

## СВЧ-СПОСОБ ОБНАРУЖЕНИЯ И ОЦЕНКИ ДЕФЕКТА ТИПА «ОТСЛОЕНИЕ» В ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЯХ ВООРУЖЕНИЯ, ВОЕННОЙ И СПЕЦИАЛЬНОЙ ТЕХНИКИ И УСТРОЙСТВО ЕГО РЕАЛИЗАЦИИ

**В.А. Манин<sup>1</sup>, А.И. Казьмин<sup>1</sup>, П.А. Федюнин<sup>1</sup>, Н.А. Тренин<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия им. профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», г. Воронеж,

<sup>2</sup> ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия им. профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», филиал, г. Челябинск

При проектировании авиационных комплексов для получения заданного уровня эффективной поверхности рассеяния радиопоглощающих материалов и покрытий имеют строго заданные параметры: переменную по профилю толщину, сложную структуру с меняющимися значениями комплексных диэлектрической и магнитной проницаемостей.

Реализовать в полной мере свойства современных покрытий возможно только при строгом соблюдении технологических режимов и допусков при их нанесении. Такие же жесткие ограничения накладываются и на допуск по значениям диэлектрической и магнитной проницаемостей радиопоглощающих покрытий.

Задача обеспечения надежной адгезии радиопоглощающих покрытий к обшивкам самолета, выполненным из различных материалов и подвергнутых разнообразной поверхностной обработке, достаточно сложна. При недостаточной адгезии высокие внутренние напряжения приводят к отслоению, а при высокой адгезии – к растрескиванию радиопоглощающих покрытий.

В ходе эксплуатации образцов авиационных комплексов, особенно в сложных условиях и при предельных механических и температурных нагрузках, неизбежны ситуации, когда в радиопоглощающих покрытиях будут возникать различные дефекты в виде отслоений, растрескиваний, сколов, царапин и т. п., что приведет к увеличению эффективной поверхности рассеяния и снижению боевых возможностей.

Разработан СВЧ-способ обнаружения неоднородностей диэлектрических и магнитодиэлектрических покрытий на металле и оценки их относительной величины, заключающийся в создании над поверхностью диэлектрического или магнитодиэлектрического покрытия поля поверхностной медленной волны СВЧ-диапазона, измерения напряженности поля по всей поверхности материала в нормальной относительно направления распространения волны плоскости, определении по величине затухания поля электрофизических параметров, а по степени отклонения коэффициента затухания поля от среднего значения – границы отслоения покрытия и величину его отслоения от подложки.

*Ключевые слова:* вооружение, военная и специальная техника, радиопоглощающее покрытие, поверхностная электромагнитная волна, коэффициент ослабления поля, дефект, отслоение, авиационный комплекс.

Снижение радиолокационной заметности в настоящее время рассматривается как один из действенных путей повышения живучести и боевой эффективности вооружения, военной и специальной техники (ВВСТ) в целом и образцов авиационных комплексов (АК), в частности. Одним из распространенных и эффективных способов снижения радиолокационной заметности АК является применение радиопоглощающих материалов (РПМ) и покрытий (РПП). Наилучшие результаты по снижению радиолокационной заметности на основе РПМ и РПП достигаются при индивидуальном по элементам поверхности образца ВВСТ применении с заданными радиофизическими характеристиками от 34 до нескольких десятков различных РПМ и РПП и многочисленных конструкционных материалов [1, 2].

## Краткие сообщения

При проектировании АК для получения заданного уровня эффективной поверхности рассеяния (ЭПР) РПМ и РПП имеют строго заданные параметры: переменную по профилю толщину, сложную структуру, с меняющимися значениями комплексных диэлектрической и магнитной проницаемостей.

Реализовать в полной мере свойства современных покрытий возможно только при строгом соблюдении технологических режимов и допусков при их нанесении. Например, толщина слоя РПП, как правило, не должна отклоняться от заданной более чем на 0,05–0,1 мм [1]. Такие же жесткие ограничения накладываются и на допуск по значениям диэлектрической и магнитной проницаемостей РПП.

Задача обеспечения надежной адгезии РПП к обшивкам самолета, выполненным из различных материалов и подвергнутых разнообразной поверхностной обработке достаточно сложна. При недостаточной адгезии высокие внутренние напряжения приводят к отслоению, а при высокой адгезии – к растрескиванию РПП [1].

