

---

## ПРОБЛЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ, МЕХАНИЗАЦИИ И КОМПЬЮТЕРИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ ЛИТЬЯ

УДК 536.521.3

**Л. Ф. Жуков**, д-р техн. наук, гл. науч. сотр., e-mail: zhukov@i.com.ua

**А. Л. Корниенко**, канд. техн. наук., науч. сотр., e-mail: cane\_cat@rambler.ru

**Д. А. Петренко**, аспирант, e-mail: dima-petrenko@meta.ua

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

### МНОГОЦВЕТОВАЯ ТЕРМОМЕТРИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ДЛЯ НЕПРЕРЫВНОГО КОНТРОЛЯ ТЕМПЕРАТУРЫ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СПЛАВОВ

*На базе микроспектрометра разработана термометрическая система для реализации новых технологий многоцветовой пирометрии излучения. Принцип действия системы заключается в измерении одноцветовых температур излучения на рабочих волнах с последующей обработкой этой первичной пирометрической информации по алгоритмам многоцветовой термометрии. Система обеспечивает измерения до 2048 одноцветовых температур излучения в видимой и ближней инфракрасной областях спектра. Установлено, что в условиях случайно изменяющейся излучательной способности металлических сплавов погрешности измерений температуры разработанной многоцветовой термометрической системой меньше погрешностей известных решений в 2,3–3,2 раза.*

**Ключевые слова:** многоцветовая пирометрия излучения, первичная пирометрическая информация, алгоритмы обработки, рабочие волны, фокусирующее устройство, волоконно-оптический кабель, микроспектрометр, линейный детектор излучения с зарядовой связью.

*На базі мікроспектрометра розроблено термометричну систему для реалізації нових технологій багатокольорової пірометрії випромінювання. Принцип дії системи полягає у вимірюванні однокольорових температур випромінювання на робочих хвилях з наступною обробкою цієї первинної пірометричної інформації за алгоритмами багатокольорової термометрії. Система забезпечує вимірювання до 2048 однокольорових температур випромінювання у видимій та ближній інфрачервоній областях спектру. Встановлено, що за умов випадково змінної випромінювальної здатності металевих сплавів похибки вимірювань температури розробленою багатокольоровою термометричною системою менше похибок відомих рішень в 2,3-13,2 рази.*

**Ключові слова:** багатокольорова пірометрія випромінювання, первинна пірометрична інформація, алгоритми обробки, робочі хвилі, фокусуючий пристрій, волоконно-оптичний кабель, мікроспектрометр, лінійний детектор випромінювання із зарядовим зв'язком.

*The thermometry system for new technologies of multicolour pyrometry realization were developed on basis of microspectrometer. Operational principle of the system is based on measurement of one-colour radiation temperatures on operational waves with following treatment of this*

## **Проблемы автоматизации, механизации и компьютеризации процессов литья**

*primary pyrometric information using algorithms of multicolour pyrometry. The system provides measurements up to 2048 one-colour radiation temperatures in visible and near infrared ranges of spectrum. It was determined that in conditions of variable emissivity of metal alloys errors of temperature measurements by developed multicolour thermometry system are lower than errors of known solutions in 2.3–13.2 times.*

**Keywords:** *multicolour pyrometry, primary pyrometric information, algorithms of treatment, operational waves, focusing device, fiber-optic cable, microspectrometer, linear charge coupled detector.*

