

УДК 535.243.25:621.326.7:621.383.8

## Экспериментальный комплекс для спектральной диагностики температуры потока частиц при газотермическом напылении

*В.И. Иордан<sup>1</sup>, Д.И. Кобелев<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Алтайский государственный университет (Барнаул, Россия)

<sup>2</sup> АО «Радий ТН» (Москва, Россия)

## Experimental Complex for Spectral Diagnostics of Particle Flow Temperature during Gas-Thermal Spraying

*V.I. Jordan<sup>1</sup>, D.I. Kobelev<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Altai State University (Barnaul, Russia)

<sup>2</sup> Joint-Stock Company "Radiy TN" (Moscow, Russia)

Представлен разработанный авторами приборный комплекс на базе компактного спектрометра LR1 для спектральной диагностики температуры частиц двухфазного потока, а также автоматизированный комплекс его калибровки с использованием эталонного излучателя. Кроме того, в тестовых экспериментах использовался специальный излучатель в виде группы близко закрепленных друг к другу миниатюрных лампочек, который служит имитационной моделью теплового излучения частиц газотермического потока, используемых для напыления функциональных покрытий на технические изделия. Программно управляя протеканием токов через лампочки излучателя в различных конфигурациях их подключения, возможно реализовать различные тестовые гистограммы распределения температур лампочек, имитирующие соответствующие гистограммы распределения температур частиц. При использовании имитационной модели излучателя с лампочками тестовые имитационные эксперименты подтвердили адекватность физико-математической модели интегрального (суммарного) спектра теплового излучения частиц способу экспериментальной регистрации спектра с использованием спектрометра LR1.

**Ключевые слова:** спектр теплового излучения, газотермический поток, напыление покрытий, имитационная модель, спектрометр.

**DOI:** 10.14258/izvasu(2023)4-05

### Введение

В различных технологиях газотермического напыления (ГТН) функциональных покрытий на технические изделия, например в технологиях плазменного, детонационно-газового и других способов напыления, актуальная задача оптимизации технологий ГТН решается с использованием приборных комплексов, предназначенных для измерения «ключе-

The paper presents an instrumental diagnostic complex developed by the authors. The compact LR1 spectrometer for spectral diagnostics of particle temperature of two-phase flow is an integral part of the complex, as well as the calibration tool with the reference emitter. Additionally, a special emitter consisting of miniature light bulbs attached closely to each other was used in test experiments. This special emitter served as a simulation model of particle thermal radiation of gas-thermal flow used for spraying of functional coatings on technical products. The program-controlled adjustment of current flow through bulbs interconnected in different configurations yields a variety of simulated test histograms of the temperature distribution of the bulbs that correspond to actual particle temperature distribution histograms. The emitter with light bulbs has been used as a simulation model to confirm the validity of the physical and mathematical model of the integral (total) spectrum of particle thermal radiation for the proposed experimental spectrum registration method employing the LR1 spectrometer.

**Keywords:** thermal radiation spectrum, gas-thermal flow, spray coating, simulation model, spectrometer.

вых физических параметров» (КФП) частиц дисперсной фазы двухфазного потока напыления, от которых существенным образом зависят свойства напыляемого покрытия. К таким параметрам относятся: скорость, температура, концентрация напыляемых частиц в газотермическом потоке и др. Методы измерений КФП частиц основываются на физических принципах дистанционного неразрушающего детек-

тирования температурно-скоростных характеристик компонентов двухфазного потока напыления [1–4]. В качестве дисперсных частиц используются частицы порошков из металлов, керамики и металлокерамики. Оптимизация технологии напыления обеспечивается необходимым контролем режима работы технологической установки напыления и ее управлением для поддержания КФП частиц струи напыления в оптимальных диапазонах значений, так как эти параметры характеризуются статистическими распределениями: по размерам, скоростям, температурам и другим распределенным параметрам [5]. Поэтому важным фактором при решении задачи оптимизации технологии напыления покрытий является точность измерений распределенных КФП, и актуальна разработка современного компьютеризированного комплекса диагностики и измерений этих параметров.