Кроме того, в ходе эксплуатации образцов АК, особенно в сложных условиях и при предельных механических и температурных нагрузках, неизбежны ситуации, когда в РПП будут возникать различные дефекты в виде отслоений, растрескиваний, сколов, царапин и т. п., что приводит к увеличению эффективной поверхности рассеяния (ЭПР) АК и снижению его боевых возможностей.

Вместе с тенденцией удорожания самолетов растут и требования к ресурсам и срокам службы всех систем и агрегатов. Это относится и к системам покрытий, используемым на самолетах, так как стоимость оснащения самолета этими системами достаточно высока.

Таким образом, основным условием обеспечения заданного уровня ЭПР АК является контроль и поддержание параметров РПМ и РПП в заданных пределах при его создании и в процессе эксплуатации.

Вместе с тем, существующие способы контроля не обеспечивают точное определение электрофизических параметров и надежное обнаружение дефектов РПМ и РПП, в том числе дефектов в виде отслоения (адгезии) покрытия. Большинство известных способов реализованы по принципу «на прохождение» электромагнитных волн через материал и не обеспечивают возможность измерения и контроля требуемого состава параметров РПП, нанесенных на металлические поверхности.

Все вышеприведенное определяет актуальность проведения исследований и разработок новых и повышение эффективности известных бесконтактных методов и устройств дефектоскопии широкого класса диэлектрических и магнитодиэлектрических покрытий.

Авторами разработан СВЧ-способ обнаружения неоднородностей диэлектрических и магнитодиэлектрических покрытий на металле и оценки их относительной величины, заключающийся в создании над поверхностью диэлектрического или магнитодиэлектрического покрытия поля поверхностной медленной волны СВЧ-диапазона, измерении напряженности поля по всей поверхности материала в нормальной, относительно направления распространения волны плоскости, определении по величине затухания поля электрофизических параметров, а по степени отклонения коэффициента затухания поля от среднего значения – границы отслоения покрытия и величину его отслоения от подложки.

Суть данного метода заключается в следующем. С помощью устройства возбуждения 1 (рис. 1, а) создается электромагнитное поле поверхностных медленных волн, вдоль расположенного на электропроводящей металлической подложке 2, диэлектрического покрытия 3.

С помощью системы приёмных вибраторов 4 в начальной точке измерений  $(x_1, z_1)$ , расположенной на линии максимума диаграммы направленности (ДН), в дальней зоне (ДЗ) устройства возбуждения 1 медленной поверхностной волны, направленной вдоль оси  $Z$ , измеряется напряжённость поля  $E$  поверхностной волны в нормальной плоскости относительно направления её распространения (в точке  $y$ ). Перемещая приёмный вибратор на шаг  $\Delta y$ , измеряется напряжённость поля поверхностной волны в точке  $(y + \Delta y)$ .

После этого рассчитывается коэффициент нормального затухания  $\alpha_1$  из выражения:

$$\alpha_1 = \alpha(y_1) = \frac{1}{\Delta y} \ln \left[ \frac{E(y_1)}{E(y_1 + \Delta y)} \right], \quad (1)$$

где  $E(y_1)$  и  $E(y_1 + \Delta y)$  – напряжённости поля поверхностной волны в нормальной плоскости относительно направления распространения в разнесённых точках измерений  $(y_1)$  и  $(y_1 + \Delta y)$ ;  $\Delta y$  – расстояние (шаг) между точками измерений (по оси  $Y$ ).

