

где Δh – перепад высоты; γ – температурный коэффициент поверхностного натяжения; ρ – плотность материала; T_m – температура плавления, g – ускорение свободного падения; y_0 – функция, определяющая зависимость от параметров теплового источника.

Если рассматривать образцы разных металлов, то можно проанализировать, как будет изменяться высота наплыва.

При глубине проплавления $h = 1$ мм, разности $\Delta T = 100^\circ$ для стали ($\rho_{ст} = 7,8$ г/см³, $\gamma = 0,49$ мН/мК) $\Delta h = 1$, для титана ($\rho_t = 4,5$ г/см³, $\gamma = 0,26$ мН/мК) $\Delta h = 0,9$, для алюминия ($\rho_a = 2,38$ г/см³, $\gamma = 0,35$ мН/мК) $\Delta h = 2,4$.

Таким образом, для алюминия высота наплыва примерно в два раза больше, чем у стали и титана, так как плотность алюминия значительно ниже.

Для различных мощностей лазерного излучения также меняется высота наплыва.

На примере нержавеющей стали 304 с теплофизическими характеристиками $\rho_{ст} = 7,8$ г/см³, $T_m = 1809$ °К, $\Delta T = \min 100^\circ$ $\gamma = 0,49$ мН/мК, в зависимости от глубины проплавления в определенной точке расплава для различных мощностей лазерного излучения: $h = 4$ мм – $\Delta h = 0,27$; $h = 6$ мм – $\Delta h = 0,18$; $h = 10$ мм – $\Delta h = 0,1$; $h = 16$ мм – $\Delta h = 0,07$; $h = 18$ мм – $\Delta h = 0,06$.

Таким образом, с увеличением мощности лазерного излучения, с увеличением глубины проплавления, высота наплывов уменьшается.

Регулируя параметры теплового источника, можно влиять на развитие термокапиллярной конвекции, вызывающей образование наплывов на поверхности различных металлов.

Перемещая тепловой источник с той или иной скоростью, можно влиять на искривление свободной поверхности. Следовательно, существует возможность найти критическую скорость перемещения сканирующего лазера, при которой высота наплыва вследствие термокапиллярной конвекции будет стремиться к нулю [2].

$$W_{кр} = \frac{d}{2\tau} = \left(\frac{\Delta T g y_0}{12 T_m} \right)^{1/2}, \quad (2)$$

где $W_{кр}$ – критическая скорость теплового источника; τ – время; ΔT – разность температур.

Из уравнения видно, что скорость движения теплового источника зависит от самого материала, выраженному через температуру плавления T_m и от параметров теплового источника, выраженных через функции y_0 , ΔT .

Выражение (2) показывает: регулируя значения параметров теплового источника (мощность, плотность мощности и др.), изменяя перепад температур в центре и на периферии расплавленного пятна, можно подобрать критическую скорость перемещения теплового источника для конкретного металла, когда отклонения свободной поверхности от плоской, вызванные термокапиллярной конвекцией, будут стремиться к нулю.

Литература

1. Гарифуллин, Ф. А. Тепловая неустойчивость слоя упруговязкой жидкости с учетом термокапиллярных сил / Ф. А. Гарифуллин, Ф. Х. Тазюков // Сб.: Тепло-массообмен в химической технологии. – Вып. 5. – Казань: КХТИ. – 1977. С. 26–30.
2. Аскарова, А. Я. Влияние термокапиллярной конвекции на форму свободной поверхности жидкости. Автореферат дис. НЭБ, Казань: 2001.

УДК 681.7

ТЕПЛОВИЗИОННО-НОЧНОЙ МОНОКУЛЯР Белохвостик Е. В., Довжик В. Г., Кузнечик В. О.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация: Рассмотрено устройство двухканального телевизионно-ночного монокуляра и его основные элементы.

Ключевые слова: ночной канал, тепловизионный канал, монокуляр.

THERMAL IMAGING-NIGHT MONOCULAR Belokhvoostik E., Dovzhik V., Kuznechik V.

*Belorussian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus*

Annotation: The device of a two-channel television-night monocular and its main elements are considered.

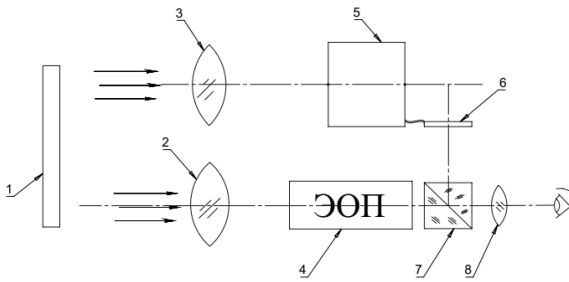
Keywords: night channel, thermal imaging channel, monocular.

