

Совершенствование методов и средств поверки и градуировки тепловизоров

В. В. Герасютенко¹, А. В. Шарков¹, В. А. Кораблев¹, Д. А. Минкин²

¹Национальный исследовательский университет ИТМО, Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: viktoriya.gerasyutenko@mail.ru, avsharkov@corp.ifmo.ru, kvant1953@gmail.com

²Санкт-Петербургский университет государственной противопожарной службы, Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: mindim-spb@mail.ru

Предложен метод поверки и градуировки тепловизоров на основе сравнения показаний температуры, полученных контактным методом с использованием хромель-алюмелевых термопар и методом тепловизионной съёмки. Для подтверждения достоверности предложенного метода изготовлена экспериментальная установка, основным элементом которой является излучающая поверхность в виде прямоугольной пластины размерами 330×200×4 мм. Пластина покрыта краской со степенью черноты не менее 0,96. Приведены результаты расчётов температурного поля излучающей поверхности пластины. Установлено, что при температурах излучающей поверхности пластины, близких к 50 °С, существенное влияние на её температурное поле оказывает теплообмен с окружающим воздухом. С целью уменьшения рассеивания тепловых потоков с излучающей поверхности пластины в окружающую среду применены нагреватели воздуха, прикреплённые к боковым торцам излучающей поверхности. Нагреватели изготовлены в виде пластин из сплава алюминия с магнием. Приведены рекомендации относительно выбора размеров пластин-нагревателей. Основные преимущества предложенного метода поверки и градуировки тепловизоров – обеспечение высокой изотермичности излучающей поверхности по высоте пластины, точность поддержания температуры на заданном уровне, сокращение времени выхода экспериментальной установки в стационарный режим.

Ключевые слова: тепловизор, метод поверки и градуировки, температурное поле, излучающая поверхность, теплообмен, поле зрения тепловизора, нагреватель.

Введение. Инфракрасная термография – это способ измерения интенсивности излучения окружающих объектов в инфракрасной области спектра с последующим определением их температуры с помощью электронно-оптических приборов. Для бесконтактных измерений и регистрации температурного поля объектов предназначены оптико-электронные приборы – тепловизоры (ГОСТ Р 8.619-2006 «ГСИ. Приборы тепловизионные измерительные. Методы поверки»). Главные преимущества тепловизионных систем: возможность бесконтактного (дистанционного) измерения температуры объекта; широкий диапазон измерения температур; отсутствие необходимости отключения устройств, оборудования, а также остановки производства для измерений; наглядность, т. е. получение общей картины теплового распределения исследуемого объекта с возможностью установления значений температур в конкретных точках объекта.

Важной задачей является обеспечение высокой точности показаний тепловизионных устройств и систем инфракрасной техники путём их градуировки [1–10]. Цель настоящей работы – разработка установки для градуировки тепловизионных устройств, позволяющей выявить возможный разброс действительных значений температуры и

показаний поверяемых средств измерений (СИ), а также обнаружить возможные неточности получаемой термограммы по всему полю зрения тепловизоров.

Методы поверки и градуировки тепловизоров. Для поддержания приемлемого уровня точности и надежности показаний тепловизионных измерительных приборов необходима их своевременная и профессиональная поверка, первичная и периодическая – раз в год, согласно ГОСТ Р 8.619-2006. Поверка включает внешний осмотр, проверку изоляции, опробование и проверку работы во всех режимах, определение углового разрешения, проверку диапазона и погрешностей измерения температуры, измерение порога температурной чувствительности, нахождение неравномерностей чувствительности по всему полю зрения, проверку сходимости показаний прибора.

В качестве эталонных излучателей для поверки тепловизоров применяются излучатели в виде модели абсолютно чёрного тела (АЧТ) и протяжённые излучатели (размеры которых в десять и более раз превышают элементарное поле зрения тепловизора) [4–10]. Инфракрасные излучатели в виде модели АЧТ разработаны для поверки, настройки и градуировки бесконтактных СИ температуры. Принцип действия инфракрасных излучателей в виде

модели АЧТ основан на законах Стефана–Больцмана и Планка, которые связывают между собой температуру АЧТ, излучательную способность и яркость излучения.

Температура излучающей полости в модели АЧТ устанавливается регулятором температуры. В полость встроены контактный датчик температуры, передающий информацию о текущей температуре на индикатор регулятора. Нагрев излучающей полости происходит с использованием электронагревателя. В некоторых моделях излучателей присутствует возможность охлаждения с помощью циркулирующего теплоносителя в системе охлаждения.

