

Верификация модели интегрального спектра теплового излучения частиц газотермической струи напыления с помощью имитационных экспериментов

В.И. Иордан, Д.И. Кобелев

Алтайский государственный университет (Барнаул, Россия)

Verification of Integral Thermal Radiation Spectrum Model for Gas-Thermal Spraying Jet Particles with Simulated Experiments

V.I. Jordan, D.I. Kobelev

Altai State University (Barnaul, Russia)

Рассматриваются проблемы, связанные с верификацией математической модели интегрального спектра теплового излучения частиц газотермической струи, используемой для напыления защитных покрытий на технические изделия. Для подтверждения адекватности математической модели интегрального спектра теплового излучения потока частиц экспериментальному спектру, регистрируемому линейным фотоприемником на выходе измерительного тракта спектрофотометра, использован и усовершенствован ранее разработанный оптоэлектронный имитатор теплового излучения частиц газотермической струи напыления. Имитацию данного излучения осуществляет излучатель, состоящий из группы близко закрепленных друг к другу миниатюрных лампочек накаливания. В имитационных экспериментах гистограмма распределения температур излучающих элементов (лампочек) реализуется разбиением группы лампочек на подгруппы, в каждой из которых при установлении необходимого значения протекающего через них тока обеспечивается требуемое значение температуры. Результаты имитационных экспериментов подтвердили адекватность модели интегрального спектра теплового излучения потока частиц.

Ключевые слова: интегральный спектр теплового излучения, поток частиц, газотермическое напыление покрытий, оптоэлектронный имитатор, спектрофотометр.

DOI 10.14258/izvasu(2015)1.1-03

Введение. В современных технологических установках напыления на изделия функциональных покрытий из порошков металлов, оксидов металлов, металлокерамических и керамических микрокомпозигов используются средства неразрушающего контроля и измерений «ключевых физических параметров»

In this paper, we consider problems related to the verification of integral thermal radiation spectrum mathematical model for particles of gas-thermal jet used for spraying of protective coatings on technical parts. Previously developed optoelectronic thermal radiation simulator for gas-thermal spraying jet particles has been used and improved to confirm the adequacy of integral thermal radiation spectrum mathematical model to the experimental spectrum, recorded by a linear photodetector at the output of spectrophotometer measuring channel. Simulation of gas-thermal jet particles thermal radiation is provided by a radiator constructed as a group of miniature electric bulbs closely fixed to each other. A temperature distribution histogram of emitting elements is formed by splitting the electric bulbs into subgroups and setting the desired value of electric current for each subgroup, thus providing the desired temperature. The results of simulated experiments confirm the adequacy of integral thermal radiation spectrum model for particle flow.

Keywords: integral thermal radiation spectrum, particle flow, gas-thermal spraying of coatings, optoelectronic simulator, spectrophotometer.

(КФП) частиц технологической струи, способствующие решению задачи оптимизации газотермических технологий напыления покрытий [1; 2]. Основными КФП частиц являются следующие распределенные по потоку частиц параметры: температура и скорость частиц, объемная плотность (концентрация) частиц

в потоке газотермической струи (например, плазменной или детонационно-газовой струи) и др. Разработка адекватных математических моделей процессов газодинамики и теплового излучения, а также методов и аппаратных средств тестирования таких измерений [3] является важным этапом для разработки и создания приборных комплексов неразрушающего контроля и измерений. Температурное распределение частиц может быть определено путем решения «обратной» задачи по экспериментально регистрируемому спектру теплового излучения частиц, для которого используется математическая модель интегрального (суммарного) спектра теплового излучения частиц [4; 5].

В данной работе для подтверждения адекватности модели интегрального спектра теплового излучения частиц экспериментально регистрируемому спектру приведены результаты имитационных экспериментов, в которых для этой цели использовалось устройство — оптоэлектронный имитатор теплового излучения частиц (ОЭИТИЧ), в котором группа близко закрепленных миниатюрных лампочек в одном корпусе (излучатель) виртуально имитирует тепловое излучение потока частиц газотермической струи напыления [6].

