

УДК 623-4; 681.78

doi: 10.53816/20753608_2025_4_127

ПАССИВНЫЕ АНТИТЕПЛОВИЗИОННЫЕ ПОКРЫТИЯ МОДУЛЬНОГО ТИПА

PASSIVE ANTI-THERMAL IMAGING COATINGS OF MODULAR TYPE

По представлению академика РАН К.М. Иванова

И.А. Новиков, А.С. Афанасьев, Г.Э. Маилян

БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова

I.A. Novikov, A.S. Afanasyev, G.E. Mailyan

В работе разработаны теоретические и практические аспекты реализации пассивной антитепловизионной защиты объектов на основе унифицированного антитепловизионного модуля. Предложены конструкции и теплофизические модели модулей, а также оценка качества антитепловизионных покрытий. Изготовлены образцы модулей и проведены их тепловые экспериментальные исследования. Описаны перспективы применения таких покрытий.

Ключевые слова: тепловизор, пассивная антитепловизионная защита, антитепловизионное покрытие, унифицированный антитепловизионный модуль.

There are developed the theoretical and practical aspects to implement the passive anti-thermal imaging protection of objects which based on a unified anti-thermal imaging module. The modules design and thermophysical models and the quality estimation of anti-thermal imaging coatings are developed. Samples of modules were manufactured and their thermal experimental studies were conducted. The prospects for using such coatings are discussed.

Keywords: thermal imager, passive anti-thermal protection, anti-thermal coating, unified anti-thermal module.

Введение

Одна из основных задач объектов военной техники (ВТ) — это способность видеть в темноте. Добиться этого можно с использованием приборов ночного видения, основанных на электронно-оптических преобразователях инфракрасного излучения в световое изображение. Более эффективными средствами военной разведки в темное время суток и плохих погодных условиях являются тепловизоры. Вслед за тепловидением развиваются методы и средства антитепловизионной защиты (АТВЗ).

Существует множество систем АТВЗ для разных видов войск и техники. Важное направление развития АТВЗ — это универсальность применения наряду с гибкостью и эффективностью результатов действия. Все чаще используются разведывательные комплексы, включающие в своем составе тепловизор и радар. Поэтому средства АТВЗ должны обладать и антирадарными свойствами [1–3].

Известно, что пассивные антитепловизионные покрытия (АТВП) по сравнению с пассивно-активными и активными имеют большую универсальность за счет возможности

применения антирадарных покрытий (типа «Накидка» для бронетехники) [4]. Переход от односвязной конструкции к модульной (однослойной или многослойной) обеспечивает свойства многофункциональности. Таким образом, теоретические и практические исследования в направлении развития пассивной модульной АТВЗ актуальны как в среднесрочной (5–10 лет), так и долгосрочной перспективе (более 10 лет).

Основные свойства антитепловизионных покрытий

Теплофизический критерий качества АТВП. Действие большинства пассивных АТВП основано на принципе «обнуления» разности температур между средой и поверхностью защищаемого объекта [2, 3]. Значение температуры на поверхности объекта T_s может быть высоким. Для повышения антитепловизионной скрытности применяют АТВП, что приводит к температуре на его внешней поверхности T_A более низкой, чем для незащищенного объекта. Схема теплообмена с внешней средой (воздухом) незащищенного объекта и объекта с АТВП представлена на рис. 1. В случае отсутствия АТВП плотность теплового потока q от объекта описывается формулой:

$$q = (T_v - T_s) / R_o; R_o = 1/\alpha_s + 1/\alpha, \quad (1)$$

где T_v — среднеобъемная температура внутри объекта, °С; T_s — температура на поверхности объекта, °С; R_o — термическое сопротивление

объекта, $\text{м}^2 \cdot \text{К} / \text{Вт}$; α_s — коэффициент теплопередачи от объема через поверхность объекта, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; α — коэффициент теплообмена объекта и АТВП с воздухом, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Величина α_s определяется экспериментально для каждого объекта и зависит от технологии обработки поверхности, окраски и других факторов. При спокойном воздухе значение α составляет $10 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ [5].