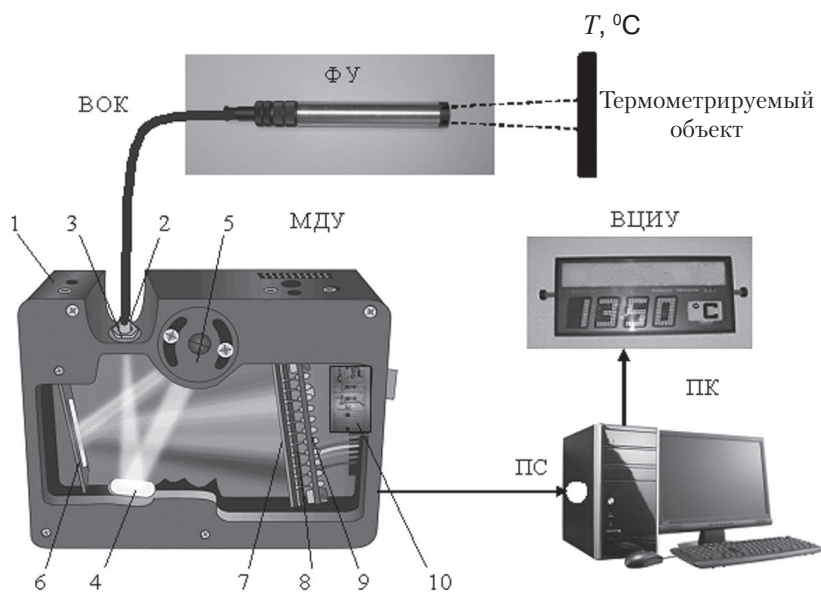
Для реализации многоцветовых термометрических технологий необходимо измерять одноцветовые температуры излучения термометрируемых объектов, в том числе металлических сплавов, на трех и более рабочих волнах. При этом выбор рабочих волн определяется алгоритмами обработки первичной пирометрической информации, а также излучательными характеристиками объектов контроля и пропусканьем сопутствующих и специальных промежуточных сред. Известные многоцветовые пирометры не обеспечивают техническую реализацию алгоритмов обработки первичной пирометрической информации в новых многоцветовых технологиях ФТИМС НАН Украины, в том числе спектрально-компенсационных (СКМПИ) [1, 2], параболической аппроксимации (ПА) [3], симметрично-волновых (СВПИ) [4] и двухцветовых компенсационных (ДКПИ) [5]. Например, разработанные Национальным бюро стандартов США трех- и четырехцветовые пирометры используют оптические (зеркала, призмы, светофильтры, полихроматоры), электромеханические (обтюраторы, модуляторы, регулируемые диафрагмы) и оптоэлектронные (фотонные приемники излучения, фотодиоды, линейные ПЗС-детекторы) устройства, исключая гибкую в процессе измерений спектральную настройку [6]. Этими же недостатками характеризуются разработанные в последнее время в России пирометры «Аккорд» и «С-3000». Общим недостатком используемых в рассмотренных пирометрах алгоритмов обработки первичной пирометрической информации является возрастание инструментальных погрешностей за счет увеличения количества рабочих волн и соответствующего усложнения зависимостей между температурой объекта и измеряемыми температурами его излучения. Например, алгоритм работы трехцветового пирометра «С-3000» предполагает аппроксимацию логарифма спектрального распределения излучательной способности линейной функцией, что справедливо в реальных условиях для близко расположенных рабочих волн. Для демонстрации метрологических преимуществ используются значения  $\Delta\lambda = \lambda_3 - \lambda_2 = \lambda_2 - \lambda_1$  не превышающие 0,02 мкм. В этом случае одноцветовые температуры излучения  $S_1$ ,  $S_2$  и  $S_3$  на  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$  и  $\lambda_3$  отличаются на величины сравнимые или меньшие погрешностей их измерений. Поэтому получаемая первичная пирометрическая информация, по сути дела, «тонет» в погрешностях прямых измерений и непригодна для расчета температуры объекта [4].

Для технической реализации алгоритмов обработки первичной пирометрической информации перечисленных выше новых многоцветовых технологий (СКМПИ, ПА, СВПИ и ДКПИ) наиболее удобны выполненные на базе современной оптоэлектроники микроспектрометры. Основными производителями микроспектрометров являются США (Ocean Optics Inc., Newport Corp., Thorlabs Inc., XiTRON Technologies, Infrared Focal Systems Inc.), Япония (Hamamatsu Photonics Corp., Horiba Corp.), Германия (Insion GmbH), Финляндия (VTT Technical Research Centre) и Израиль (SK Advanced Group). При соответствующем программировании используемые в них кремниевые линейные детекторы излучения с зарядовой связью обеспечивают реализацию алгоритмов новых многоцветовых технологий. Такие микроспектрометры предназначены для медицины (неразрушающей диагностики, исследований крови и т. д.), исследований окружающей среды (атмосферы, воды, земной коры и растений), астрономии и космонавтики (исследований излучения космических объектов, эффективности сжигания топлива и работы ракетных двигателей).