Инфракрасный излучатель в виде модели протяжённого черного тела (ПЧТ) (например, ПЧТ 540/40/100) используется для поверки бесконтактных СИ температуры в диапазоне 30–95 °С, определения минимальной разрешающей способности, а также угла поля зрения и геометрических параметров разрешения тепловизионных приборов с помощью мир (пластинок с крестовыми или штриховыми отверстиями, расположенными на определенном расстоянии).

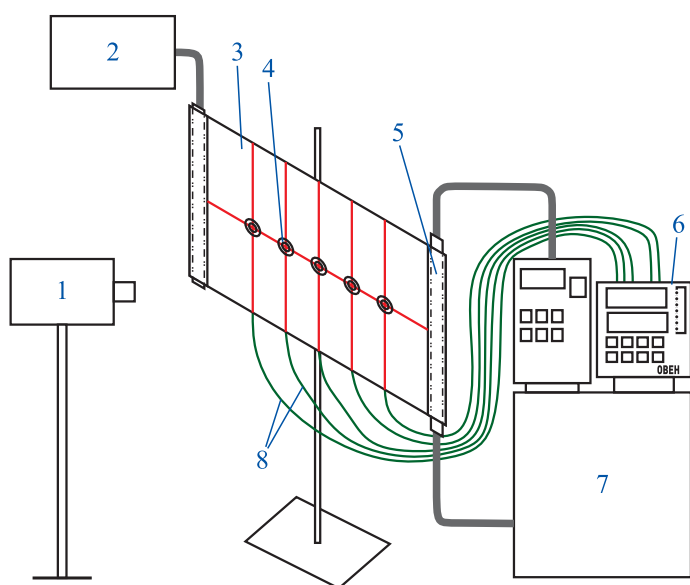


Рис. 1. Схема установки для поверки и градуировки тепловизоров; 1 – тепловизор FLIR SC620; 2 – источник стабилизированного питания Mastech HY3020E; 3 – излучающая поверхность; 4 – шайбы с гальваническим покрытием для точного наведения тепловизора; 5 – трубка квадратного сечения для термостатирования правой кромки; 6 – устройство для измерения и контроля температуры; 7 – жидкостный термостат ТЖ-ТС-01/12; 8 – термопары

Fig. 1. The scheme of experimental set up for thermal imagers verification and calibration:

1 – thermal imager FLIR SC620; 2 – stabilized power supply Mastech HY3020E; 3 – emitting surface; 4 – washers with galvanic coating for precise guidance of the imager; 5 – square tube for thermostating the right edge; 6 – device for measuring and controlling temperature; 7 – liquid thermostat TJ-TS-01/12; 8 – thermocouples

Излучатель ПЧТ 540/40/100 является моделью ПЧТ с излучающей поверхностью в форме квадрата и состоит из протяжённого теплового излучателя, блока управления и мир. Температурный режим излучателя задаётся термостатированным теплоносителем – дистиллированной водой, омывающей обратную сторону излучающей поверхности. В резервуаре с теплоносителем расположен датчик, с помощью которого блок управления поддерживает температуру теплоносителя на заданном уровне. Температура излучающей поверхности определяется эталонным термометром сопротивления.

Существующие излучатели для поверки тепловизоров имеют следующие недостатки: воспроизводится только одно значение температуры, установленное на регуляторе; перенастройка с одного уровня значения температуры на другой занимает достаточно много времени; сложности при создании изотермической поверхности значительных размеров; место расположения датчиков температуры не отмечено.

Установка для поверки и градуировки тепловизоров.

В настоящей работе предложен метод поверки портативного матричного измерительного тепловизора FLIR SC620 (Flir Systems, США, Швеция), оснащённого сверхточной высокочувствительной инфракрасной камерой с большим набором функций.

