

**УДК 537.877**

**Вологина Александра Юрьевна**, студент 3 курса специализации «Эксплуатация воздушных судов и организация воздушного движения», Санкт-Петербургский университет гражданской авиации, г. Санкт-Петербург.  
Vologda Alexandra Yurievna, 3rd year student specializing in Aircraft Operation and Air Traffic Management, St. Petersburg University of Civil Aviation, St. Petersburg. Email: pineeaplealex32@yandex.ru

## **РАДИОПОГЛОЩАЮЩИЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ТЕХНОЛОГИИ «СТЕЛС»: АНАЛИЗ И ВЫБОР ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ВЛАЖНОГО КЛИМАТА**

В статье проводится комплексный анализ радиопоглощающих материалов (РАМ) для применения в конструкции малозаметных беспилотных летательных аппаратов. Рассматриваются основные механизмы поглощения электромагнитной энергии и приводится классификация современных РАМ. Особое внимание уделено критериям выбора материалов для эксплуатации в условиях влажного климата, характеризующегося высокой влажностью и коррозионной активностью. Также затрагиваются практические проблемы обслуживания и перспективы разработки интеллектуальных покрытий, что в совокупности позволяет определить пути создания высокоэффективных БПЛА-«невидимок» для применения в сложных погодных условиях.

**Ключевые слова:** Беспилотный летательный аппарат, радиопоглощающие материалы, стелс-технологии, ферритовые покрытия, влажный климат, электромагнитное поглощение, эксплуатационная стойкость.

The article provides a comprehensive analysis of radio-absorbing materials (frames) for use in the construction of low-visibility unmanned aerial vehicles. The main mechanisms of electromagnetic energy absorption are considered and the classification of modern frames is given. Special attention is paid to the criteria for selecting materials for use in humid climates characterized by high humidity and corrosive activity. Practical maintenance issues and prospects for the development

of intelligent coatings are also discussed, which together makes it possible to identify ways to create highly efficient stealth UAVs for use in difficult weather conditions.

**Keywords:** Unmanned aerial vehicle, radio-absorbing materials, stealth technologies, ferrite coatings, humid climate, electromagnetic absorption, operational resistance.

## **Введение**

Эпоха современной авиации и беспилотных систем неразрывно связана с концепцией снижения заметности. Беспилотные летательные аппараты (БПЛА), оснащенные технологиями «стелс», стали ключевым инструментом в арсенале сил безопасности. Их эффективность напрямую зависит от способности оставаться необнаруженными сложными системами ПВО и радиолокационного контроля. В то время как геометрическая форма корпуса отвечает за рассеивание радиолокационных сигналов, именно радиопоглощающие материалы (РАМ) несут основную нагрузку по поглощению энергии электромагнитных волн, превращая ее в тепло и минимизируя отраженный сигнал. Данная статья предлагает комплексный анализ современных РАМ, фокусируясь на выборе оптимальных решений для БПЛА, предназначенных для эксплуатации в регионах с влажным и изменчивым климатом, где такие факторы, как высокая влажность, перепады температур и солевые испарения, предъявляют повышенные требования к долговечности и стабильности материалов.

## **Основная часть**

Принципы действия и классификация радиопоглощающих материалов

Основная задача любого РАМ – максимально ослабить энергию падающей электромагнитной волны. Достигается это за счет двух основных механизмов: интерференционного гашения и поглощения с диссипацией энергии.

1. Интерференционное гашение работает в тонкослойных покрытиях. Волна, отразившаяся от внешней поверхности материала, интерферирует с

волной, отразившейся от внутренней границы раздела с металлом корпуса. При правильном подборе толщины и диэлектрической проницаемости материала эти волны оказываются в противофазе и взаимно уничтожаются.

2. Поглощение и диссипация – это преобразование энергии электромагнитного поля в тепловую. В зависимости от типа материала, это происходит за счет:

- **Магнитных потерь:** В материалах с магнитными свойствами (ферриты, карбонильное железо) переменное магнитное поле волны вызывает гистерезисные потери и потери на вихревые токи.

- **Диэлектрических потерь:** В диэлектриках (полимеры, керамика) энергия тратится на поляризацию молекул в переменном электрическом поле.

- **Резистивных (омических) потерь:** В проводящих материалах (углеродные нанотрубки, графит) индуцированный ток приводит к джоулеву нагреву.

На основе этих принципов строится обширная классификация РАМ [2, с.45-60]:

- **Магнитные поглотители (ферриты, карбонильное железо):** Высокоэффективны на низких и средних частотах, но, как правило, обладают значительной массой.

- **Диэлектрические поглотители (специализированные полимеры, керамические композиты):** Легкие и эффективные на высоких частотах, но могут иметь узкую полосу поглощения.

- **Резистивные поглотители (сажа, графит, металлические порошки):** Часто используются в виде тонких пленок или покрытий, хорошо поглощают за счет омических потерь.

- **Широкополосные многослойные композиты:** Сочетают в себе слои с разными свойствами (магнитными и диэлектрическими), создавая градиент импеданса, что позволяет поглощать волны в широком частотном диапазоне.

- **Метаматериалы и интеллектуальные покрытия:** Перспективный класс материалов, чья структура, а не химический состав, определяет свойства. Они

могут быть перестраиваемыми, изменяя свои характеристики под внешним воздействием (электрическим или магнитным полем).

