

DOI: 10.24937/2542-2324-2022-4-402-120-125
УДК 535.233+537.312.5+621.384.3

С.С. Зенченко

ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, Россия

ОСОБЕННОСТИ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ ИК-ПОЛЯ ОТ 4-ЩЕЛЕВОЙ ДИСК-МИШЕНИ И АБСОЛЮТНО ЧЕРНОГО ТЕЛА В ДИАПАЗОНЕ СПЕКТРА 7–14 МКМ

Объект и цель научной работы. Объектом является процесс измерения инфракрасного (ИК) поля тест-мишеней. Цель – контроль и изучение ИК-поля и его динамики при различных условиях его создания имитатором абсолютно черного тела (АЧТ).

Материалы и методы. Применена техническая система, содержащая набор автоматически вращающихся 4-щелевых мишеней, которые, с одной стороны, облучаются излучателем АЧТ и ИК-тепловизором спектрального диапазона 7–14 мкм, с другой – регистрируют прошедшее через них поле.

Основные результаты. Получены оценки ИК-поля для шести различных мишеней. Определены количественные соотношения между параметрами поля мишеней, полем, окружающим щели мишеней, и полем, первично созданным АЧТ. Выведены параметры, определяющие эффективность тепловизионной системы при регистрации различных по размерам мишеней. Установлены границы 50 % потерь выявления структуры мишени и рассмотрены методы поддержания применимости техники.

Заключение. Получены данные о допустимых параметрах разрешения прибора, методах дополнительного поддержания его возможностей и дальнейшего развития способа контроля с использованием тест-мишеней.

Ключевые слова: тепловизионные приборы, мишень, абсолютно черное тело, эффективность, гидрофизическое направление, инфракрасный спектр, разрешение, методика.

Автор заявляет об отсутствии возможных конфликтов интересов.

DOI: 10.24937/2542-2324-2022-4-402-120-125
UDC 535.233+537.312.5+621.384.3

S.S. Zenchenko

Krylov State Research Center, St. Petersburg, Russia

PECULIARITIES AND RESULTS OF INFRARED SIGNATURE MEASUREMENT ON 4-SLOT DISK TARGET AND ABSOLUTELY BLACK BODY AT WAVELENGTHS 7–14 μm

Object and purpose of research. This paper discusses infrared signature measurements for test targets. The purpose of the study was to control and investigate infrared signature and its dynamics in different conditions of its generation by a simulator of an absolutely black body.

Materials and methods. The measurement was performed with a set of automatically rotating 4-slot targets. From one side, these targets were subject to the radiation from an absolutely black body and a 7–14 μm IR thermal imager. On the other side, the targets had the instrumentation that recorded infrared signals.

Main results. The study yielded infrared signature estimates for six different targets. It also yielded the expressions linking the parameters of the target field, the field around target slots and the initial field generated by the absolutely black body. It was also possible to obtain the parameters that determine the efficiency of IR imager in the detection of targets of different size. The study established the boundaries for 50 % loss of target structure detection and investigated the methods that maintain the applicability of this technique.

Для цитирования: Зенченко С.С. Особенности и результаты измерений ИК-поля от 4-щелевой диск-мишени и абсолютно черного тела в диапазоне спектра 7–14 мкм. Труды Крыловского государственного научного центра. 2022; 4(402): 120–125.

For citations: Zenchenko S.S. Peculiarities and results of infrared signature measurement on 4-slot disk target and absolutely black body at wavelengths 7–14 μm . Transactions of the Krylov State Research Centre. 2022; 4(402): 120–125 (in Russian).

Conclusion. The study yielded the data about acceptable resolution parameters of the IR imager, as well as the methods for maintaining its capabilities and further development paths for this control technology based on test targets.

Keywords: IR imagers, target, absolutely black body, efficiency, hydrodphysics, infrared spectrum, resolution, technique.

The author declares no conflicts of interest.

Введение

Introduction

Оптические тепловизионные приборы находят широкое применение для решения задач гидрофизического направления как в гражданском флоте, так и в ВМФ. По сравнению с другими областями их применение для гидрофизических условий имеет свои особенности, поскольку как внешние (морские) условия, так и источники теплового поля отличаются значительной нестабильностью. Поэтому последние являются предметом особого исследования и могут быть выделены с учетом пространственно-временной изменчивости параметров морской поверхности. При этом уровень полезного сигнала может быть не более десятых и сотых долей градуса, а масштабы проявления – уменьшаться до сантиметровых и миллиметровых значений.