Технические характеристики тепловизора FLIR SC620

Тип детектора	матрица 640×480 пикселей в фокальной плоскости
Угол обзора	45°×25°
Спектральный диапазон	7,5–13 мкм
Температурная чувствительность при 30 °С	0,065 °С
Цифровое увеличение непрерывное	(1–2) ^х
Частота обновления кадров	30 Гц
Фокус	ручной и автоматический
Видеокамера с автофокусировкой	3,2 Мп
Цветной (16000 цветов) жидкокристаллический дисплей, диагональ	5,6 дюйма
Интервал температур	–40...+1500 °С (опция – до +2000 °С)
Погрешность	±2 % абсолютной температуры (не более ±2 °С)
Рабочий диапазон температур	–15...+50 °С
Размер камеры	120×140×220 мм

Для определения и калибровки основных параметров инфракрасных измерительных приборов авторы настоящей статьи разработали установку, которая содержит прямоугольную пластину-излучатель 3 из сплава АМг-5 [11–13] толщиной $\delta=4$ мм, источник 2 стабилизированного питания Mastech HY3020E (Mastech, КНР), жидкостный термостат ТЖ-ТС-01/12 (ЛОИП, Россия) 7, устройство 6 для измерения и контроля температуры и тепловизор FLIR SC620 1 (рис. 1). Излучающая поверхность пластины 3 покрыта чёрной порошковой краской с коэффициентом

черноты $\varepsilon \approx 0,96$. Задняя стенка излучающей поверхности изолирована от окружающей среды пенопластом, поэтому через неё не рассеивается тепловой поток в окружающую среду. Пластина по всей высоте изотермическая. На одном крае с обратной стороны излучающей пластины по всей высоте закреплён копелевый нагреватель 1 (рис. 2), обеспечивающий равномерное поступление теплового потока на пластину. На противоположном крае по всей высоте пластины закреплена металлическая трубка 3 квадратного сечения, соединённая резиновыми шлангами с жидкостным термостатом ТЖ-ТС-01/12. Через трубку 3 циркулирует нагретая в термостате дистиллированная вода для термостатирования правого торца пластины.

Методика проведения измерений. Измерение температуры поверхности излучающей пластины с помощью тепловизора. Температуру излучающей поверхности регулируют изменением температуры жидкости охладителя или мощности нагревателя. Мощность нагревателя изменяют варьированием подаваемого на нагреватель напряжения с помощью стабилизированного источника питания Mastech HY3020E. Тепловой поток рассеивается с поверхности пластины в окружающую среду излучением и свободной конвекцией. Тепловое излучение передаётся от пластины в окружающую среду с помощью лучисто-конвективного механизма теплообмена. На расстоянии 0,45 м от лицевой стороны пластины установлен тепловизор FLIR SC620, который фиксирует излучение пластины и воспроизводит на дисплее её температурное поле в виде термограммы.

Контактное измерение температуры поверхности излучающей пластины. На данном этапе температуру пластины измеряют с использованием термопар. На обратной стороне излучающей поверхности пластины с помощью высокотеплопроводного клея закрепляют пять хромель-алюмелевых термопар 2 (см. рис. 2). Рабочие концы термопар находятся вблизи излучающей поверхности, что обеспечивает высокую точность измерений. Показания термопар отображаются на дисплее электронного устройства измерения и контроля температуры. Для точного наведения тепловизора к лицевой части излучающей пластины в качестве маркеров, указывающих на места расположения термопар, прикреплены тонкие металлические шайбы с гальваническим покрытием. Коэффициент черноты гальванического покрытия $\varepsilon \approx 0,2$, поэтому на термограмме шайбы всегда будут затемнены.

Результаты показаний тепловизора сравнивают с результатами контактных измерений температур и оценивают расхождение полученных значений.

Расчёт и выбор параметров конструкции установки. В ходе разработки установки особое внимание уделяли следующим моментам: обеспечению высокой изотермичности излучающей поверхности по высоте пластины в условиях лучисто-конвективного теплообмена; точности поддержания температуры на заданном уровне; выбору оптимального покрытия с высоким ($\varepsilon \geq 0,96$) коэффициентом

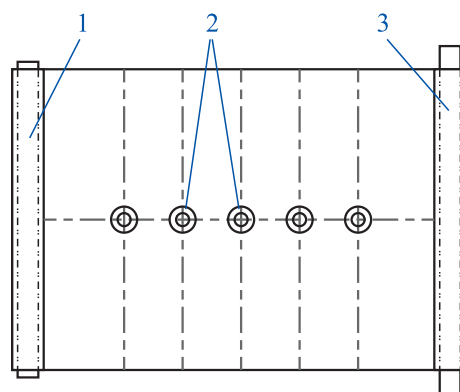


Рис. 2. Схема исследуемой пластины:
1 – электрический нагреватель; 2 – места контакта термопар с пластиной; 3 – трубка квадратного сечения для термостатирования правой кромки

Fig. 2. The scheme of the plate tested:
1 – electrical heater; 2 – the contact place of the thermocouples with plate; 3 – square tube for thermostating the right edge

черноты; сокращению времени выхода прибора в стационарный режим по сравнению с другими устройствами для проверки.