Методика имитационного эксперимента. Идея имитационного вычислительного эксперимента состоит в том, что зарегистрированный на выходе спектрофотометра линейным фотоприемником интегральный спектр теплового излучения группы совместно включенных лампочек с заданным температурным распределением, имитирующих поток нагретых частиц, должен в пределах ошибок измерений «практически» не отличаться от суммы спектров теплового излучения тех же лампочек, зарегистрированных при их «одионом» включении

с прежними значениями температур. При таком условии модель интегрального (суммарного) спектра теплового излучения частиц газотермической струи напыления будет считаться адекватной экспериментально регистрируемому спектру теплового излучения частиц струи.

Под аппаратным обеспечением ОЭИТИЧ (8) понимается электронный тракт прибора (рис. 1а), основной задачей которого является преобразование цифровой информации, передаваемой от ПЭВМ в устройство-имитатор с излучателем на основе миниатюрных лампочек накаливания СМН 6,3-20-2, температуры которых должны соответствовать заданному в программе распределению температур, имитирующих температурное распределение частиц гетерогенного потока [6; 7].

Тепловое излучение от излучателя (1), управляемого аппаратным обеспечением ОЭИТИЧ (8), фокусируется линзой (2) на входную щель спектрального прибора (3), в частности монохроматора УМ-2. Непрерывный спектр излучения фокусируется в плоскости линейного фотоприемника (5), закрепленного непосредственно на корпусе УМ-2.

Оптимальное проецирование спектра теплового излучения на «линейку» активных ячеек фотоприемника (5) достигается поворачиванием диспергирующей призмы прибора с помощью барабана (4). Регистрация сигнала спектра происходит в блоке «выделения и обработки сигнала» (6), а затем этот сигнал сохраняется и окончательно обрабатывается в ПЭВМ (7). Специально разработанной прикладной программой задаются конкретный вид и значения параметров тестовой гистограммы температурного распределения, определяющей и формирующей соответствующее тепловое излучение излучателя ОЭИТИЧ [6].

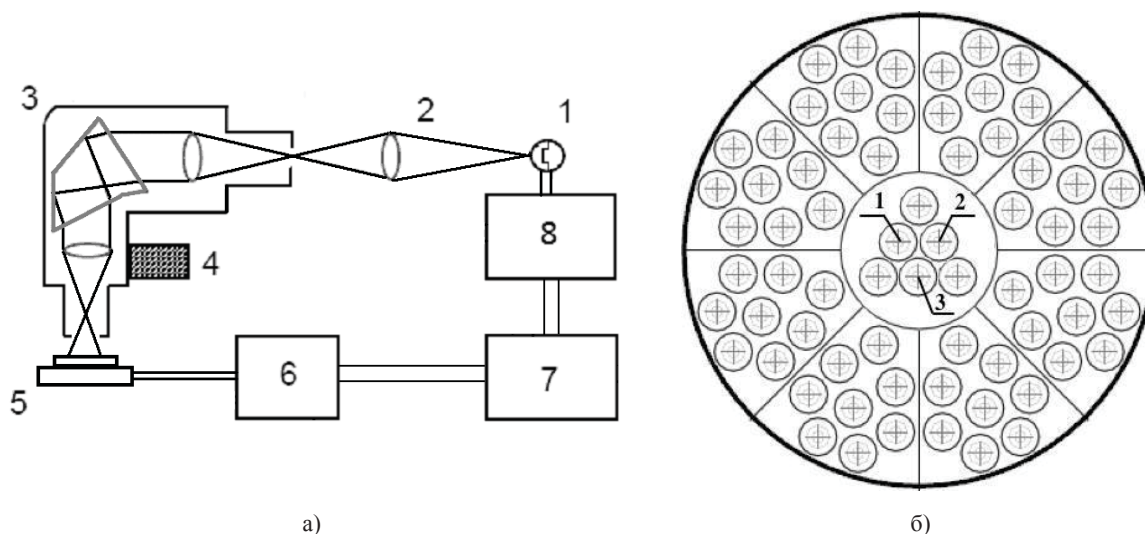


Рис. 1. Схема экспериментального автоматизированного комплекса (а) и внешний вид излучателя (б) оптоэлектронного имитатора теплового излучения (ОЭИТИЧ)

Программно-аппаратная реализация ОЭИТИЧ выполняет преобразование передаваемой от ПЭВМ цифровой информации о тестовом температурном распределении в соответствующее ему тепловое излучение при помощи излучающих элементов на основе миниатюрных лампочек накаливания.