Плотность теплового потока q для объекта с АТВП описывается формулой:

$$q = (T_v - T_A) / R, \quad (2)$$

где T_A — температура на поверхности АТВП, °С; R — термическое сопротивление объекта с АТВП, $\text{м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$. Разные конструкции АТВП и соответствующие им термические сопротивления R рассмотрены ниже.

В качестве показателя эффективности работы АТВП введен теплофизический критерий качества K , который показывает во сколько раз для защищенного объекта применение АТВП увеличивает разность температур между объектом и поверхностью АТВП по сравнению с разностью аналогичных температур для незащищенного объекта. Критерий K — это отношение температурных контрастов:

$$K = \Delta T_A / \Delta T_s;$$

$$\Delta T_A = T_v - T_A;$$

$$\Delta T_s = T_v - T_s. \quad (3)$$

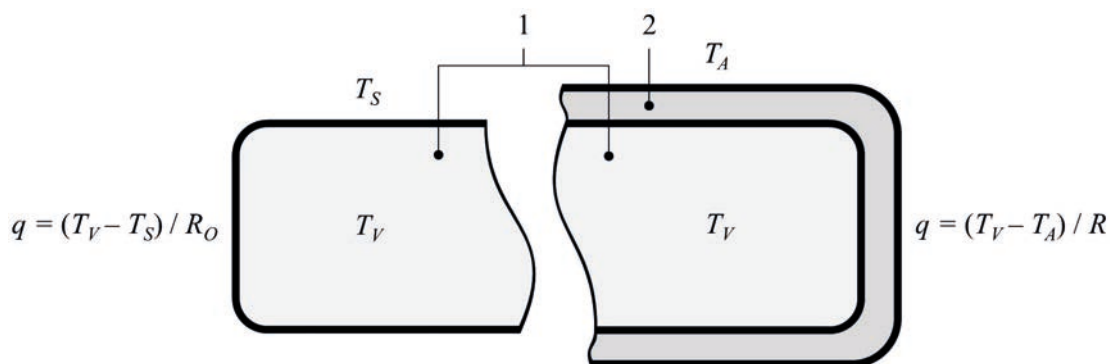


Рис. 1. Схема теплопередачи для объекта без/с АТВП: 1 — объект; 2 — АТВП; T_v — среднеобъемная температура внутри объекта; T_s — температура на поверхности объекта; T_A — температура на поверхности АТВП; R_o — термическое сопротивление объекта; R — термическое сопротивление объекта с АТВП; q — плотность теплового потока

С учетом формул (1)–(3) можно выразить критерий K через термические сопротивления:

$$K = \Delta T_A / \Delta T_S = R / R_O. \quad (4)$$

Формула (4) — это общее выражения для вычисления параметра K при разных конструктивных исполнениях АТВП.

Пороговая величина температуры на поверхности АТВП. Для гражданских и военных задач тепловизионного наблюдения существует минимальный температурный контраст $\Delta T_{\min} = T_A - T_E$ между поверхностью АТВП и окружающей средой (с температурой T_E), при котором объект может быть обнаружен посредством тепловизора. Применительно к объектам ВТ значение ΔT_{\min} не превышает нескольких градусов Цельсия и зависит от следующих факторов: необходимой дальности обнаружения объекта; углового разрешения поверхности объекта, видимой из объектива тепловизора; решаемой тепловизионной задачи (обнаружение, распознавание и идентификация); атмосферных условий; качества тепловизора; опытности оператора; применяемых алгоритмов обработки [1–3]. Современные тепловизоры обладают температурным разрешением порядка 0,1–0,3 °С и менее. Для тепловизионных задач наблюдения (обнаружение, распознавание и идентификация) важным параметром объекта и окружающей его среды (подстилающей поверхности) является тепловой шум, характеризующийся его температурным контрастом ΔT_N . Он может изменяться от 0,5–1 °С (для ровной поверхности типа степи) до 2–3 °С (для лесопосадок и лесистой местности). Также ΔT_N зависит от погодных условий.

