в [9], что в результате позволяет получать результаты измерений  $S$ -параметров образцов с высокой точностью.

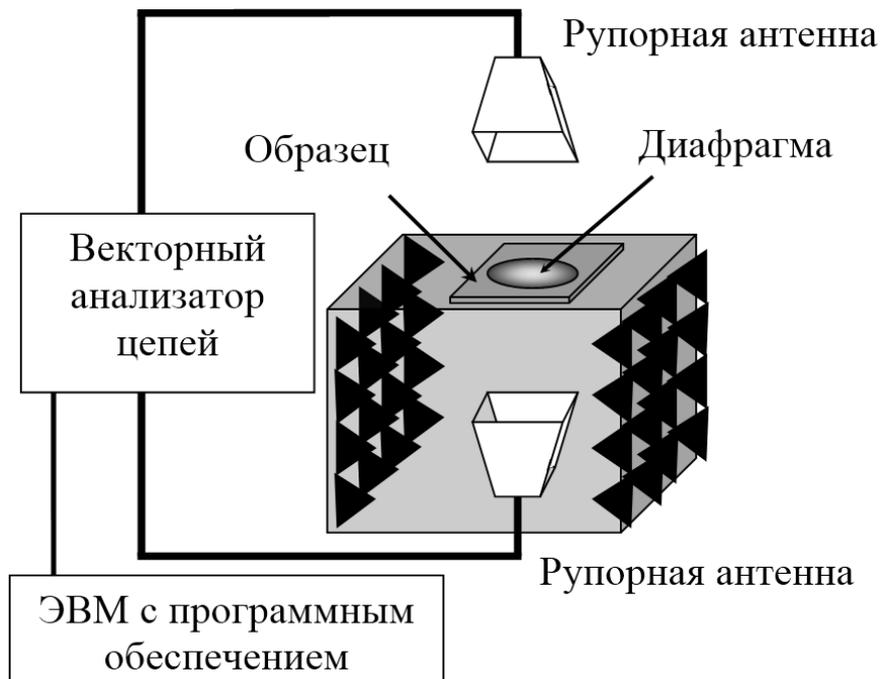


Рис. 2. Упрощенная схема измерительного комплекса для проведения радиоволнового контроля РПУ.

При проведении радиоволнового контроля стенки РПУ пятислойной конструкции определяются параметры ее слоев, а именно, толщины и диэлектрические проницаемости слоев. Для этого используются плоские образцы стенки размерами  $200 \times 200$  мм. Измерения  $S$ -параметров образцов стенки РПУ, рассчитанного на диапазон длин волн  $2 \dots 3$  см, проводятся в диапазоне частот от 5 до 18 ГГц при нормальном падении электромагнитной волны. Следует отметить, что для определения стабильности производства РПУ необходимо исследование нескольких образцов стенки одного РПУ.

Методика радиоволнового контроля производства РПУ с пятислойной стенкой состоит из четырех этапов.

На первом этапе определяются значения диэлектрических проницаемостей материалов, которые будут использоваться при производстве РПУ. В настоящее время существует множество различных подходов к измерению диэлектрической проницаемости материалов: измерения в коаксиальных, волноводных и микрополосковых линиях передачи, резонаторные методы [10], измерения с помощью зондов и пробников [11]. Настоящая методика радиоволнового контроля предполагает, что значения диэлектрических проницаемостей вычисляются с помощью измеренных параметров  $S_{12}$  плоских образцов материалов по методике измерений в свободном пространстве, описанной в [8]. Следует учесть, что РПУ часто эксплуатируется с нанесенным на него внутренним и внешним ЛКП, которые могут сильно влиять на радиотехническое качество РПУ. В связи с этим необходимо также определить значения диэлектрических проницаемостей лакокрасочных материалов, которыми окрашивается РПУ.

На втором этапе изготавливаются несколько плоских образцов пятислойной стенки без ЛКП по технологии, по которой будет изготавливаться РПУ, и оценивается точность воспроизводимости параметров (толщин и диэлектрических проницаемостей) слоев образцов по результатам измерений их S-параметров ( $S_{12}$  и  $S_{11}$ ). Определение параметров слоев образцов по результатам измерений их S-параметров осуществляется с помощью минимизации методом Коши [12] целевой функции (ЦФ), которая представляет собой зависимость от параметров многослойной структуры невязки между измеренными и вычисленными в широкой полосе частот значениями параметров  $S_{12}$  и  $S_{11}$ : коэффициента пропускания (КП) и коэффициента отражения (КО). Формула ЦФ имеет следующий вид:

$$F(\vec{x}, \vec{y}) = \frac{1}{(f_K - f_H)} \int_{f_H}^{f_K} \left[ \frac{|T_H - T_P(\vec{x}, \vec{y})|}{|T_H| + |T_P(\vec{x}, \vec{y})|} + \frac{||R_H| - |R_P(\vec{x}, \vec{y})||}{||R_H| + |R_P(\vec{x}, \vec{y})||} \right] df, \quad (1)$$

где  $T_H$  и  $R_H$  – измеренные КП и КО;  $T_P$  и  $R_P$  – рассчитанные КП и КО;

$f_H$  и  $f_K$  – начальная и конечная частота измеряемого диапазона (5 и 18 ГГц);

$\vec{x}$  – вектор подбираемых параметров слоев образца;

$\vec{y}$  – вектор известных параметров слоев образца.

Расчет КП и КО плоскостройной многослойной диэлектрической структуры осуществляется с помощью метода эквивалентных длинных линий, описанного в [13].

Следует отметить, что при подборе параметров слоёв образцов измеренные значения фазы КО использовать не стоит, т.к. обычно образцы нельзя изготовить идеально плоскими, что в итоге приводит к существенным погрешностям в измерениях фазы КО образцов.

Задача подбора параметров слоёв многослойных образцов (обратная задача синтеза) с помощью минимизации целевой функции вида (1) является некорректно поставленной и при попытке непосредственного её решения результаты могут оказаться нефизическими [14]. В [14] задача подбора параметров слоёв многослойной диэлектрической структуры в оптическом диапазоне решалась формированием системы моделей, которая должна адекватно описывать основные причины возможных отклонений результатов измерений и расчётов и которая должна учитывать наличие различных типов априорной информации. Как и в [14], в настоящей работе задача подбора параметров слоёв осуществляется с использованием всей априорной информации об образцах, которую возможно получить. Кроме этого, в настоящей работе при решении задачи подбора определяются адекватные, а не точные, значения параметров. Адекватными считаются такие параметры слоев образца, которые мало отличаются от реальных параметров слоев и могут быть использованы для численной оценки качества РПУ.

Алгоритм подбора параметров слоев пятислойных образцов осуществляется по следующим шагам.