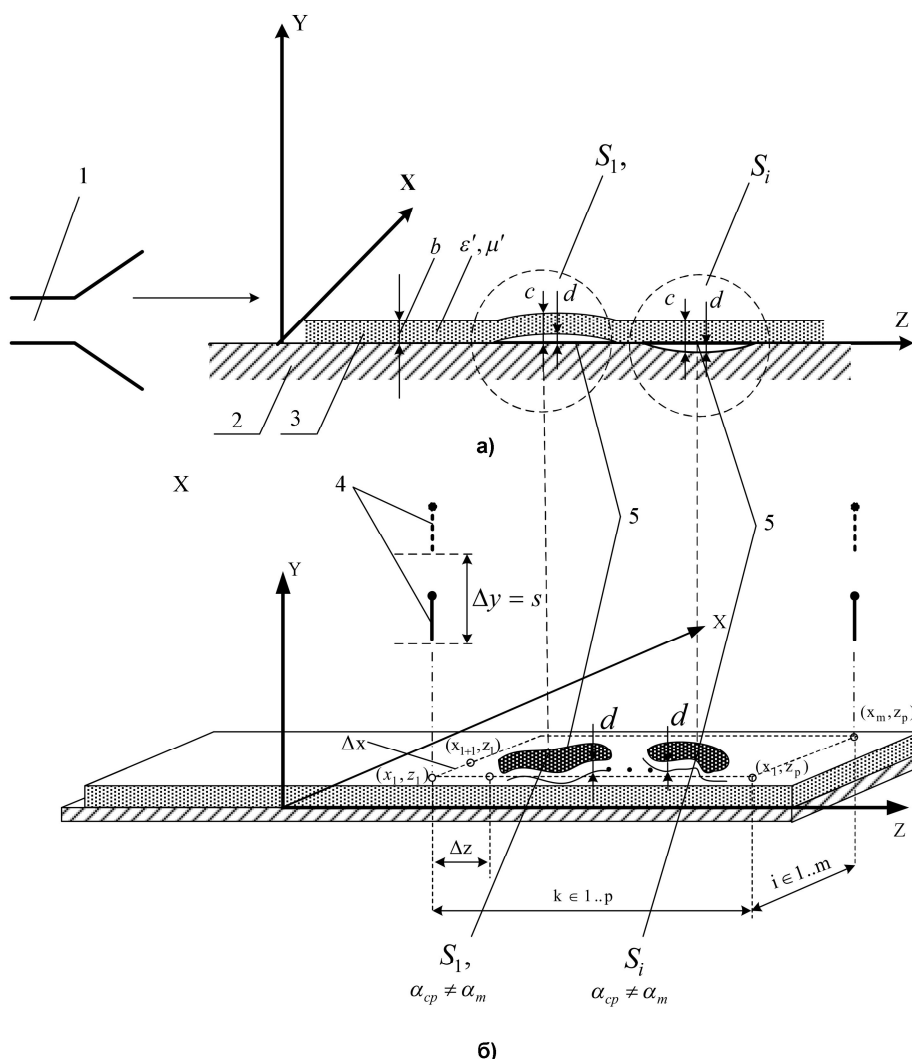


Рис. 1. СВЧ-способ обнаружения и оценки степени отслоения диэлектрического покрытия от металлической подложки

Подобным образом вычисляются все значения коэффициента затухания поля  $\alpha_j$ , где  $j \in [1, \dots, n-1]$  – количество точек измерений в нормальной плоскости, и рассчитывается его среднее значение  $\alpha_{cp}$  в точке измерений  $(x_1, z_1)$ :

$$\alpha_{cp} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^{n-1} \alpha_j. \quad (2)$$

Одновременно для данной точки измерений производится расчет теоретического значение коэффициента затухания поля поверхностной медленной волны  $\alpha_T$  без отслоения покрытия по известным значениям диэлектрической проницаемости  $\epsilon'$  и толщины покрытия  $b$  путем решения уравнения:

$$\frac{\sqrt{k_1^2 - k^2 - \alpha_T^2}}{\alpha_T} \frac{1}{\epsilon'} \operatorname{tg} \sqrt{k_1^2 - k^2 - \alpha_T^2} b - 1 = 0, \quad (3)$$

где  $\alpha_T$  – теоретическое значение коэффициент нормального затухания поля поверхностной элек-

## Краткие сообщения

тромагнитной волны,  $k = \frac{2\pi}{\lambda_T}$  – волновое число свободного пространства;  $k_1 = \frac{2\pi}{\lambda_T} \sqrt{\varepsilon'}$  – волновое число в слое покрытия;  $\lambda_T$  – длина волны генератора,  $\varepsilon'$  – действительная часть диэлектрической проницаемости покрытия,  $b$  – толщина слоя покрытия.

Для расчета  $\alpha_T$  используют известные значения  $\varepsilon'$  и  $b$ , которые берутся из «технологической» карты, составленной при нанесении РПП на металлическую поверхность.

В микропроцессорном устройстве (МПУ) запоминаются координаты точки  $(x_1, z_1)$  и значения  $\alpha_{cp}$  и  $\alpha_T$ .