Существующие алгоритмы обнаружения, распознавания и идентификации тепловизионных образов объектов ВТ могут успешно работать при отношении сигнала к шуму $S/N = \Delta T_{\min} / \Delta T_N$ порядка 3–5 (в зависимости от типа тепловизионной задачи) [1–4]. Учитывая данные факторы, минимальный температурный контраст ΔT_{\min} может достигать 6–8 °С. Обычно эта величина определяется экспериментально. Как результат, пороговые величины T_L и K_L принимают вид:

$$T_L = \Delta T_{\min} + T_E; K_L = (T_V - T_L) / \Delta T_S. \quad (5)$$

Эти величины характеризуют порог тепловизионной скрытности объекта с учетом основных реальных ограничивающих факторов.

АТВП, реализующее идеальную тепловизионную скрытность объекта, можно описать критерием K_{\max} :

$$K_{\max} = (T_V - T_E) / \Delta T_S. \quad (6)$$

При этом за T_E нужно принять минимальную температуру окружающей среды в данный момент времени.

Устройство и теплофизическая модель унифицированного антитепловизионного модуля

Рассмотрены четыре возможных варианта конструкции унифицированного антитепловизионного модуля (УАМ), представленные на рис. 2. В общем виде УАМ состоит из следующих основных элементов: ткани (плащевки) 1; металлизированного слоя (алюминиевой фольги) 2; теплоизолирующего материала УАМ 3; антирадарного покрытия, например, типа «Накидка» [4], но с улучшенными теплоизолирующими свойствами 4; связующих элементов 5.

Одноэлементный УАМ. Теплофизические модели одноэлементных УАМ (рис. 2, а–в) описываются полными термическими сопротивлениями R [6], которые запишутся в виде:

$$R = R_C + h / \lambda_M + R_O;$$

$$R = R_C + h / \lambda_M + H / \lambda_E + R_O;$$

$$R = R_C + h / \lambda_M + 2 \cdot H / \lambda_E + R_O, \quad (7)$$

где R_C — контактное термическое сопротивление между тканью (плащевкой) и объектом, м²·К/Вт; h — толщина материала УАМ, м; λ_M — коэффициент теплопроводности материала УАМ, Вт/(м·К); H — высота связующих элементов, м; λ_E — коэффициент эффективной теплопроводности слоя со связующими элементами и воздухом между ними, Вт/(м·К).

Коэффициент эффективной теплопроводности слоя λ_E , занятого частично связующими элементами и воздушной прослойкой, рассчитывается по модели Максвелла [7]:

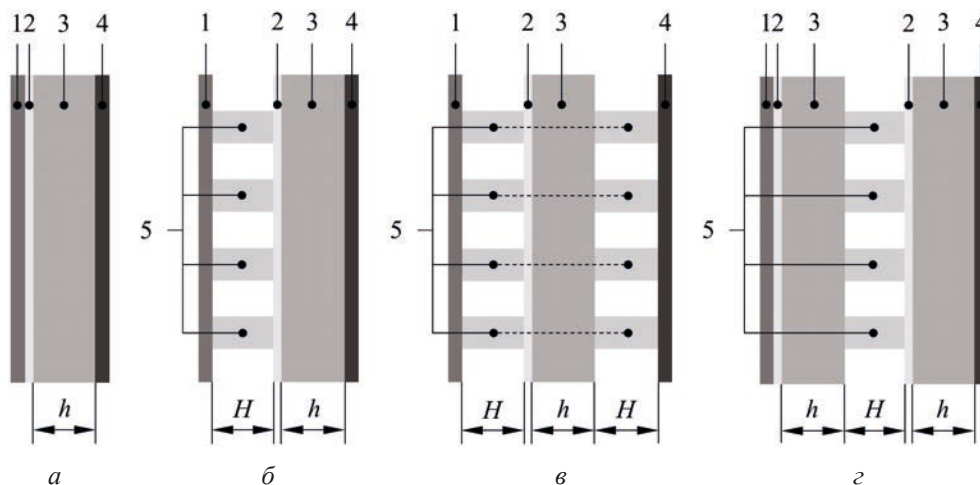


Рис. 2. Конструкции УАМ: а — одноэлементный; б — одноэлементный с односторонними выступами; в — одноэлементный с двухсторонними выступами; г — двухэлементный; 1 — ткань (плащевка); 2 — металлизированный слой; 3 — материал УАМ; 4 — антирадарное покрытие; 5 — связующие элементы; h — толщина материала УАМ; H — высота связующих элементов (воздушной прослойки)

$$\lambda_E = \lambda_M \cdot (1 - V) + \lambda_A \cdot V = k_1 \cdot \lambda_M + k_2 \cdot \lambda_A,$$

где λ_A — коэффициент теплопроводности воздуха, Вт/(м·К); V — объемное содержание воздушных включений, м³; k_1 — коэффициент, показывающий отношение площади выступов 5 на рис. 2 к общей площади УАМ; k_2 — коэффициент, показывающий отношение оставшейся площади к общей площади УАМ.

Теплофизические критерии качества K одноэлементных УАМ (рис. 1, а–в) соответствуют формуле (4) с учетом полного термического сопротивления согласно формуле (7).

Одноэлементные УАМ из сплошного материала (рис. 2, а) недорогие. Их основной недостаток — это низкая теплофизическая защита (коэффициент K), что приводит к необходимости увеличения толщины при высоком температурном контрасте между объектом и средой.

Одноэлементные УАМ с односторонними и двухсторонними связующими элементами (рис. 2, б и в) имеют более высокое теплофизическое качество K (особенно последний вариант). При этом наличие каждого слоя со связующими элементами 5 приводит к появлению дополнительного радиационного потока, который практически «обнуляется» за счет высокого коэффициента отражения (0,9–0,93) алюминиевой фольги 2. Однако в этих конструкциях УАМ непосредственный контакт слоя связующих элементов 5 с объектом вы-

зывает ухудшение механических и теплофизических свойств УАМ при эксплуатации. Поэтому их практическое применение для АТВП ограничено.

Двухэлементный (однослойный) УАМ. По аналогии с одноэлементными УАМ (рис. 1, а–в) полное термическое сопротивление R_1 двухэлементного УАМ (рис. 2, г) можно записать следующим образом:

$$R_1 = R_C + 2 \cdot h / \lambda_M + H / \lambda_E + R_O. \quad (8)$$

Тогда теплофизический критерий качества K_1 двухэлементного УАМ (рис. 2, г) с учетом формул (1)–(3) принимается в следующем виде:

$$K_1 = R_1 / R_O = \\ = 1 + (R_C + 2 \cdot h / \lambda_M + H / \lambda_E) / R_O.$$

Двухэлементные УАМ с воздухом между слоями (рис. 2, г) имеют достаточно высокий теплофизический критерий качества K и свойства скрытности по сравнению с одноэлементными УАМ с выступами (рис. 2, б и в). Наличие второго слоя из материала УАМ 3 с металлизированным слоем 2 образует дополнительную (вторую) поверхность контакта связующих элементов 5, что повышает общую жесткость УАМ. В дальнейшем такой вариант конструкции принят за основной и назван однослойным.

Конструкция и теплофизическое описание многослойного антитепловизионного покрытия

Предложенный однослойный УАМ (рис. 2, *з*), являющийся основным однослойным модулем, не всегда обладает достаточными свойствами скрытности. Тогда из нескольких таких слоев собирается многослойный УАМ, что необходимо для улучшения эффективности работы АТВП (уменьшения теплофизического критерия K). Конструкция многослойного УАМ представлена на рис. 3.