*Адрес для переписки: Кузнечик В. О., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: kuznechik@bntu.by*

Для расширения тактико-технических возможностей опτικο-электронных приборов (ОЭП) наблюдения используют комбинированные ОЭП, к которым можно отнести двухканальный тепло-

визионно-ночной монокуляр (рисунок 1), в состав которого входит ночной (работает по отраженному от объекта излучению) и тепловизионный (работает по собственному тепловому излучению

от объекта) каналы с общим для обоих каналов окуляром, что позволяет уменьшить массогабаритные характеристики монокуляра.



1 – объект; 2 – объектив ночного канала; 3 – объектив тепловизионного канала; 4 – ЭОП; 5 – микроболометрический датчик; 6 – микродисплей; 7 – призма К-0°; 8 – окуляр

Рисунок 1 – Оптическая схема монокуляра

Ночной канал прибора, в состав которого входит линзовый объектив 2, электронно-оптический преобразователь (ЭОП) 4 и линзовый окуляр 8, позволяет наблюдать объекты в условиях низкой освещенности, благодаря усилению яркости изображения, рассматриваемого через окуляр 8 с экрана ЭОП 4. ЭОП позволяет не только усилить яркость изображения более чем в 10 000 раз, но и преобразовать его из ИК-изображения в видимое для человека. Дальность видения ночного канала зависит от уровня освещенности объекта 1 ночью, разрешающей способности объектива 2, ЭОП 4 и разрешающей способности глаза наблюдателя, а также от согласования характеристик окуляра 8 с характеристиками глаза человека (например, с помощью диоптрийной подвижки окуляра 8). Использование ЭОП в приборе позволяет использовать аналоговый сигнал, получать изображение привычное для наблюдателя, снизить энергопотребление прибора и увечить ресурс его работы, по сравнению с цифровым прибором ночного видения (ПНВ), а также обеспечить приемлемую дальность видения.

Тепловизионный канал используется для наблюдения объектов в полной темноте, при плохих погодных условиях (туман, пыль, дождь, дым), в условиях засветки, т.е. когда не эффективен ночной канал монокуляра. ИК-объектив тепловизионного канала 3 формирует на сенсоре 5 (миниатюрная полупроводниковая матрица из терморезисторов, имеющих чувствительность в сотые доли градуса и преобразующая оптические сигналы в массив электрических сигналов) температурную карту (или карту разности мощности излучения) всей наблюдаемой в поле зрения области. Сигнал от матрицы обрабатывается электроникой и выводится на жидкокристаллический экран (микродисплей 6) в виде изображения (улучшенное с помощью специального программного обеспечения), которое наблюдатель видит

через призму К-0° 7 в окуляр 8. Полученное изображение отличается от изображения в ночном канале (хуже детализация). Питание осуществляется от аккумуляторов (батареинный отсек на рисунке не показан).

Кратко рассмотрим основные элементы тепловизионного канала монокуляра.

ИК-объективы, используемые в тепловизорах можно классифицировать по следующим признакам:

- рабочий спектральный диапазон (3–5 мкм, 8–14 мкм);

- тип тепловизора ($\lambda = 3\text{--}5\text{ мкм}$ – охлаждаемые; $\lambda = 8\text{--}14\text{ мкм}$ – неохлаждаемые);

- с постоянным и переменным (изменяемым «скачками» или плавно) фокусным расстоянием;

- величина фокусного расстояния (обычно 50–300 мм);

- диафрагменное число или относительное отверстие (влияет на освещенность изображения, создаваемого объективом в плоскости датчика);

- минимальный размер пикселя ИК-датчика (функция передачи модуляции (ФПМ) объектива, по которой с помощью частоты Найквиста определяют минимальный размер пикселя);

- максимальный размер пикселя ИК-датчика (имеет значение в первую очередь для внеосевых пучков);

- терморастраиваемость в следствии широкого рабочего диапазона температур прибора, например, $\pm 50\text{ }^\circ\text{C}$ (возникают термоабберации, изменяется положение деталей в оправках или возникают напряжения из-за различия температурных коэффициентов линейного расширения материалов), приводящая к ухудшению качества изображения (корректируется обычно путем атермализации объективов).

Предлагаемые на рынке ИК-датчики изображения представляют собой микросхемы формирования изображения, созданные путем объединения массива оптических детекторов, чувствительных к тепловому излучению, с интегральной схемой, специально разработанной для считывания электрических сигналов с этого массива детекторов (генерируют электронное изображение в одном из стандартов электронного видеозображения).