Миниатюрные лампочки накаливания с диапазоном рабочих температур от 25 до 2500 °С сформированы в девять групп (рис. 1б), центральная группа содержит шесть лампочек. Например, если в двух лампочках протекает один и тот же ток, а в третьей лампочке протекающий ток отличается от тока первых двух, тогда соответствующая температура этих двух лампочек в тестовой гистограмме должна иметь высоту столбца гистограммы, в два раза большую, чем столбец гистограммы с температурой третьей лампочки. Управляя процессом протекания токов в различных группах лампочек, можно реализовать различные законы из некоторого набора тестовых температурных распределений.

Анализ результатов имитационных экспериментов. Математическая модель интегрального (суммарного) теплового спектра частиц газотермической струи напыления имеет вид [4; 5; 7]:

$$R(\lambda) = \beta(\lambda) \int_{T_{\min}}^{T_{\max}} r(\lambda, T) \cdot P_2(T) \cdot P_1(T) dT, \quad (1)$$

где $\beta(\lambda)$ — аппаратная функция искажений регистратора спектра; $r(\lambda, T)$ — излучательная способность частицы как «серого» тела; $P_1(T)$ — функция плотности вероятности распределения частиц по температурам; $P_2(T)$ — функция «дисперсионного соотношения» между размерами и значениями температуры частиц. Как правило [4; 5], можно принять $P_2(T) = 1$ и сменить для функции $P_1(T)$ обозначение на $f(T)$. Тогда модель (1) в упрощенном виде принимает вид

$$R(\lambda) = \beta(\lambda) \int_{T_{\min}}^{T_{\max}} r(\lambda, T) \cdot f(T) dT. \quad (2)$$

Функция плотности вероятности распределения частиц по температурам $f(T)$ показывает долю частиц, имеющих температуру T , другими словами, определяет вклад частиц с температурой T в интегральный спектр.

Созданное устройство ОЭИТИЧ было использовано для верификации на адекватность модели (2) экспериментально регистрируемому тепловому спектру потока частиц. В имитационном эксперименте каждая лампочка, через которую протекает определенный постоянный ток, соответствующий определенной температуре накаливания, имитирует тепловое излучение группы однородно нагретых частиц газотермической струи напыления. На рисунке 2 показаны три варианта «модельных» гистограмм распределения температур миниатюрных лампочек («излучающих элементов» — ИЭ), которые соответствуют ИЭ центральной группы с номерами 1, 2 и 3 (рис. 1б). На гистограмме, изображенной на рисунке 2а, температура $T_1 \approx 1715$ °С соответствует лампочке с номером 1, а температура $T_2 \approx 1823$ °С — лампочке с номером 3. На гистограмме, изображенной на рисунке 2б, лампочки с номерами 1 и 2 имеют одну и ту же температуру $T_1 \approx 1715$ °С. На гистограмме, изображенной на рисунке 2в, лампочки с номерами 1 и 2 соответствуют одной и той же температуре $T_1 \approx 1715$ °С, а лампочка с номером 3 — температуре $T_2 \approx 1823$ °С.