Геометрические размеры пластины-излучателя выбирали исходя из разрешающей способности макрообъектива тепловизионной системы, размера матрицы и угла обзора объектива [14, 15]. Рассчитывали поле зрения (field of view) тепловизора, которое соответствует размерам получаемого на экране пространства. С уменьшением угла поля зрения увеличивается максимальное расстояние от тепловизионной системы до исследуемого объекта. Размеры излучающей пластины, представленной на рис. 2, получены на основе результатов проведенного расчёта.

Необходимую мощность P нагревателя находили из решения дифференциального уравнения теплопроводности для пластины [16, 17]:

$$\frac{d^2 T(x)}{dx^2} - \frac{\alpha h}{\lambda A} [T(x) - T_c] = 0, \quad (1)$$

где $T(x)$ – температура пластины в точке x на оси OX ; T_c – температура среды; A – площадь поперечного сечения пластины; λ – теплопроводность; α – суммарный коэффициент лучисто-конвективной теплоотдачи.

Уравнение (1) решали в общем виде:

$$T(x) - T_c = (T_{\text{охл}} - T_c) \frac{\text{ch}(bx)}{\text{ch}(bl)} + \frac{P}{\lambda Ab} \frac{\text{sh}[b(l-x)]}{\text{ch}(bl)}, \quad (2)$$

где $T_{\text{охл}}$ – температура охлаждающей жидкости в термостате; $b = \sqrt{\alpha h / (\lambda A)}$.

Из зависимости (2) определяли мощность нагревателя $P = 18$ Вт. Рассчитывали количество витков N_b и длину l_n

Таблица 1

Зависимость коэффициентов теплообмена от температуры поверхности пластины

$T_{\text{пов}}, ^\circ\text{C}$	$\alpha_{\text{л}}, \text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$	$\alpha_{\text{к}}, \text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$	$\alpha, \text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$
30	6,0	3,7	9,7
45	6,5	4,7	11,2
60	6,9	5,3	12,2

Таблица 2

Результаты измерений температуры тепловизором T_1 и термомпарами T_2 при температурах охлаждающей среды $T_{\text{охл}} = 30^\circ\text{C}$ и среды $T_{\text{с}} = 27^\circ\text{C}$

$x, \text{м}$	$T_1, ^\circ\text{C}$	$T_2, ^\circ\text{C}$	$\Delta T_1, ^\circ\text{C}$
0,055	41,8	42	0,2
0,095	40,1	39	1,1
0,135	38,6	37	1,6
0,175	37,2	36	1,2
0,215	36,1	34	2,1

провода (выбранный диаметр $d = 0,2 \text{ мм}$) нагревателя при подаваемом напряжении $U = 20 \text{ В}$ и мощности $P = 18 \text{ Вт}$: $l_{\text{н}} = 2,6 \text{ м}$; $N_{\text{в}} \approx 12$. Для термостатирования правого торца пластины применяли жидкостный термостат погружного типа ТЖ-ТС-01/12.

Расчёт температурного поля пластины. Принимали следующие допущения:

предложенная установка для калибровки и поверки тепловизоров находится в стационарном режиме;

коэффициент лучисто-конвективной теплоотдачи α не зависит от координат;

на левой границе пластины соблюдаются граничные условия II рода, в левый торец поступает непрерывный тепловой поток;

на правой границе пластины соблюдаются граничные условия I рода, задана температура правого торца;

на верхней и нижней границах пластины соблюдаются адиабатические условия, рассеивание теплоты с верхней и нижней границы пренебрежимо мало и поэтому не учитывается;

дифференциальное уравнение (1) описывает температурное поле пластины.

