

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Особенности применения *SWIR*-камеры для температурных измерений в энергетике и электротехнологии / А.В. Щербаков, Д.А. Гапонова, А.Л. Гончаров, Р.В. Родякина, В.К. Драгунов, Нуха Абусаиф // Вестник ПНИПУ. Машиностроение. Материаловедение. – 2022. – Т. 24, № 4 – С. 78–86. DOI: 10.15593/2224-9877/2022.4.09

Please cite this article in English as:

Shcherbakov A.V., Gaponova D.A., Goncharov A.L., Rodyakina R.V., Dragunov V.K., Abusaif Nuha Features of SWIR-camera application for temperature measurements in power engineering and electrical engineering. *Bulletin of PNRPU. Mechanical engineering, materials science*. 2022, vol. 24, no. 4, pp. 78-86. DOI: 10.15593/2224-9877/2022.4.09

ВЕСТНИК ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение
Т. 24, № 4, 2022
Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science
<http://vestnik.pstu.ru/mm/about/inf/>

Научная статья

DOI: 10.15593/2224-9877/2022.4.09

УДК 536.521.2

**А.В. Щербаков¹, Д.А. Гапонова¹, А.Л. Гончаров¹,
Р.В. Родякина¹, В.К. Драгунов¹, Нуха Абусаиф²**

¹Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия

²Университет Тишрин, Латакия, Сирийская Арабская Республика

**ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ *SWIR*-КАМЕРЫ ДЛЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ
ИЗМЕРЕНИЙ В ЭНЕРГЕТИКЕ И ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ**

Показаны перспективы применения камер ближней инфракрасной области (коротковолновых ИК-камер) для мониторинга тепломассообменных процессов в промышленной энергетике, электротехнике и электротехнологии. Особенности применения ближнего инфракрасного диапазона обуславливают необходимость разработки методик температурной калибровки приборов для последующего использования получаемых изображений в ходе исследования распределений температуры на объектах электроэнергетики и при управлении различными электротехнологическими процессами (например, процессом электронно-лучевой сварки). Обоснована актуальность применения камеры для непрерывной регистрации распределений температуры и описана методика температурной калибровки камеры с применением пирометра и программной обработки потока регистрируемых данных. Разработан экспериментальный стенд на основе среднетемпературной камерной электропечи сопротивления, в которой температура образца из стали 316L измеряется пирометром, а средняя яркость свечения объекта определяется в результате программной обработки потока данных. Проведен анализ полученных при калибровке данных, показывающий возможность регулирования диапазона регистрируемых температур за счет изменения времени накопления кадра матричного фотоприемного устройства камеры. Рассмотрены перспективы применения методики калибровки камеры для работы в других диапазонах температур за счет изменения времени накопления сигнала и входной апертуры диафрагмы объектива. Показана перспективность применения *SWIR*-камер для проведения температурных измерений по регистрируемым изображениям объектов в электроэнергетике и электротехнологии, обусловленная возможностью съемки объектов в условиях задымленности, присутствия паров (например, во время электронно-лучевой сварки), а также при установленных защитных стеклах и пленках, непрозрачных в случае применения традиционно используемых тепловизоров средне- и длинноволнового ИК-диапазона.

Ключевые слова: *SWIR*-камера, температурные измерения, стенд для калибровки инфракрасной камеры, пирометр, электрическая печь сопротивления, матричное фотоприемное устройство, тепловидение, регистрируемые изображения объектов, калибровка данных, электротехнологические процессы.

A.V. Shcherbakov¹, D.A. Gaponova¹, A.L. Goncharov¹,
R.V. Rodyakina¹, V.K. Dragunov¹, Nuha Abusaif²

¹National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Moscow, Russian Federation

²Tishreen University, Latakia, Syrian Arab Republic

FEATURES OF SWIR-CAMERA APPLICATION FOR TEMPERATURE MEASUREMENTS IN POWER ENGINEERING AND ELECTRICAL ENGINEERING

The article presents the prospects for the use of near-infrared cameras (short-wave IR-cameras) for monitoring heat and mass transfer processes in industrial power engineering, electrical engineering and electrical technology. The peculiarities of near-infrared range using necessitate the development of methods for temperature calibration of devices for the subsequent use of the images obtained during the study of temperature distributions at electric power facilities and in the management of various electrotechnological processes (for example, the process of electron beam welding). The relevance of using the camera for continuous recording of temperature distributions is substantiated and the method of temperature calibration of the camera using a pyrometer and software processing of the recorded data stream is described. An experimental stand has been developed based on a medium-temperature resistance chamber furnace, in which the temperature of a sample made of 316L steel is measured by a pyrometer, and the average brightness of the object is determined as a result of software processing of the data stream. The analysis of the data obtained during calibration is carried out, showing the possibility of regulating the range of recorded temperatures by changing the frame accumulation time of the camera matrix photodetector. The prospects of applying the camera calibration technique to work in other temperature ranges by changing the signal accumulation time and the input aperture of the lens aperture are considered. The perspective of using SWIR-cameras for temperature measurements based on recorded images of objects in the electric power industry and electrical engineering is shown, due to the possibility of shooting objects in conditions of smoke, the presence of vapors (for example, during electron beam welding), as well as with protective glasses and films installed, opaque in the case of traditionally used medium- and long-wave thermal imagers IR range.

Keywords: SWIR-camera, temperature measurements, infrared camera calibration stand, pyrometer, electric resistance furnace, matrix photodetector, thermal imaging, recorded images of objects, data calibration, electrotechnological processes.