Шаг 1. Измеряются толщины каждого слоя исследуемого образца, а также его суммарная толщина.

Шаг 2. Результаты измерений толщин слоев, а также измеренные значения диэлектрической проницаемости материалов, которые были определены на первом этапе методики радиоволнового контроля, являются первым приближением при минимизации ЦФ методом Коши. Путем минимизации ЦФ подбираются толщины трех внутренних слоев образца (слои 2—4 в структуре образца на рис. 1), остальные параметры считаются постоянными, т.е. к вектору подбираемых параметров  $\vec{x}$  относятся величины  $t_{2,3,4}$  а все остальные параметры образца относятся к вектору известных параметров  $\vec{y}$ .

Шаг 3. Изменяются значения толщин внешних слоев образца  $t_1$  и  $t_5$  в начальном приближении, а остальные начальные параметры остаются такими же, как и на шаге 2. Далее повторяется процесс минимизации ЦФ (шаг 2) до тех пор, пока не будут найдены толщины слоев образца, соответствующие минимальному значению ЦФ (1).

Шаг 4. Используя в качестве начального приближения параметры слоев, полученных на шаге 3, подбираются толщины всех слоев, т.е. в процессе минимизации к вектору подбираемых параметров  $\vec{x}$  относятся толщины всех слоев образца  $t_{1,2,3,4,5}$ .

Шаг 5. Так как значения диэлектрических проницаемостей материалов плотных слоев образца могут отличаться от значений диэлектрических проницаемостей материалов, измеренных на первом этапе методики радиоволнового контроля, процесс подбора толщин всех слоев образца повторяется до тех пор, пока не будут найдены значения действительной части  $\varepsilon'_{1,3,5}$  и мнимой части диэлектрической проницаемости  $\varepsilon''_{1,3,5}$ , при которой достигается минимум ЦФ в конце процесса подбора толщин слоев  $t_{1,2,3,4,5}$ . В качестве начальных приближений необходимо использовать параметры образца, полученные на шаге 4, за исключением значений диэлектрической проницаемости  $\varepsilon'_{1,3,5}$  и  $\varepsilon''_{1,3,5}$ . Если внешние слои стенки и центральный слой

выполнены из разных материалов (с различной диэлектрической проницаемостью), то значение диэлектрической проницаемости следует подбирать только для центрального (обычно более толстого) слоя.

Шаг 6. Используя в качестве начального приближения параметры слоев, полученные на шаге 5, процесс подбора толщин всех слоев  $t_{1,2,3,4,5}$  повторяют до тех пор, пока не будет вычислено значение действительной части диэлектрической проницаемости менее плотных слоев образца  $\varepsilon'_2$  и  $\varepsilon'_4$ , при которой достигается минимум ЦФ. Предполагается, что определение  $\varepsilon'_2$  и  $\varepsilon'_4$  осуществляется так же, как и на шагах 3 и 5, путем последовательного небольшого изменения их значений в сторону увеличения или уменьшения.

Шаг 7. Оценивается адекватность подбора параметров по суммарной толщине образца, значениям диэлектрических проницаемостей (обычно величины диэлектрической проницаемости материалов изменяются не более, чем на 10% от измеренных значений диэлектрической проницаемости материалов, полученных на первом этапе методики радиоволнового контроля) и достигнутому минимальному значению ЦФ (в зависимости от качества изготовления образца значения ЦФ в конце алгоритма подбора параметров его слоев не превышают 0,03—0,04).

Шаг 8. Принимается решение об окончании подбора параметров. Если полученные толщины неадекватны, значит образец является анизотропным и его параметры сильно меняются по площади, т.е. образец принимается непригодным для радиоволнового контроля. В этом случае следует изменить технологию формования стенки, так как при производстве РПУ сложной формы неоднородности параметров слоев его стенки по поверхности приведут к существенному снижению его радиотехнического качества.

На третьем этапе после определения параметров слоев пятислойных образцов стенки РПУ на образцы стенки наносится внутреннее ЛКП и с помощью минимизации ЦФ (1), так же как на этапе 2, определяется толщина ЛКП, приведенная к значениям действительной и мнимой частей диэлектрической проницаемости  $\varepsilon'_{\text{ЛКП}2}$  и  $\varepsilon''_{\text{ЛКП}2}$ , измеренным на этапе 1.

Параметры слоев пятислойных образцов, полученные на этапе 2, при определении толщин слоев ЛКП относятся к вектору известных параметров  $\vec{y}$ .

На четвертом этапе на образцы стенки наносится внешнее ЛКП и, так же как на этапе 3, проводится оценка толщин внешнего ЛКП, приведенных к значению диэлектрической проницаемости внешнего ЛКП, которое было измерено на этапе 1.

Примечание. При неизвестной толщине определить точно значение диэлектрической проницаемости тонких слоёв ЛКП, нанесённых на пятислойные образцы, невозможно, т.к. известно [15], что тонкие относительно длины волны ( $\sqrt{k_0 t(\varepsilon - 1 + \sin^2 \theta_{II})} \ll 1$ , где  $k_0$  – волновое число, а  $\theta_{II}$  – угол падения волны) слои диэлектрика с равными величинами  $\xi$  обладают одинаковыми электродинамическими свойствами при нормальном падении волны. Параметр  $\xi$  определяется по формуле:

$$\xi = (\varepsilon - 1)t, \quad (2)$$

где  $t$  – толщина слоя;

$\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость слоя.

Отсюда также следует, что правильно оценить диэлектрическую проницаемость можно только у центрального слоя образца. Диэлектрическую проницаемость и толщину внешних обычно тонких слоёв образца следует считать некоторыми эквивалентными параметрами, соответствующими величине  $\xi$ . При небольших отличиях истинной диэлектрической проницаемости внешних слоёв от истинной отличие вычисленных КП и КО при наклонном падении волны будет практически незаметным. Если несколько тонких слоёв находятся вплотную друг к другу, то они эквивалентны одному диэлектрическому слою с параметром  $\xi$  равным сумме параметров  $\xi_i$  каждого слоя.

Подбор толщин слоев пятислойных образцов и систем ЛКП (этапы 2-4) необходимо проводить с учетом усредненных значений диэлектрических проницаемостей материалов, измеренных на этапе 1. Частотную дисперсию измеренных диэлектрических проницаемостей материалов учитывать не стоит,

так как для радиопрозрачных материалов она слабая. Необходимо использовать усредненные в полосе частот значения мнимой и действительной частей измеренных диэлектрических проницаемостей материалов.