Гистограмме «равномерного» распределения (рис. 2а) соответствуют результаты регистрации спектров теплового излучения лампочек с номерами 1 и 3 (рис. 3): при одиночном включении (соответственно рис. 3а и рис. 3б) и при совместном их включении (рис. 3в). На рисунке 3г отражено отношение $Y(i)$

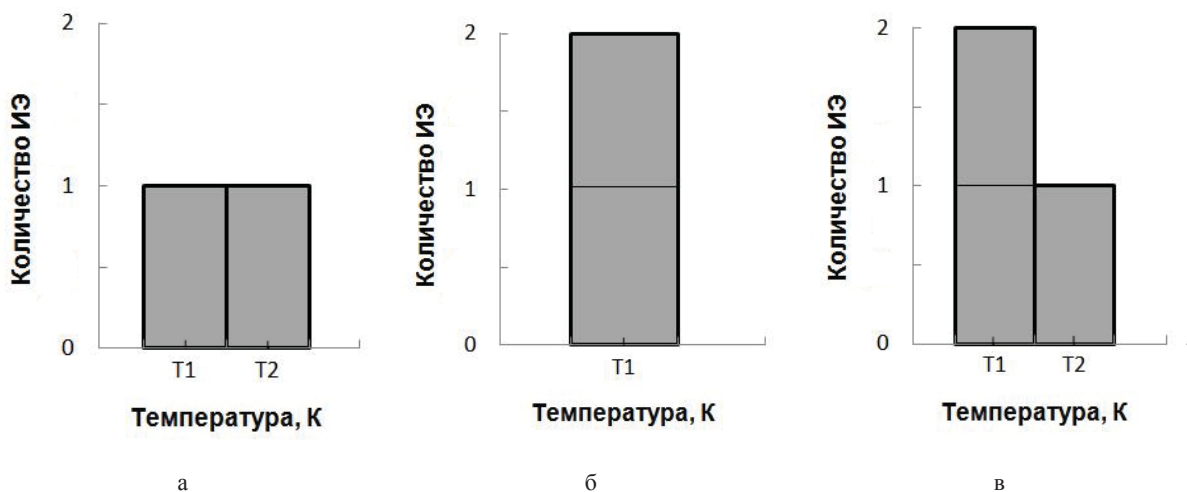


Рис. 2. Три варианта «модельных» гистограмм распределения температур миниатюрных лампочек: а — «равномерное» распределение; б — «дельта-функция»; в — «линейно-спадающее» распределение