В работе [6] обоснована математическая модель интегрального спектра теплового излучения потока частиц, с помощью которой и экспериментально регистрируемого аналога интегрального спектра решением обратной задачи определяется температурное распределение частиц.

Целью настоящей работы является разработка современного комплекса для спектральной диагностики температуры потока частиц при газотермическом напылении и его первичное тестирование с использованием имитационной модели теплового излучения частиц в виде специального излучателя, в корпусе которого закреплены близко между собой несколько миниатюрных лампочек.

### Комплекс спектральной диагностики температуры частиц и методика его калибровки

В работе [7] регистратор спектра излучения был реализован на базе монохроматора УМ-2, уступающего по габаритам и по весу современным спектрометрам, например спектрометру LR1\*. Разработанный авторами новый приборный комплекс спектральной диагностики температуры частиц двухфазного потока (рис. 1) реализован на базе компактного и легкого спектрометра LR1. Вентилятор охлаждения в спектрометре LR1 практически на порядок уменьшает апертуру собственных шумов в процессе регистрации спектра.

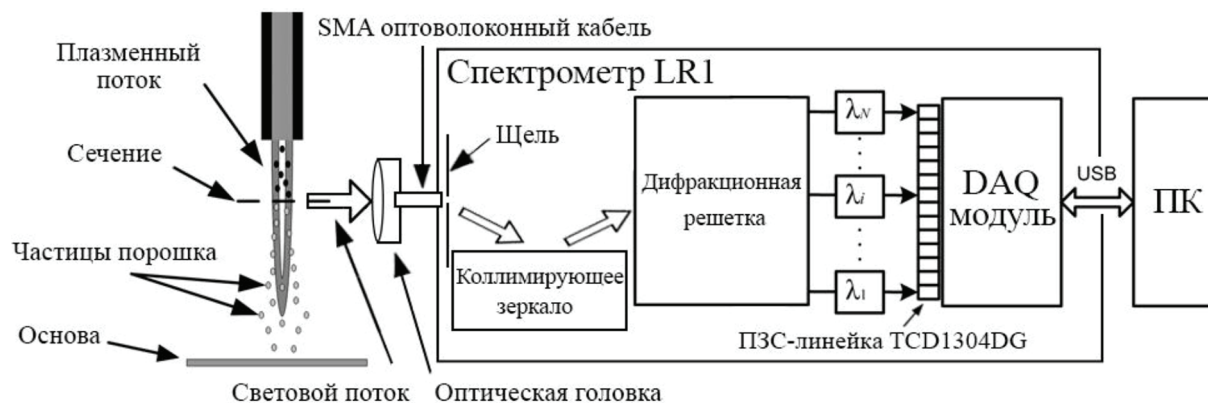


Рис. 1. Структурная схема комплекса спектральной диагностики температуры частиц газотермического потока

Комплекс спектральной диагностики температуры частиц двухфазного потока использует в своем составе оптическую головку с оптоволоконным кабелем для передачи на вход спектрометра LR1 светового потока излучения, фокусируемого от газотермического потока струи напыления, как показано на рисунке 1. В спектрометре световой поток излучения направляется на дифракционную решетку с последующим проецированием спектра излучения на ПЗС-линейку TCD1304DG фирмы Toshiba, имеющую 3648 ячеек. Выходной оцифрованный массив отсчетов спектра излучения, соответствующий набору длин волн  $\lambda_1, \dots, \lambda_i, \dots, \lambda_N$  (в диапазоне от 200 до 1100 нм), через последовательный интерфейс передается на ПК (рис. 1) для дальнейшей обработки и решения обратной за-

дачи определения температурного распределения частиц  $f(T)$ .