Граничные условия:

по левой границе (при $x = 0$) в торец пластины поступает непрерывный тепловой поток и распространяется по её длине:

$$-\lambda A \frac{dT(x)}{dx} \Big|_{x=0} = P;$$

на правой границе (при $x = l$) можно пренебречь потоком, рассеиваемым с торца в окружающую среду, так как он значительно меньше теплового потока от боковой поверхности пластины, и принять температуру торца за температуру термостата:

$$T(x) \Big|_{x=l} = T_{\text{охл}}.$$

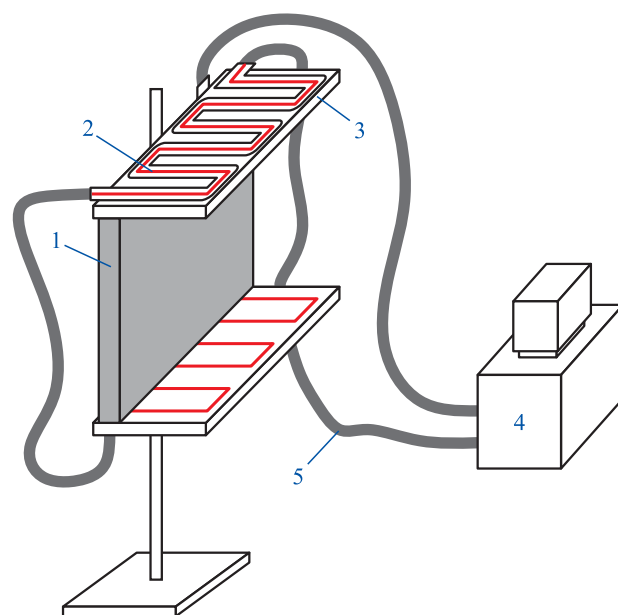


Рис. 3. Схема установки с нагревателями воздуха:

1 – исследуемая пластина; 2 – змеевики; 3 – пластины-нагреватели; 4 – жидкостный термостат; 5 – резиновые шланги

Fig. 3. The scheme of experimental set up with air heaters:

1 – tested plate; 2 – coils; 3 – plates-heaters; 4 – liquid thermostat; 5 – rubber hoses

Суммарный коэффициент теплоотдачи складывается из лучистого $\alpha_{\text{л}}$ и конвективного $\alpha_{\text{к}}$ коэффициентов теплоотдачи:

$$\alpha = \alpha_{\text{л}} + \alpha_{\text{к}}.$$

Лучистую составляющую находили по закону Стефана–Больцмана [18], конвективную составляющую – по законам конвективного теплообмена [19, 20]. Изменение температуры $T_{\text{пов}}$ поверхности пластины значительно влияет на коэффициенты лучистого и конвективного теплообмена, как показано в табл. 1.

Результаты исследований температурного поля пластины. Решая уравнения (2), определяли температурное поле пластины для контрольных точек x (табл. 2). В качестве контрольных точек выбирали координаты мест подключений термопар.

При температурах излучающей поверхности пластины, близких к 50°C , существенную роль играет теплообмен пластины с окружающим воздухом. Поэтому необходимо уменьшать рассеивание тепловых потоков с излучающей поверхности пластины в окружающую среду. Тепловую изоляцию использовать невозможно, так как в этом случае излучающая поверхность не будет попадать в поле зрения тепловизора. В работах [11, 12] предложено обдувать поверхность пластины подогретым воздухом. Для подогревания воздуха две пластины-нагревателя 3 из сплава АМГ-5 прикрепляют к верхнему и нижнему торцам излучающей пластины 1 (рис. 3). На поверхностях пластин-нагревателей устанавливают металлические

теплообменники-змеевики 2, присоединённые резиновыми шлангами 5 к жидкостному термостату ТЖ-ТС-01/12 4. Через шланги циркулирует дистиллированная вода, которая протекает и в канале охлаждения излучающей поверхности. Одна пластина подогревает воздух, обтекающий излучающую поверхность, а другая пластина препятствует распространению теплоты излучением в окружающую среду. Воздух является диатермической средой (не поглощает и не излучает электромагнитное излучение), поэтому температура окружающего пластину воздуха не оказывает влияния на излучающие свойства пластины и не перекрывает обзор тепловизору. Поэтому при повышенной температуре окружающего воздуха градиент температуры на излучающей пластине будет практически постоянным.

Рекомендации относительно выбора размеров пластин-нагревателей. При выборе оптимальной ширины пластин необходимо учитывать, что между излучающей и нагревающей воздух пластинами происходит лучистый теплообмен. При этом принимаются допущения: тела непрозрачны и имеют изотермические поверхности; среда между телами прозрачна для излучения; вся лучистая энергия, поглощаемая телами, переходит в тепловую энергию; коэффициенты поглощения и черноты не зависят от температуры; процессы стационарны. Таким образом, с увеличением влияния пластин-нагревателей на излучающую поверхность, уменьшается влияние окружающей среды. Для данной задачи удовлетворительный суммарный коэффициент облучённости должен быть не менее 0,5, что уменьшит влияние окружающей среды приблизительно в пять раз. Соответственно для одной пластины-нагревателя этот коэффициент составит не менее 0,25.

