

УДК 621.383

## **Имитаторы динамических тепловых полей для стендовых испытаний тепловизионных систем**

*В. А. Стефанов, В. С. Кравченко*

ГНЦ РФ «ФГУП «Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем»», Москва, Россия

*Представлены характеристики имитатора тепловых изображений, разработанного по оригинальной схеме сотрудниками Государственного научно-исследовательского института авиационных систем.*

Для измерения характеристик тепловизионных датчиков в лабораторных условиях, а также для комплексных стендовых испытаний бортовых оптико-электронных систем с тепловизионным каналом возникает необходимость генерации динамических тепловых полей для подачи на оптический вход испытываемых систем. Использование физических моделей распределения температурных контрастов реальной фоноцелевой обстановки позволяет значительно сократить объем испытаний тепловизионной аппаратуры в натуральных условиях и получить существенный экономический эффект.

В практике создания и полунатурных испытаний авиационных тепловизионных систем физические модели тепловых контрастов на объектах фоноцелевой обстановки называют обычно тепловыми имитаторами. Анализ показал, что наиболее часто применяются имитаторы с двухградационными тепловыми испытательными изображениями в виде штриховых мир, состоящих из подогреваемых до нужной температуры полос. К недостаткам мир следует отнести малую точность поддержания температуры штрихов и большой разброс температуры по поверхности штрихов. Используется и другая схема имитатора, при которой отражающие покрытия нужной формы наносятся на прозрачную подложку, размещаемую в раскрыве модели абсолютно черного тела. Для данной конструкции существуют ограничения на габаритные размеры миры. Подвижная цель моделируется перемещаемой тепловой точкой, инициируемой лазерными импульсами с частотой следования несколько десятков герц.

Многоградационные тепловые изображения с подвижными элементами генерировать существенно сложнее. Известные технические решения имеют недостатки, связанные со сложностью оптико-механической схемы, технологического процесса подготовки изображения, а также высокой стоимостью. Перспективная технология модуляции тепловых пучков пленками  $\text{VO}_2$  до настоящего времени не освоена.

Оригинальная схема имитатора тепловых изображений была предложена сотрудниками нашего предприятия. Разработки проводились в конце 80-х гг. Имитатор состоит из источника излучения — модели абсолютно черного тела, раскрыв которого закрыт подвижной германиевой пластиной с наложенным силуэтным изображением цели из алюминиевой фольги. Схема позволяла получить бинарное тепловое изображение с высокой разрешающей способностью и хорошей равномерностью фона. Масштабировать изображение предполагалось специальным трансфокатором на основе германиевых линз. Позднее было выполнено усовершенствование, касающееся воспроизведения полутонов (градаций). Для этой цели предлагалось печатать трафаретное изображение на фольге через типографский полутоновый растр, изменяющий коэффициент пропускания участков фольги. Замена изображений производилась сменой транспарантов. Предусматривалась возможность наложения на фоновое изображение подвижного изображения цели. Для этого имелась дополнительная подвижная германиевая пластина-подложка. В описанном виде схема была проверена экспериментально и показала свою работоспособность. Схема имитатора была впоследствии усовершенствована. Предлагалось наносить трассовые изображения (панорамы в направлении полета) на тонкую фторопластовую пленку, имеющую высокую прозрачность в спектральном диапазоне 8—14 мкм. Пленка могла протягиваться путем перемотки перед раскрывом излучателя — модели абсолютно черного тела. Данная схема имитатора моделировала полет по трассе плавной сменой изображений. Масштабировалось изображение с помощью трансфокатора. Заслуживает внимания конструкция проекционного экрана, преобразующего обычные кинопроекционные изображения в динамические распределения термодинамической температуры на обратной стороне экрана (рис. 1).