Теплофизический критерий качества K_N многослойного УАМ можно вычислить по формуле:

$$K_N = N \cdot K_1 - (N - 1), \quad (9)$$

где N — количество слоев (однослойных УАМ). При этом принято, что тепловой контакт между соприкасающимися слоями УАМ идеальный ($R_C = 0$), что обеспечивается достаточно сильным прижатием однослойных УАМ.

Формула (9) позволяет просто оценить необходимое число слоев для различных типов АТВЗ. Так, для АТВП, реализующих идеальную скрытность объекта (согласно формуле (6)) можно определить необходимое число однослойных УАМ:

$$N_{\max} = [(K_{\max} - 1)/(K_1 - 1)] + 1. \quad (10)$$

Квадратными скобками в формуле (10) обозначена целая часть числа.

Сравнение экспериментальных и теоретических результатов для однослойного и двухслойного антитепловизионных модулей

Изготовлены экспериментальные образцы однослойного (рис. 2, *з*) и двухслойного (рис. 3) УАМ. Использовался пенополиэтиленовый лист ($h = 5$ мм), с металлизированным покрытием (фольгой) на одной стороне (толщиной 0,2 мм) [8, 9]. Размеры УАМ выбраны 300×300 мм. Связующие элементы готовились из более плотного пенополиэтилена [8] в форме параллелепипеда размерами 5×5 мм ($H = 10$ мм). Сборка выполнялась по технологии склеивания составом на основе каучука и резины с последующей сушкой. Общая толщина однослойного УАМ составила 20 мм, а двухслойного — 40 мм. Испытания на изгиб и вибрацию показали, что требуемая механическая устойчивость УАМ по восстановлению формы выполняется.

Тепловизионные исследования по определению теплофизических характеристик УАМ проводились при средней температуре воздуха в помещении $T_E = 22,8$ °С. Расчеты проводились по формулам (1)–(9). При этом, кроме вышеописанных геометрических параметров УАМ, использовались параметры: $\alpha_s = 20$ Вт/(м²·К); $\lambda_M = 0,032$ Вт/(м·К); $\lambda_E = 0,0223$ Вт/(м·К). Основные результаты расчетов и экспериментов представлены в табл.

Превышение экспериментально полученного критерия K над расчетным для однослойного и двухслойного УАМ объясняется тем, что в теплофизической модели УАМ не учтено влияние

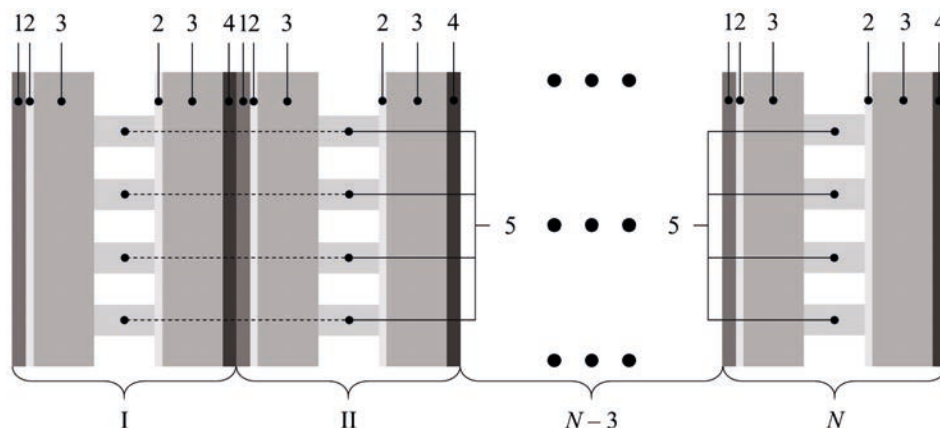


Рис. 3. Конструкция многослойного УАМ: 1 — ткань (плащевка); 2 — металлизированный слой; 3 — материал УАМ; 4 — антирадарное покрытие; 5 — связующие элементы; I, II, N — однослойные УАМ