## Проблемы автоматизации, механизации и компьютеризации процессов литья

Однако, именно такие микроспектрометры наиболее перспективны для технической реализации и повышения метрологических характеристик многоцветовой оптической термометрии. Многоцветовая термометрическая система разработана на базе микроспектрометра S2000 (Ocean Optics Inc.). Схема системы приведена на рисунке.

Принцип работы многоцветовой термометрической системы заключается в измерении одноцветовых температур излучения на определенных, с учетом характе-



Многоцветовая термометрическая система: ФУ – фокусирующее устройство; ВОК – волоконно-оптический кабель; МДУ – многоцветовое детектирующее устройство: 1 – пылевлагозащитный корпус; 2 – разъем SMA-905; 3 – фиксированная входная щель; 4 – коллимирующее зеркало; 5 – дифракционная решетка; 6 – фокусирующее зеркало; 7 – собирающая линза детектора; 8 – линейный многоточечный детектор излучения с зарядовой связью (ПЗС-детектор); 9 – система термостатирования детектора излучения; 10 – управляющий микропроцессорный модуль; ПК – персональный компьютер с платой согласования ПК; ВЦИУ – выносное цифровое индикаторное устройство

ристик термометрируемых объектов, в том числе металлических сплавов, рабочих волнах с последующей компьютерной обработкой этой первичной пирометрической информации по алгоритму многоцветовой термометрии.

ФУ представляет собой оптическую линзовую систему для диафрагмирования, виньетирования и фокусирования излучения термометрируемого объекта на входном торце ВОК. Для максимально возможного выполнения своих функций, в том числе обеспечения требуемого показателя визирования, ФУ состоит из длиннофокусного объектива, конденсора, апертурной и полевой диафрагм, с узлом регулировки и фиксации положения входного торца ВОК на главной оптической оси устройства. Апертурная и полевая диафрагмы позволяют регулировать интенсивность излучения термометрируемого объекта на входном торце ВОК без изменения его спектрального состава. Конденсор фокусирует излучение со входного зрачка объектива в плоскости входного торца ВОК. Его задача – сформировать максимально равномерный поток излучения на входном торце ВОК. ФУ с приемлемыми характе-

## **Проблемы автоматизации, механизации и компьютеризации процессов литья**

ристиками производятся в США (Thorlabs Inc., Ocean Optics Inc., Tec5, Newport Inc.) и Японии (Sugitoh). Для многоцветовой термометрической системы ФУ разработано на базе фотонного первичного пирометрического преобразователя частичного излучения типа ПЧД-121.

ВОК предназначен для передачи на МДУ сформированного с помощью геометрической оптики ФУ излучения с минимальным ослаблением. Для передачи излучения без искажений кабель должен быть защищен от механических повреждений и температурных воздействий. В системе использован одножильный кабель производства компании Thorlabs Inc. (США), с диаметром волокна 1 мм. Оптическое сочленение ВОК с ФУ и МДУ осуществляется стандартными коннекторами типа SMA-905.