Введение

В последние десятилетия в мире проявляется большой интерес к применению видеоизображений, получаемых с помощью матричных фотоприемных устройств (МФПУ), принимающих излучение в коротковолновом инфракрасном диапазоне [1; 2]. В зарубежной литературе этот диапазон обозначают как *SWIR* (*Short Wave Infrared Range*), а применяемые устройства называют *SWIR*-камерами.

На рис. 1 показаны диапазоны длин волн оптического излучения. *SWIR*-диапазон (0,9–2,5 мкм) занимает промежуточное положение между областью видимого излучения и тепловизионным средневолновым диапазоном [3–5]. При низких температурах объектов в этом диапазоне изображение формируется преимущественно за счет отраженного от них излучения, в отличие от средневолнового диапазона, в котором для формирования изображений используется собственное излучение объектов. В то же время в области более высоких темпе-

ратур (200°C и выше) нагретые объекты начинают заметно излучать в этом диапазоне [4; 6–8].

Таким образом, *SWIR*-изображения в зависимости от условий наблюдения формируются как за счет собственного, так и за счет отраженного от объекта излучения. В результате формируются тени и контраст, что делает их более «узнаваемыми» визуально и упрощает идентификацию [9–12]. Кроме того, в *SWIR*-диапазоне многие материалы, не прозрачные для традиционно применяемых тепловизоров среднего и длинноволнового диапазонов, например, стекла и полимерные пленки, – остаются прозрачными. Это дает возможно использовать для съемки защитные окна и пленки из полимерных материалов. Вследствие уменьшенного релеевского рассеяния света на более длинных волнах, чем в видимой области спектра, камеры коротковолнового ИК-диапазона обеспечивают наблюдение в присутствии дыма и тумана [4; 13–16], а также паров, в том числе паров металлов, при сварке, плавке и наплавке [17; 18].

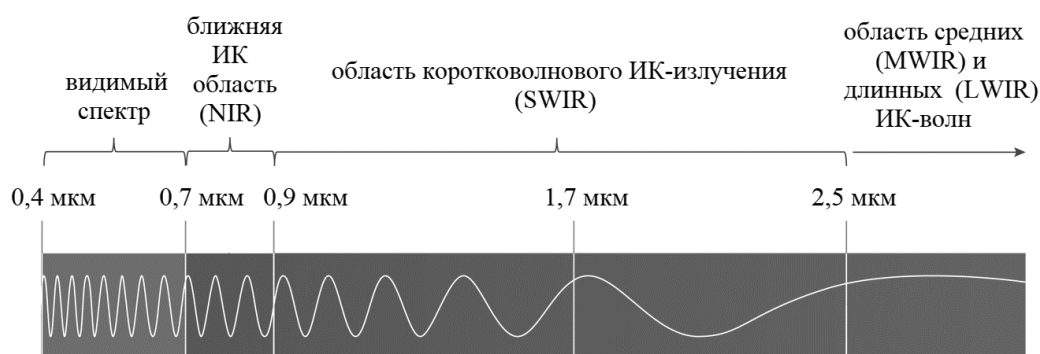


Рис. 1. Диапазоны длин волн оптического излучения

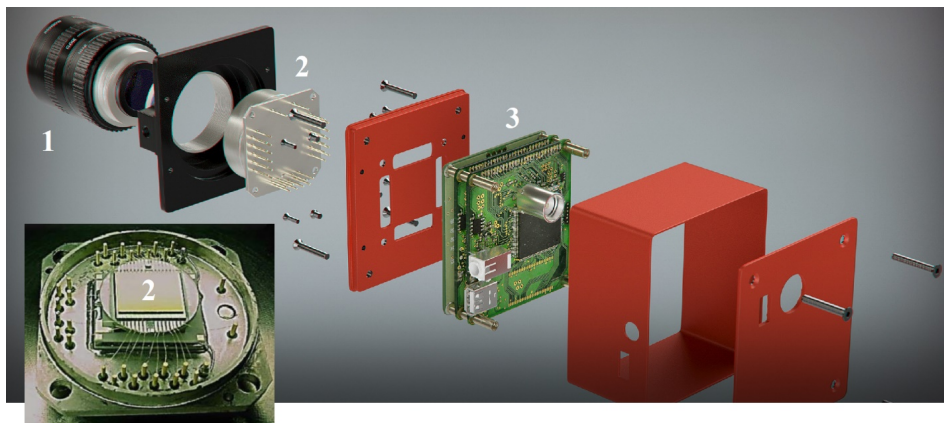


Рис. 2. Устройство SWIR-камеры Orion SQUH000 [4, 7]

Приведенные выше особенности применения ближнего инфракрасного диапазона обуславливают необходимость разработки методик температурной калибровки приборов для того, чтобы получаемые изображения можно было использовать для исследования распределений температуры на объектах электроэнергетики и при управлении различными электротехнологическими процессами [19; 20].

Особенности применяемой SWIR-камеры и ее характеристики

Устройство применяемой малогабаритной SWIR-камеры Orion SQUH000, разработанной предприятием НПО «Ориона» холдинга «Швабе» ГК «Ростех», показано на рис. 2. Корпус камеры предназначен для установки объектива 1 с резьбовым креплением c-mount (в данном эксперименте использовался объектив Kowa LM75JC).