#### Критерии выбора РАМ для БПЛА в условиях влажного климата

Выбор конкретного материала – это всегда компромисс между его электрофизическими свойствами и эксплуатационными характеристиками. [1, с. 200-215] Для БПЛА, работающих в прибрежных или просто влажных регионах, ключевыми становятся следующие критерии:

1. Устойчивость к влаге и коррозии: Материал не должен терять своих свойств при длительном воздействии высокой влажности, а его нанесение должно защищать корпус БПЛА от коррозии.

2. Термостабильность: Способность выдерживать перепады температур, нагрев на солнце и остывание в полете без расслоения или растрескивания.

3. Масса и толщина: Для БПЛА, особенно малого и среднего класса, каждый грамм и миллиметр на счету. Тяжелые покрытия неприемлемы.

4. Адгезия и гибкость: Покрытие должно прочно держаться на различных поверхностях (композиты, металлы) и не отслаиваться при вибрациях и деформациях планера.

5. Технологичность нанесения и ремонтпригодность: Процесс нанесения должен быть относительно простым, а возможность локального ремонта – критически важна для эксплуатации.

Проанализировав спектр доступных решений, можно заключить, что одним из наиболее сбалансированных вариантов для влажного климата являются ферритовые краски и покрытия.

Ферриты – это магнитные материалы на основе оксидов железа. Их ключевые преимущества [3, с. 310-325]:

- Гидрофобность: Они обладают врожденной стойкостью к влаге, не набухают и не впитывают воду.

- Химическая стабильность: Устойчивы к воздействию солей и слабоагрессивных сред, что актуально для приморских регионов.

- Отличная адгезия: Хорошо сцепляются с большинством авиационных материалов.

- Оптимальное соотношение эффективность/масса: Будучи нанесенными в виде краски, они добавляют минимальный вес.

Ярким примером коммерчески успешного продукта является покрытие Eccosorb MFS. Его характеристики – широкий рабочий диапазон (от 50 МГц до 18 ГГц), высокий уровень поглощения (до 20 дБ), устойчивость к коррозии и отличная адгезия – делают его практически идеальным кандидатом для оснащения беспилотного летательного аппарата, эксплуатируемых в сложных погодных условиях.

#### Практические аспекты эксплуатации и перспективные разработки

Одной из значительных практических проблем при использовании монолитных РАМ является необходимость технического обслуживания. Доступ к электронным блокам, антеннам и системам управления часто требует нарушения целостности покрытия, что после сборки несет дорогостоящую процедуру повторного нанесения.

Решением этой проблемы видятся «умные» или адаптивные материалы. Ведутся разработки покрытий, свойства которых можно локально и обратимо изменять. [4, с. 180-195] Например, материал, чувствительный к магнитному полю, мог бы временно терять свои поглощающие свойства в зоне воздействия, позволяя инженерам получить доступ к сервисным люкам без физического удаления покрытия. После закрытия люка свойства материала восстанавливались бы. Другой подход – создание многофункциональных композитных панелей, в которых РАМ интегрирован в структуру материала, а точки доступа спроектированы таким образом, чтобы минимизировать влияние на общую радиолокационную заметность.

#### Заключение

Правильный выбор радиопоглощающего материала является критически важным элементом в создании эффективного БПЛА-«невидимки». Для регионов с влажным климатом, характеризующихся высокой влажностью и

коррозионной активностью, наиболее предпочтительными оказываются ферритовые покрытия. Они сочетают в себе высокие поглощающие характеристики с исключительной стойкостью к воздействию окружающей среды, технологичностью нанесения и малым весом. Дальнейшее развитие этой области лежит на пути создания интеллектуальных, адаптивных и легко обслуживаемых покрытий, которые не только скрывают аппарат от радаров, но и упрощают его жизненный цикл, обеспечивая тактическое преимущество в самых суровых условиях эксплуатации. Теоретической основой для моделирования таких материалов остаются фундаментальные труды по физической теории дифракции. [5, с. 45-60]

### **Список литературы**

1. Веремеенко К.К., Зиненко В.И., Лесовой В.И. Радиолокационная заметность и малозаметность летательных аппаратов. – Изд-во: Радиотехника, 2005.
2. Михневич Н.В., Пятков А.И., Саевич В.Н. Радиопоглощающие материалы и покрытия. – Изд-во: Беларуская навука, Минск, 2009.
3. Смоленский Г.А., Леманов В.В. Ферриты и их техническое применение. – Изд-во: Наука, 1975.
4. Тимохин Е.Б., Устинов М.В. Основы технологии стелс: учебное пособие. – Изд-во: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015.

5. Уфимцев П.Я. Метод краевых волн в физической теории дифракции. – Изд-во.: Советское радио, 1962.

### **References**

1. Veremeenko K.K., Zinenko V.I., Lesovoy V.I. Radar visibility and stealth of aircraft. – Publishing house: Radio Engineering, 2005.
2. Mikhnevich N.V., Pyatkov A.I., Saevich V.N. Radio-absorbing materials and coatings. – Publishing house: Belorusskaya nauka, Minsk, 2009.
3. Smolensky G.A., Lemanov V.V. Ferrites and their technical application. – Publishing house: Nauka, 1975.
4. Timokhin E.B., Ustinov M.V. Fundamentals of stealth technology: a textbook. – Publishing house: Bauman Moscow State Technical University, 2015.
5. Ufimtsev P.Ya. The method of edge waves in the physical theory of diffraction. – Publishing house: Soviet Radio, 1962.