Расчёт температурного поля пластины для условий, когда температура охлаждающей жидкости в термостате равна температуре окружающей среды. Результаты решения уравнения (2) для контрольных точек x – мест подключений термопар при температуре окружающей среды T_c , близкой к температуре на правом торце $T_{охл}$, представлены в табл. 3.

На рис. 4 показано распределение температуры по длине пластины при температурах охладителя $T_{охл} = 30, 45, 60$ °C. Вследствие подогрева обтекающего излучающую поверхность пластины воздуха, градиент температурного поля пластины выравнивается, и температурная зависимость имеет практически линейное распределение.

Закключение. Предложенный в данной работе метод поверки и градуировки тепловизоров можно использовать для установления погрешности измерения температурного поля,

Таблица 3
Температурные поля $T_{пов}$, °C, пластины

x , м	$T_{охл}$, °C		
	30	45	60
0,055	54,8	68,7	82,7
0,095	49,5	63,6	77,6
0,135	44,9	59,1	73,3
0,175	40,7	55,1	69,5
0,215	37,0	51,6	66,2

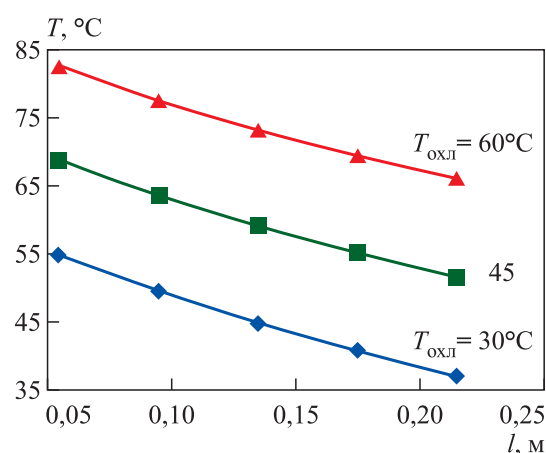


Рис. 4. Распределение температуры по длине пластины при температурах охладителя $T_{охл} = 30, 45, 60$ °C

Fig. 4. Temperature distribution throughout the plate length at cooler temperatures 30, 45, 60 °C

определения характеристик тепловизоров и инфракрасных пирометров. Метод и установка для поверки и градуировки тепловизоров позволяют проверить характеристики тепловизора по следующим параметрам: погрешность измерения температуры в диапазоне температур поверхности 20–90 °C по сравнению с действительным значением, измеренным термоэлектрическими термометрами; определить количество и расположение неисправных пикселей матрицы тепловизора; сократить время перенастройки установки на другой диапазон температур.

Список литературы

1. Гоголинский К. В., Сильд Ю. А. Метрологическое обеспечение средств теплового неразрушающего контроля: измерительных тепловизоров и пирометров // В мире неразрушающего контроля. 2017. № 1 (20). С. 21–25.
2. Волков С. П., Никоненко В. А. Метрологическое обеспечение неконтактных средств измерения температуры // Контроль. Диагностика. 2007. № 8. С. 63–70.
3. Сильд Ю. А., Иванова М. А., Никоненко В. А. Разработка системы метрологического обеспечения измерительных тепловизионных приборов // Измерительная техника. 2004. № 4. С. 48–51.
4. Сильд Ю. А., Матвеев М. С., Походун А. И., Визулайнен Е. В. Исследование нового излучателя ВНИИМ для метрологического обеспечения радиационной термометрии // Приборы. 2008. № 10 (100). С. 46–52.
5. Шарганов К. А., Сильд Ю. А., Визулайнен Е. В. Метод воспроизведения, хранения и передачи единицы температуры неконтактным способом // Вестник Метролога. 2017. № 2. С. 19–22.
6. Grgić G., Pušnik I., *International Journal of Thermophysics*, 2011, vol. 32, no. 1–2, pp. 237–247. DOI: 10.1007/s10765-011-0932-z

7. Vendt R., Jaanson P., et al., *Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering*, 2009, pp. 729902-5. DOI: 10.1117/12.818423

