

*В.И. Иордан, А.А. Соловьев*

### **Опτικο-электронные методы тестирования систем измерения температурно-скоростных параметров частиц при плазменном напылении порошковых покрытий**

*V.I. Jordan, A.A. Soloviev*

### **Opto-electronic Methods to Test Systems for Measuring Temperature and Speed Parameters of Particles in a Process of Powder Coating Plasma Spraying**

Рассмотрены проблемы, связанные с верификацией оптических методов анемометрии и методов спектральной пирометрии гетерогенных потоков. Приведены структурные схемы опτικο-электронных устройств, позволяющих имитировать тепловое излучение потоков частиц с заданными распределениями скоростей и температур и предназначенных для тестирования пирометрических измерительных комплексов.

**Ключевые слова:** напыление покрытий, измерение, скорость, температура, гетерогенный поток.

**Введение.** В настоящее время для гетерогенной плазмохимии и физического материаловедения большой интерес представляют такие наукоемкие технологии, как плазменное, детонационно-газовое, газопламенное напыление покрытий с помощью микрокапель расплавов различных порошковых материалов (путем их соударения с напыляемой поверхностью), а также электродуговая металлизация, микрораспыление порошков, микропайка в электронике, получение микрокристаллических и аморфных материалов, высокотемпературных сверхпроводников [1].

Ограничиваясь рассмотрением плазменного напыления покрытий, для прогнозирования свойств получаемого материала в технологической цепочке «плазмотрон–струя–покрытие» необходимо учитывать характерные особенности процесса напыления: малые размеры частиц (микрокапель), широкий диапазон скоростей и температур их взаимодействия с поверхностью. Однако для прогнозирования функциональных характеристик покрытия (пористость, шероховатость поверхности, адгезия, когезия и др.) нужно измерять не только диапазоны скоростей и температур частиц, но еще более важным является определение распределений частиц расплава по скоростям и температурам в плазменной струе.

Наиболее пригодны для исследования температурно-скоростных параметров гетерогенных потоков частиц среди методов неразрушающего контроля и измерений методы оптической анемометрии для измерения скорости многофазных потоков частиц и методы спектральной пирометрии для изме-

The article considers the problems connected with verification of anemometry optical methods and methods of spectral pyrometry of heterogeneous flows. Structural diagrams of optiko-electronic devices capable to simulate thermal radiation of particle flows under the preset distribution of speed and temperature, and intended to test the pyrometric measuring systems are resulted.

**Key words:** spraying of coatings, measurement, speed, temperature, heterogeneous flow.

рения температуры этих частиц [2, с. 5–28]. Методы спектральной пирометрии характеризуются достаточно высокой точностью измерения температуры в случае однородно нагретых частиц конденсированной фазы, определяемой по их равновесному тепловому излучению [3, с. 75–77].

Быстропротекающие многофазные потоки частиц, использующиеся при напылении порошковых покрытий и характеризующиеся существенной динамической и тепловой неравновесностью фаз, могут иметь существенную неоднородность распределений частиц по размерам, температурам и скоростям. Поэтому при измерении скорости и температуры частиц недостаточно получать лишь одну «осредненную» оценку скорости и одну «осредненную» оценку температуры, так как на свойства формируемого покрытия оказывает влияние характер распределений частиц по скоростям и температуре.

В работах [4, с. 158–167; 5, с. 79–87; 6, с. 69–76] апробированы методы, применяющие линейные фотоприемники для регистрации интенсивности и интегрального спектра теплового излучения частиц в различных сечениях гетерогенного потока при напылении покрытий, в результате чего программной обработкой определяются распределения частиц по скоростям и температурам. Однако восстановление распределений частиц по скоростям и температурам на основе зарегистрированных сигналов интенсивности теплового излучения и интегрального спектра теплового излучения частиц, по своей сути, является «некорректной обратной» за-

дачей, решение которой традиционно сопряжено с определенными трудностями и достигается применением процедур «регуляризации» решений. Достигнутое в процессе регуляризации физически разумное решение всегда характеризуется некоторой степенью «неопределенности» по причине недостаточности априорной информации о задаче и о самом решении. Следовательно, методы оптической анемометрии для определения скорости частиц и методы спектральной пирометрии для измерения температуры этих частиц в быстропротекающих многофазных потоках требуют в этих условиях применения достоверного метода (методики) их верификации. Другими словами, для тестирования систем измерения распределенных температурно-скоростных параметров частиц в многофазном потоке необходимо разработать специальные устройства – управляемые имитаторы теплового излучения потока частиц, которые позволяли бы имитировать тепловое излучение, соответствующее выбранному исследователем варианту распределения из набора определенных тестовых распределений частиц по скоростям и температурам.