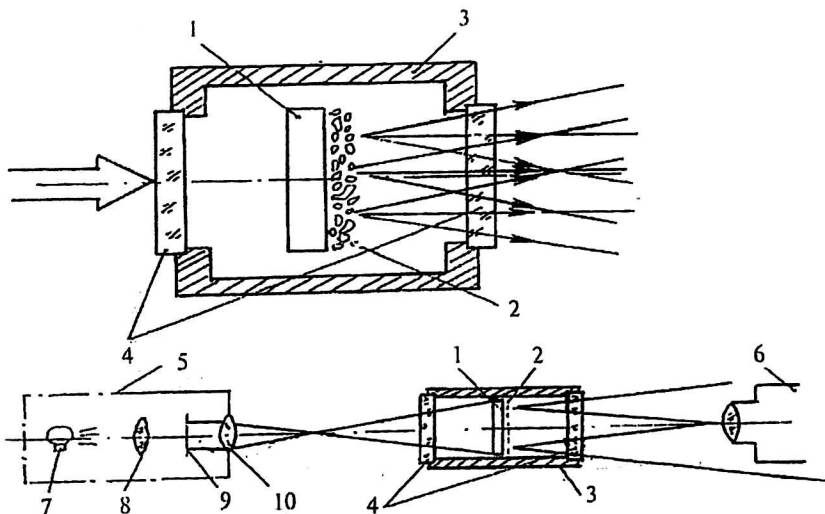


Рис. 1. Тепловой имитатор — проекционный экран

Цель разработки — обеспечение возможности преобразования информации, полученной в видимом диапазоне, в инфракрасный диапазон при испытаниях тепловизионных систем. Подложка экрана выполнена из окиси алюминия, а воспринимающий слой выполнен поглощающим проектирующее излучение, причем толщина подложки и воспринимающего слоя определяют из соотношения

$$H = \frac{k S}{c \theta \Delta T},$$

где  $k$  — коэффициент поглощения материала;

$c$  — теплоемкость;

$\theta$  — плотность;

$\Delta T$  — перегрев участка, на который падает излучение. При этом  $H \leq \gamma$ , где  $\gamma$  — пространственное разрешение.

Воспринимающий слой выполнен из графита. Экран содержит подложку 1 (см. рис. 1), выполненную в виде пленки из трехоксида алюминия, прозрачной для проектирующего и ИК-излучений, а также воспринимающий слой 2, выполненный поглощающим для проектирующего излучения, например из графита.

Экран, содержащий подложку 1 и воспринимающий слой 2, может быть помещен в термостат 3 с окнами 4 и 5 из прозрачного для проектирующего и ИК-излучений материала, расположенными со стороны входа проектирующего излучения и выхода ИК-излучения. Проекционное устройство содержит проектирующую систему 6 и испытуемый тепловизор 7. Проектирующая система содержит, в свою очередь, источник проектирующего излучения 8, конденсор 9, слайд 10 с зафиксированным в видимом диапазоне полутонным изображением объекта (не показан) и объектив 11. Оптические оси проектирующей системы и испытуемого тепловизора коллинеарны в пространстве.

Устройство работает следующим образом. Излучение от источника проходит через конденсор 9 и просвечивает негативное или позитивное изображение объекта, полученное в видимом диапазоне на слайде 10. Пройдя через объектив 11, излучение попадает на экран. Поскольку подложка 1 прозрачна для проектирующего излучения, оно проходит через нее не нагревая, и поглощается в воспринимающем излучение слое графита 2, нагревая его. Температура нагрева участков экрана обратно пропорциональна степени почернения участка (оптической плотности) слайда, через который проходит проектирующее излучение. Воспринимающий слой 2, подвергнутый нагреву, начинает излучать в ИК-диапазоне тепловое излучение в соответствии с законом Стефана — Больцмана. Диаграмма излучения воспринимающего слоя является квазиламбертовской. ИК-излучение воспринимающего слоя попадает через окно 5 термостата 3 во входной зрачок тепловизора, и в его фокальной плоскости создается изображение объекта в ИК-лучах, которое затем преобразуется тепловизором в видимое и выводится на индикаторное устройство (на рисунке не показано). При падении на экран энергии импульса светового излучения  $E_{\text{пад}}$  поглощенная энергия будет

$$E_{\text{погл}} = (1 - A) E_{\text{пад}},$$

$A$  — коэффициент отражения подложки.