В связи с этим решения технического и методического характера составляют основу для повышения эффективности применения тепловизионной техники в гидрофизическом направлении. Почти 50-летний опыт создания методических основ для применения этой техники [1–5] был основан на использовании аналоговых ИК-радиометрических приборов, обеспечивающих получение осредненных сигналов поля температуры. Большой заслугой этих работ явилось изучение эффективности применения приборов при различных углах визирования, вариациях высоты и удалении от морской поверхности, а также влияния отраженного излучения небосвода, солнечной подсветки, волнения и т.д. Результаты остаются основой для применения и современных моделей оптических цифровых тепловизионных приборов.

Современные типы приборов [6] отличаются наличием высокочувствительных приемников излучения с применением технологий их охлаждения азотом или замкнутой системы охлаждения Стирлинга для уменьшения уровня шумов. Также используются матричные приемники излучения с большим числом пикселей, каждый из которых фактически играет роль отдельного приемника теплового излучения. При таких конфигурациях увеличивается эффективность прибора при регистрации теплового поля с высоким разрешением.

Однако определение характеристик каждого типа приборов осуществляется отдельно в соответствии со стандартом [7–8] и длительной, кропотливой метрологической аттестацией. При этом практическое, особенно комплексное, применение приборов, отвечающих различным диапазонам ИК-спектра, обязывает пользователя самостоятельно подстраивать каждый из них к условиям, проводить тарировку, настройку и выбор для решения своих задач. И если есть возможность заранее быть подготовленным к применению прибора именно нужной конфигурации, то это всегда актуально.

К примеру, для задач гидрофизического направления необходимо использовать приборы длинноволнового диапазона ИК-спектра 7–14 мкм. Этот диапазон отличается наилучшим пропусканием атмосферы, имеет наибольшую интенсивность излучения и несет информацию о тепловых изменениях очень тонкого излучающего слоя морской поверхности (порядка десятков микрометров). При этом важной мерой эффективности применения тепловизионного канала является разрешающая способность. Есть традиционные способы оценки этого параметра, основанные на кропотливых измерениях при установленных сроках плановой поверки каждого прибора [8]. Однако практическое использование, опираясь на «классический» подход, заставляет искать более оперативные методы такой оценки.

Суть рассматриваемого метода заключается в измерении искусственно создаваемого излучателем абсолютно черного тела (АЧТ) ИК-поля в диапазоне 7–14 мкм при его распространении через 4-щелевые мишени калиброванного размера. Осуществляется измерение характеристик поля, при которых регистрируется щелевая структура мишени, для последующей оценки показателей эффективности.

Характеристики технических средств, используемых в исследованиях

Parameters of the equipment used in the study

Тепловизор:

- диапазон ИК-спектра – 7–14 мкм;
- тип приемника – неохлаждаемый болометр;

- фокусное расстояние – 30 мм;
- объектив – 32,4×24,6°;
- мгновенное поле зрения – 0,57 мрад;
- температурное разрешение – 0,05 °С;
- тип матрицы – 1024×768 пикс.;
- рабочий диапазон температур – –25...50 °С;
Абсолютно черное тело:
- диапазон воспроизводимых температур – 0...125 °С;
- погрешность поддержания температуры излучателя – 0,001 °С;
- напряжение питания – 220 В;
- потребляемая мощность – 200 ВА.

Конструкция измерительной системы

Measurement system design

На рис. 1 (см. вклейку) показаны компоновка и функционирование элементов системы измерения. Экспериментальная система включает излучатель АЧТ 1, блок с набором мишеней из четырех щелей, которые собраны в барабане 3, вращающемся под действием привода 2. На барабане симметрично установлены шесть калиброванных мишеней, между которыми размещены одинаковые отверстия. Барабан вместе с приводом размещены внутри кожуха 4, в котором имеется сквозное отверстие 5, превышающее по диаметру размер любой мишени.

Напротив сквозного отверстия 5 установлен объектив тепловизионного прибора 6. Расстояние от объектива до поверхности барабана равно фокусному расстоянию объектива. С противоположной стороны кожуха на таком же расстоянии напротив сквозного отверстия 5 располагается поверхность полости излучателя АЧТ 1. Снаружи кожуха со стороны установки АЧТ вокруг сквозного отверстия 5 размещен экран, выполненный из одного материала с диском барабана. Сигнал с тепловизионного прибора 6 выводится на компьютер для последующей обработки.