МДУ является наиболее ответственным и сложным элементом многоцветовой термометрической системы и требует прецизионной механической обработки и сборки его оптоэлектронных компонентов. МДУ – это микроспектрометр с габаритными размерами 139×105×41 мм и весом 0,2 кг. Он состоит из следующих элементов [7]:

- пылевлагозащитного корпуса, предохраняющего оптические и электронные элементы устройства от механических повреждений;
- оптического разъема, расположенного таким образом, чтобы излучение с выходного торца ВОК через фиксированную входную щель (пластину из непрозрачного материала с прямоугольной прорезью, установленную непосредственно за разъемом), попадало на коллимирующее зеркало;
- коллимирующего зеркала, преобразующего расходящийся входной световой пучок в параллельный и направляющего его на дифракционную решетку;
- дифракционной решетки, разлагающей излучение металлического сплава в спектр и направляющей его на фокусирующее зеркало. Конструкция решетки, в том числе количество штрихов, определяет спектральный диапазон и разрешение микроспектрометра. Дифракционная решетка устанавливается на платформе, поворотом которой задаются граничные длины волн. После настройки решетка жестко фиксируется для исключения ее механического смещения и спектрального дрейфа;
- фокусирующего зеркала, проецирующего изображение спектра на собирающую линзу детектора излучения;
- собирающей линзы детектора с минимальной аберрацией, установленной на входном окне детектора излучения, которая повышает эффективность фокусирования излучения и уменьшает засветку рассеянным излучением. Использование линзы также полезно для повышения чувствительности в условиях низкой освещенности и ВОК с большим диаметром;
- линейного детектора излучения с зарядовой связью, преобразующего поток излучения в электрические сигналы. Детектор представляет собой линейку из пикселей, каждый из которых накапливает заряд, пропорциональный интенсивности падающего излучения в определенной части спектра. При считывании информации заряды пикселей преобразовываются в соответствующие импульсы напряжения, которые поступают на аналого-цифровой преобразователь ПС. В системе применен кремниевый 2048-точечный детектор SONY ILX511 с рабочим спектральным диапазоном 0,5–1,1 мкм. Детектор обладает высокой чувствительностью 86 фотон/ед с приемлемым отношением сигнал / шум (не менее 250:1) и рабочей частотой до 2 МГц [8]. Приведенная единица измерения определяет количество фотонов на пиксель на единицу оцифрованного сигнала на выходе 12-битного АЦП. От геометрических размеров детектора и его спектрального диапазона зависят параметры и расположение оптических элементов МДУ, в том числе сферических отражателей и дифракционной решетки;
- системы термостатирования детектора, поддерживающей его температуру на заданном постоянном уровне, исключая влияние температурной нестабильности детектора на результаты измерений. Возможно термостатирование охлажде-

## **Проблемы автоматизации, механизации и компьютеризации процессов литья**

нием или нагревом. В первом случае используется обратный термоэлектрический эффект и температура, как правило, задается близкой к среднегодовой температуре рабочей зоны. При нагреве задание превышает температуру рабочей зоны. С учетом размеров и формы детектора первый вариант наиболее предпочтителен;

– микропроцессорного модуля для управления ПЗС-детектором, термостатом и взаимодействия с ПК через ПС.

ПС предназначена для преобразования аналоговых сигналов МДУ в цифровую форму и передачи их в ПК на обработку. ПС определяет быстродействие системы, поскольку задает тактовую частоту работы аналого-цифрового преобразователя, осуществляющего оцифровку сигналов с ПЗС-детектора. Для соединения ПС с ПК может быть использован USB порт, ISA- или PCI-шина. В системе применена плата согласования ADC500 (Ocean Optics Inc.), которая соединяется с ПК шиной ISA.

ПК обрабатывает первичную пирометрическую информацию по алгоритму многоцветовой термометрии, рассчитывает искомую температуру объекта термоконтроля и управляет ее индикацией на ВЦИУ. Кроме программного обеспечения, реализующего алгоритмы многоцветовой термометрии, в ПК содержатся программы, управляющие работой ПС, а также выполняющие шумоподавление и компенсацию темновых токов ПЗС-детектора и обеспечивающие работу ВЦИУ. Вместо ПК допускается применение любого универсального конфигурируемого промышленного контроллера, связанного с МДУ соответствующей платой согласования.

ВЦИУ предназначено для отображения информации о температуре термометрируемого объекта и дистанционного (до 50 м) ее считывания оператором, управляющим работой металлургической печи или агрегата.