Таблица

Результаты тепловизионных экспериментов объекта без/с УАМ

Поверхность нагретого объекта	Критерий качества K		Данные измерений		
	расчет	эксперимент	$T_p, ^\circ\text{C}$	$T_A, ^\circ\text{C}$	$\Delta T_A, ^\circ\text{C}$
Без УАМ	1	1	85	80,2*	4,8*
С однослойным УАМ	6	7,021	68	34,3	33,7
С двухслойным УАМ	11	11,52	84,2	28,9	55,3

*Величины T_A и ΔT_A при отсутствии УАМ соответствуют значениям T_S и ΔT_S

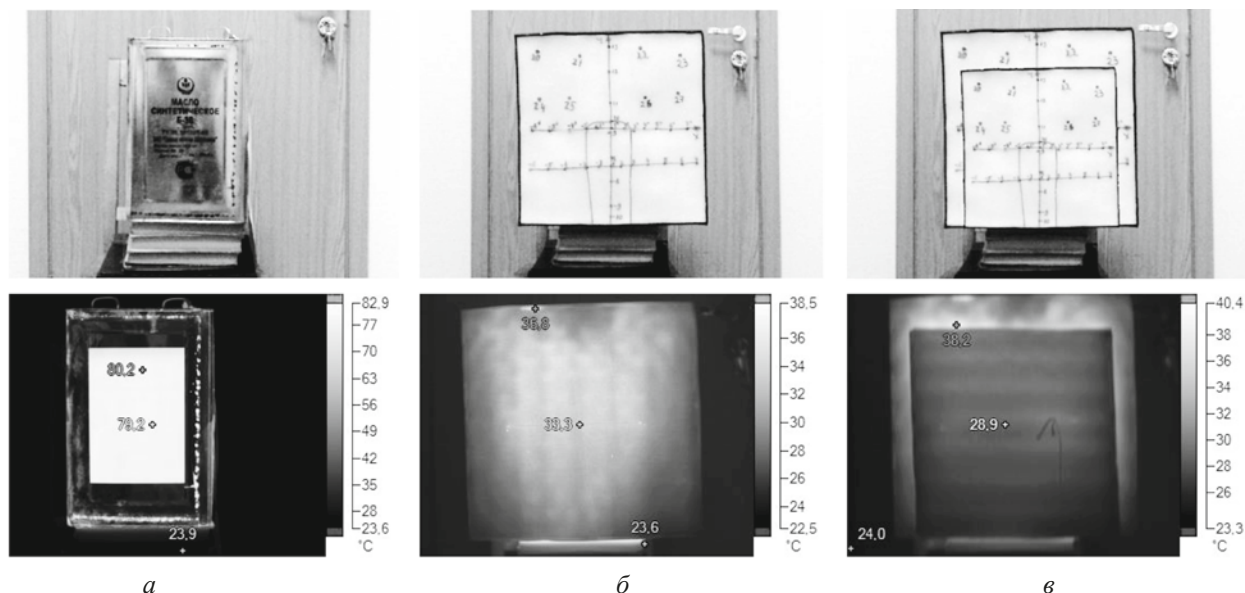


Рис. 4. Фото объекта без/с УАМ и результаты тепловизионной съемки: а — нагретый объект без УАМ; б — объект с однослойным УАМ; в — объект с двухслойным УАМ

имеющихся слоев (термического сопротивления) ткани (плащевки).

Тепловизионные изображения нагретого объекта без АТВП на расстоянии 1,5 м и защищенного одним и двумя однослойными УАМ представлены на рис. 4.

Результаты тепловизионной съемки (рис. 4) иллюстрирует эффект ослабления и «расплывания» температурного поля в поперечном направлении при использовании пассивного АТВП на основе УАМ. Переход от нагретого объекта без защитного покрытия к защищенному одним и двумя однослойными УАМ уменьшает температурный контраст на поверхности и повышает степень антитепловизионной защиты.