В корпусе камеры установлен фотоприемный модуль формата 320×256 элементов. Матрица фоточувствительных элементов выполнена на основе гетероструктур арсенида индия-галлия (*InGaAs*), гибридизирована с большой интегральной схемой считывания и установлена в корпусе с термоэлектрическим охлаждением 2. Система охлаждения данной камеры предназначена не столько для понижения температуры МФПУ, сколько для термостабилизации фоточувствительных элементов, что позволяет снизить геометрический шум при изменении температуры внешней среды [4–6]. Внутри корпуса камеры также установлен блок предварительной обработки сигналов и передачи данных 3, обеспечивающий управление настройками камеры и передачу данных в персональную ЭВМ по интерфейсу USB для их сохранения в файлы.

На рис. 3 представлены спектральные характеристики камеры и применяемого инфракрасного фильтра *MidOpt* LP-1475 [8]. Как показали предварительно проведенные экспериментальные исследо-

вания, применение данного фильтра позволяет существенно снизить яркость бликов, формируемых на изображении при съемке через защитные стекла.

Каждый фоточувствительный элемент МФПУ воспринимает часть потока регистрируемого оптического излучения. Матрица имеет формат 320×256 элементов, расположенных с шагом 30 мкм. Время накопления сигнала фоточувствительных элементов можно регулировать с помощью прилагаемой программы *USB Vision* в очень широком диапазоне – от 30 мкс до 1000 мс, а частота следования кадров может изменяться от 1 до 200 Гц. Поэтому фактически появляется возможность установления времени экспозиции при проведении съемки объектов различной яркости либо в условиях различной освещенности.

Программное обеспечение камеры обеспечивает возможность автоматической настройки параметров экспозиции в режиме максимальной или минимальной освещенности объекта. Эта функция позволяет эффективно использовать динамический диапазон МФПУ с учетом разрядности аналогово-цифрового преобразователя (АЦП), установленного в блоке предварительной обработки сигналов. При разрядности АЦП 14 бит обеспечивается возможность идентификации до 16 384 градаций сигнала. Уровень светового потока во входном окне МФПУ можно регулировать вручную с помощью лепестковой диафрагмы используемого объектива, что также позволяет корректировать пределы регистрируемых фоточувствительными элементами матрицы сигналов.

Таким образом, для каждого выбранного режима экспозиции (установлении входной диафрагмы и выбора времени накопления), а также для выбранных условий освещения, при которых проводится съемка, необходима температурная калибровка камеры [2; 9], для реализации которой был разработан стенд, описанный ниже. При определении условий съемки следует учитывать не только дневной свет или свет от осветительных

приборов, но и тепловое излучение объектов – обогревателей, нагретых металлических или теплоизоляционных поверхностей и т.д.

Описание экспериментального стенда

На рис. 4 показан разработанный лабораторный стенд для температурной калибровки *SWIR*-камеры при съемке металлической пластины из стали 316L (на рис. 4 поз. 1, размеры пластины 100×80×40 мм), установленной в камеру муфельной электропечи сопротивления 2.

Внутри футерованного муфеля печи установлены проволочные нагреватели 3, обеспечивающие нагрев рабочего пространства до температуры 1300 °С, а

также термопара 4, необходимая для работы регулятора температуры 5. Для измерения температуры поверхности образца снаружи, на расстоянии 0,8 м от печи установлен пирометр *Raytek Marathon MR1SACF* с рабочим диапазоном температур 600...1400 °С (на рис. 4 поз. 6), и минимальным размером пятна измерения 7 мм. На расстоянии 1 м от камеры печи на штативе установлена *SWIR*-камера *Orion SQUH000* (поз. 7) с объективом *Kowa LM75JC*, направленным на область, в которой установлена нагреваемая пластина. Съемка камеры печи и показаний пирометра осуществлялась в моменты открытия двери муфельной печи 9. На рис. 4, б, приведены фотографии печи с открытой дверью с точки расположения пирометра и *SWIR*-камеры (рис. 4, в).