Обоснование методики измерения

Justification of the measurement methodology

Измерение параметров ИК-поля каждой мишени проводилось при различных значениях термодинамической температуры поверхности полости излучателя (10 °С, 15 °С и 20 °С), поддерживаемых процессором АЧТ. Оценка соответствующего со-

стояния каждой мишени осуществлялась на основе термограмм.

Для учета тонкой структуры поля в переходах от одной щели к другой применен метод рабочих контрольных линий и сечений. При этом для каждой мишени установлена своя расчетная ширина щели a (указано в таблице). Интерес представлял процесс формирования поля мишеней по линиям как вертикального, так и горизонтального направления (рис. 2, см. вклейку). В качестве расчета оценки принималось значение отличия радиационной температуры щели при горизонтальном сечении $T_{щели1}$ и при вертикальном сечении $T_{щели2}$ от величины фиксированной термодинамической температуры $T_{АЧТ}$. Результаты сопоставления сведены в таблице.

Кроме указанных параметров температурных показателей под действием постоянного теплового излучения полости АЧТ формируется поле областей вокруг щели из-за нагрева. Оно считается полем экрана, а фактически свидетельствует о тепловом состоянии барабана и может характеризоваться параметром $T_{экрана}$. Его значение зависит преимущественно от температуры окружающей среды; в процессе измерений среднее значение поля температуры экрана была около 25 °С.

Окончательным показателем эффективности применения как тепловизионной техники с выбранными параметрами, так и мишени с определенными размерами может служить показатель, характеризующий отношение разности радиационных температур $T_{экрана} - T_{щели}$ к разности радиационной температуры экрана и температуры АЧТ ($T_{экрана} - T_{АЧТ}$). Результаты оценки сведены в таблице. Для объективного сопоставления результатов оценки приведены значения суммарной площади щелей в каждой мишени (S , мм²).

Основные результаты исследования

Main results

Результаты проведенных измерений представлены на рис. 2–6. На рис. 2 показано сравнение результатов измерений для самой большой мишени (№ 1) и граничной мишени (№ 7), начиная с которой не просматривается структура мишени. При этом в качестве примера для получения дополнительной информации иллюстрируется способ применения контрольных сечений.

На рис. 3 (см. вклейку) представлены изображения распределений измеренного поля от упомя-

нутых выше 4-щелевых мишеней и от разделительного отверстия № 2. На рис. 4 (см. вклейку) приведены в качестве примера данные динамики отличия поля, проходящего через каждую из мишеней от основного поля АЧТ в зависимости от площади мишеней для сечения горизонтального контроля этого поля. На рис. 5 (см. вклейку) представлены данные динамики отведенного тепла (потерянного) у разных мишеней для горизонтального сечения. В таблице выведены расчетные значения показателя эффективности для различных мишеней и способов контроля теплового поля.

Анализ этих данных свидетельствует, что при больших размерах мишени легко просматриваются ее структура и перемычки между щелями. На рис. 2 представлен набор термограмм, соответствующих всем исследуемым мишеням (№ 1, 3, 5, 7, 9, 11)

и большим отверстиям (№ 2), отделяющим основные мишени на барабане друг от друга. Начиная с мишени уменьшенного размера (№ 7), их структура на термограмме не видна. Область малых мишеней похожа на квадратное пятно с последующим размывтием контура у малоразмерных образцов от квадрата до круга.

При этом наличие щелей у малоразмерных мишеней можно подтвердить только на термограммах при использовании линии выделения L1. Она, в соответствии с термограммами на рис. 2а и 2б мишени № 1 и мишени № 7, характеризует сечение в горизонтальной плоскости L1 поперек щелей.