В работах [6, 7] обоснована математическая модель интегрального спектра теплового излучения частиц  $R(\lambda)$  в виде уравнения Фредгольма 1-го рода

$$R(\lambda) = k_{scale} \cdot \alpha(\lambda) \int_{T_{min}}^{T_{max}} \epsilon(\lambda, T) \cdot \varphi(\lambda, T) \cdot f(T) dT, \quad (1)$$

$$\varphi(\lambda, T) = C_1 \cdot \lambda^{-5} / (e^{\lambda T} - 1), \quad (2)$$

где  $k_{scale}$  — коэффициент масштабирования сигнала, который можно аппаратно устанавливать (изменять)

\* Equipment for Spectroscopy // ASEQ instruments. <https://aseq-instruments.com/> (дата обращения: 12.04.2023).

каждый раз в процессе регистрации сигнала спектра;  $\alpha(\lambda)$  — аппаратная функция оптоэлектронного канала регистрации спектра, определяемая на этапе калибровки;  $\varepsilon(\lambda, T)$  — спектральный коэффициент «черноты» материала частиц (относительная излучательная способность частиц);  $\varphi(\lambda, T)$  — функция Планка для спектральной плотности излучения «абсолютно черного» тела;  $f(T)$  — функция плотности вероятности распределения частиц по температурам в диапазоне  $[T_{min}, T_{max}]$ , которая показывает долю

частиц или относительный вклад частиц с температурой  $T$  в интегральный спектр.

На этапе калибровки спектрометра LR1 (рис. 2) тепловое излучение от излучателя 2 (эталона «черного» тела — температурной лампы ТРУ 1100-2350), программно управляемого с помощью ПК 6 и источника тока 1 (рис. 2а), фокусируется линзой оптической головки 3 на вход оптоволоконного кабеля 4, с помощью которого оптический сигнал передается на вход спектрометра LR1.

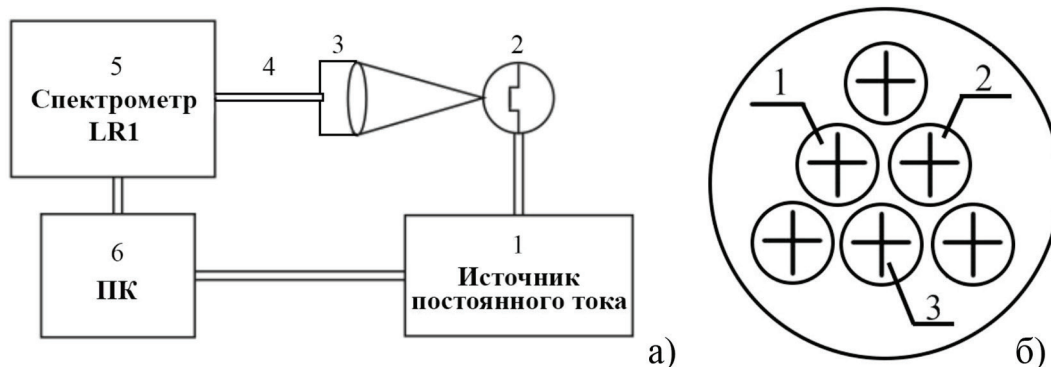


Рис. 2. Схема автоматизированного комплекса калибровки спектрометра LR1 (а) и схема специального излучателя с лампочками (б)

Далее программа, используя массив отсчетов  $\{R(\lambda_i, T_{ref}); i = 1, 2, \dots, N\}$  зарегистрированного спектра лампы ТРУ 1100-2350 с температурой  $T_{ref}$  и массив  $\{\varepsilon(\lambda_i, T_{ref}) \cdot \varphi(\lambda_i, T_{ref}); i = 1, 2, \dots, N\}$ , определяет массив значений аппаратной функции  $\{\alpha(\lambda_i); i = 1, 2, \dots, N\}$ . В описании спектрометра LR1 указано замечание об отсутствии интерференционной картины в сигналах спектра, детектируемых ПЗС-детектором TCD1304DG. Приведенные ниже на рисунках спектры подтверждают это замечание. Напротив, в регистрируемых спектрах комплексом на основе монохроматора УМ-2 наблюдается модуляция [7] — проявление эффектов интерференции и дифракции на оптических элементах (щель, линзы, призма УМ-2 и т.д.) и защитного покрытия ПЗС-детектора [8], использованного в комплексе [7].