**1. Оптико-электронная реализация имитатора теплового излучения частиц для тестирования системы измерения температуры потока.** На рисунке 1а показана схема экспериментального автоматизированного комплекса для проведения сквозного физического эксперимента, позволяющего по тепловому спектру излучения излучателя оптико-электронного имитатора теплового излучения с заданным тестовым температурным распределением восстанавливать с определенной степенью точности температурное распределение, подобное этому тестовому распределению.

От излучателя 1, управляемого аппаратным обеспечением оптико-электронного имитатора теплового излучения 8, тепловое излучение фокусируется линзой 2 на входную щель спектрального прибора 3, в частности, монохроматора УМ-2. В плоскости линейного фотоприемника 5, закрепленного непосредственно на корпусе УМ-2, фокусируется непрерывный спектр излучения. Поворачивая диспергирующую призму прибора с помощью барабана 4, можно добиться оптимального проецирования спек-

тра теплового излучения на «линейку» активных ячеек фотоприемника 5. В блоке «выделения и обработки сигнала» 6 происходит регистрация сигнала спектра, а затем этот сигнал сохраняется и окончательно обрабатывается в ПЭВМ 7. Конкретный вид и значения параметров тестовой гистограммы температурного распределения, определяющей соответствующее тепловое излучение излучателя оптико-электронного имитатора, задаются специально разработанной прикладной программой.

Структурно-функциональная схема программно-аппаратной реализации оптико-электронного имитатора теплового излучения гетерогенных потоков частиц, основная задача которой состоит в преобразовании передаваемой от ПЭВМ цифровой информации о тестовом температурном распределении в соответствующее ему тепловое излучение при помощи излучающих элементов на основе сверхминиатюрных ламп накаливания СМН 6,3-20-2, представлена на рисунке 2. Миниатюрные лампы накаливания СМН 6,3-20-2 с вольфрамовой спиралью, которые наиболее подходят по спектральным и габаритным характеристикам, имеют напряжение питания 6,3 В и диапазон рабочих температур от 25 до 2500 °С. Они сформированы в девять групп по восемь лампочек (рис. 1б) и размещены симметрично относительно центра окружности радиусом 20 мм. Лампы накаливания в каждой группе соединены последовательно, что обеспечивает протекание одного и того же заданного для этой группы ламп постоянного тока. Следовательно, лампы одной группы будут иметь практически одну и ту же температуру накаливания. Например, если в двух группах ламп задан один и тот же ток, а в других группах ламп – различные значения токов, тогда соответствующая температура этих двух групп ламп в тестовой гистограмме должна иметь высоту столбца гистограммы, в два раза большую, чем остальные столбцы гистограммы тестового распределения. Управляя процессом протекания токов в различных группах ламп, можно реализовать определенные законы из некоторого набора тестовых температурных распределений.

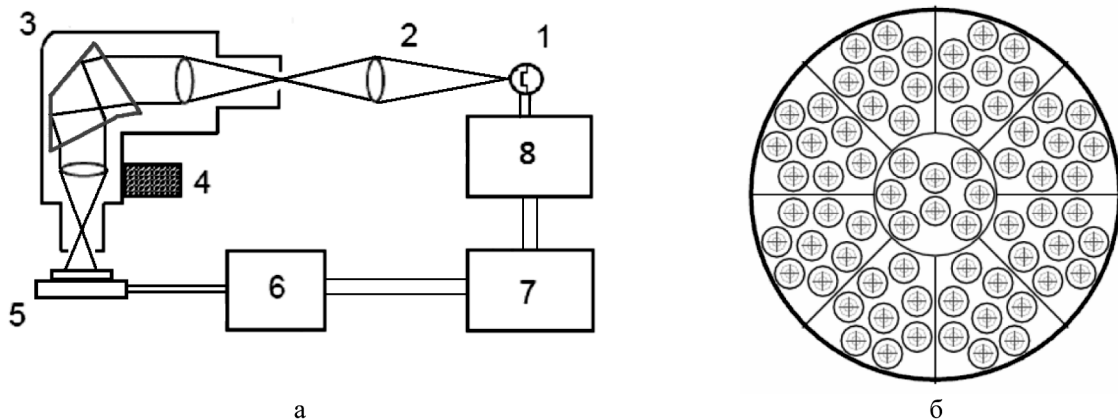


Рис. 1. Схема автоматизированного комплекса (а) и внешний вид излучателя (б) оптико-электронного имитатора теплового излучения

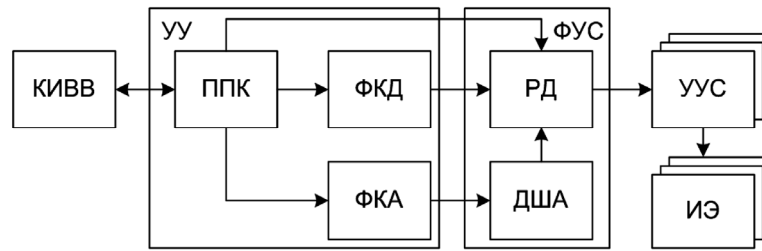


Рис. 2. Функциональная схема аппаратного обеспечения опико-электронного имитатора теплового излучения

Рассмотрим процесс функционирования аппаратного обеспечения опико-электронного имитатора теплового излучения (рис. 2).