На рис. 4 приведены зависимости разности радиационной температуры щелей после прохождения теплового потока через мишень и темпера-

Таблица. Результаты измерений радиационной температуры мишеней

Table. Measurement results for IR radiation from targets

№ п/п	№ мишени	$T_{\text{АЧТ}},$ °C	$T_{\text{экрана}},$ °C	$T_{\text{щели1}},$ °C	$T_{\text{щели2}},$ °C	$\Delta T =$ $= (T_{\text{щели1}} - T_{\text{АЧТ}}) /$ $(T_{\text{щели2}} - T_{\text{АЧТ}}),$ °C	$(T_{\text{экрана}} - T_{\text{щели}}) /$ $(T_{\text{экрана}} - T_{\text{АЧТ}}),$ $K_{\text{эфф}}$	$S, \text{мм}^2$
1	№ 1 $A = 6 \text{ мм}$	10	25,73	11,53	11,46	1,53/1,46	0,903/0,907	1764
		15	25,31	15,98	15,87	0,98/0,87	0,904/0,916	
		20	24,59	20,48	20,38	0,48/0,38	0,895/0,917	
2	№ 2 (отверстие) $D = 57 \text{ мм}$	10	25,37	11,21	11,14	1,21/1,14	0,921/0,925	2550,5
		15	25,23	15,78	15,75	0,778/0,75	0,924/0,927	
		20	24,38	20,34	20,28	0,34/0,28	0,922/0,936	
3	№ 3 $A = 4,5 \text{ мм}$	10	25,84	11,69	11,63	1,69/1,63	0,893/0,897	900
		15	25,39	16,06	16,17	1,06/1,17	0,898/0,887	
		20	24,9	20,66	20,59	0,66/0,59	0,865/0,880	
4	№ 5 $A = 2 \text{ мм}$	10	25,88	12,48	12,37	2,48/2,37	0,844/0,851	324
		15	25,57	19,81	19,85	4,81/4,85	0,545/0,541	
		20	25,06	20,83	20,66	0,83/0,66	0,896/0,87	
5	№ 7 $A = 1 \text{ мм}$	10	25,92	17,68	17,72	7,68/7,72	0,518/0,515	81
		15	25,53	17,50	17,43	2,60/2,54	0,497/0,509	
		20	25,17	22,60	22,54	2,55/2,57	0,492/0,488	
6	№ 9 $A = 0,5 \text{ мм}$	10	25,91	16,11	16,58	6,11/6,58	0,616/0,586	20,25
		15	25,59	18,66	18,66	3,66/3,66	0,654/0,654	
		20	25,51	22,02	22,07	2,02/2,07	0,624/0,633	
7	№ 11 $A = 0,25 \text{ мм}$	10	25,88	18,59	18,59	8,59/8,59	0,459/0,459	9,0
		15	25,77	21,23	21,91	6,23/6,91	0,421/0,358	
		20	25,42	23,47	23,56	3,47/3,56	0,36/0,343	

туры АЧТ для различных площадей мишеней. Видно, что для больших мишеней отличие от температуры излучателя небольшое. С уменьшением температуры АЧТ отличие радиационной температуры щели увеличивается, а самый резкий контраст соответствует малым размерам мишени, поскольку из-за соотношения площадей между мишенью и площадью поверхности оптической системы поле яркостной температуры экрана (фона) доминирует над полем щели и они начинают сливаться.

Если проанализировать представленную на рис. 5 зависимость отведенного тепла, то наблюдается некоторое постоянство отведенного тепла при больших размерах мишени. При этом с увеличением базовой температуры АЧТ отвод тепла меньше по средним показателям, поскольку меньше разность температур экрана и АЧТ. При малых размерах мишени отвод тепла резко уменьшается, поскольку поле температуры мишени сливается с полем температуры экрана.

Если посмотреть на картину прохождения теплового поля (рис. 1), то можно отметить, что тепловое излучение претерпевает многократное отражение до прохода через отверстие мишеней внутри канала с барабаном мишеней и на выходе. Поэтому на входе объектива тепловизора это излучение должно отличаться от первоначально заданного и поддерживаемого с высокой точностью. А поскольку каждая мишень имеет конечные размеры щелей (толщина, длина, ширина), то тепловое излучение на выходе даже при больших размерах способно содержать некоторый спектр (ореол) изолиний. Это убедительно показывают картины 3D-вида (рис. 6, см. вклейку). При этом для больших мишеней информативной основой является поле внутри щелей, а для малоразмерных определяющая роль переходит к фону-экрану.

И наконец, если проанализировать представленные на рис. 6 материалы и сопоставить их с оценочными значениями коэффициента эффективности $K_{эфф}$, представленного в таблице, то можно констатировать, что при малых мишенях, начиная с мишени № 7 ($a = 1$ мм), этот коэффициент становится меньше 0,5 (50 %). Поэтому возможности практического применения и наблюдения аномальных температурных областей морской поверхности с размером менее 1 мм и общей площадью поверхности менее 81 мм^2 требуют дополнительной компьютерной обработки и применения методов сечений, аналогичных рассмотренным в работе и т.п.