В заключение после проведения радиоволнового контроля предполагается произвести оценку радиотехнического качества РПУ, которым оно будет обладать, если его стенка будет иметь параметры слоев, определенные на этапах 1—4. Оценка радиотехнического качества РПУ проводится расчетным путем с помощью различных электродинамических моделей [1, 16, 17]. После оценки радиотехнического качества РПУ формулируются рекомендации по коррекции технологии производства. Например, в случае смещения частоты настройки исследованных образцов стенки РПУ при наклонном падении волны рекомендуется изменить толщину центрального слоя стенки РПУ таким образом, чтобы она была настроена на центральную частоту рабочего диапазона антенны.

## **2. Пример подбора параметров слоев пятислойного образца стенки радиопрозрачного укрытия**

Для проверки пригодности представленного алгоритма подбора параметров слоев пятислойных образцов стенки РПУ с целью оценки его радиотехнического качества был исследован образец стенки РПУ размерами 1200×400 мм. Плотные слои образца выполнены из материала на основе кварцевой ткани с действительной и мнимой частями диэлектрической проницаемости  $\varepsilon'_{1,3,5}$  и  $\varepsilon''_{1,3,5}$  приблизительно равными 3,2 и 0,03, соответственно. Менее плотные диэлектрические слои выполнены из синтактной пены с  $\varepsilon'_{2,4}$  и  $\varepsilon''_{2,4}$  приблизительно равными 2,0 и 0,02. На поверхность образца, с одной стороны, нанесен слой внешнего ЛКП. Параметры слоя внешнего ЛКП считаются известными:  $t_{\text{ЛКП}2} = 0,2$  мм;  $\varepsilon_{\text{ЛКП}2} = 3,7 + j0,2$ . При расчете параметров слоев образца параметры ЛКП относились к вектору известных параметров  $\vec{y}$ . Значения толщин слоев образца, приблизительно определенные с помощью штангенциркуля с торца образца, составляют:  $t_{1,5} = 1,0$  мм;  $t_{2,4} = 3,5$  мм;  $t_3 = 3,0$  мм.

На рис. 3 представлены внешний вид и параметры слоев пятислойного образца стенки РПУ, подобранные по описанному в разделе 2 алгоритму. Значение ЦФ после шага 6 алгоритма подбора параметров составило 0,0072. Полученные параметры слоев пятислойного образца являются адекватными, так как полная толщина образца мало отличается от измеренной толщины, а значение невязки в конце алгоритма составляет менее 1%.

Из результатов расчета параметров слоев пятислойного образца можно отметить, что материал, из которого выполнены плотные диэлектрические слои образца, обладает высоким радиотехническим качеством: низкой диэлектрической проницаемостью и малыми диэлектрическими потерями. Материал в виде синтактной пены является неподходящим материалом для изготовления высококачественных РПУ с пятислойной конструкцией стенки: синтактная пена обладает высоким значением диэлектрической проницаемости и высокими диэлектрическими потерями.

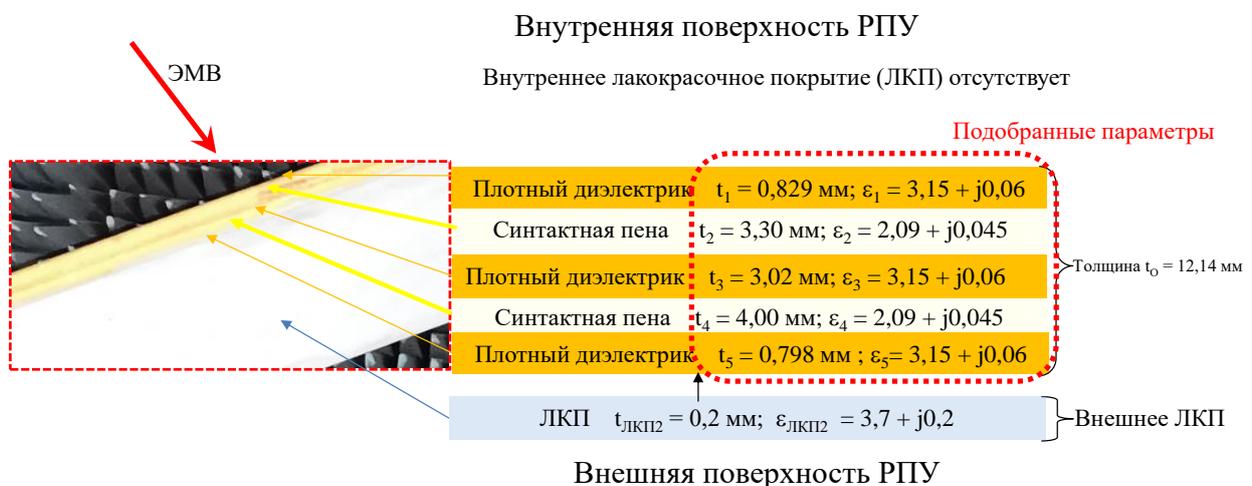


Рис. 3. Внешний вид и подобранные параметры слоев пятислойного образца стенки РПУ.

На рис. 4 представлены результаты расчета и измерений КП и КО исследуемого пятислойного образца при нормальном падении волны. Следует отметить, что у качественного образца с однородными параметрами слоев по всей его площади измеренные и рассчитанные значения модуля КО, а также модуля и фазы КП совпадают практически идеально, если в расчетах

использовать параметры слоев, подобранные по описанному выше алгоритму (раздел 2). Вычисленные значения фазы КО с результатами измерений несколько не совпадают, так как образец не является идеально плоскопараллельным. В этой связи использовать измеренную частотную зависимость фазы КО при подборе параметров не представляется возможным.