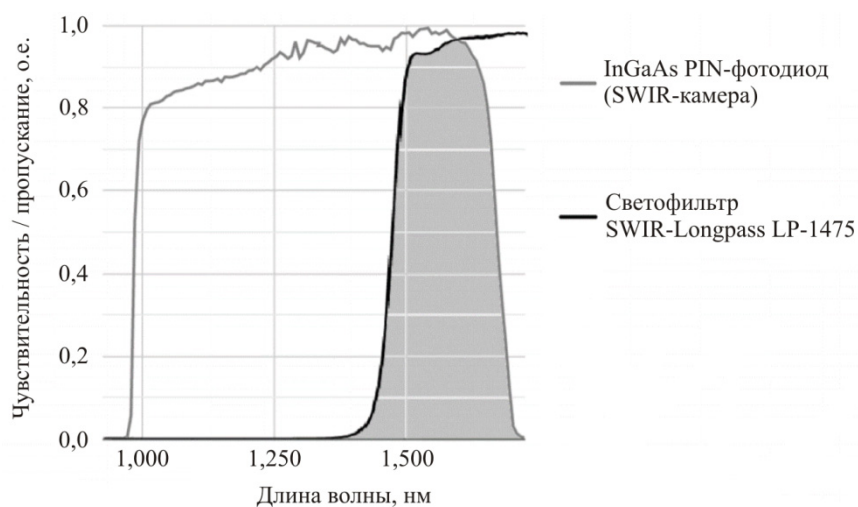


Рис. 3. Спектральные характеристики *SWIR*-камеры и используемого светофильтра

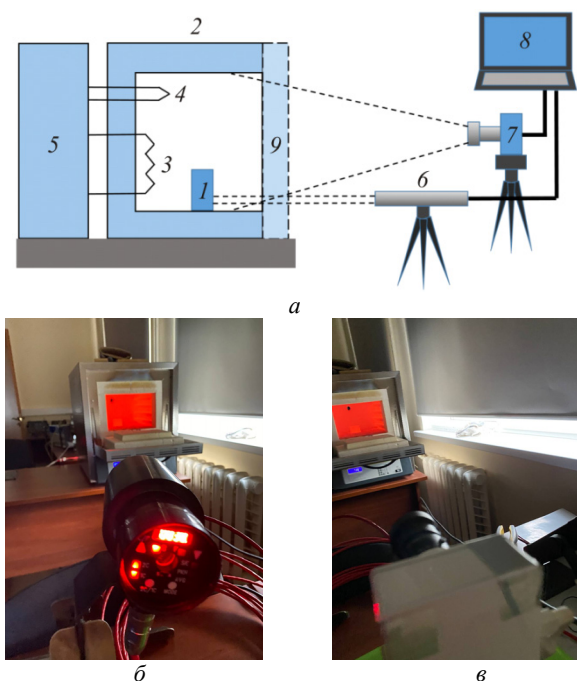


Рис. 4. Экспериментальный стенд для температурной калибровки *SWIR*-камеры:
а – схема расположения приборов; б – вид со стороны пирометра; в – вид со стороны *SWIR*-камеры

Формат данных ORV-файла SWIR-камеры

Порядок	Обозначение	Наименование параметра	Тип данных	Размер, байт
<i>Формат заголовка</i>				
1	x	Ширина кадра	32-разрядное знаковое целое	4
2	y	Высота кадра	32-разрядное знаковое целое	4
3	n	Количество подкадров (для режима <i>HDR</i>)	32-разрядное знаковое целое	4
4	-	Частота кадров	64-разрядное число двойной точности	8
5	-	Адрес начала области данных	64-разрядное знаковое целое	8
6	-	Служебное место	–	1024 кБайт
7	FS	Таблица калибровок (аддитивный коэффициент)	64-разрядное число двойной точности	$x \cdot y \cdot n \cdot 8$
8	K	Таблицы калибровок (мультипликативный коэффициент)	64-разрядное число двойной точности	$x \cdot y \cdot n \cdot 8$
9	–	Таблица дефектов	16-разрядное беззнаковое целое	$x \cdot y \cdot 2$
10	–	Дополнительное место	–	–
<i>Формат данных</i>				
11	–	Область данных (кадров)	16-разрядное беззнаковое целое	$x \cdot y \cdot n$

Эксперимент проводился следующим образом. Первоначально печь нагревалась до температуры 1000 °С, после чего нагреватели отключали. Периодически в процессе остывания печи открывали дверь, производили видеосъемку пластины и регистрацию температуры ее поверхности с помощью пирометра с последующим закрытием дверцы до тех пор, пока пластина не остыла до 580 °С – минимальной температуры, регистрируемой пирометром. Съемка проводилась при неизменном положении лепестков диафрагмы объектива камеры, частоте кадров 50 Гц, и величины времени накопления 20 мс. Видеофайлы сохранялись в формате *ORV* (*Orion Raw Video*), описание которого даны в таблице.

Обработка результатов эксперимента и их интерпретация

Для осуществления температурной калибровки сохраненных в *ORV*-формате изображений необходимо выбрать ту же область изображения пластины, в которой осуществлялось измерение с помощью пирометра, и сопоставить яркость точек изображения с показаниями пирометра. Поскольку в изображении может присутствовать разброс по яркости пикселей, связанный с наличием шероховатостей, шумов и другими причинами, необходимо провести осреднение регистрируемой яркости поверхности образца (пластины). На рис. 5 приведена блок-схема программы, обеспечивающей отрисовку изображения, регистрируемого камерой, и вычисление средней по выбранной области яркости точек этого изображения.

Данные о яркости пикселей были предварительно сохранены в двумерный массив *imag* разме-

ром 320 на 256 элементов в формате *Long* (целое). Величина регистрируемой яркости может изменяться от 0 до 16 384, и для отрисовки изображения необходимо определить цвет каждого прямоугольника (переменная *Col*). Для нашего случая достаточно иметь 256 градаций серого цвета, что отражено в программе.

После отрисовки пикселей изображения необходимо вычислить среднюю яркость поверхности стальной пластины. Было установлено, что искомая область усреднения соответствует области координат с 75 ($x_{\min}$) по 150 ($x_{\max}$) фоточувствительного элемента МФПУ по горизонтали, и со 100 ($y_{\min}$) по 160 ($y_{\max}$) фотоэлемента по вертикали. Сумма яркостей сигналов, регистрируемых указанными фоточувствительными элементами, сохраняется в переменной *Power*, а среднее значение яркости – в переменной D_{14} , значение которой выводится затем в окне программы.

На рис. 6 в графическом виде представлены результаты описанного эксперимента. По горизонтальной оси отложены значения температуры, регистрируемые пирометром (T) в градусах Цельсия, а по вертикальной – соответствующие этим значениям температуры усредненные значения яркости поверхности образца (D_{14}).