Устройство управления (УУ) принимает последовательность данных (пакет данных) от контроллера интерфейса ввода–вывода (КИВВ) и через приемник последовательного кода (ППК) происходит передача этих данных формирователю кода адреса (ФКА) и формирователю кода данных (ФКД). Блок формирователя кода данных формирует адрес, по которому записывается значение параметра скважности ШИМ-сигнала. Он также формирует «целевые» значения ШИМ-сигнала. В формирователь управляющих сигналов (ФУС) поступают значения адреса на вход дешифратора шины адреса (ДША), а значения данных и управляющего сигнала – на вход регистра данных (РД). Формирователь управляющих сигналов производит запись данных по определенному адресу и формируется управляющий сигнал, который поступает на вход усилителя управляющих сигналов (УУС) и далее на излучающие элементы (ИЭ).

Основной функцией контроллера интерфейса ввода–вывода является обеспечение возможности передачи информации от ПЭВМ к опико-электронному имитатору теплового излучения. В устройстве имитатора применен интерфейс USB. Контроллер интерфейса ввода–вывода реализован на базе наиболее близкой к стандартным интерфейсам микросхемы ИМС FT232RL – микросхемы сопряжения периферийных устройств, получающей данные от ПЭВМ и формирующей сигналы на линии передачи данных. Устройство управления реализовано на основе 8-битного RISC-микроконтроллера ATmega88 семейства Mega AVR фирмы Atmel, так как он обладает развитой периферией, достаточным объемом памяти программ и данных, имеет необходимое количество портов ввода–вывода и поддерживает внутрисхемное программирование. Входными величинами для формирователя управляющих сигналов являются цифровые сигналы, выходной величиной – аналоговый сигнал. Для преобразования сигналов из цифровой в аналоговую форму применяется широтно-импульсная модуляция (ШИМ), т.е. аналоговая величина на выходе пропорциональна скважности управляющего ШИМ-сигнала.

Устройство опико-электронного имитатора теплового излучения реализовано и проведены его пробные испытания, в которых на тепловых спектрах

излучения регистрировались изменения в результате изменения (регулирования) протекающих в различных группах ламп токов (из-за изменения тестового температурного распределения), тем самым подтверждается его функциональное назначение.

**2. Опико-электронная реализация имитатора быстропротекающего импульсного гетерогенного потока частиц для тестирования системы измерения скорости потока частиц.** Общая схема автоматизированного комплекса, позволяющего проводить эксперименты по тестированию системы измерения скорости быстропротекающего импульсного гетерогенного потока частиц, изображена на рисунке 3 [4, с. 158–167]. Имитатор быстропротекающего импульсного гетерогенного потока частиц (ИБИГПЧ) 1 управляет процессом последовательного зажигания и гашения миниатюрных ламп накаливания, сгруппированных в виде линейки 4. С линейки фотоприемников 5, регистрирующей движущийся фронт теплового излучения, соответствующие сигналы передаются в многоканальную измерительную систему 2, которая передает в ПЭВМ 3 измерительную информацию в цифровом представлении для программной обработки и определения скорости движущегося фронта теплового излучения, имитирующего движение частиц импульсного гетерогенного потока.

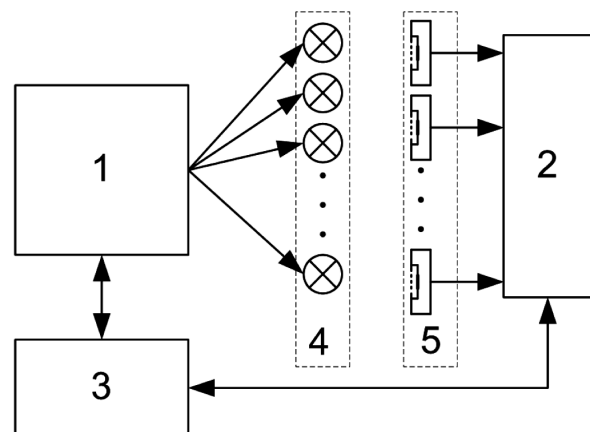


Рис. 3. Схема автоматизированного комплекса для тестирования системы измерения скорости потока частиц: 1 – имитатор быстропротекающего импульсного гетерогенного потока частиц; 2 – система измерения скорости частиц; 3 – ПЭВМ; 4 – управляемая линейка ламп накаливания; 5 – линейка фотоприемников

Структурно-функциональная схема программно-аппаратной реализации имитатора быстропротекающего импульсного гетерогенного потока частиц, основная задача которой состоит в преобразовании передаваемой от ПЭВМ цифровой информации о тестовом законе распределения частиц по скоростям в соответствующий ему закон управления зажиганием и гашением сверхминиатюрных ламп накаливания СМН 6,3-20-2, показана на рисунке 4.