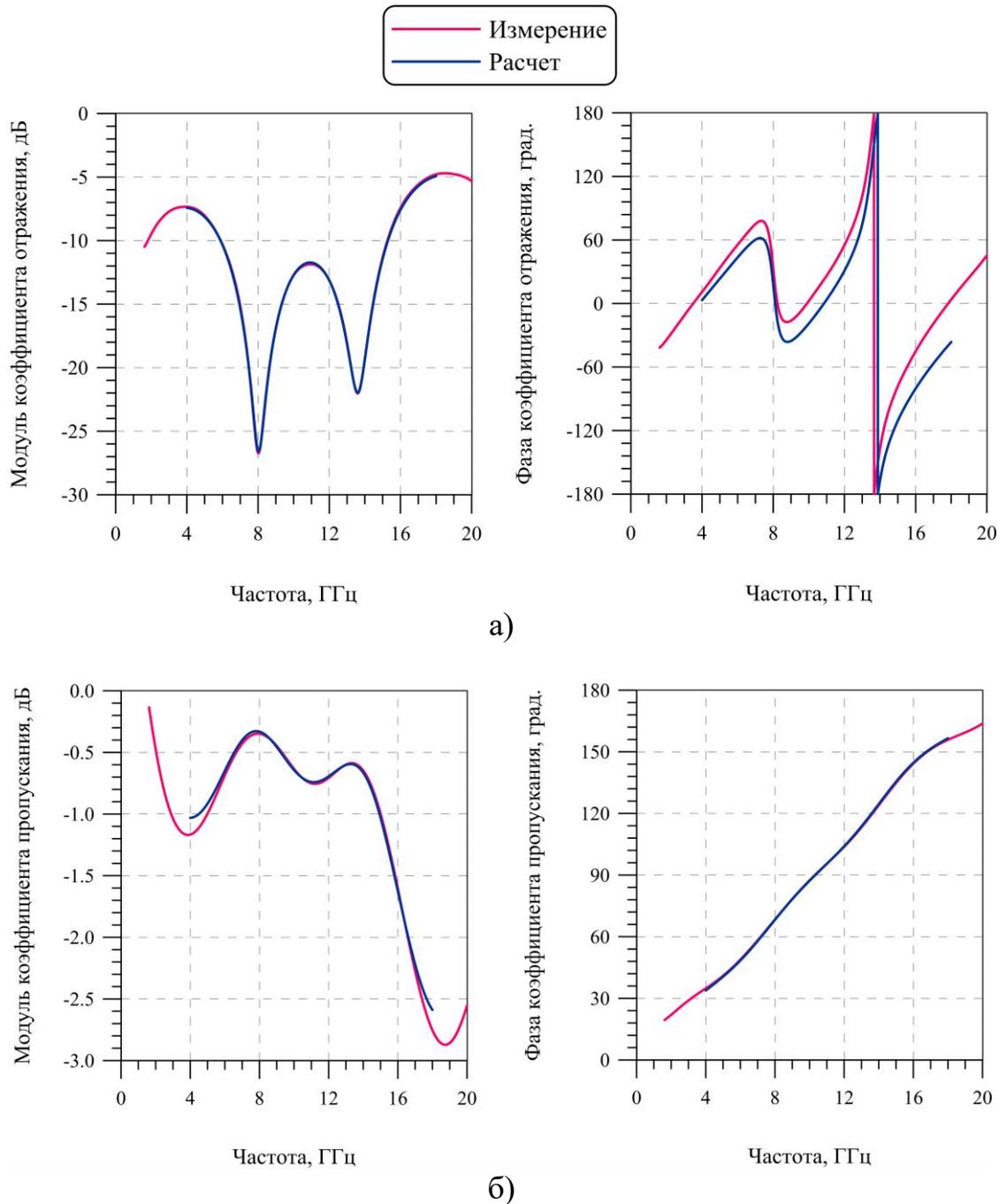


Рис. 4. Измеренные и рассчитанные частотные зависимости модуля и фазы КО (а) и модуля и фазы КП (б) пятислойного образца стенки РПУ.

### 3. Измерение коэффициента пропускания образца стенки радиопрозрачного укрытия при наклонном падении волны

Измерительный стенд, описанный во втором разделе настоящей статьи, позволяет проводить измерения КП образцов не только при нормальном падении электромагнитной волны, но и для случая наклонного падения волны при параллельной (Е) и перпендикулярной (Н) поляризациях. При проведении измерений КП образца в случае наклонного падения волны с помощью специально разработанной кинематической схемы изменяется угловое положение образца относительно плоскости измерительной диафрагмы, в это время в автоматизированном режиме происходит измерение частотных зависимостей КП. Измерение угла падения волны определяется с помощью инклинометра, который определяет угол наклона образца относительно плоскости диафрагмы измерительного стенда. Далее результаты измерений синхронизируются и обрабатываются.

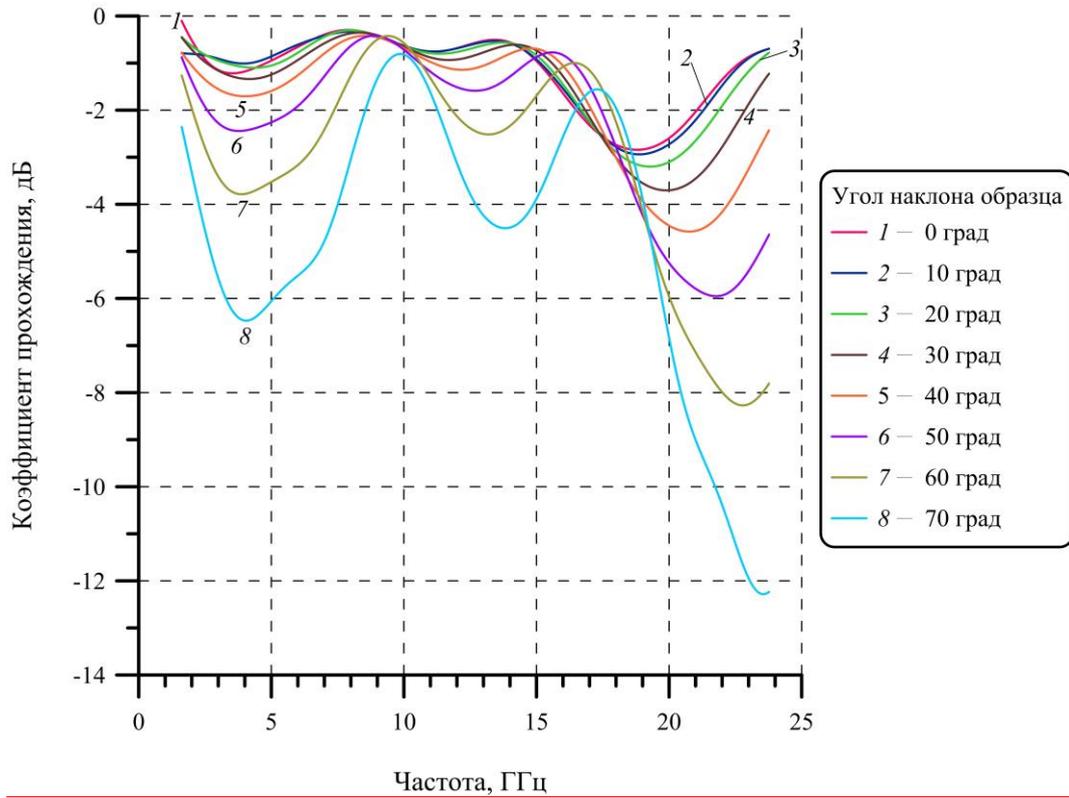


а)