После произведенных вычислений делается шаг  $\Delta z$  в направлении максимума ДН и проводится аналогичный цикл измерений коэффициентов затуханий, расчетов среднего значения коэффициента затухания  $\alpha_{cp}$  и его теоретического значения  $\alpha_T$  в точке  $(x_1, z_1 + \Delta z)$ , и так далее, в пределах заданных границ сканируемого покрытия по оси  $Z$  от начального  $z_1$  до конечного  $z_p$  (рис. 1, б).

Таким образом, производится сканирование всей поверхности в пределах заданных границ изменения, где  $k \in (1...p)$  – количество точек измерений по оси  $z$ ;  $i \in (1...m)$  – количество точек измерений по оси  $x$ .

После полного сканирования заданной области покрытия по массиву значений  $\alpha_{cp}$  по всем дискретным точкам измерений производят обнаружение, оценку границ и количество неоднородностей  $S_i$  в виде отслоений покрытия, где  $\alpha_{cp} \neq \alpha_T$  и области без неоднородностей (без отслоения покрытия), где  $\alpha_{cp} = \alpha_T$ .

В точках сканирования  $(x_i, z_k)$  в пределах границ неоднородностей, где  $\alpha_{cp} \neq \alpha_T$  производится количественное (численное) определение величины отслоения покрытия  $d$  от металлической подложки путем решения уравнения вида [3]:

$$\operatorname{th} \alpha_{cp} d = \frac{\frac{\sqrt{k_1^2 - k^2 - \alpha_{cp}^2}}{\alpha_{cp}} \frac{1}{\varepsilon'} \operatorname{tg} \sqrt{k_1^2 - k^2 - \alpha_{cp}^2} b - 1}{\frac{\sqrt{k_1^2 - k^2 - \alpha_{cp}^2}}{\alpha_{cp}} \varepsilon' \operatorname{tg} \sqrt{k_1^2 - k^2 - \alpha_{cp}^2} b + 1}, \quad (4)$$

где  $d$  – величина отслоения покрытия от металлического основания.

В точках, где нет неоднородностей, величина отслоения принимается соответственно равной нулю  $d = 0$ .

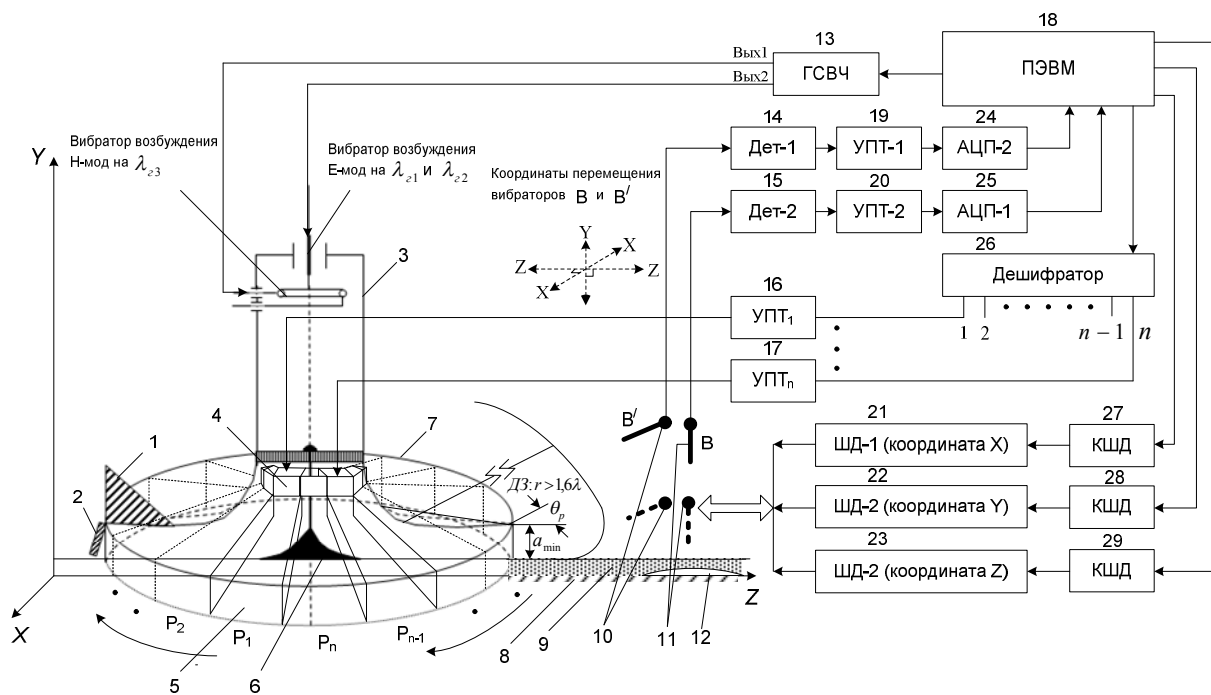
В микропроцессорном устройстве запоминаются значения величины отслоений покрытия  $d$  для каждой точки измерения  $(x_i, z_k)$  и формируется массив значений  $\mathbf{d}$ .