Поскольку в камере установлена 14-разрядная микросхема АЦП, максимальная регистрируемая яркость должна соответствовать значению 16384, однако из рис. 6 видно, что это значение составляет менее 14 000 (в точке с температурой 800 °С регистрируется среднее значение 13 802). Такой результат связан с выбранным в процессе начальной калибровки камеры аддитивным коэффициентом FS (см. таблицу) и может быть легко скорректирован.

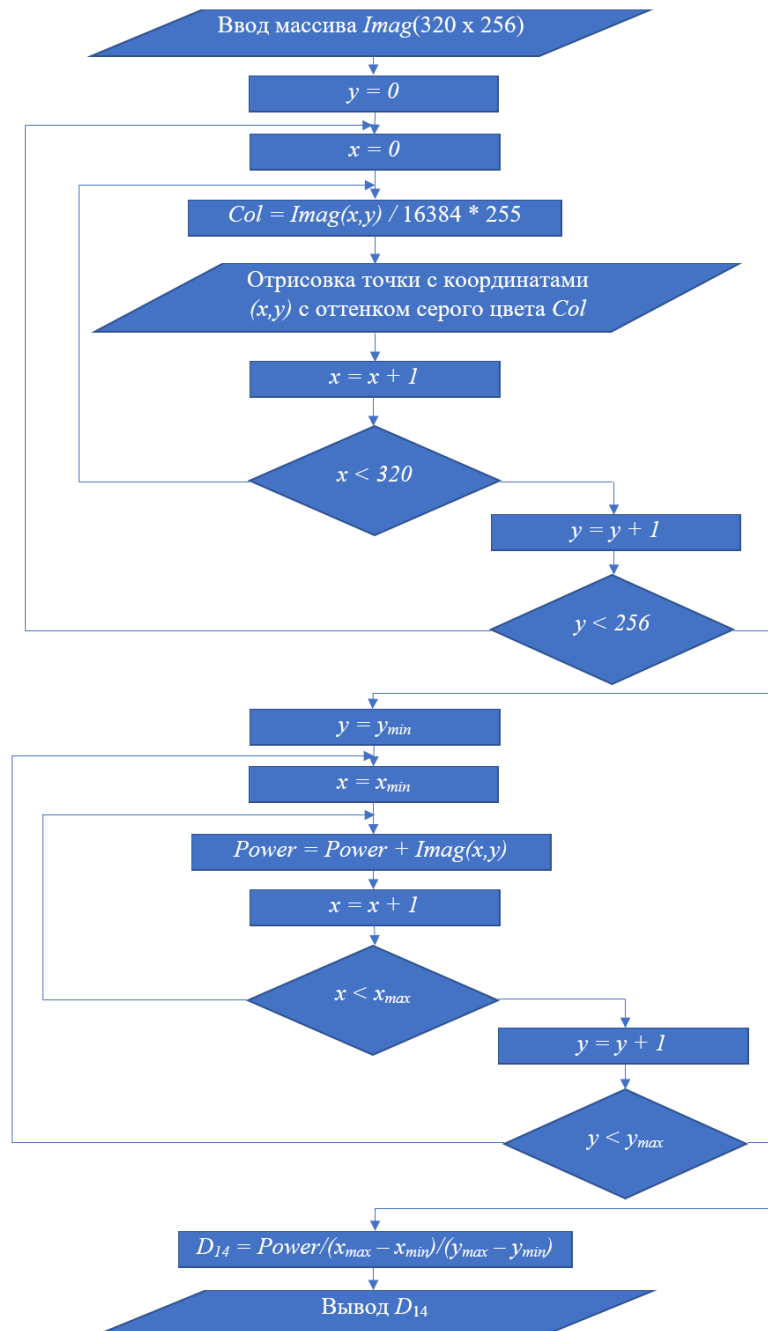


Рис. 5. Блок-схема программы обработки данных SWIR-камеры

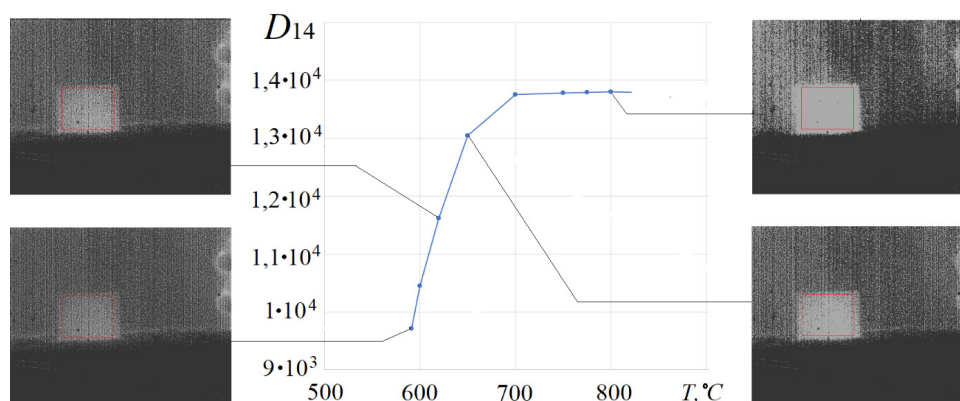


Рис. 6. Результаты температурной калибровки SWIR-камеры

Также в полученной зависимости хорошо просматривается участок «насыщения»: при увеличении температуры образца выше 700° яркость изображения пластины практически не изменяется. Это связано с тем, что при выбранном времени накопления (20 мс) при температуре образца выше 700°C достигается максимально возможная величина сигнала фоточувствительного элемента матрицы, и дальнейший прогрев образца уже не влияет на яркость точек изображения, получаемого с помощью SWIR-камеры. Для устранения этого ограничения необходимо уменьшать время накопления кадра, а для калибровки прибора при температурах ниже 600°C – использовать низкотемпературный пирометр.