Аппаратная регистрация спектра в спектрометре LR1 (дифракция света при отражении от решетки) отличается от регистрации спектра в монохроматоре УМ-2 (за счет дисперсии света при прохождении через призму), поэтому вновь требуется проверка адекватности модели спектра (1) способу регистрации спектра на основе спектрометра LR1, используя при этом в качестве излучателя 2 (рис. 2а) имитационную модель теплового излучения частиц — излучатель (рис. 2б).

#### Методика имитационного эксперимента

Проверка адекватности модели спектра в имитационных экспериментах состоит в том, что зарегистрированный спектрометром интегральный спектр теплового излучения группы совместно включенных лампочек, имитирующих поток нагретых частиц, должен в пределах ошибок измерений «практически» не отличаться от суммы спектров излучения тех же лампочек, зарегистрированных при их «одиночных» включениях с прежними значениями температур.

В имитационных экспериментах использовались два типа миниатюрных лампочек: а) галогенные лампочки NH-JC-20-12-G4-CL (диаметр стеклянного баллона 12 мм, высота 44 мм); б) лампочки накаливания СМН 6,3-20-2 (диаметр стеклянного баллона 3 мм, высота 11 мм) с вольфрамовой спиралью, которые наиболее подходят по спектральным и габаритным характеристикам (диапазон температур от 25 °С до 2500 °С). Изменением токов, протекающих через лампочки, задаются определенные тестовые распределения температур лампочек (излучающих элементов — ИЭ), имитирующих температурные распределения частиц газотермического потока (рис. 3) [7].

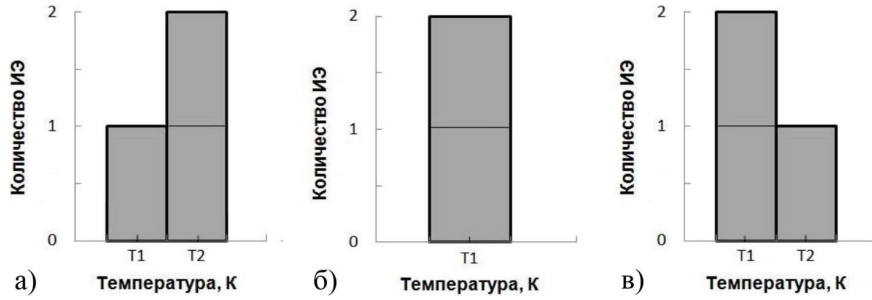


Рис. 3. Три варианта «модельных» гистограмм распределения температур миниатюрных лампочек: а) «линейно-нарастающее» распределение; б) распределение «дельта-функция»; в) «линейно-спадающее» распределение

Например, случай почти одинаковых токов в первых двух лампочках и превышающего их тока в третьей лампочке (рис. 4, слева) соответствует гистограмме рисунка 3в.

**Анализ и обсуждение результатов имитационных экспериментов**

Результаты имитационных экспериментов отображены на рисунках 4, 5 и 6, 7.

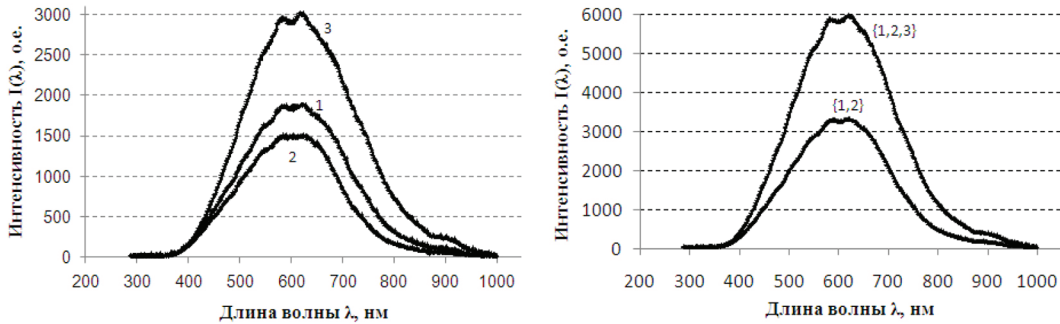


Рис. 4. Спектры трех галогенных лампочек при одиночных их включениях (слева) и два спектра совместного включения (справа): {1,2} соответствует гистограмме рисунка 3б, {1,2,3} — гистограмме рисунка 3в