По массиву значений  $\mathbf{d}$  строится распределение отслоений покрытия по всей поверхности сканирования.

Рассмотренный способ реализуется в СВЧ-устройстве для обнаружения и оценки неоднородностей в диэлектрических и магнитоэлектрических покрытиях на металле.

Структурная схема устройства показана на рис. 2, где обозначено: 1 – поглотитель затекающего тока; 2 – «крышка-преломитель»; 3 – круглый волновод; 4 – управляющий клапан соответствующего  $n$ -рупора  $P_n$ ; 5 – один из  $P_n$  рупоров; 6 – согласующий конус; 7 – верхняя «тарелка» апертуры с углом раскрыва  $\theta_{порт}$  обеспечивающим удовлетворительное согласование со свободным пространством; 8 – подстилающая металлическая поверхность; 9 – нанесенное покрытие; 10 – горизонтально ориентированные приемные вибраторы В'; 11 – вертикально ориентированные приемные вибраторы В; 12 – внутренний дефект покрытия (отслоение); 13 – генератор СВЧ с прямым цифровым синтезом; 14 и 15 – СВЧ-детекторы переменного тока Дет-1 и Дет-2; 16 и 17 – усилители постоянного тока УПТ<sub>1</sub> и УПТ<sub>н</sub>; 18 – персонально электронно-вычислительная машина; 19 и 20 – усилители постоянного тока УПТ-1 и УПТ-2; 21 – шаговый электродвигатель ШД-1, для перемещения приемных вибраторов В и В' по координате X; 22 – ша-

говый электродвигатель ШД-2, для перемещения приемных вибраторов В и В' по координате Y; 23 – шаговый электродвигатель ШД-3, для перемещения приемных вибраторов В и В' по координате Z; 24 – аналогово-цифровой преобразователь АЦП-1; 25 – аналогово-цифровой преобразователь АЦП-2; 26 – дешифратор; 27, 28, 29 – контроллеры шаговых двигателей.



**Рис. 2. СВЧ-устройство для обнаружения и оценки неоднородностей в диэлектрических и магнитоэлектрических покрытиях на металле**

Устройство для обнаружения и оценки неоднородностей в диэлектрических и магнитоэлектрических покрытиях на металле работает в следующих режимах.

Алгоритм работы устройства в режиме обнаружения и оценки неоднородностей состоит в следующем. Перед началом сканирования в ПЭВМ задаются известные параметры исследуемого покрытия, а именно диэлектрическая проницаемости  $\epsilon'$  и толщины покрытия  $b$ , для расчета теоретического значения коэффициента затухания поля поверхностной медленной волны  $\alpha_T$  без отслоения покрытия.

С управляющего порта ПЭВМ производится подача цифрового кода на вход дешифратора для активизации его первого выхода. Сигнал с первого выхода дешифратора через усилитель постоянного тока 16 подается на управляющий вентиль рупора  $P_1$ , при этом он включается в работу.

С помощью вибратора возбуждения Е-волн производится последовательное возбуждение двух Е-волн поверхностной электромагнитной волны на длинах волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ , а с помощью вибратора возбуждения Н-волн производится возбуждение Н-волны на длине генератора  $\lambda_3$  в пределах излучающего сектора диаграммы направленности рупора  $P_1$ . С помощью системы приемных вибраторов 10 и 11 производится сканирование поверхности покрытия 9 по заданной траектории в пределах излучающего сектора диаграммы направленности рупора  $P_1$  приводимых в действие с помощью системы из трех шаговых двигателей ШД-1, ШД-2 и ШД-3. Управляющие сигналы на шаговые двигатели ШД-1, ШД-2 и ШД-3 подаются с управляющего порта ПЭВМ через контроллеры шаговых электродвигателей КШД. Синхронно со сканированием поверхности покрытия вибраторами 10 и 11 переменный ток, наводимый в каждом из вибраторов и пропорциональный напряженности поля поверхностной волны, детектируется соответствующим детектором Дет-1 и Дет-2 и через усилители постоянного тока УПТ-1 и УПТ-2 поступает на аналогово-цифровые преобразователи АЦП-1 и АЦП-2, с которых цифровой код, пропорциональный на-