Заключение

1. Показана перспективность применения SWIR-камер для проведения температурных измерений по регистрируемым изображениям объектов в электроэнергетике и электротехнологии, обусловленная возможностью съемки объектов в условиях задымленности, присутствия паров, а также при установленных защитных стеклах и пленках, непрозрачных в случае применения традиционно используемых тепловизоров средне- и длинноволнового ИК-диапазона.

2. Разработан экспериментальный стенд на базе лабораторной электропечи сопротивления, обеспечивающий возможность проведения температурной калибровки регистрируемых камерой видеок кадров по показаниям промышленного пирометра, а также программное обеспечение, позволяющее усреднять яркость пикселей изображения в интересующей исследователя области.

3. Проведен анализ полученных в процессе калибровки данных, показывающий возможность регулирования диапазона регистрируемых температур за счет изменения времени накопления кадра матричного фотоприемного устройства камеры.

Библиографический список

1. Thermal imaging for assessment of electron-beam freeform fabrication (EBF3) additive manufacturing deposits / J.N. Zalameda, E.R. Burke, R.A. Hafley, K.M. Taminger, C.S. Domack, A. Brewer, R.E. Martin // *Proceedings of the SPIE*. – 2013. – Vol. 8705. – id. 87050M. – 8 p.
2. Thermal Imaging Metrology Using High Dynamic Range Near-Infrared Photovoltaic-Mode Camera / T.B. Rockett, N.A. Boone, R.D. Richards, J.R. Wilmott // *Sensors (Basel)*. – 2021. – Vol. 21. – P. 6151. DOI: 10.3390/s21186151
3. Детекторы коротковолнового ИК-диапазона на основе InGaAs (обзор) / И.Д. Бурлаков, Л.Я. Гринченко,

А.И. Дирочка, Н.Б. Залетаев // *Успехи прикладной физики*. – 2014. – № 2. – С. 131–159.

4. Камера коротковолнового инфракрасного диапазона спектра с матричным фотоприемным устройством на основе гетероструктур InGaAs/InP / К.А. Хамидуллин, Д.Л. Балиев, П.С. Лазарев, К.О. Болтарь [и др.] // *Прикладная физика*. – 2017. – № 6. – С. 95–102.

5. Матричные фотоприемные устройства коротковолнового инфракрасного диапазона спектра с лавинным усилением сигнала на основе гетерозонитаксиальных структур InGaAs / Н.И. Яковлева, К.О. Болтарь, М.В. Седнев, А.И. Патрашин, Н.А. Иродов // *Прикладная физика*. – 2014. – № 2. – С. 45–49.

6. Особенности гетероструктур InGaAs/InP, предназначенных для изготовления быстродействующих фотоприемных устройств коротковолнового диапазона ИК-спектра / Е.Д. Коротаев, Н.И. Яковлева, А.Е. Миронянченко, А.В. Ляликов // *Прикладная физика*. – 2014. – № 6. – С. 60–65.

7. Online [Электронный ресурс]. – URL: <https://midopt.com/filters/lp1475/> (дата обращения: 15.09.2022).

8. Сычев В., Кочергина Е. Невидимый нам свет [Электронный ресурс] // N + 1 (Интернет-издание), Август 2020. – URL: <https://nplus1.ru/material/2020/08/18/swir> (дата обращения: 15.09.2022).

9. One step calibration of industrial hyperspectral cameras / M. Henriksen, W. Pedersen, P. Klarskov, M. Hinge // *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*. – 2022. – Vol. 227. – P. 104609. DOI: 10.1016/j.chemolab.2022.104609

10. Кузнецов П.А., Мошев И.С. Расширение динамического диапазона коротковолновых ИК матричных фотоприемных устройств // *Прикладная физика*. – 2017. – № 5. – С. 52–58.

11. Ульянова Е.О. Оптические системы для тепловизионных приборов на основе матричных фотоприемных устройств спектрального диапазона 8–12 мкм // *Оптический журнал*. – 2013. – Т. 80, № 6. – С. 14–19.

12. Борошнев А.В. Широкоформатные матричные фотоприемные устройства инфракрасного диапазона спектра // *Прикладная физика*. – 2007. – № 2. – С. 86–89.

13. Кремис И.И. Повышение качества изображения тепловизоров на основе матричных HGCDTE фотоприемных устройств ИК-диапазона // *Прикладная физика*. – 2010. – № 1. – С. 108–114.

14. Зуйков И.Е., Савкова Е.Н. Метод расширения динамического диапазона матричного фотоприемного устройства // *Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика*. – 2008. – № 3. – С. 45–47.

15. Кузнецов П.А., Мошев И.С. Исследование матричного фотоприемного модуля SWIR диапазона в дальномерном режиме // *Успехи прикладной физики*. – 2020. – Т. 8, № 6. – С. 472–478.

16. Кульчицкий Н.А., Наумов А.В., Старцев В.В. Тенденции развития матричных фотоприемных устройств ИК диапазона // *Нано- и микросистемная техника*. – 2020. – Т. 22, № 9. – С. 500–510.

17. Oskolkov A., Trushnikov D., Bezukladnikov I. Indirect temperature measurement in high frequency heating systems // *Sensors*. – 2021. – Т. 21, no. 7. – P. 35–43.