Заключение

Conclusion

1. Проведенные исследования показали, что при измерении предполагаемых мелкомасштабных тепловых структур с размерами менее 1 мм они могут не фиксироваться на термограммах. Поэтому полезную информацию следует получать на основе дополнительной компьютерной обработки.
2. Несомненный интерес представляет применение аналогичного подхода для приборов другого спектрального диапазона (1,5–5,7 мкм) и сопоставление с данными представленных материалов.
3. Существуют дополнительные задачи для случая установления температур АЧТ выше температуры экрана.

Список использованной литературы

1. *Зенченко С.С., Поварков В.И., Самков В.М.* Угловой и многоспектральный метод измерения характеристик морской поверхности в оптическом диапазоне спектра // Оптика моря и атмосферы: тезисы докладов X Пленума Рабочей группы по Оптике океана. Ленинград, 1988. С. 414–415.
2. *Зенченко С.С., Самков В.М.* Особенности использования дистанционной аппаратуры при измерении температуры поверхности океана // Проблемы метрологии гидрофизических измерений: тезисы докладов Всесоюз. конф. Москва: ВНИИФТРИ, 1990.
3. *Зенченко С.С., Самков В.М.* Опыт практического применения ИК-радиометрической и тепловизионной аппаратуры при решении задач, связанных с тепломассообменом на границе раздела двух сред // Тепловидение в медицине, промышленности и экологии: тезисы докладов XVIII Научно-практ. конференции. Санкт-Петербург, 2014. С. 62–63.
4. *Гаврилов Д.С., Зенченко С.С., Самков В.М.* Результаты угловых и многоспектральных измерений радиационной температуры взволнованной морской поверхности // Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики: труды Всерос. конференции. Санкт-Петербург, 2016. С. 151–153.
5. *Краус Е.В.* Взаимодействие атмосферы и океана. Ленинград: Гидрометеоздат, 1976. 295 с.
6. *Зенченко С.С.* Методы и результаты эффективного применения современных тепловизионных средств измерения гидрофизических процессов // Труды Крыловского гос. науч. центра. 2021. Вып. 2(396). С. 134–138. DOI: 10.24937/2542-2324-2021-2-396-134-138.

7. ГОСТ Р 8.619-2006. Приборы тепловизионные измерительные. Методика поверки. Москва, 2006. III, 15 с. (Государственная система обеспечения единства измерений).
8. OIML R 141:2008. Procedure for calibration and verification of the main characteristics of thermographic instruments – Процедура калибровки и поверки основных параметров и характеристик термографических приборов : International Recommendations. Paris : International organization of legal metrology, 2008. 21 p.
5. Kraus E.B. Atmosphere-ocean interaction. Leningrad : Hydrometeoizdat, 1976. 295 p. (*in Russian*).
6. Zenchenko S.S. Methods and results of effective application of modern infra-red imaging technologies for measuring hydrophysical processes // Transactions of Krylov State Research Centre. Vol. 2(396). P. 134–138. DOI: 10.24937/2542-2324-2021-2-396-134-138 (*in Russian*).
7. GOST R 8.619-2006. Infrared imaging measuring instruments. Verification procedure. Moscow, 2006. III, 15 p. (State system for ensuring the uniformity of measurements) (*in Russian*).
8. OIML R 141:2008. Procedure for calibration and verification of the main characteristics of thermographic instruments – International Recommendations. Paris : International organization of legal metrology, 2008. 21 p.

References

1. Zenchenko S.S., Povarkov V.I., Samkov V.M. Angular and multispectral method of measuring characteristics of the sea surface in the optical range of spectrum // Sea and atmospheric optics: abstracts of the reports of the X Plenum of the Working Group on Ocean Optics. Leningrad, 1988. P. 414–415 (*in Russian*).
2. Zenchenko S.S., Samkov V.M. Specifics of remote instrumentation application in measuring ocean surface temperature. Metrology problems of hydrophysical measurements: abstracts of the reports of All-Soviet National Conference Moscow : VNIIFTRI, 1990 (*in Russian*).
3. Zenchenko S.S., Samkov V.M. Experience with application of IR radiometry and IR imaging instrumentation in solving the problems related to thermal and mass exchanges at two media interface // IR imaging in medicine, industry and ecology: abstracts of the XVIII Scientific and Practical Conference. St. Petersburg, 2014. P. 62–63 (*in Russian*).
4. Gavrilov D.S., Zenchenko S.S., Samkov V.M. Results of angular and multispectral method of measuring wavy

Сведения об авторе

Зенченко Сергей Сергеевич, к.т.н., начальник 703 сектора ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Тел.: +7 (812) 415-96-14. E-mail: zenchenko50@bk.ru.