Температура перегрева поглощающего слоя определяется выражением

$$\Delta T = \frac{E_p (1 - A)}{c \delta H S}.$$

Для точечного изображения с диаметром  $D$ , много большего  $\gamma^{-1}$ , температура перегрева определяется по формуле

$$\Delta T = \frac{pK_p}{hCS} \sqrt{t} \sqrt{\tau},$$

где  $p$  — падающая мощность излучения;

$h$  — толщина слоя;

$K_p$  — коэффициент поглощения материала слоя;

$C$  — теплоемкость материала слоя;

$S$  — площадь слоя;

$t$  — длительность импульса светового (проектирующего) излучения;

$\tau$  — характерное время релаксации в системе подложка — поглощающий слой.

Таким образом, эти условия определяют получаемое разрешение  $\gamma$  при наблюдении ИК-изображения в зависимости от величин, характеризующих свойства экрана, в том числе его толщину, частоту и длительность импульсов проектирующего излучения при получении как неподвижных (статических), так и подвижных (динамических) изображений. Поглощающий слой может быть обращен как к тепловизионному устройству, так и к проектирующему излучению, причем в последнем случае контраст несколько больше, хотя наблюдение тепловизионным устройством также должно вестись со стороны падения проектирующего излучения, что приведет к геометрическим искажениям. При наблюдении с противоположной стороны контраст несколько ухудшится из-за поглощения в подложке, расположенной между поглощающим слоем и тепловизионным устройством. ИК-изображения подвижных объектов при использовании импульсной подсветки синхронизированы по времени с частотой смены слайдов в проекционном устройстве. Воздействие источника проектирующего излучения может быть как непрерывным, так и импульсным, причем в качестве источника может быть использован лазер с длиной волны, пропускаемой материалом подложки слайда. Помещение экрана в термостат позволяет в больших пределах изменять начальную температуру экрана от  $-160$  до  $+200$  °С, т. е. перемещать рабочую точку экрана и в конечном итоге имитировать различные температуры фона. Практическая проработка имитаторов согласно данному предложению не проводилась, что связано с технологическими ограничениями на конец 70-х гг., к которым относится данное предложение.

Предлагаемый имитатор динамических тепловых изображений схематически изображен на рис. 2.

В состав конструкции входят несколько основных блоков: банк цифровых изображений местности, управляющий компьютер, видеопроектор, промежуточная оптическая система, транспонирующий экран, зеркальный коллиматор, блок формирования сигнала обратной связи. Видеопроектор, промежуточная оптическая система, транспонирующий экран и зеркальный коллиматор связаны между собой оптически и установлены на узле цепи динамического стенда полунатурного моделирования. Видеопроектор по сигналам управляющего компьютера формирует яркое промежуточное изображение в плоскости транспонирующего экрана специальной конструкции, предназначенного для управляемого переноса (транспонирования) лучистой мощности промежуточного изображения из видимого диапазона спектра в дальний инфракрасный с сохранением качества изображения и его динамических характеристик. Транспонирующий экран пропускает также значитель-

но ослабленное изображение в видимом диапазоне спектра, что необходимо для юстировки оптической схемы и контроля процесса преобразования спектра. Преобразованное по спектру изображение, появляющееся на обратной стороне транспонирующего экрана, через зеркальный коллиматор попадает на оптический вход датчика тепловизионной станции, установленной на динамическом стенде. Видеосигнал тепловизионного изображения с выхода датчика подается на вход блока формирования сигнала обратной связи для компенсации погрешностей преобразования изображений в имитаторе.