18. Mladenov G.M., Koleva E.G., Truishnikov D.N. Welding in space and in vacuum chambers // *Electrotechnica and Electronica*. – 2019. – Т. 54, no. 5–6. – P. 111–121.

19. Ларионов Н.А., Мошчев И.С., Залетаев Н.Б. Ячейка считывания матричного фотоприемного устройства ИК-диапазона для пассивного детектирования источников лазерного излучения // *Прикладная физика*. – 2020. – № 4. – С. 52–56.

20. Полесский А.В., Юдовская А.Д. Анализ требований к фотоприемному тракту для установок измерения пятен рассеяния на основе матричных фотоприемных устройств // *Успехи прикладной физики*. – 2016. – Т. 4, № 5. – С. 517–522.

References

1. Zalameda J.N., Burke E.R., Hafley R.A., Taminger K.M., Domack C.S., Brewer A., Martin R.E. Thermal imaging for assessment of electron-beam freeform fabrication (EBF3) additive manufacturing deposits. *Proceedings of the SPIE*, 2013, vol. 8705, id. 87050M, 8 p.

2. Rockett T.B., Boone N.A., Richards R.D., Wilmott J.R. Thermal Imaging Metrology Using High Dynamic Range Near-Infrared Photovoltaic-Mode Camera. *Sensors (Basel)*, 2021, vol. 21, pp. 6151. DOI: 10.3390/s21186151

3. Burlakov I.D., Grinchenko L.Ia., Dirochka A.I., Zaletaev N.B. Detektory korotkovolnovogo IK-diapazona na osnove InGaAs (obzor) [InGaAs-based short-wave infrared detectors (review)]. *Uspekhi prikladnoi fiziki*, 2014, no. 2, pp. 131–159.

4. Khamidullin K.A., Baliev D.L., Lazarev P.S., Boltar' K.O. Kamera korotkovolnovogo infrakrasnogo diapazona spektra s matrichnym fотopriemnym ustroystvom na osnove geterostruktur InGaAs/InP [Shortwave infrared spectral range camera with matrix photodetector based on InGaAs/InP heterostructures]. *Prikladnaia fizika*, 2017, no. 6, pp. 95–102.

5. Iakovleva, N.I., Boltar' K.O., Sednev M.V., Patrashin A.I., Irodov N.A. Matrichnye fотopriemnye ustroystva korotkovolnovogo infrakrasnogo diapazona spektra s lavinnym usileniem signala na osnove geteroepitaksial'nykh struktur InGaAs [Matrix photodetectors of the short-wave infrared spectrum with avalanche signal amplification based on InGaAs heteroepitaxial structures]. *Prikladnaia fizika*, 2014, no. 2, pp. 45–49.

6. Korotaev E.D., Iakovleva N.I., Mirofianchenko A.E., Lialikov A.V. Osobennosti geterostruktur InGaAs/InP, prednaznachennykh dlia izgotovleniia bystrodeistvuiushchikh fотopriemnykh ustroystv korotkovolnovogo diapazona IK-spektra [Features of InGaAs/InP heterostructures designed for the fabrication of fast photodetectors in the short-wave range of the IR spectrum]. *Prikladnaia fizika*, 2014, no. 6, pp. 60–65.

7. Online [Elektronnyi resurs]. URL: <https://midopt.com/filters/lp1475/> (data available 15 September 2022).

8. Sychev V., Kochergina E. Nevidimyi nam svet [Invisible light]. *N + 1 (Internet-izdanie)*, Avgust 2020. URL: <https://nplus1.ru/material/2020/08/18/swir> (data available 15 September 2022).

9. Henriksen M., Pedersen W., Klarskov P., Hinge M. One step calibration of industrial hyperspectral cameras. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 2022, vol. 227, pp. 104609. DOI: 10.1016/j.chemolab.2022.104609

10. Kuznetsov P.A., Moshchev I.S. Rasshirenie dinamicheskogo diapazona korotkovolnovykh IK matrichnykh fотopriemnykh ustroystv [Extending the dynamic range of shortwave IR matrix photodetectors]. *Prikladnaia fizika*, 2017, no. 5, pp. 52–58.

11. Ul'ianova E.O. Opticheskie sistemy dlia teplovizionnykh priborov na osnove matrichnykh fотopriemnykh ustroystv spektral'nogo diapazona 8–12 mkm [Optical systems for thermal imaging devices based on matrix photodetectors in the 8–12 μm spectral range]. *Opticheskii zhurnal*, 2013, vol. 80, no. 6, pp. 14–19.

12. Boroshnev A.V. Shirokoformatnye matrichnye fотopriemnye ustroystva infrakrasnogo diapazona spektra [Wide matrix infrared photodetectors]. *Prikladnaia fizika*, 2007, no. 2, pp. 86–89.

13. Kremis I.I. Povyshenie kachestva izobrazheniia teplovizorov na osnove matrichnykh HGCDTE fотopriemnykh ustroystv IK-diapazona [Improvement of image quality of thermal imagers based on matrix HGCDTE IR photodetectors]. *Prikladnaia fizika*, 2010, no. 1, pp. 108–114.

14. Zuikov I.E., Savkova E.N. Metod rasshireniia dinamicheskogo diapazona matrichnogo fотopriemnogo ustroystva [Method for extending the dynamic range of a matrix photodetector]. *Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika*, 2008, no. 3, pp. 45–47.

