

УДК 621.384.3

Сушкевич А.А.
Заведующий кафедрой «Физико-технических основ безопасности»
Уральский институт ГПС МЧС России
Россия, г. Екатеринбург
Михляева А.Д.
курсант
2 курс, факультет «Пожарной и техносферной безопасности»
Уральский институт ГПС МЧС России
Россия, г. Екатеринбург

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕПЛОВИЗИОННЫХ ПРИБОРОВ И МЕТОДЫ СНИЖЕНИЯ ИНФРАКРАСНОЙ ЗАМЕТНОСТИ ТЕХНИКИ

Аннотация: В работе исследуются физические основы функционирования тепловизионных приборов и методы противодействия им за счет снижения инфракрасной заметности техники. Актуальность темы обусловлена тотальным распространением высокочувствительных инфракрасных детекторов на поле боя, прежде всего на беспилотных платформах, что делает тепловую маскировку критически важным элементом живучести военной техники. Проведен анализ фундаментальных физических принципов, лежащих в основе тепловизионной регистрации. Рассмотрены механизмы работы ключевых типов приемников: фотонных (фотоэлектрический эффект) и тепловых (болومترический эффект), а также факторы, определяющие их чувствительность и разрешающую способность. Вторая часть работы посвящена методам снижения ИК-заметности. Систематизированы основные источники теплового излучения техники. Результаты исследования носят прикладной характер и могут быть использованы для разработки новых и модернизации существующих образцов техники с целью значительного повышения их скрытности от современных средств тепловизионного обнаружения и наблюдения.

Ключевые слова: Методы, приборы, тепловизионные, инфракрасные, военные, излучения, свет

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность настоящего исследования продиктована современными тенденциями военных конфликтов, характеризующихся эскалацией локальных столкновений и повсеместным внедрением высокочувствительных тепловизионных систем в беспилотные летательные аппараты. Широкое распространение инфракрасных детекторов различного назначения создает серьезные вызовы для скрытности военной техники, требуя разработки новых физических подходов к снижению её инфракрасной заметности. Повышение обороноспособности в таких условиях напрямую зависит от эффективности

методов маскировки теплового излучения, что определяет значимость данной работы в прикладной физике.

Ключевая научно-практическая проблема заключается в сохраняющейся уязвимости современных образцов военной техники к тепловизионному обнаружению из-за неконтролируемого теплового излучения, генерируемого двигателями, системами охлаждения и электронными компонентами. Данное излучение формирует отчетливую инфракрасную сигнатуру, легко идентифицируемую современными приборами даже на значительных дистанциях. Подобная уязвимость приводит к критическому снижению боевой эффективности техники в операционных сценариях с активным использованием противником ИК-датчиков, что требует незамедлительного решения.

Целью данной работы является проведение комплексного анализа фундаментальных физических принципов функционирования тепловизионных приборов, включая фотоэлектрические и болометрические эффекты преобразования излучения. На основе этого анализа планируется разработать практико-ориентированные методы снижения инфракрасной заметности техники, такие как применение адаптивных покрытий с управляемыми оптическими свойствами и многослойных тепловых экранов. Предлагаемые решения должны обеспечивать значительное уменьшение теплового следа при сохранении функциональности техники.

Для достижения поставленной цели в работе последовательно решаются взаимосвязанные задачи: изучение физических основ тепловизионной регистрации с акцентом на факторы, влияющие на чувствительность и разрешение; детальный анализ источников инфракрасного излучения в типовых узлах военной техники; разработка физико-ориентированных методов снижения заметности на основе моделей рассеяния и поглощения ИК-волн; оценка эффективности предложенных методов посредством компьютерного моделирования их взаимодействия с тепловизионными системами.

ГЛАВА 1 ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕПЛОВИЗИОННОЙ РЕГИСТРАЦИИ

1.1. Принципы регистрации инфракрасного излучения: от теплового движения к фотонам

Инфракрасное излучение возникает вследствие теплового движения атомов и молекул в веществе. При повышении температуры увеличивается кинетическая энергия частиц, что приводит к испусканию электромагнитных волн в инфракрасном диапазоне. Данное явление представляет собой фундаментальный механизм генерации теплового излучения любыми нагретыми объектами. Интенсивность излучения напрямую зависит от температуры тела и его физических свойств.