Существует множество ИК-датчиков, используемых для производства тепловизоров. Эти датчики можно разделить по следующим критериям:

- тип (принцип работы) датчика (фотонные; тепловые, чаще всего применяются в виде микроболометрических матриц);

- охлаждение датчика (охлаждаемые и неохлаждаемые);

- спектральный диапазон датчика;

- разрешение/размер пикселя (разрешение не менее 1024×768 , пиксель 12 мкм или 10 мкм);

- максимальная частота кадров выходного изображения (50–60 кадров в секунду).

Технология изготовления ИК-датчиков сложна, поэтому между датчиками, представленными на рынке, существует некоторая разница в качестве. Большинство производителей делают ИК-датчики на классы, которые различаются по таким параметрам, как детектируемость, NETD (разница температур, эквивалентная шуму), коэффициент усиления, шум, динамические, количество и расположение битых пикселей, ФПМ, относительная спектральная чувствительность.

Дисплей – это электронный модуль, используемый во многих портативных тепловизорах в качестве внутреннего блока, способного отображать изображение на выходе. Если дисплей миниатюрный, то для увеличения изображения на дисплее используется окулярная линза. Дисплеи и окуляры тепловизоров представляют собой те же блоки, что и в приборе ночного видения.

Комбинирование тепловизионного канала с каналом ночного видения в ОЭП предоставляет ряд значительных преимуществ:

– **улучшенная идентификация объектов:** тепловизоры хорошо работают в полной темноте, а ночные приборы могут усиливать световые сигналы. Это позволяет более точно идентифицировать объекты;

– **работа в сложных условиях:** в условиях плохой видимости (дым, дождь) тепловизоры остаются эффективными, тогда как ночное видение может быть ограничено;

– **снижение ложных срабатываний:** использование обоих типов сенсоров позволяет повысить надежность обнаружения за счет перекрестной проверки данных.

Применение двухканального тепловизионно-ночного монокуляра увеличивает эффективность обнаружения и идентификации объектов, а также открывает новые возможности для применения в других сферах деятельности человека.

Литература

1. Грузевич, Ю. К. Оптико-электронные приборы ночного видения. – М.: Физматлит, 2014. – 276 с.

УДК 53.089.5

ИСПЫТАНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК MWIR КАМЕРЫ С ЦЕЛЬЮ МОНИТОРИНГА ПОЖАРОВ

Беляев Ю. В.¹, Литвинович Г. С.¹, Горский Д. А.², Котов Д. С.², Страшко И. Б.²

¹НИУ «Институт прикладных физических проблем им. А. Н. Севченко БГУ»

²УП «Геоинформационные системы»

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. В работе представлены результаты испытаний оптических характеристик камеры MWIR диапазона для применения в раннем детектировании очагов возгораний. В исследовании определялись угловое поле зрения, угловое разрешение и спектральный диапазон камеры. Также представлены первые результаты по сравнению LWIR и MWIR тепловизоров в эксперименте по определению температуры пламени.

Ключевые слова: средневолновой ИК-диапазон, оптические характеристики, тепловизор.

MWIR CAMERA OPTICAL CHARACTERISTICS TESTING FOR FIRE MONITORING

Belyaev Yu.¹, Litvinovich H.¹, Gorsky D.², Kotov D.², Strashko I.²

¹A. N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems of Belarusian State University

²UE "Geoinformation Systems"

Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The paper presents the results of testing the optical characteristics of MWIR camera for use in early detection of fires. The study determined the angular field of view, angular resolution, and spectral range of the camera. First results of LWIR and MWIR thermal imagers comparison in experiment for flame temperature determination are also presented.

Key words: MWIR, optical characteristics, thermal imager.

Адрес для переписки: Литвинович Г. С., ул. Курчатова, 7, г. Минск 220045, Республика Беларусь
e-mail: litvinovichgs@yandex.by

Большинство усилий по раннему обнаружению лесных пожаров, по-прежнему предпринимаются наблюдателями. В современном мире развитие получают автоматизированные системы определения очагов возгораний в виду их масштабируемости, всепогодности и возможности круглосуточного мониторинга. Несмотря на то, что популярные на сегодня системы на основе камер видимого диапазона

успешно себя зарекомендовали, они имеют большое количество ложных срабатываний. К сожалению, они работают только в дневное время при не слишком сильном ветре, при котором столб дыма не уносит в сторону [1].

В виду описанных недостатков перспективными выглядят системы на работающие в LWIR (8–14 мкм) и MWIR (3–5 мкм) диапазонах. MWIR