15. Kuznetsov P.A., Moshchev I.S. Issledovanie matrichnogo fотopriemnogo modulia SWIR diapazona v dal'nomernom rezhime [Investigation of the SWIR range matrix photodetector module in range mode]. *Uspekhi prikladnoi fiziki*, 2020, vol. 8, no. 6, pp. 472–478.

16. Kul'chitskii N.A., Naumov A.V., Startsev V.V. Tendentsii razvitiia matrichnykh fотopriemnykh ustroystv IK diapazona [Trends in the development of IR matrix photodetectors]. *Nano- i mikrosistemnaia tekhnika*, 2020, vol. 22, no. 9, pp. 500–510.

17. Oskolkov A., Trushnikov D., Bezukladnikov I. Indirect temperature measurement in high frequency heating systems. *Sensors*, 2021, vol. 21, no. 7, pp. 35–43.

18. Mladenov G.M., Koleva E.G., Truishnikov D.N. Welding in space and in vacuum chambers. *Electrotechnica and Electronica*, 2019, vol. 54, no. 5–6, pp. 111–121.

19. Larionov N.A., Moshchev I.S., Zaletaev N.B. Iacheika schityvaniia matrichnogo fотopriemnogo ustroystva IK-diapazona dlia passivnogo detektirovaniia istochnikov lazernogo izlucheniia [IR matrix photodetector readout cell for passive detection of laser radiation sources]. *Prikladnaia fizika*, 2020, no. 4, pp. 52–56.

20. Poleskii A.V., Iudovskaia A.D. Analiz trebovaniia k fотopriemnomu traktu dlia ustanovok izmereniia piaten rasseianiia na osnove matrichnykh fотopriemnykh ustroystv [Analysis of requirements for the photodetector path for scattering spot measurement installations based on matrix photodetectors]. *Uspekhi prikladnoi fiziki*, 2016, vol. 4, no. 5, pp. 517–522.

Поступила: 18.10.2022

Одобрена: 01.11.2022

Принята к публикации: 01.12.2022

Об авторах

Щербаков Алексей Владимирович (Москва, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры электроснабжения промышленных предприятий и электротехнологий Национального исследовательского университета «МЭИ» (Россия, 111250, г. Москва, Красноказарменная ул., 14, e-mail: ShcherbakovAV@mpei.ru).

Гапонова Дарья Александровна (Москва, Россия) – инженер кафедры технологии металлов Национального исследовательского университета «МЭИ» (Россия, 111250, г. Москва, Красноказарменная ул., 14, e-mail: GaponovaDA@mpei.ru).

Гончаров Алексей Леонидович (Москва, Россия) – доцент, заведующий кафедрой Технологии металлов Национального исследовательского университета «МЭИ» (Россия, 111250, г. Москва, Красноказарменная ул., 14, e-mail: GoncharovAL@mpei.ru).

Родякина Регина Владимировна (Москва, Россия) – доцент, доцент кафедры технологии металлов Национального исследовательского университета «МЭИ» (Россия, 111250, г. Москва, Красноказарменная ул., 14, e-mail: RodiakinaRV@mpei.ru).

Драгунов Виктор Карпович (Москва, Россия) – профессор, профессор кафедры технологии металлов, проректор Национального исследовательского университета «МЭИ», (Россия, 111250, г. Москва, Красноказарменная ул., 14, e-mail: DragunovVK@mpei.ru).

Абусаиф Нуха (Латакия, Сирийская Арабская Республика) – кандидат технических наук, доцент университета Тишрин (Сирийская Арабская Республика, Латакия, Мухафаза Латакия, e-mail: noha_abo87@hotmail.com).

About the authors

Alexey V. Shcherbakov (Moscow, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Power Supply of Industrial Enterprises and Electrical Technologies of National Research University "MPEI"

(14, Krasnokazarmennaya str., Moscow, 111250, Russian Federation, e-mail: ShcherbakovAV@mpei.ru).

Darya A. Gaponova (Moscow, Russian Federation) – Engineer of Metals Technology Department of National Research University "MPEI" (14, Krasnokazarmennaya str., Moscow, 111250, Russian Federation, e-mail: GaponovaDA@mpei.ru).

Alexey L. Goncharov (Moscow, Russian Federation) – Associate Professor, Head of Metals Technology Department of National Research University "MPEI" (14, Krasnokazarmennaya str., Moscow, 111250, Russian Federation, e-mail: GoncharovAL@mpei.ru).

Regina V. Rodyakina (Moscow, Russian Federation) – Associate Professor, Associate Professor of Metals Technology Department of National Research University "MPEI" (14, Krasnokazarmennaya str., Moscow, 111250, Russian Federation, e-mail: RodiakinaRV@mpei.ru).

Viktor K. Dragunov (Moscow, Russian Federation) – Professor, Professor of Metals Technology Department of National Research University "MPEI", Vice-Rector of National Research University "MPEI" (14, Krasnokazarmennaya str., Moscow, 111250, Russian Federation, e-mail: DragunovVK@mpei.ru).

Nuha Abusaif (Latakia, Syrian Arab Republic) – Ph.D., Associate Professor at Tishrin University (Tishrin University, Latakia, Syrian Arab Republic, Latakia Governorate, e-mail: noha_abo87@hotmail.com).

Финансирование. Работы по разработке программного обеспечения системы калибровки камеры выполнены в ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» при финансовой поддержке Стипендии Президента Российской Федерации СП-2918.2021.1. Работы по созданию экспериментального стенда выполнены в ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FSWF – 2020-0023).

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад всех авторов равноценен.