8. Miklavac A., Pušnik I., Batagelj V., Drnovšek J., *Measurement Science and Technology*, 2013, vol. 24, no. 2, p. 025001. DOI: 10.1088/0957-0233/24/2/025001

9. Hartmann J., Hollandt J., et al., *Experimental methods in the physical sciences*, 2009, vol. 42, no. C, pp. 241–295. DOI: 10.1016/S1079-4042(09)04206-4

10. Lagüela S., Gonzalez H. et al., *Infrared Physics & Technology*, 2011, vol. 54, no. 2, pp. 92–99. DOI: 10.1016/j.infrared.2011.01.002

11. Кораблев В. А., Минкин Д. А., Шарков А. В. Обеспечение изотермических условий на излучателе устройства для калибровки тепловизоров // Природные и техногенные риски (физико-математические и прикладные аспекты). 2014. № 3 (11). С. 42–50.

12. Кораблев В. А., Шарков А. В., Минкин Д. А. Методы выравнивания температурного поля вертикальной теплоотдающей пластины // Природные и техногенные риски (физико-математические и прикладные аспекты). 2016. № 2 (18). С. 42–46.

13. Кораблев В. А., Шарков А. В., Минкин Д. А. Метод формирования равномерного температурного поля охлаждаемой поверхности в условиях принудительного движения теплоносителя // Проблемы управления рисками в техносфере. 2015. № 4(36). С. 43–49.

14. Мошаров В. Е., Радченко В. Н., Сенюев И. В. Измерение тепловых потоков с помощью тепловизора // Материалы XXIX Научно-технической конференции по аэродинамике, Жуковский, 1–2 марта 2018. Жуковский: Центральный аэрогидродинамический институт им. профессора Н. Е. Жуковского, 2018. С. 161.

15. Госсорж Ж. Инфракрасная термография. Основы, техника, применение: Пер. с фр. Н. В. Васильченко / Под ред. Л. Н. Курбатова. М.: Мир, 1988. 399 с.

16. Дульнев Г. Н., Тихонов С. В. Основы теории тепло-массообмена, Санкт-Петербург: СПбГУ ИТМО, 2010. 93 с.

17. Михеев М. А., Михеева И. М. Основы теплопередачи, М.: ИД «БАСТЕТ», 2010 г. 344 с.

18. Исаченко В. П., Осипова В. А., Сукомел А. С. Теплопередача. М.: Энергоиздат, 1981. 416 с.

19. Мартыненко О. Г., Соковishин Ю. А. Свободно-конвективный теплообмен на вертикальной поверхности. Граничные условия II рода. М.: Наука и техника, 1977, 216 с.

20. Schaub M., Kriegel M., Brandt. S., *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, vol. 136, pp. 1186–1198. DOI:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.03.089

References

1. Gogolinskij K. V., Sil'd Yu. A., *V mire nerazrushayushchego kontrolya*, 2017, no. 1 (20), pp. 21–25 (in Russian).

2. Volkov S. P., Nikonenko V. A., *Kontrol'. Diagnostika*, 2007, no. 8, pp. 63–70 (in Russian).

3. Sil'd Yu. A., Ivanova M. A., Nikonenko V. A., *Measurement Techniques*, 2004, vol. 47, no. 4, pp. 389–392. DOI: 10.1023/B:METE.0000033697.57678.4f

4. Sil'd Yu. A., Matveev M. S., Pohodun A. I., Vizulajnen E. V., *Instruments*, 2008, no. 10 (100), pp. 46–52.

5. Sharganov K. A., Sil'd Yu. A., Vizulajnen E. V., *Vestnik Metrologa*, 2017, no. 2, pp. 19–22 (in Russian).

6. Grgić G., Pušnik I., *International Journal of Thermophysics*, 2011, vol. 32, no. 1–2, pp. 237–247. DOI: 10.1007/s10765-011-0932-z

7. Vendt R., Jaanson P., et al., *Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering*, 2009, pp. 729902-5. DOI: 10.1117/12.818423

8. Miklavac A., Pušnik I., Batagelj V., Drnovšek J., *Measurement Science and Technology*, 2013, vol. 24, no. 2, p. 025001. DOI: 10.1088/0957-0233/24/2/025001

9. Hartmann J., Hollandt J., et al., *Experimental methods in the physical sciences*, 2009, vol. 42, no. C, pp. 241–295. DOI: 10.1016/S1079-4042(09)04206-4

10. Lagüela S., Gonzalez H. et al., *Infrared Physics & Technology*, 2011, vol. 54, no. 2, pp. 92–99. DOI: 10.1016/j.infrared.2011.01.002

11. Korablev V. A., Minkin D. A., Sharkov A. V., *Prirodnye i tekhnogennye riski (fiziko-matematicheskie i prikladnye aspekty)*, 2014, no. 3 (11), pp. 42–50 (in Russian).