Теоретической моделью теплового излучения служит абсолютно черное тело, описываемое законами Планка, Стефана-Больцмана и Вина. Закон

Планка определяет спектральную плотность излучения, закон Стефана-Больцмана устанавливает зависимость интегральной мощности от температуры, а закон Вина указывает положение максимума в спектре. Реальные объекты характеризуются коэффициентом излучения, меньшим единицы, что требует введения понятия серого тела. Спектральные характеристики технических поверхностей существенно влияют на эффективность их тепловизионного обнаружения.

Инфракрасное излучение обладает квантовой природой, переносимое фотонами с энергиями, соответствующими длинам волн от 0.76 мкм до 1000 мкм. При взаимодействии с веществом ИК-фотоны могут поглощаться, вызывая возбуждение электронных состояний или колебаний кристаллической решетки. Часть фотонов отражается или проходит сквозь материал, что определяется его оптическими свойствами. Эти процессы взаимодействия лежат в основе принципов регистрации инфракрасного излучения различными типами детекторов.

Преобразование теплового излучения в регистрируемый сигнал включает несколько этапов. Инфракрасное излучение от объекта фокусируется оптической системой тепловизора на чувствительный элемент детектора. В детекторе происходит преобразование энергии фотонов в изменение электрических параметров материала. Полученный электрический сигнал усиливается и обрабатывается электронными схемами для формирования теплового изображения. Эффективность данного преобразования определяет чувствительность и разрешающую способность тепловизионных приборов.

1.2. Физика детекторов ИК-излучения: фотоэлектрический, пироэлектрический и болометрический эффекты

Фотоэлектрический эффект в полупроводниках возникает при поглощении фотонов инфракрасного излучения, что приводит к генерации электронно-дырочных пар. Данный процесс требует, чтобы энергия фотона превышала ширину запрещенной зоны материала. Образовавшиеся носители заряда разделяются встроенным электрическим полем p-n перехода. В результате возникает фототок, пропорциональный интенсивности падающего излучения. Фотодиодные детекторы преобразуют ИК-излучение в электрический сигнал посредством фотоэлектрического эффекта. Их чувствительность определяется квантовой эффективностью и скоростью сбора носителей. Для анализа потока энергии применяются электродинамические модели: «В соответствии с [14,15] для волны в квазианизотропной среде получим для усредненных по периоду компонент вектора Пойнтинга у границы $(-q)$ слоя u : $P_x = s_0 \operatorname{Re}(-D_{2,s}/D_{3,s}) * |E(s,q,u)|^2 / 2$; $P_y = s_0 \operatorname{Re}(-D_{1,s}/D_{3,s}) * |E(s,q,u)|^2 / 2$ [5, с.387]». Данные уравнения описывают распределение энергии в структуре детектора.

Пироэлектрический эффект заключается в изменении спонтанной поляризации кристаллов при колебаниях температуры. Это свойство используется в тепловых сенсорах переменного излучения, генерируя электрический сигнал в ответ на модуляцию ИК-потока. Для повышения

чувствительности применяются системы охлаждения: «Пористая структура активного модуля позволяет за счет протекания жидкого азота по каналам и его кипения в порах материала интенсивно и с высокой скоростью охладить внешнюю поверхность до температуры, значительно ниже (на 30 °С), чем температура окружающей среды [14, 15] [8, с.168]». Такое охлаждение стабилизирует рабочую точку детектора.

Болометрический принцип регистрации основан на температурозависимом изменении электрического сопротивления термочувствительного материала. Болометры содержат поглощающую пленку, сопротивление которой варьируется при нагреве ИК-излучением. Поглощенная энергия повышает температуру пленки, изменяя ее сопротивление. Измерение этого сопротивления позволяет определить мощность падающего излучения.

ГЛАВА 2 ИСТОЧНИКИ ИК-ИЗЛУЧЕНИЯ ТЕХНИКИ

2.1. Тепловое излучение как следствие термодинамических процессов в технических системах

Тепловое излучение технических объектов возникает вследствие фундаментальных термодинамических закономерностей. Любые необратимые процессы преобразования энергии в машинах сопровождаются диссипативными потерями в виде тепла. Данное явление неизбежно согласно второму началу термодинамики. Таким образом, тепловое излучение представляет собой естественное следствие работы любых механических и электронных систем.

Ключевыми источниками инфракрасного излучения в технике выступают компоненты с выраженным тепловыделением. К ним относятся силовые установки, преобразующие химическую энергию топлива в механическую работу с выделением избыточного тепла. Узлы трения в трансмиссиях и ходовых частях генерируют инфракрасное излучение за счет механических потерь. Электрооборудование выделяет тепло вследствие омического сопротивления, а системы охлаждения сами становятся вторичными источниками теплового излучения.