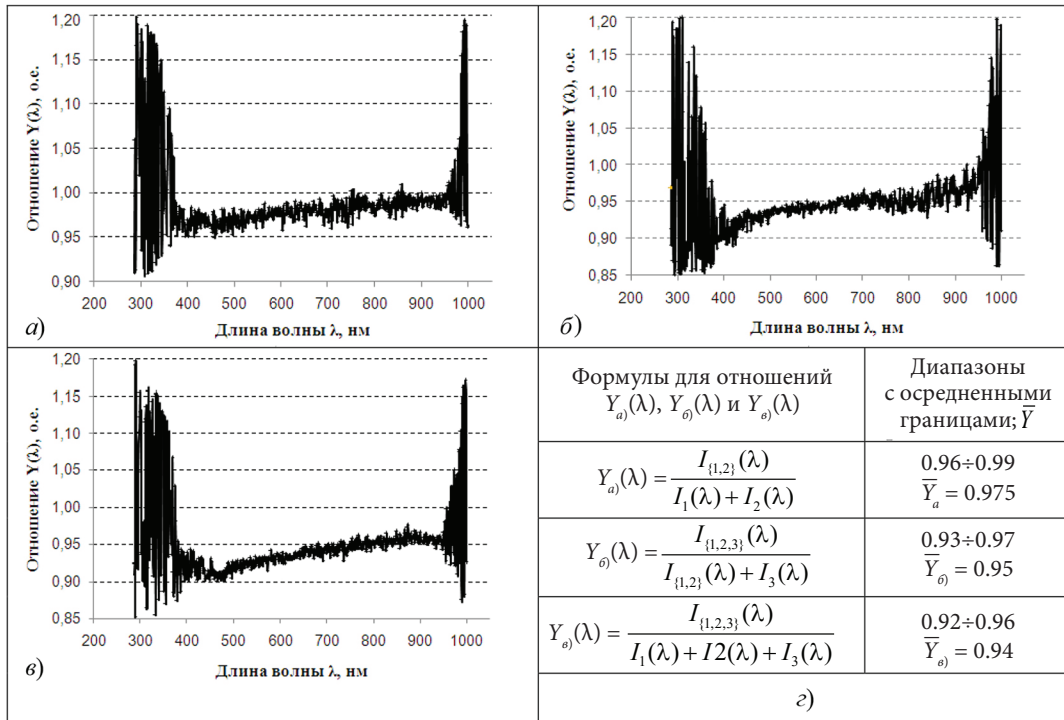


Рис. 5. Графики отношений спектров  $Y_a(\lambda)$ ,  $Y_{\theta}(\lambda)$  и  $Y_{\sigma}(\lambda)$ , определяемых в соответствии с формулами (см. рис. 5г) с использованием галогенных лампочек