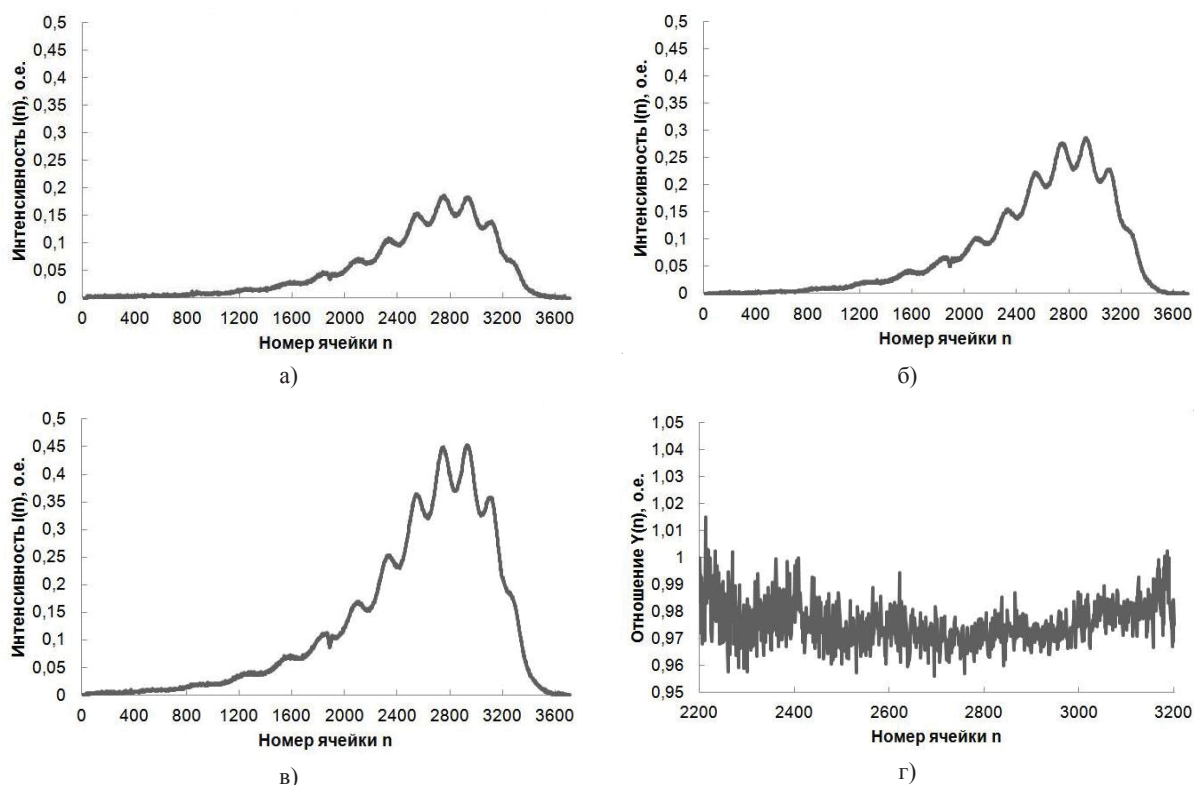


Рис. 3. Интенсивности спектров теплового излучения: а) одиночно включенная лампочка №1 с температурой $T_1 \approx 1715$ °C; б) одиночно включенная лампочка №3 с температурой $T_2 \approx 1823$ °C; в) совместно включенные лампочки №1 и №3; г) отношение интенсивности $I_{\Sigma}(n)$ интегрального спектра совместно включенных лампочек №1 и №3 к сумме интенсивностей спектров $I_1(n)$ и $I_3(n)$, полученных при одиночном включении и отраженных на рисунке 3а и 3б

интенсивности интегрального спектра совместно включенных лампочек №1 и №3 к сумме интенсивностей спектров, полученных при одиночном включении (рис. 3а, б), т.е. $Y(n) = I_{\Sigma}(n) / (I_1(n) + I_3(n))$.

Как следует из графика на рисунке 3г, отношение $Y(n)$ близко к 1 (в среднем около значения 0.98), что подтверждает адекватность математической модели интегрального спектра теплового излучения частиц в виде (1) или (2).

Аналогичные выводы справедливы и для варианта гистограммы в виде «дельта-функции» (рис. 2б), для которой результаты регистрации спектров теплового излучения лампочек с номерами 1 и 2 отражены на рисунке 4.

Как следует из графика (рис. 4г), отношение $Y(n) = I_{\Sigma}(n) / (I_1(n) + I_2(n))$ близко к 1 (в среднем около значения 0.99), что также подтверждает адекватность математической модели интегрального спектра теплового излучения частиц в виде (1) или (2).

Необходимо отметить, что температуры накаливания лампочек определялись в соответствии с экспериментальной методикой калибровки, изложенной в [7]. Кроме того [7], для каждого номера n ячейки ПЗС-приемника определялась соответствующая дли-

на волны $\lambda = \lambda(n)$. Характерная модуляция регистрируемых ПЗС-приемником спектров теплового излучения проявляется по причине многослойности покрытия поверхности ПЗС-приемника [8].

Результат регистрации интенсивности $I_{\Sigma}(n)$ интегрального спектра теплового излучения (рис. 5а) совместно включенных лампочек с номерами 1, 2 и 3 используется при анализе варианта гистограммы «линейно-спадающего» распределения (рис. 2в).

Как следует из графика (рис. 5б), отношение $Y(n) = I_{\Sigma}(n) / (I_1(n) + I_2(n) + I_3(n))$ также близко к 1 (в среднем около значения 0.96), что также дает основание сделать вывод об адекватности математической модели интегрального спектра теплового излучения частиц в виде (1) или (2).