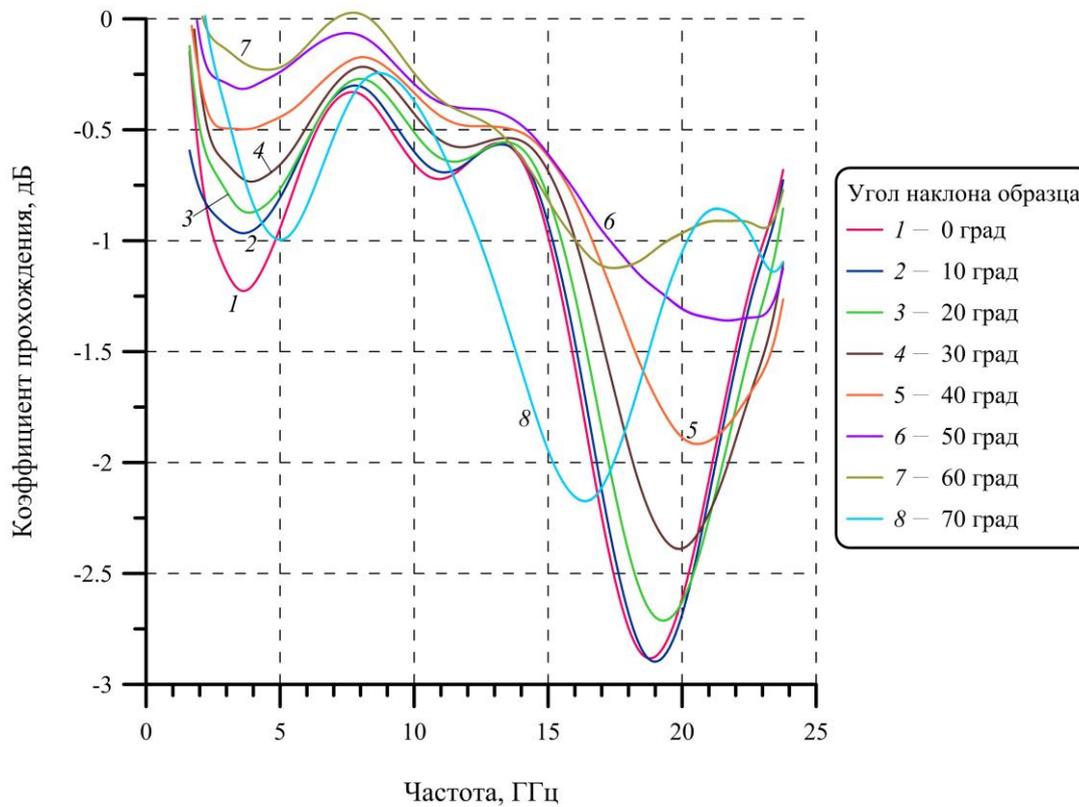


б)

Рис. 5. Внешний вид пятислойного образца при проведении измерений частотных зависимостей КП для различных углов падения волны при Н-поляризации (а) и при Е-поляризации (б).



а)



б)

Рис. 6. Измеренные частотные зависимости КП пятислойного образца для различных углов падения волны при Н-поляризации (а) и Е-поляризации (б).

На рис. 5 в качестве примера показан процесс измерений угловых зависимостей КП пятислойного образца размерами 1200×400 мм, параметры которого приведены на рис. 3.

На рис. 6 представлены измеренные частотные зависимости КП пятислойного образца при разных углах падения волны при Н- и Е-поляризациях. Полученные частотные зависимости помогают проводить анализ радиотехнического качества стенки РПУ. Например, видно, что образец стенки РПУ настроен на частоту 10 ГГц. Полоса прозрачности составляет 1,1 ГГц по уровню 1,0 дБ при угле падения волны 70 градусов при Н-поляризации. При этом для случая нормального падения электромагнитной волны частота настройки образца (частота, при которой наблюдается максимальный уровень КП) смещена в область более низких частот.

По измеренным значениям КП образца стенки РПУ при различных углах падения электромагнитной волны можно проверить правильность предложенного в разделе 2 алгоритма подбора параметров слоев образцов стенки РПУ пятислойной конструкции. На рис. 7 представлены измеренные и вычисленные с использованием подобранных параметров частотные зависимости модуля и фазы КП пятислойного образца при разных углах падения волны при Н-поляризации.

Из графиков, приведенных на рис. 7, видно, что измеренные и вычисленные частотные зависимости КП при Н-поляризации падающей волны совпадают с высокой степенью точности. Отличия в измеренных и вычисленных значениях модуля КП не превышают 0,2 дБ. Вычисленные и измеренные частотные зависимости фазы КП практически не отличаются.

На рис. 8 представлены измеренные и вычисленные с использованием подобранных параметров частотные зависимости модуля и фазы КП пятислойного образца при разных углах падения волны при Е-поляризации.