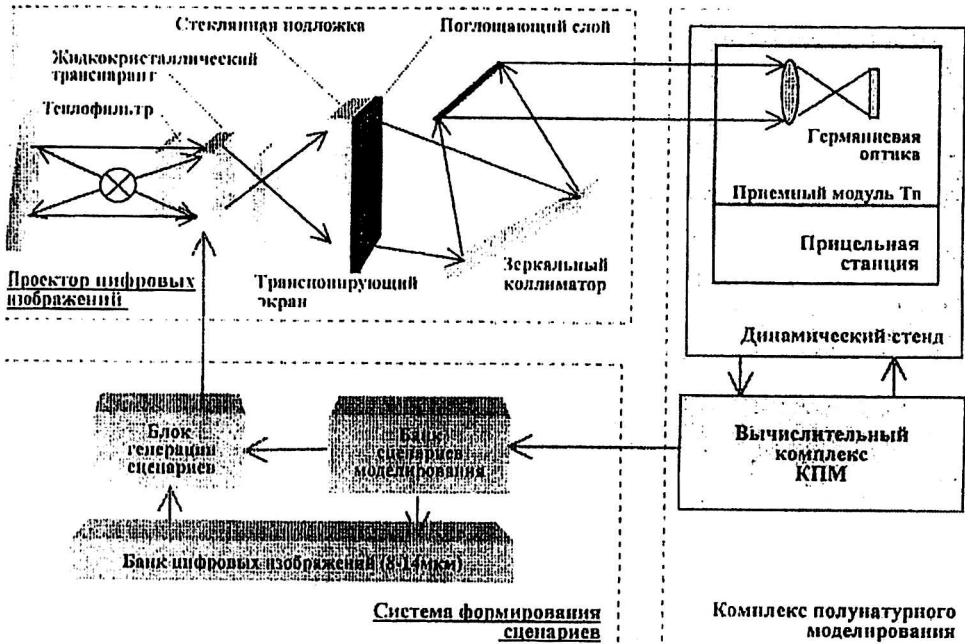


Рис. 2. Схема имитатора динамических тепловых полей

На рис. 3, а показано спектральное распределение мощности исходного изображения, сформированного видеопроектором. На рис. 3, б — спектральное распределение мощности преобразованного изображения, имеющего компоненты в видимом и дальнем ИК-диапазоне спектра, соответственно.

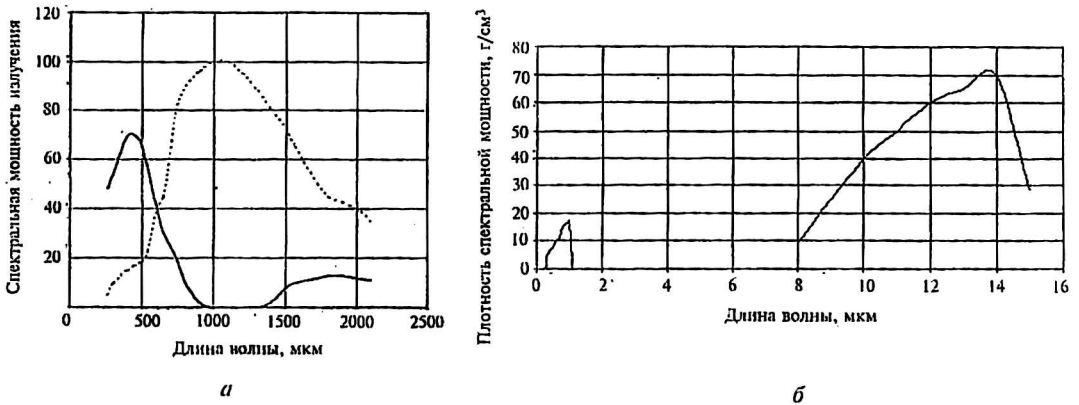


Рис. 3. Спектральное распределение мощности исходного изображения:

а — исходного: — — стекло калорекс; - - - - - излучатель 3000 с; б — преобразованного

На рис. 4 в сильно увеличенном виде показана структура обратной стороны транспонирующего экрана, который наносится на прозрачную подложку методом лазерной литографии. Промежутки между активными точками уменьшают расплывание областей локального перегрева и улучшают динамические характеристики имитатора. Для защиты создаваемого динамического теплового поля на поверхности экрана от спонтанных воздушных потоков, вызывающих искажения (смаз) изображения, экран располагается в открытых с двух сторон шахтах — демпферах воздушных потоков. Предложенная схема защиты экрана позволяет обойтись без прозрачных в ИК-области спектра окон, что улучшает качество изображения.

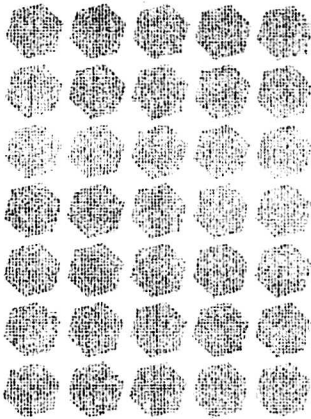


Рис. 4. Структура обратной стороны экрана

Авторами проведено математическое моделирование для оценки общей работоспособности и количественных характеристик предлагаемой схемы. Полученные оценки параметров транспонирующего экрана приведены ниже.