## Краткие сообщения

---

пряженности поля поверхностной волны, поступает на вход ПЭВМ, где происходит запоминание значений напряженности поля поверхностной волны в каждой точке измерения.

Далее с управляющего порта ПЭВМ производится подача цифрового кода на вход дешифратора для активизации его второго выхода. Сигнал со второго выхода дешифратора через усилитель постоянного тока УПТ-2 подается на управляющий клапан рупора  $P_2$ , при этом он включается в работу и повторяется алгоритм работы рассмотренный выше, только для излучающего сектора рупора  $P_2$ .

Аналогично, переключением выходов дешифратора 26 с ПЭВМ, производится последовательное включение остальных  $n$ -рупоров  $P_3 \dots P_n$  в пределах всей круговой апертуры. Алгоритм работы устройства для каждого из рупоров  $P_3 \dots P_n$  аналогичен, рассмотренным выше.

После полного сканирования заданной области поверхности покрытия в ПЭВМ на основе полученного массива значений напряженностей поля поверхностной волны вычисляются средние значения коэффициентов затухания поля поверхностной  $\alpha_{cp}$  волны и производится сравнение измеренных значений  $\alpha_{cp}$  с рассчитанными значениями  $\alpha_T$ .

В точках сканирования, где  $\alpha_{cp} \neq \alpha_T$  производится количественное определение величины отслоения покрытия  $d$  от металлической подложки и формируется массив отслоений  $\mathbf{d}$ , по которому строится распределение отслоений покрытия по всей поверхности сканирования.

Таким образом, предлагаемый способ и устройство для его реализации позволяют повысить вероятность обнаружения неоднородностей, обеспечивает повышение точности определения степени отслоения покрытия от подложки и позволяет произвести количественное (численное) определение величины отслоения покрытия  $d$  от металлической подложки.

### Литература

1. Актуальные задачи стелс-технологии / А.Н. Лагарьков, А.И. Федоренко, В.Н. Кисель и др.; Институт теоретической и прикладной электродинамики Российской академии наук. – [http://www/itae.ru/science/topics/№4%20\(стелс\).pdf](http://www/itae.ru/science/topics/№4%20(стелс).pdf) (дата обращения: 06.08.2015).
2. Лагарьков, А.Н. Фундаментальные и прикладные проблемы стелс-технологий / А.Н. Лагарьков, М.А. Погосян // Вестник Российской академии наук. – 2003. – Т. 73, № 9. – С. 779–787.
3. Казьмин, А.И. Математическая модель отслоения покрытия от подложки / А.И. Казьмин, П.А. Федюнин, А.Ю. Попов // Информатика: проблемы, методология, технологии: материалы XIV международной конференции (6–8 февраля 2014). – Воронеж: ВГУ, 2014. – Т. 1. – С. 325–328.

**Манин Василий Александрович**, адъюнкт кафедры управления воинскими частями связи РТО авиации, ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия им. профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», г. Воронеж; fanni.05@mail.ru.

**Казьмин Александр Игоревич**, канд. техн. наук, слушатель, ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия им. профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», г. Воронеж; alek-kazmin@ya.ru.

**Федюнин Павел Александрович**, д-р техн. наук, профессор, почетный радист, начальник кафедры управления воинскими частями связи и РТО авиации, ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия им. профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», г. Воронеж; fpa1@yandex.ru.

**Тренин Николай Александрович**, канд. воен. наук, начальник кафедры авиационных комплексов и конструкции летательных аппаратов, ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия им. профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», г. Челябинск; treninnickolai76@gambler.ru.