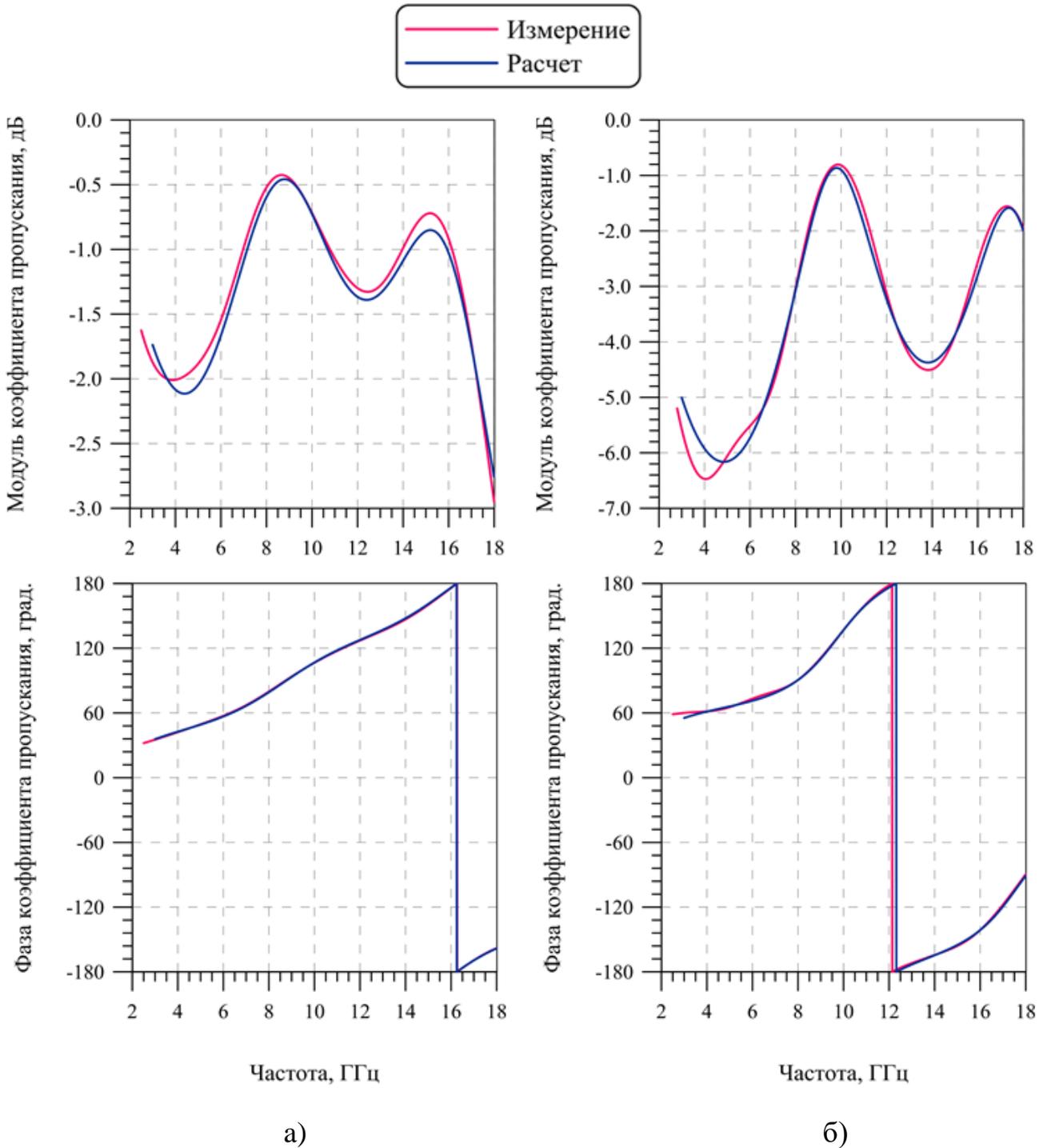


Рис. 7. Измеренные и вычисленные частотные зависимости модуля и фазы КП пятислойного образца при углах падения волны 45 град (а) и 70 град (б) при Н-поляризации.

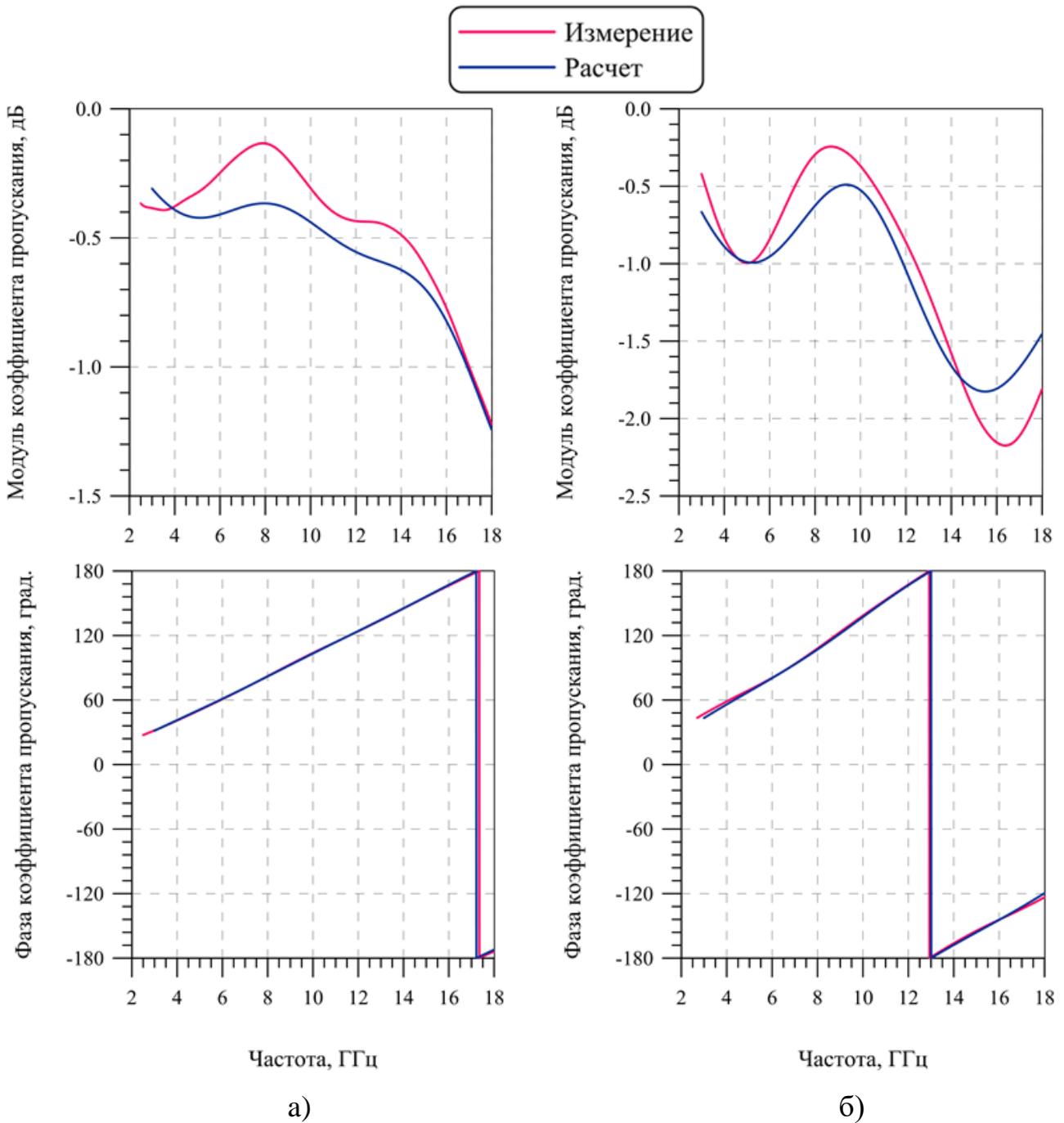


Рис. 8. Измеренные и вычисленные частотные зависимости модуля и фазы КП пятислойного образца при углах падения волны 45 град (а) и 70 град (б) при Е-поляризации.

Как и при Н-поляризации, вычисленные и измеренные частотные зависимости фазы КП пятислойного образца при Е-поляризации хорошо совпадают. Однако совпадение частотных зависимостей модуля КП при наклонном падении волны при Е-поляризации несколько хуже, чем при Н-поляризации, что связано с большим влиянием краев образца на результаты измерений.