Материал поглощающей ячейки.....	уголь порошковый сухой
Плотность вещества, г/см <sup>3</sup> .....	1,3
Удельная теплоемкость, кДж/(кг·К).....	1
Размер ячейки раstra, мм <sup>2</sup> .....	0,1x0,1
Коэффициент заполнения площади экрана.....	0,95
Масса вещества на 1 мм <sup>2</sup> площади экрана, г.....	2,136·10 <sup>-9</sup>
Разогревающая мощность излучения, Вт/мм <sup>2</sup> .....	8,9·10 <sup>-4</sup>
Время разогрева пиксела на 1 °С, с/град.....	2,4·10 <sup>-6</sup>
Теплоемкость поглощающей поверхности экрана, Дж/град.....	$Q = 4,5 \cdot 10^{-5}$
Теплоемкость подложки, Дж/град.....	$Q = 339,3$
Отношение теплоемкости подложки к теплоемкости поглощающей поверхности, раз.....	$N_q = 3\ 968\ 000$

Оценочные расчеты параметров транспонирующего экрана и технические характеристики остальных компонентов, входящих в состав имитатора динамических тепловых изображений, дают возможность прогнозировать следующие характеристики предлагаемого имитатора:

геометрическая разрешающая способность, твл, не хуже.....	600—800
минимальный температурный контраст соседних пикселей, °С.....	0,1
динамический диапазон воспроизводимых тепловых градаций для деталей изображения среднего размера, дБ.....	20—30
инерционность полной смены содержания кадра, с.....	0,1
время непрерывной работы, ограниченное возрастанием низкочастотной помехи, связанной с повышением средней температуры подложки, ч, не менее.....	1 (без специаль- ного охлаждения)

Отметим, что генерируемое имитатором тепловое поле может восприниматься тепловизорами как со сканирующими, так и с матричными приемниками.

Для оценки общей работоспособности предлагаемого имитатора и прогнозирования его важнейших характеристик нами был изготовлен макет имитатора, собрана и отлажена экспериментальная установка. В качестве регистрирующего устройства использовался отечественный тепловизор "Иртис-200". В состав экспериментальной установки входил транспонирующий экран, размещенный как центральная перегородка в шахте прямоугольного сечения из черного дюралюминия. Крепления экрана в шахте герметизировались по периметру для исключения движения воздуха. Такая конструкция экранного узла обеспечивает демпфирование движения воздушных масс около поверхности транспонирующего экрана и позволяет обойтись без защитных окон из дорогостоящей керамики, прозрачной в дальней ИК-области спектра. Транспонирующий экран изготовлялся с использованием лазерной полутонковой печати (растрирования) на прозрачную полиграфическую пленку производства фирмы BASF. Размер полезной поверхности экрана — 170x257 мм. Коэффициент заполнения растровыми точками поверхности экрана изменялся в процессе эксперимента для достижения наилучшего качества тепловизионного изображения, так как от значения этого параметра зависит разрешающая способность получаемых изображений. Оптимальное значение данного параметра составило 90 %.

Для создания изображения в видимом спектральном диапазоне наилучшим образом подходит мультимедийный проектор в комбинации с управляющим компьютером, обеспечивающим получение динамических изображений. В качестве замены в данном эксперименте применялся проектор слайдов с аналогичными параметрами светового потока.

В состав оборудования входят основные блоки: диапроектор, транспонирующий экран в светозащитной шахте, регистрирующий прибор — тепловизор марки "Иртис-200", управляющий компьютер с математическим обеспечением для регистрации и обработки тепловизионных изображений. Использовалось математическое обеспечение фирмы Flir Systems "Infrared Explorer".

Тепловизор "Иртис-200" относится к классу сканирующих устройств с одноканальным приемником и имеет следующие основные характеристики.