About the author

Sergey S. Zenchenko, Cand. Sci. (Eng.), Head of Sector of Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: +7 (812) 415-96-14 E-mail: zenchenko50@bk.ru.

Поступила / Received: 13.07.22
Принята в печать / Accepted: 05.10.22
© Зенченко С.С., 2022

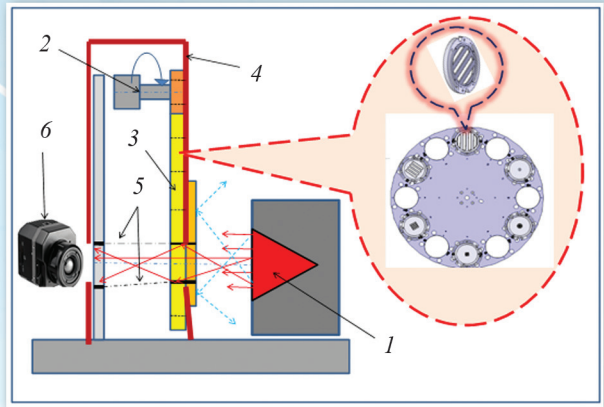


Рис. 1. Схема измерительной установки
Fig. 1. Layout of measurement system

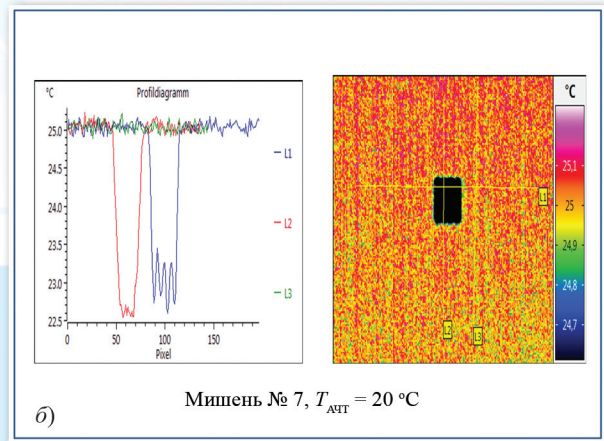
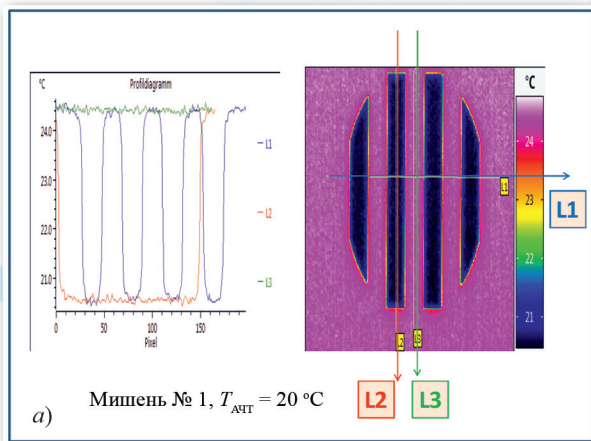


Рис. 2. Термограммы мишени № 1 (а) и мишени № 7 (б) и параметры ИК-поля при использовании линий горизонтального контроля (L1), вертикального сечения (L2) и линии контроля поля экрана (L3)

Fig. 2. IR images of Target 1 (a) and Target 7 (b). IR signature parameters for horizontal control lines (L1), vertical section (L2) and screen field control line (L3)