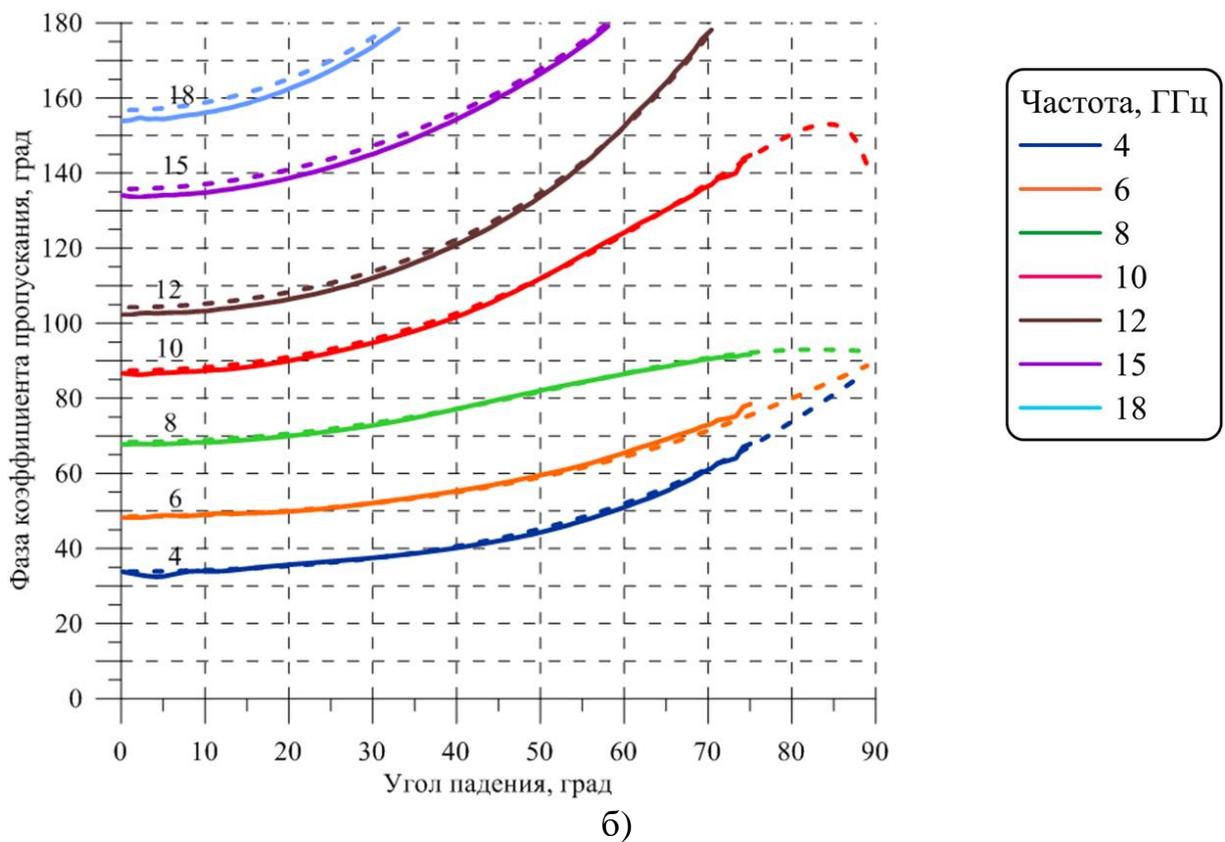
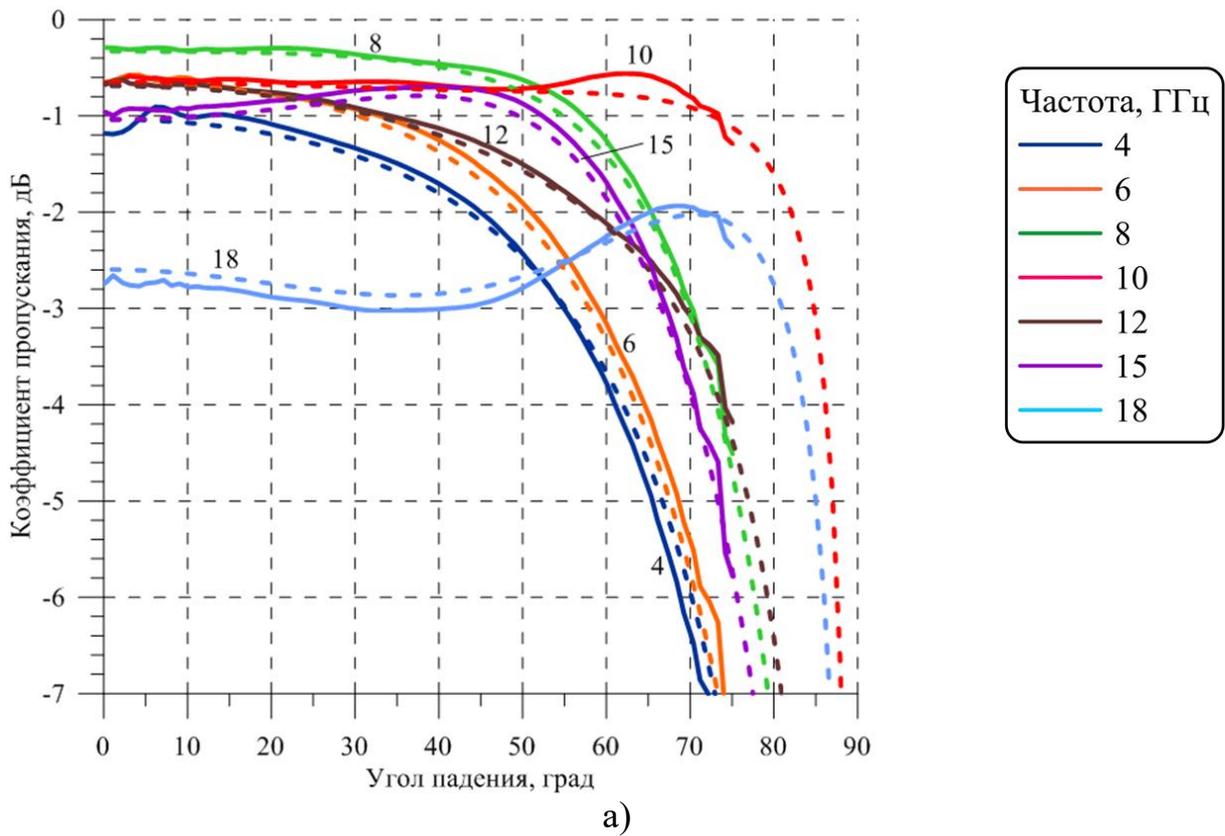


Рис. 9. Вычисленные и измеренные угловые зависимости модуля КП (а) и фазы КП (б) при Н-поляризации падающей волны на фиксированных частотах (сплошными линиями показаны результаты измерений; штриховыми линиями показаны результаты расчета).