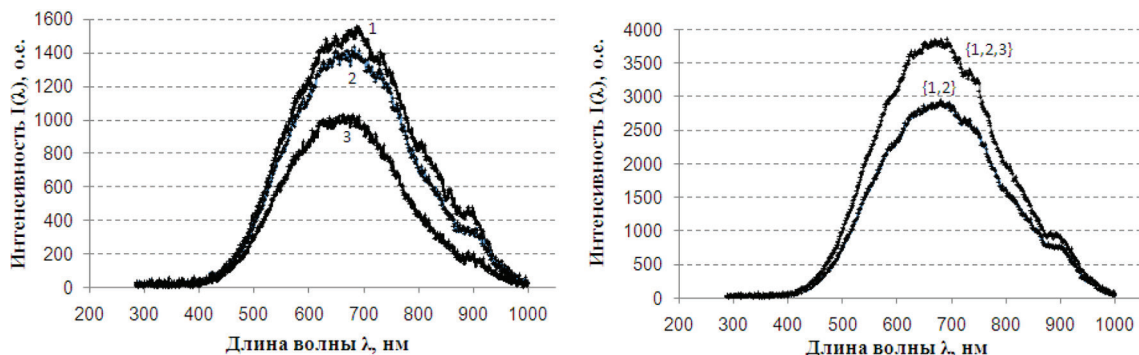


Рис. 6. Спектры трех лампочек накаливания СМН 6,3-20-2 при одиночных их включениях (слева) и два спектра совместного включения (справа): {1,2} соответствует гистограмме рисунка 3б, {1,2,3} — гистограмме рисунка 3а

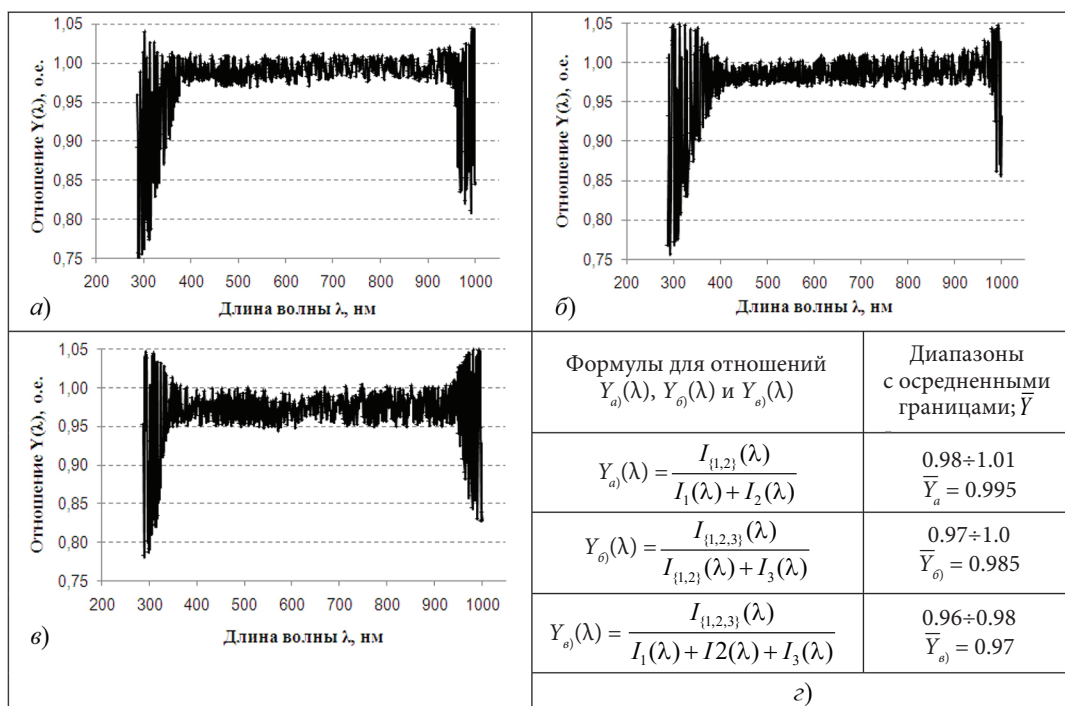


Рис. 7. Спектральные графики для отношений  $Y_a(\lambda)$ ,  $Y_{\theta}(\lambda)$  и  $Y_{\sigma}(\lambda)$ , определяемых формулами (см. рис. 7з), с использованием лампочек СМН 6,3-20-2

Спектральный диапазон всех сигналов ограничен приблизительно от 380 до 980 нм (рис. 4 и 6). Исследуемые отношения  $Y_a(\lambda)$ ,  $Y_{\theta}(\lambda)$  и  $Y_{\sigma}(\lambda)$  также соответствуют этому спектральному диапазону. Вне этого диапазона шумовые отсчеты определяют большой разброс значений для отношений (рис. 5, 7).