*Поступила в редакцию 30 ноября 2015 г.*

## MICROWAVE WAY FOR DETECTION AND ESTIMATION OF DEFECT TYPE “DELAMINATION” IN THE PROTECTIVE COATINGS OF WEAPONS, MILITARY AND SPECIAL EQUIPMENT AND DEVICE FOR ITS IMPLEMENTATION

V.A. Manin<sup>1</sup>, fanni.05@mail.ru,  
A.I. Kazmin<sup>1</sup>, alek-kazmin@ya.ru,  
P.A. Fedyunin<sup>1</sup>, fpa1@yandex.ru,  
N.A. Trenin<sup>2</sup>, treninnickolai76@rambler.ru

<sup>1</sup> Air force academy named after Professor N.E. Zhukovsy and Y.A. Gagarin, Voronezh,  
Russian Federation,

<sup>2</sup> Air force academy named after Professor N.E. Zhukovsy and Y.A. Gagarin, Chelyabinsk,  
Russian Federation

When designing aircraft systems to produce a given level of effective surface scattering absorbing materials and coatings have strictly defined parameters: a variable thickness along the profile, a complex structure with the changing values of the complex permittivity and permeability.

Implementation of the properties of modern coatings is possible only with the observance of technological modes and tolerances in their application. The same severe restrictions are imposed on the tolerance values of permittivity and permeability of radar absorbing coatings.

The task of ensuring reliable adhesion of radar absorbing coatings to the skin self-summer, made of various materials and subjected to a variety of surfaces handling is quite complicated. In case of insufficient adhesion the internal high-voltages lead to detachment and high adhesion – cracking of radar absorbing coatings.

During operation of the samples of airborne systems, especially in difficult conditions and under extreme mechanical and thermal loads, there are inevitable situations when various defects such as delamination, cracking, chips, scratches and so on will appear in radar absorbing coatings, resulting in increase of the effective surface scattering and reduce combat capabilities.

Microwave method for detection of inhomogeneities of the dielectric and magnetodielectric coating on the metal and assessment of their relative magnitudes is designed, consisting in creation of a field of the surface slow wave microwave range upon the surface of a dielectric or magnetodielectric coverage, measurement of the field strength across the surface of the material in the normal to the direction of propagation wave plane defined by the value of the electrical field attenuation parameters, and on the degree of deviation of the attenuation coefficient of the mean field – border detachment of the coating and the value of its delamination from the substrate.

*Keywords: weapons, military and special equipment, radio-absorbing coatings; surface electromagnetic waves; field attenuation coefficient; defect; delamination, aircraft complex.*

### References

1. Lagar'kov A.N., Fedorenko A.I., Kisel' V.N., Kibets S.G., Semenenko V.N. *Aktual'nye zadachi stels-tehnologii* [Urgent Objectives of Stealth Technology], Institute of Theoretical and Applied Electrodynamics, Russian Academy of Sciences, available at: [http://www/itae.ru/science/topics/№4%20\(стелс\).pdf](http://www/itae.ru/science/topics/№4%20(стелс).pdf) (accessed: 06.06.2015).
2. Lagar'kov A.N., Pogosyan M.A. [Fundamental and Applied Problems of Stealth Technology]. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences*, 2003, vol. 73, no. 9, pp. 779–787. (in Russ.)
3. Kaz'min A.I., Fedyunin P.A., Popov A.Yu. [Mathematical Model of Delamination of the Coating from the Substrate]. *Informatika: problem, metodologiya, nekhnologii. Materialy XIV mezhdunarodnoy*

## Краткие сообщения

---

*konferentsii* [Computer Science: Problems, Methodology, Technology: Proc. of the 17 International Conf.]. Voronezh, Voronezh St. Univ., 2014, vol. 1, pp. 325–328. (in Russ.)

*Received 30 November 2015*

---

### ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

СВЧ-способ обнаружения и оценки дефекта типа «отслоение» в защитных покрытиях вооружения, военной и специальной техники и устройство его реализации / В.А. Манин, А.И. Казьмин, П.А. Федюнин, Н.А. Тренин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2016. – Т. 16, № 1. – С. 145–152. DOI: 10.14529/ctcr160113

### FOR CITATION

Manin V.A., Kazmin A.I., Fedyunin P.A., Trenin N.A. Microwave Way for Detection and Estimation of Defect Type “Delamination” in the Protective Coatings of Weapons, Military and Special Equipment and Device for Its Implementation. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2015, vol. 16, no. 1, pp. 145–152. (in Russ.) DOI: 10.14529/ctcr160113

---