Заключение. Результаты имитационных экспериментов при решении «прямой» задачи имитационного моделирования и их анализ подтверждают свойство «суммируемости (интегрируемости)» спектров отдельных частиц с учетом их вклада в «суммарный спектр» согласно моделям (1), (2).

Рассмотренный в настоящей статье оптоэлектронный имитатор теплового излучения потока нагретых частиц используется для тестирования систем изме-

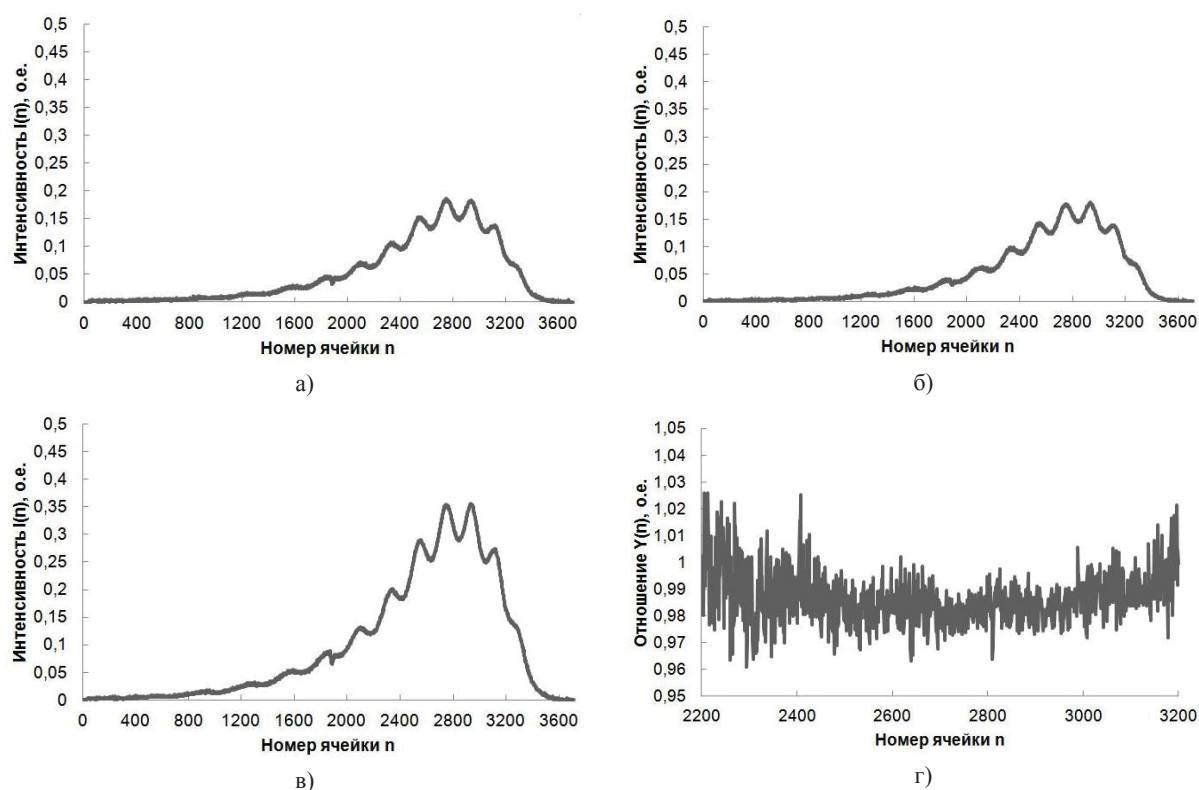


Рис. 4. Интенсивности спектров теплового излучения: а — одиночно включенная лампочка № 1 с температурой $T_1 \approx 1715$ °С; б — одиночно включенная лампочка № 2 с температурой $T_1 \approx 1715$ °С; в — совместно включенные лампочки № 1 и № 2; г — отношение интенсивности $I_{\Sigma}(n)$ интегрального спектра совместно включенных лампочек № 1 и № 2 к сумме интенсивностей спектров $I_1(n)$ и $I_2(n)$, полученных при одиночном включении и отраженных на рисунке 4а, б