Приемник	InSb or HgCdTe охлаждаемый жидким азотом	HgCdTe термоэлектрическое охлаждение
Спектральный диапазон, мкм	3—5 или 8—12	3—5
Чувствительность к перепаду температур на уровне 30 °С, °С.....		0,05
Поле зрения, град.....		25x20
Мгновенное поле зрения, мрад.....		2
Базовый диапазон контролируемых температур, °С.....	от -20 до +200; (-60 до 1300 в расширенном варианте)	
Диапазон рабочих температур, °С.....	от -20 до +50	
Погрешность измерения абсолютных температур по АЧТ.....		±1 °С или ±1 %
Разрешение кадра, точек.....		256x256
Время формирования кадра, с.....		1,5

Для проведения эксперимента были изготовлены черно-белые слайды тестовых изображений — градационных шкал, мир разрешающей способности и сюжетных картин (фотографий бронетехники). Диапроектор был дора-

ботан для уменьшения доли инфракрасного излучения в выходном световом потоке. С этой целью в его оптическую схему был установлен дополнительный теплофильтр.

Изготовленная экспериментальная установка позволяет проверить предложенный принцип формирования тепловых изображений. Для этого слайд тестового изображения помещался в диапроектор, световое изображение слайда фокусировалось со стороны подложки на активную плоскость транспонирующего экрана. Вследствие поглощения энергии излучения диапроектора углеродным покрытием на активной поверхности транспонирующего экрана возникало распределение температур углеродного слоя, отображающее содержание тестового слайда в позитиве (более яркому участку слайда соответствовало большее повышение температуры в сопряженной точке экрана). С помощью тепловизора полученное температурное поле преобразовывалось в тепловизионное изображение, которое можно было фиксировать с помощью программы термообработки и наблюдать на экране монитора. Для каждого слайда подбиралось (диафрагмированием) оптимальное значение светового потока диапроектора, обеспечивающее наилучшее по контрастности и разрешающей способности качество тепловизионного изображения. Возможность передачи движения в кадре проверялась сдвигом светового изображения по поверхности транспонирующего экрана.

На рис. 5 в качестве примера приведено тепловизионное изображение полутоновой шкалы, которая использовалась как один из тест-объектов.

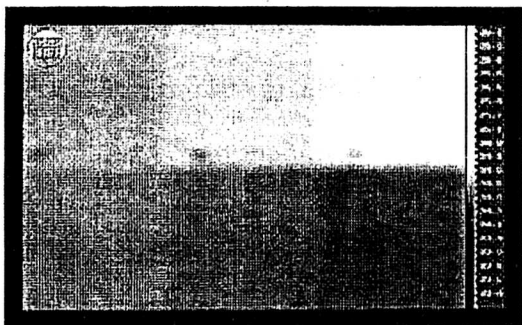


Рис. 5. Тепловизионное изображение полутоновой шкалы

## Выводы

1. Предложенный принцип действия теплового имитатора подтвердил свою работоспособность при генерации как статичных, так и подвижных изображений.

2. Экспериментально полученные тепловые изображения имеют тепловой контраст порядка  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Увеличить тепловой контраст можно более тщательной фильтрацией ИК-компоненты светового изображения и выбором большей толщины подложки экрана, что согласуется с оценочными расчетами.

3. Для исключения помех, вызванных переотражением ИК-излучения в помещении и воздействием паразитных тепловых потоков, требуется заключение конструктивных элементов имитатора в тепловой экран из металла с хорошей теплопроводностью (алюминия, меди). Толщина материала экрана определяется в итоге контрастной чувствительностью применяемого тепловизионного прибора.

**Л и т е р а т у р а**

1. Стефанов В. А., Кравченко В. С. Имитаторы динамических тепловых полей для стендовых испытаний тепловизионных систем: Тез. докл. 17-й Междунар. науч.-техн. конф. по фотоэлектронике и приборам ночного видения. — М., ГНЦ РФ ФГУП «НПО «Орион»», 2002.
2. Ллойд Дж. Системы тепловидения. — М.: Мир, 1978.
3. Жуков А. Г., Горюнов А. Н., Кальфа А. А. Тепловизионные приборы и их применение. — М.: Радио и связь, 1983.

## **Simulators of dynamic thermal fields for bench tests of IR imager systems**

*V. A. Stefanov, V. S. Kravchenko*

The State Research Institute for Aircraft Systems, Moscow, Russia

*Features of the thermal images simulator, which is designed by the employees of the State Research Institute for Aircraft Systems under the original plan, are submitted in the paper.*