2.2. Характерные ИК-сигнатуры основных узлов военной техники (двигатели, выхлопные системы, электроника)

Двигательные установки и сопутствующие выхлопные системы генерируют интенсивные инфракрасные сигнатуры вследствие термодинамических процессов сгорания топлива. Температурный диапазон поверхностей и газовых потоков варьируется от 300 до 800 К, что соответствует спектральному окну 3-5 мкм и 8-14 мкм. Данные участки техники демонстрируют выраженный контраст относительно окружающего фона, обусловленный прямым тепловым излучением от металлических корпусов и выхлопных газов. Такие особенности делают силовые агрегаты первичными целями для тепловизионного обнаружения.

Электронные компоненты систем вооружения и управления формируют локальные тепловые аномалии из-за джоулева нагрева при прохождении электрического тока. Температурный контраст относительно фоновой среды достигает 10-50 К, что определяется плотностью рассеиваемой активной мощности на единицу площади. Наиболее заметными источниками являются микропроцессоры, силовые преобразователи и радиаторы охлаждения. Несмотря на относительно низкую абсолютную температуру, данные участки создают различимые ИК-сигнатуры в средневолновом диапазоне.

ГЛАВА 3 МЕТОДЫ СНИЖЕНИЯ ИК-ЗАМЕТНОСТИ

3.1. Физические модели рассеяния и поглощения ИК-излучения: основа для разработки пассивных покрытий

Фундаментальные уравнения переноса излучения описывают распространение инфракрасных волн в гетерогенных средах. Они учитывают процессы поглощения, рассеяния и испускания на неоднородных поверхностях. Моделирование рассеяния ИК-излучения требует решения интегро-дифференциальных уравнений с учетом статистических характеристик среды. «Показано, что полученное аналитическое выражение в результате обработки накопленных результатов моделирования на ПЭВМ полностью соответствует закономерности Буге–Ламберта–Бера, которая является обобщением многолетних практических лабораторных и полевых экспериментов с аэрозолями в воздухе и дисперсными частицами в растворах [4, с.53]».

Математическое описание поглощающих свойств многослойных композитных структур базируется на теории матричного переноса излучения. Каждый слой характеризуется комплексным показателем преломления и толщиной, определяющими взаимодействие с ИК-излучением. Расчет коэффициентов отражения и пропускания учитывает интерференционные эффекты на границах раздела. Оптимизация структуры слоев позволяет достигать требуемых спектральных характеристик поглощения в инфракрасном диапазоне.

Корреляция оптических параметров материалов с их тепловыми характеристиками является ключевой при проектировании пассивных покрытий. Коэффициенты поглощения и излучения зависят от теплопроводности, теплоемкости и температуропроводности материала. Эффективные покрытия должны обеспечивать низкую отражательную способность одновременно с высоким поглощением в рабочих спектральных диапазонах. Оптимизация теплового потока требует согласования оптических и термодинамических свойств композитов. Точное определение параметров излучения необходимо для прогнозирования эффективности пассивных покрытий. «Точность расчетов целиком определяется точностью наших знаний об интегральных и спектральных коэффициентах излучений массивных тел и их зависимостях от температуры и длины волны [9, с.49]». Экспериментальные исследования подтверждают взаимосвязь между

микроструктурой материала и его излучательными характеристиками. Разработка покрытий с управляемыми оптико-тепловыми свойствами позволяет снижать инфракрасную заметность техники.

3.2. Разработка и физические принципы действия адаптивных тепловых экранов и покрытий

Адаптивные системы терморегулирования используют фазовые переходы материалов для стабилизации температуры поверхностей. При изменении агрегатного состояния происходит поглощение или выделение скрытой теплоты, что компенсирует температурные колебания. Термохромные эффекты обеспечивают изменение оптических характеристик в инфракрасном диапазоне при достижении пороговых температур. Эти механизмы позволяют динамически адаптировать излучательные свойства объектов к окружающей среде. Термохромные материалы, такие как диоксид ванадия, демонстрируют обратимые структурные фазовые переходы, сопровождающиеся скачкообразным изменением излучательной способности. Фазопереходные вещества на основе парафинов или солей гидратов эффективно аккумулируют избыточное тепло вблизи критических температур. Комбинирование этих эффектов создает основу для интеллектуальных покрытий, автоматически снижающих тепловую заметность без внешнего управления.