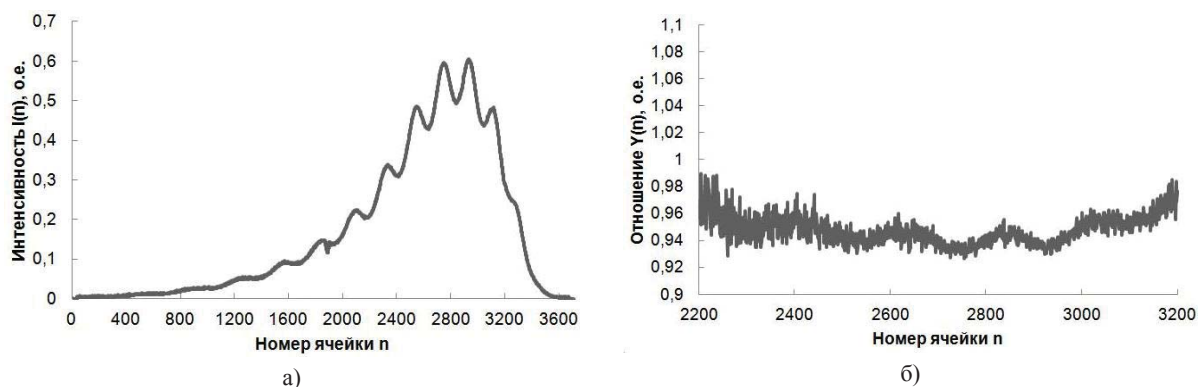


Рис. 5. Результаты анализа спектров теплового излучения для гистограммы «линейно-спадающего» распределения: а — интенсивность $I_{\Sigma}(n)$ интегрального спектра теплового излучения совместно включенных трех лампочек № 1, № 2, № 3; б — отношение интенсивности $I_{\Sigma}(n)$ интегрального спектра совместно включенных лампочек № 1, № 2 и № 3 к сумме интенсивностей спектров $I_1(n)$, $I_2(n)$ и $I_3(n)$, полученных при одиночном включении и отраженных на рисунке 4а, 4б и 3б

рения температурно-скоростных параметров частиц при напылении защитных порошковых покрытий. Использование подобных устройств способствует совершенствованию самих методов измерения темпе-

ратурно-скоростных параметров столь сложных быстротекущих процессов. Кроме того, описанные устройства позволяют повысить надежность и точность этих измерений.

Библиографический список

1. Иордан В.И., Соловьев А.А. Редукция температурного распределения частиц гетерогенных потоков методом «обращения» их интегрального теплового спектра // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. — 2010. — №2 (98).
2. Соловьев А.А., Иордан В.И. Измерение скорости волнового фронта быстротекущих процессов многоканальным пироэлектрическим детектором // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. — 2009. — №4 (88).
3. Иордан В.И., Соловьев А.А. Оптико-электронные методы тестирования систем измерения температурно-скоростных параметров частиц при плазменном напылении порошковых покрытий // Известия Алтайского гос. ун-та. — 2010. — №1/2 (65).
4. Иордан В.И. Теоретические аспекты решения обратной задачи определения температурного распределения частиц гетерогенного потока по их интегральному тепловому спектру // Известия Алтайского гос. ун-та. — 2013. — №1/1 (77).
5. 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.
6. Иордан В.И., Соловьев А.А. Оптико-электронный имитатор теплового излучения для тестирования системы измерения температуры частиц при напылении порошковых покрытий // Известия вузов. Физика. — 2010. — Т. 53, №9/3.
7. Иордан В.И., Кобелев Д.И., Соловьев А.А. Калибровка оптико-электронного измерительного тракта спектрофотометра по спектрам эталонных источников излучения // Известия Алтайского гос. ун-та. — 2014. — №1/2 (81).
8. Ван де Виле Ф. Многослойные покрытия на кремниевой подложке // Полупроводниковые формирователи сигналов изображения / под ред. Г. Йесперса. — М., 1979.