Материалы для изготовления пассивных АТВП. Пассивные АТВП основаны на использовании УАМ в виде монолитного элемента простой формы и с фиксированными размерами, способного обеспечивать в сборе различные ге-

ометрии полностью собранного покрытия. В качестве УАМ подходят элементы простой геометрии: правильный треугольник, квадрат, ромб, трапеция и шестигранник. Каждый из них имеет свои достоинства и недостатки. Так, шестигранные модули позволяют реализовать сложные геометрии полного АТВП при сравнительно умеренных трудозатратах на изготовление. Универсальными свойствами по критерию «простота-качество» обладают УАМ квадратной формы. Окончательный тип УАМ выбирается с учетом специфики применения АТВП. Для повышения качества АТВП в УАМ могут быть использованы связующие элементы других геометрий, например, шарообразные.

Изготовление УАМ должно обеспечивать в своем составе теплозащитный слой (рис. 2) из современных термо- и теплоизоляционных пористых материалов [8]. При этом необходимо учитывать: доступность и технологию изготов-

ления; физико-механические и теплоизоляционные свойства; токсичность. Требованиям удовлетворяют строительные материалы на основе вспененных полимеров (пенополиэтилен, пенополиуретан и др.) [9, 10]. Среди них пенополиуретан является оптимальным, так как имеет наименьший коэффициент теплопроводности, равный 0,025–0,033 Вт/(м·К) при рабочих температурах от –200 до +180 °С. Методы изготовления покрытий модульного типа должны обеспечивать разборку готовой конструкции и повторную сборку. Возможны следующие подходы к соединению элементов УАМ: склеивание; использование односторонних или двухсторонних соединительных элементов (скотч, липучка и др.); сшивка. Выбор технологии соединения элементов УАМ в АТВП определяется спецификой использования АТВЗ.

Заключение

Полученные теоретические и экспериментальные данные показали хорошую совместимость, что подтверждает теплофизическую модель унифицированного антитепловизионного модуля.

Разработанная система пассивной антитепловизионной защиты на основе унифицированного модульного элемента может обеспечить скрытность разнообразных объектов военного назначения с соответствующей адаптацией под тип конструкции и условия эксплуатации.

Список источников

1. Якушенков Ю.Г. Инфракрасные оптико-электронные системы 3-го поколения: перспективы развития // Изв. вузов. Физика. 2013. Т. 56, № 8/3. С. 266–268.

2. Новиков И.А., Агошков О.Г. Два поколения антитепловизионной защиты // Инновационные технологии и технические средства специального назначения: труды VII общерос. науч.-практ. конф. Санкт-Петербург, 17–19 ноября 2014 года. СПб.: БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, 2015. С. 112–119.

3. Михеев С.В., Новиков И.А., Горбачев А.А. Анализ систем антитепловизионной защиты объектов // Изв. вузов. Приборостроение. 2018. Т. 61, № 9. С. 756–760.

4. Михеев С.В., Новиков И.А. Адаптивная антитепловизионная защита подвижных объектов // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2021. Т. 21, № 2. С. 163–171.

5. Исаев С.И. и др. Теория тепломассообмена: учебник для вузов; под ред. Леонтьева А.И. Изд. 3-е, испр. и доп. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018. 462 с.

6. Лыков А.В. Тепломассообмен: справочник. Изд. 2-е., перераб. и доп. М.: Энергия, 1978. 478 с.

7. Дульнев Г.Н., Новиков В.В. Процессы переноса в неоднородных средах. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1991. 248 с.

8. ГОСТ 16381–2022. Материалы и изделия строительные теплоизоляционные. Классификация. Общие технические требования. М.: Российский институт стандартизации, 2022. 16 с.

9. ГОСТ Р 58955–2020. Изделия из пенополиэтилена заводского изготовления, применяемые при изготовлении зданий и сооружений. Общие технические условия. М.: Стандартиформ, 2020. 30 с.

10. ГОСТ Р 56590–2015 Изделия из жесткого пенополиуретана теплоизоляционные заводского изготовления, применяемые в строительстве. Общие технические условия. М.: Стандартиформ, 2016. 32 с.