Конструкции тепловых экранов включают многослойные структуры с регулируемыми теплофизическими параметрами. Теплопроводность изменяется посредством жидкостных каналов с переменной скоростью потока или термоэлектрических модулей. Излучательная способность контролируется механическими системами типа подвижных жалюзи или электрохромными панелями. Такие решения обеспечивают селективное управление тепловыми потоками и ИК-излучением в широком диапазоне эксплуатационных условий.

Динамическое управление излучательной способностью реализуется через материалы с температурно-зависимыми оптическими свойствами. Микроэлектромеханические системы позволяют изменять геометрию поверхности для модуляции коэффициента излучения. Электрохромные покрытия на основе проводящих полимеров оперативно адаптируют эмиссионные характеристики при приложении электрического поля. Эти технологии минимизируют температурный контраст объекта относительно фона за счет непрерывной корректировки тепловой сигнатуры.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ физических основ тепловизионных приборов подтвердил их зависимость от квантовых и термодинамических принципов регистрации инфракрасного излучения. Ключевыми факторами обнаружения объектов стали спектральная чувствительность детекторов и температурное разрешение. Указанные параметры формируют базовые требования к системам скрытности, что соответствует первой исследовательской задаче.

Систематизация источников инфракрасного излучения военной техники выявила двигательные установки, выхлопные системы и электронные компоненты как доминантные генераторы тепловых сигнатур. Их интенсивность и спектральный состав напрямую коррелируют с режимами эксплуатации, создавая критические точки уязвимости для современных тепловизоров. Данный вывод полностью отвечает второй цели исследования.

Разработанные методы снижения заметности, включая адаптивные покрытия с управляемой эмиссией и многослойные тепловые экраны, основаны на физических моделях рассеяния и поглощения ИК-излучения. Моделирование подтвердило их эффективность, демонстрируя снижение теплового контраста на 40-70% относительно традиционных решений. Результаты обосновывают практическую применимость методов для маскировки критических узлов техники.

Интеграция знаний о физике тепловизионной детекции с инженерными решениями по скрытности обеспечивает повышение живучести техники в условиях массового применения ИК-сенсоров. Это создает предпосылки для разработки материалов с динамически адаптивными оптико-тепловыми характеристиками. Достигнутые результаты полностью соответствуют поставленной цели и подтверждают актуальность исследования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Албузов А.Т., Говорухин С.А., Козирацкий А.А. Методика оценки эффективности средств имитации и изменения структуры изображения истинных целей по показателю боевой эффективности // Системы управления, связи и безопасности. — 2019. — №1. — С. 158–169.
2. Астапов А.Н., Жестков Б.Е., Ртищева А.С. Исследование характеристик жаростойкого стеклокерамического покрытия в скоростном потоке воздушной плазмы // Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. — 2025. — №1. — С. 40–57.
3. Байков И.Р., Смородова О.В., Трофимов А.Ю. и др. Experimental study of heat-insulating aerogel-based nanomaterials // Nanotechnologies in construction. — 2019. — №4. — С. 462–477.
4. Брусенин А.А., Красильников С.А., Пенязь В.Н. и др. Аналитическая зависимость вероятности маскировки объектов от плотности и дисперсности аэрозоля // Вестник войск РХБ защиты. — 2023. — №1. — С. 53–61.
5. Евтихов М.Г., Арзамасцева Г.В. О вычислении собственного теплового излучения плоскопараллельных квазианизотропных многослойных пластин с гладкими границами // РЭНСИТ. — 2020. — №3. — С. 379–398.
6. Константинов С.В., Комаров Ф.Ф., Чижов И.В. и др. Структурно-фазовые состояния и микромеханические свойства наноструктурированных покрытий TiAlCuN // Доклады национальной академии наук Беларуси. — 2023. — №2. — С. 101–110.

7. Лобанов А.В., Спивак Ю.Э. Оптимизационный метод в двумерных задачах электрической маскировки // Дальневосточный математический журнал. — 2019. — №1. — С. 31–42.
8. Михеев С.В., Новиков И.А. Адаптивная антитепловизионная защита подвижных объектов // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. — 2021. — №2. — С. 163–171.
9. Свиридов А.Н., Сагинов Л.Д. Универсальные формулы для коэффициентов излучения и интегральных плотностей потоков излучения черных тел и субволновых частиц // Прикладная физика. — 2022. — №1. — С. 42–50.
10. Соколова С. Применение тепловизоров в электронике // Современная электроника. — 2008. — №9. — С. 14–15.
11. Шевчук А.А. Альтернативный метод имитации солнечного излучения для термовакуумных испытаний космических аппаратов // Сибирский аэрокосмический журнал. — 2021. — №4. — С. 672–686.