На рис. 9 приведены вычисленные и измеренные угловые зависимости

модуля и фазы КП пятислойного образца при фиксированных частотах при Н-поляризации падающей волны, при которой наблюдается минимальный уровень радиопрозрачности стенок РПУ из диэлектрических материалов. В этом случае, как и на рис. 7, результаты измерений и расчетов очень близки. Небольшие отличия кривых, изображенных на графиках, в области высоких частот рассматриваемого диапазона связаны с некоторой неоднородностью параметров слоев по площади образца с достаточно большими габаритными размерами.

Приведенные на рис. 7—9 сравнения результатов измерений и расчетов с использованием подобранных параметров свидетельствуют об адекватности алгоритма подбора параметров слоев пятислойных образцов, предложенного в настоящей статье. Таким образом, описанный алгоритм позволяет достаточно точно подбирать параметры слоев образцов РПУ пятислойной конструкции. Далее с помощью подобранных параметров слоев возможно проводить вычисления электродинамических свойств стенки РПУ при различных углах падения электромагнитной волны и при любой поляризации излучения.

## **Заключение**

Представленная в настоящей работе методика радиоволнового контроля качества производства радиопрозрачных укрытий (РПУ) основана, в первую очередь, на использовании высокоточных результатов измерений S-параметров плоских образцов его стенки. Высокую точность измерений обеспечивает разработанный измерительный стенд [2], в котором при проведении измерений S-параметров плоских образцов конструкционных материалов в свободном пространстве используется процедура пространственной фильтрации сигналов Time Domain с подавлением эффекта Гиббса.

На основании результатов измерений S-параметров образцов разработан алгоритм расчета параметров слоев плоских образцов стенки РПУ со сложной пятислойной конструкцией. Таким образом, появляется возможность проводить анализ качества технологии производства РПУ и разрабатывать рекомендации

по ее улучшению. В указанном алгоритме при подборе параметров используется процедура минимизации методом Коши зависящей от параметров стенки РПУ целевой функции, которая является невязкой между результатами измерений и расчета. Следует учитывать, что функции многих переменных, к которым принадлежит целевая функция, имеют большое число локальных минимумов, что приводит к многочисленным вариантам решения задачи минимизации. В итоге многие из вариантов набора параметров слоев могут быть неадекватными, т.е. сильно отличающимися от реальных параметров слоев исследуемого образца. Это может привести к неправильной оценке технологии производства РПУ. Представленный алгоритм позволяет подбирать параметры слоев пятислойных образцов с высокой точностью, что было проверено ранее многочисленными экспериментами по оценке качества технологий производства радиопрозрачных укрытий различного назначения.

Описанный в настоящей работе измерительный комплекс позволяет проводить измерения коэффициентов пропускания образцов конструкционных материалов в широкой полосе частот при углах падения электромагнитной волны до 70 градусов. Возможность проведения измерений коэффициентов пропускания образцов при наклонном падении волны является необходимым инструментом для оценки радиотехнического качества материалов, которые могут применяться при производстве РПУ, особенно с анизотропными свойствами.

Материалы, приведённые в настоящей работе, докладывались на XXII Международной конференции «Конструкции и технологии получения изделий из неметаллических материалов» (г. Обнинск) и на Международной конференции «2019 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves» («RSEMW-2019», п. Дивноморское).

## Литература

1. Тихонравов А. В. О методе синтеза оптических покрытий, использующим необходимые условия оптимальности. // Вест. Моск. Ун-та, сер. 3, Физика. Астрономия, 1982, т. 23, № 6, с. 91—93.
2. Каплун В.А. Обтекатели антенн СВЧ. – Москва, Сов. радио, 1974. – 240 с.
3. Пригода Б.А. Кокунько В.С., Обтекатели антенн летательных аппаратов – М.: Машиностроение, 1978, с. 39—42.
4. Измайлов В.В. Антенны – М: Связь, 1971 г., вып. 10, с. 6—20.
5. Калашников В.С. Системы испытаний и диагностирования радиотехнического качества антенных обтекателей на этапах их проектирования и изготовления. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. Санкт-Петербург, СПб ГУАП, 1999. – 278 с.
6. Балашов В.М., Бузинов И.А., Смирнов А.О. Оценка погрешностей СВЧ-датчиков радиоволнового контроля антенных обтекателей // Радиопромышленность. 2017. № 4. С. 80—84.
7. Самбуров Н.В. Многочастотный способ измерения потерь в обтекателях // Вестник ЮУрГУ. 2015, Т. 15, № 3. С. 83—94.
8. Семененко В.Н., Чистяев В.А., Политико А.А., Басков К.М. Стенд для измерения в свободном пространстве радиофизических параметров материалов в сверхширокой полосе сверхвысоких частот. // Измерительная техника. 2019. №2, с. 56—59.
9. Pan C. Gibbs Phenomenon Removal and Digital Filtering Directly through the Fast Fourier Transform. // IEEE Transaction on Signal Processing. 2001, Vol. 49, № 2, February, pp. 444—448.
10. Дьяконова О. А., Казанцев Ю. Н. Резонатор для измерения диэлектрической проницаемости тонких плёнок. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2019. № 7. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/jul19/13/text.pdf>
11. Jilani M.T., Rehman M.Z., Khan A.M., Khan M.T., Ali S.M. “A Brief Review of Measuring Techniques for Characterization of Dielectric Materials”, Int. J. Inf. Technol. Electr. Eng., vol. 1(1), December 2012, pp. 1—5.

12. Рейзлин В.И. Численные методы оптимизации. – Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 105 с.
13. Бодров В.В., Сурков В.И. Математическое моделирование устройств СВЧ и антенн. – Москва, Изд-во МЭИ, 1994. – 96 с.
14. Трубецков М.К. Обратные задачи синтеза и распознавания в оптике многослойных покрытий. Диссертация на соискание учёной степени доктора физико-математических наук. Москва, МГУ, 2001. – 337 с.
15. Senior N.B.A., Volakis J.L. Sheet simulation of a thin dielectric layer. // Radio Science, 1987, Vol. 22, №7, December, pp. 1261—1272.
16. Басков К.М., Федоренко А.И., Федоров С.А. Методика расчета радиотехнических характеристик системы антенна-обтекатель. // Журнал радиоэлектроники: электронный журнал. 2016. №2. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/feb16/11/text.pdf>
17. Wu D.C.F., Rudduck R.C. Plane wave Spectrum-Surface integration technique for Radome analysis. // IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1974, №5, May. pp. 497—500.

**Для цитирования:**

Басков К.М., Политико А.А., Семенов В.Н., Чистяев В.А., Акимов Д.И., Краснолобов И.И. Радиоволновой контроль параметров образцов многослойных стенок радиопрозрачных покрытий. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2019. № 11. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/nov19/12/text.pdf>. DOI 10.30898/1684-1719.2019.11.12