Средние значения  $\bar{Y}_a(\lambda)$ ,  $\bar{Y}_{\theta}(\lambda)$  и  $\bar{Y}_{\sigma}(\lambda)$  ближе к единице для лампочек накаливания СМН 6,3-20-2 с меньшим диаметром (и по этой причине более близко расположенных друг к другу), чем для галогенных лампочек с большим диаметром, более удаленных друг от друга. Сфокусированные изображения галогенных лампочек на входе оптоволоконного кабеля в оптической головке, вероятнее всего, частично перекрываются (а не накладываются друг на друга

полностью), и оптическая система оказывается «дифракционно-ограниченной» [9; 10, с. 93–94] с некогерентной передаточной функцией и функцией рассеяния. Иначе говоря, пятно рассеяния на входном сечении оптоволоконного кабеля неравномерно освещено с неоднородным пространственным спектром. Поэтому на фрагментах а), б) и в) рисунка 5 в спектральном диапазоне от 380 до 980 нм вместо горизонтального участка наблюдается «уклон» в сторону более коротких длин волн.

#### Заключение

Предложен новый компактный комплекс спектральной диагностики температуры потока частиц при газотермическом напылении. Кроме того,



при регистрации спектров излучения по сравнению с предыдущим вариантом комплекса [7] новый комплекс имеет преимущества по апертуре собственных шумов ПЗС-детектора, используемого в спектрометре LR1. Тестирование в имитационных экспериментах подтвердило для математической модели, основанной на свойстве суммируемости (интегрируемости) спектров излучения от отдельных частиц,

ее адекватность способу регистрации спектра нового комплекса на основе спектрометра LR1. Установлено, что имитационная модель излучателя сверхминиатюрных лампочек СМН 6,3-20-2 по сравнению с более габаритными галогенными лампочками в аспекте их характеристик излучения точнее соответствует фракции частиц напыления с размерами в несколько микрон.

### Библиографический список

1. Mauer G., Vassen R. and Stöver D. Study on detection of melting temperatures and sources of errors using two-color pyrometry for in-flight measurements of plasma sprayed particles // *International Journal of Thermophysics*. 2008. Vol. 29 (2).
2. Lee J. Estimation of emission properties for silica particles using thermal radiation spectroscopy // *Applied Optics*. 2011. Vol. 50 (22). <https://doi.org/10.1364/AO.50.004262>
3. Долматов А.В., Гуляев И.П., Имамов Р.Р. Спектральный пирометр для контроля температуры в процессах термосинтеза // *Вестник Югорского гос. ун-та*. 2014. № 2 (33).
4. Магунов А.Н., Захаров А.О., Лапшинов Б.А. Измерение нестационарной температуры методом спектральной пирометрии // *Приборы и техника эксперимента*. 2012. № 1.
5. Галимзянов Ф.Г., Галимзянов Р.Ф. Теория внутреннего турбулентного движения : монография / под ред. Ф.Г. Галимзянова. Уфа, 1999.
6. Иордан В.И. Обратное интегральное преобразование для восстановления температурного распределения частиц гетерогенного потока по их интегральному тепловому спектру // *Известия вузов. Физика*. 2013. Т. 56. № 8/3.
7. Иордан В.И., Кобелев Д.И. Верификация модели интегрального спектра теплового излучения частиц газотермической струи напыления с помощью имитационных экспериментов // *Известия Алт. гос. ун-та. Физика*. 2015. № 1/1 (85). Doi: 10.14258/izvasu(2015)1.1-03
8. Ван де Виле Ф. Многослойные покрытия на кремниевой подложке // *Полупроводниковые формирователи сигналов изображения* / под ред. Г. Йесперса. М., 1979.
9. Navas-Moya F.A., Nieves J.L., Valero E.M., Garrote E. Measurement of the optical transfer function using a white-dot pattern presented on a liquid-crystal display // *J. Europ. Opt. Soc. Rap. Public*. 2013. Vol. 8 (13029).
10. Ульянова Е.О. Оптическая система с двумя полями зрения для тепловизионных приборов на основе матричных фотоприемных устройств // *Прикладная физика*. 2012. № 3.