Система работает следующим образом. Излучение термометрируемого объекта собирается ФУ на торце ВОК и передается на МДУ. Дифракционная решетка МДУ разлагает излучение в спектр для подачи на ПЗС-детектор. Детектор может регистрировать интенсивность излучения на 2048 длинах волн. Но такое количество длин волн избыточно для алгоритмов многоцветовых термометрических технологий, где обычно не требуется более 5-6 рабочих волн. К тому же, электрические сигналы от каждого пикселя слабые, в результате чего недопустимо снижается отношение сигнал / шум и возрастают погрешности измерений одноцветовых температур излучения. Для повышения отношения сигнал/шум в МДУ на базе микроспектрометра S2000 предусмотрено временное и пространственное (путем объединения пикселей) усреднение измеренных интенсивностей излучения [9]. При первом алгоритме усреднения регистрируется  $n$  спектров излучения, после чего усредняется  $n$  отсчетов сигналов для каждого пикселя. При этом отношение сигнал/шум возрастает пропорционально  $\sqrt{n}$ . Второй алгоритм усреднения предполагает разбивку рабочего спектрального диапазона на одинаковые интервалы из  $n$  пикселей в каждом и усреднение  $n$  сигналов пикселей для каждого интервала. При этом усредненный сигнал относят к длине волны, соответствующей середине интервала. Применение указанных алгоритмов усреднения позволяет повысить отношение сигнал / шум до 2500:1 и выше. Затем сигналы, пропорциональные измеренным интенсивностям излучения на рабочих волнах, оцифровываются ПС и поступают в ПК. ПК, на основе градуировки системы по модели АЧТ, рассчитывает соответствующие одноцветовые температуры излучения, а затем по алгоритму многоцветовой термометрии – температуру термометрируемого объекта. Рассчитанная температура поступает для индикации на ВЦИУ, а также сохраняется в памяти ПК для архивирования результатов измерений.

При испытаниях было установлено, что в условиях случайно изменяющейся излучательной способности металлических сплавов погрешности измерений тем-

## **Проблемы автоматизации, механизации и компьютеризации процессов литья**

пературы разработанной многоцветовой термометрической системой меньше погрешностей известных многоцветовых, а также классических энергетических и спектрального отношения пирометров соответственно в 2,3, 4,9–13,2 и 3,1–3,6 раз.

Таким образом, на базе микроспектрометра разработана термометрическая система, реализующая новые, созданные ФТИМС НАН Украины, технологии многоцветовой пирометрии излучения, в том числе спектрально-компенсационные, параболической аппроксимации, симметрично-волновые и двухцветовые компенсационные. Известные многоцветовые пирометры излучения и алгоритмы обработки первичной пирометрической информации не предусматривают изменение их спектральных характеристик в процессе измерений. Принцип действия многоцветовой термометрической системы заключается в измерении одноцветовых температур излучения на определенных при адаптации системы рабочих волнах и компьютерной обработке этой первичной пирометрической информации по алгоритмам многоцветовой термометрии. Термометрическая система обеспечивает измерения в видимой и ближней инфракрасной областях спектра до 2048 одноцветовых температур излучения и расчет по ним искомой температуры металлических сплавов. Система разработана на современной оптоэлектронной и микропроцессорной элементной базе, состоит из фокусирующего устройства, оптически связанного волоконно-оптическим кабелем с многоцветовым детектором излучения, компьютера и выносного цифрового индикатора температуры. Установлено, что в условиях случайно изменяющейся излучательной способности металлических сплавов погрешности измерений температуры разработанной многоцветовой термометрической системой меньше погрешностей известных решений в 2,3–13,2 раза.