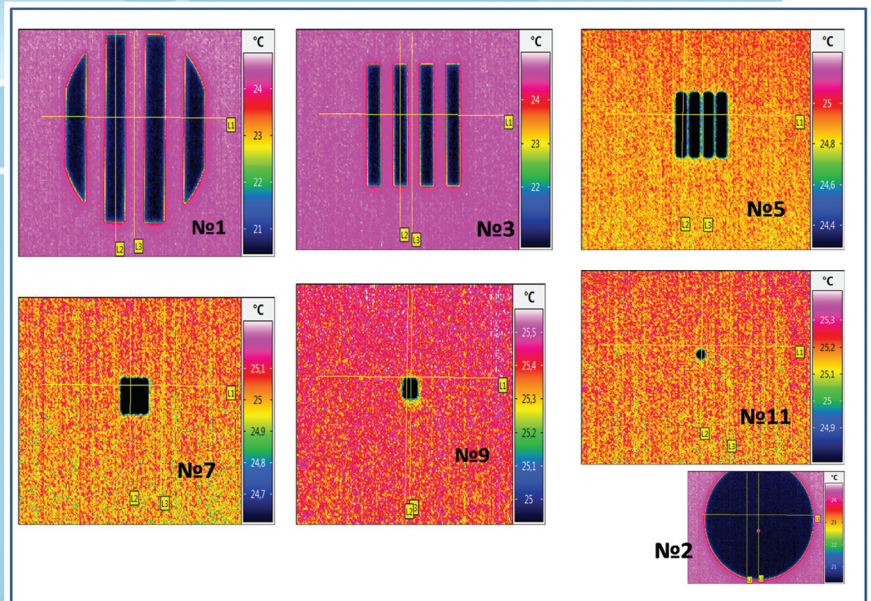


Рис. 3. Термограммы картины ИК-поля применяемых 4-щелевых мишеней

Fig. 3. IR images for the 4-slot targets used in the study

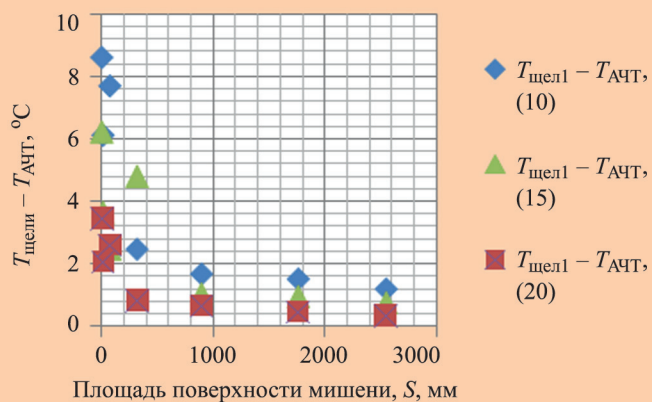


Рис. 4. Зависимость разности радиационных температур щелей мишеней и температуры абсолютно черного тела по линии горизонтального контроля

Fig. 4. Gradient between thermal signatures of target slots and absolutely black body temperature: horizontal control line

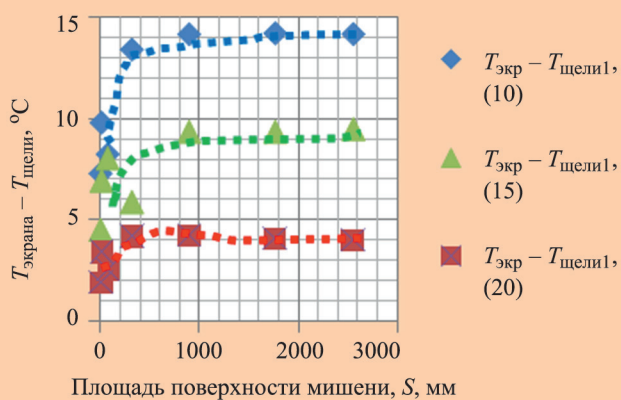
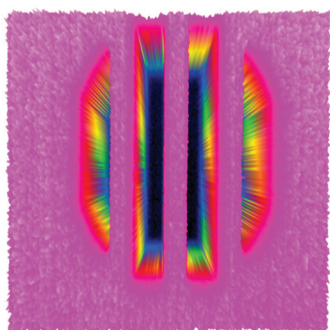
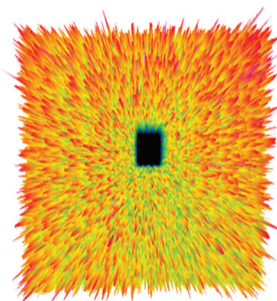


Рис. 5. Зависимость разности радиационных температур экрана и щелей мишеней по линии горизонтального контроля

Fig. 5. Gradient between thermal signatures of screen and target slots: horizontal control line



Мишень № 1



Мишень № 7

Рис. 6. Термограммы мишени № 1 и мишени № 7 в трехмерном представлении

Fig. 6. 3D representation of IR images for Targets 1 and 7