12. Korablev V. A., Sharkov A. V., Minkin D. A., *Prirodnye i Tekhnogennye riski (fiziko – matematicheskie i prikladnye aspekty)*, 2016, no. 2 (18), pp. 42–46 (in Russian).

13. Korablev V. A., Sharkov A. V., Minkin D. A., *Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere*, 2015, no. 4 (36), pp. 43–49 (in Russian).

14. Mosharov V. E., Radchenko V. N., Senyuev I. V., *Proceedings of the XXIX Scientific And Technical conference of Aerodynamics*, Zhukovsky, Moscow region, March 1–2, 2018, Zhukovsky, Central Aerohydrodynamic Institute Publ., 2018, p. 161.

15. Gilbert Gaussorgues, *La Thermographie Infrarouge. Principes – Technologie – Applications*, Paris, 1984.

16. Dul'nev G. N., Tihonov S. V., *Osnovy teorii teplo-massobmena*, Saint Petersburg, Saint Petersburg State University of Information Technologies Mechanics and Optics Publ., 2010, 93 p. (in Russian).

17. Miheev M. A., Miheeva I. M. *Osnovy teploperedachi*, Moscow, Izdatel'skij dom "BASTET" Publ., 2010, 344 p. (in Russian).

18. Isachenko V. P., Osipova V. A., Sukomel A. S., *Teploperedacha*, Moscow, Energoizdat Publ., 1981, 416 p. (in Russian).

19. Martynenko O. G., Sokovishin Yu. A., *Svobodno-konvektivnyj teploobmen na vertikal'noj poverhnosti. Granichnye usloviya II roda*, Moscow, Nauka i tekhnika Publ., 1977, 216 p. (in Russian).

20. Schaub M., Kriegel M., Brandt. S., *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, vol. 136, pp. 1186–1198. DOI:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.03.089

Дата поступления: 27.12.2019.

Дата принятия: 03.03.2020.

Improvement of methods and means of thermal imagers verification and calibration

Victoria V. Gerasyutenko¹, Alexander V. Sharkov¹, Vladimir A. Korablev¹, Dmitry A. Minkin²

¹ITMO University, St. Petersburg, Russian Federation, e-mail: viktoriya.gerasyutenko@mail.ru, avsharkov@corp.ifmo.ru, kvant1953@gmail.com

²St. Petersburg University of State Fire Service of EMERCOM of Russia, St. Petersburg, Russian Federation, e-mail: mindim-spb@mail.ru

This paper suggests the verification and calibration method of thermal imagers that consists in comparison of temperature readings obtained by contact and thermal imaging method. The experimental setup has been developed to confirm the reliability of the proposed method. The main element of experimental setup is an emitting surface in the form of rectangular plate that measures 330×200×4 mm. The plate is covered with paint which emissivity factor is not less than 0,96. The paper presents the results of temperature field calculations on the plate emitting surface. The temperature field of the plate emitting surface has been determined by the contact method using chromel-alumel thermocouples and thermal imaging method. As a result of the obtained temperature values analysis, it has been concluded that if the plate emitting surface temperatures close to 50 °C, the heat exchange of the plate with the ambient air plays a significant role. The air heaters are applied in order to reduce the heat flows dissipation from the plate emitting surface into the environment. The heaters are two aluminum-magnesium alloy plates attached to the end face of the emitting surface. The metal heat exchangers – coils are installed on the surfaces of the plates and connected by hoses to the liquid thermostat. One of the plates heats the air flowing around the emitting surface, and another one prevents the emission thermal expansion into the environment. As a result of heaters application, the heat exchange intensity of a plate radiating surface with environment decreases. Moreover, recommendations about the choice of heaters sizes have been given. The main advantages of the method proposed are the following: ensuring high isothermic of the emitting surface throughout the height of the plate; accuracy of the temperature maintaining at a given level; reducing the device transition time to steady-state regime.

Key words: thermal imager, verification and calibration method, temperature field, emitting surface, heat exchange, thermal imager field of view, heater.