### **Список литературы**

1. Жуков Л. Ф., Богдан А. В. Исследование и разработка методов многоцветовой оптической термометрии // Инженерно-физический журнал. – 2002. – № 5. – С. 510–515.
2. Жуков Л. Ф., Богдан А. В. Идентификация объектов оптической термометрии по их тепловому излучению // Измерительная техника и метрология. – 2009. – № 70. – С. 96–103.
3. Жуков Л. Ф., Корниенко А. Л., Богдан А. В., Крупник В. М., Крупник Л. В., Писаренко В. Г., Костановский В. В. Инновационные технологии многоцветовой термометрии // Измерительная техника и метрология. Межведомственный научно-технический сборник. – 2012. – № 73. – С. 45–51.
4. Жуков Л. Ф., Корниенко А. Л. Новые технологии симметрично-волновой термометрии. – Lambert Academic Publishing, 2014. – 161 с.
5. Жуков Л. Ф., Петренко Д. А., Корниенко А. Л. Двухцветовая компенсационная термометрия металлических сплавов и ее инструментальные погрешности // Процессы литья. – 2016. – № 5. – С. 48–58.
6. Поскачей А. А., Чарихов Л. А. Пирометрия объектов с изменяющейся излучательной способностью. – М.: Металлургия, 1978. – 200 с.
7. Спектрометры Ocean Optics. [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.ecmoptec.ru/pics/optekusr/File/Spektrometr.pdf>.
8. SONY ILX511 Data Sheet. [Электронный ресурс]. – URL: <https://oceanoptics.com/wp-content/uploads/SONY-ILX511B.pdf>.
9. Ocean Optics S2000 Spectrometer Data Sheet. [Электронный ресурс]. – URL: <https://oceanoptics.com/wp-content/uploads/OEM-Data-Sheet-S2000.pdf>.



## References

1. Zhukov, L. F., Bogdan, A. V. (2002) Issledovanie i razrabotka metodov mnogotsvetovoy opticheskoy termometrii [*Research and development of multicolour optical thermometry methods*]. Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal, no. 5, pp. 510–515. [in Russian].
2. Zhukov, L. F., Bogdan, A. V. (2009) Identifikatsiya obyektov opticheskoy termometrii po ikh teplovomu izlucheniyu. [*Identification of optical thermometry objects by their heat radiation*]. Izmeritelnaya tekhnika i metrologiya, no. 70, pp. 96–103. [in Russian].
3. Zhukov, L. F., Kornienko, A. L., Bogdan, A. V., Krupnik, V. M., Krupnik, L. V., Pisarenko, V. G., Kostanovskiy, V. V. (2012) Innovatsionnyie tekhnologii mnogotsvetovoy termometrii. [*Innovation technologies of multicolour thermometry*]. Izmeritelnaya tekhnika i metrologiya. Mezhdvdomstvennyy nauchno-tekhnicheskiiy sbornik, no. 73, pp. 45–51. [in Russian].
4. Zhukov, L. F., Kornienko, A. L. (2014) Novye tekhnologii simmetrichno-volnovoy termometrii [*New multicolour symmetric-wave thermometry technologies*]. Lambert Academic Publishing, 161 p.
5. Zhukov, L. F., Petrenko, D. A., Kornienko, A. L. (2016). Dvukhtsvetovaya kompensatsionnaya termometria metallicheskiikh splavov i ee instrumentalnye pogreshnosti [*Two-colour compensating thermometry of metal alloys and its instrumental errors*]. Protsessy litya, № 5, p. 48–58. [in Russian].
6. Poskachey, A. A., Charikhov, L. A. (1978). Piroometriya obektov s izmenyayushcheysya izluchatelnoy sposobnostyu [*Pyrometry of objects with variable emissivity*]. Moscow: Metallurgiya, 200 p. [in Russian].
7. Spektrometry Ocean Optics [*Ocean Optics Spectrometers*]. URL: <http://www.ecmoptec.ru/pics/optekusr/File/Spektrometr.pdf>. [in Russian].
8. SONY ILX511 Data Sheet. URL: <https://oceanoptics.com/wp-content/uploads/SONY-ILX511B.pdf>.
9. Ocean Optics S2000 Spectrometer Data Sheet. URL: <https://oceanoptics.com/wp-content/uploads/OEM-Data-Sheet-S2000.pdf>.

Поступила 07.08.2017