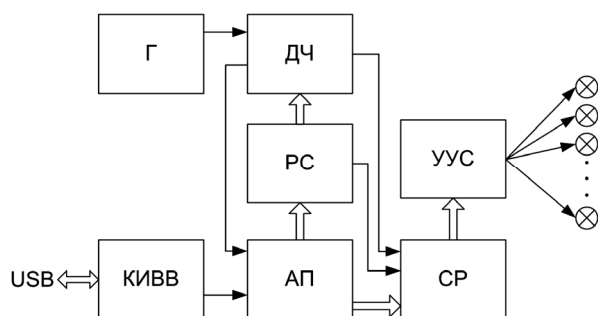


Рис. 4. Структурно-функциональная схема программно-аппаратной реализации имитатора быстропротекающего импульсного гетерогенного потока частиц

В состав имитатора быстропротекающего импульсного гетерогенного потока частиц входит контроллер интерфейса ввода-вывода, при помощи которого осуществляется связь с персональным компьютером. Контроллер интерфейса ввода-вывода преобразует интерфейс USB в интерфейс RS-232. Асинхронный приемник (АП) получает данные от контроллера интерфейса ввода-вывода и записывает их в регистр состояния (РС) и сдвиговый регистр (СР). В регистре состояния хранится управляющее слово, которое определяет коэффициент деления для делителя частоты (ДЧ) и задает способ работы имитатора. Делитель частоты такти-

руется от генератора (Г) и формирует тактовые сигналы для асинхронного приемника и сдвигового регистра. Сигнал тактирования асинхронного приемника фиксирован и кратен скорости обмена 19200 бод. Имитация потока частиц происходит за счет сдвига в сдвиговый регистр загруженного оператором битового шаблона. Сигнал тактирования сдвигового регистра определяет имитируемую скорость потока частиц. Параллельный выход сдвигового регистра подключен к усилителю управляющих сигналов, который усиливает цифровые управляющие сигналы до уровня, достаточного для питания ламп накаливания. Кроме того, усилитель управляющих сигналов позволяет задать ток смещения, что будет выражено в фоновой яркости ламп накаливания. Таким образом, лампы зажигаются и гаснут последовательно, за счет чего создается эффект перемещения группы частиц.

**Заключение.** Рассмотренные в настоящей статье оптико-электронные методы тестирования систем измерения температурно-скоростных параметров частиц при напылении защитных покрытий способствуют совершенствованию самих методов измерения температурно-скоростных параметров столь сложных быстропротекающих процессов, а также они позволяют повысить надежность и точность этих измерений. Наряду с совершенствованием методов измерений, калибровки и методов их тестирования происходит прогресс в области разработки и совершенствования измерительных датчиков. Серьезные перспективы в последнее время связывают с применением новых твердотельных полихроматоров, в том числе в виде наноразмерных покрытий прямо на поверхности чувствительного элемента фотоматрицы, позволяющих почти на три порядка увеличить мощность оптического сигнала («сигнал/шум»), регистрируемого датчиком, за счет отсутствия входных апертурных щелей, а заодно и самого монохроматора.

### Библиографический список

1. Солоненко О.П., Алхимов А.П., Марусин В.В. и др. Высокоэнергетические процессы обработки материалов // Низкотемпературная плазма. – Новосибирск, 2000. – Т. 18.
2. Магунов А.Н. Спектральная пирометрия (обзор) // Приборы и техника эксперимента. – 2009. – №4.
3. Альтман И.С. Об определении температуры частиц по спектру излучения // Физика горения и взрыва. – 2004. – Т. 40, №1.
4. Соловьев А.А., Иордан В.И. Измерение скорости волнового фронта быстропротекающих процессов многоканальным пироэлектрическим детектором // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. – 2009. – №4(88).
5. Гуляев П.Ю., Иордан В.И., Гуляев И.П., Соловьев А.А. Оптико-электронная система диагностики двухфазных потоков динамическим методом счета частиц // Известия вузов. Физика. – 2008. – №9/3.
6. Гуляев П.Ю., Иордан В.И., Гуляев И.П., Соловьев А.А. Виновский критерий выбора параметров редукции температурного распределения частиц по их суммарному тепловому спектру // Известия вузов. – Физика. – 2008. – Т. 51, №9/3.