

В. И. Иордан, Д. И. Кобелев

**РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ  
И ОБРАБОТКИ СПЕКТРОГРАММ ТЕПЛООВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ГЕТЕРОГЕННЫХ  
ПОТОКОВ ЧАСТИЦ ПРИ ГАЗОТЕРМИЧЕСКОМ НАПЫЛЕНИИ ПОКРЫТИЙ**

Работа выполнена при финансовой поддержке  
Российского фонда фундаментальных исследований  
(грант № 18-41-220004)

*В статье изложено описание функциональных блоков созданного программного обеспечения (ПО), предназначенного для регистрации и последующей обработки спектрограмм теплового излучения гетерогенных потоков частиц на основе спектрометра BTC-110S. ПО в виде программного комплекса планируется к использованию при решении задачи контроля и измерения температуры потока частиц в процессе напыления функциональных покрытий на основе решения «обратной» задачи восстановления температурного распределения напыляемых частиц по их «интегральному» тепловому спектру. Разработанный программно-аппаратный комплекс обработки спектрограмм теплового излучения потока частиц может быть использован для оптимизации режимов газотермического напыления покрытий с эффективными эксплуатационными характеристиками.*

*Ключевые слова: программный комплекс, спектрометр BTC-110S, гетерогенный поток частиц, интегральный тепловой спектр частиц, обратная задача, оптимизация режима газотермического напыления.*

V. I. Jordan, D. I. Kobelev

**DEVELOPMENT OF SOFTWARE FOR REGISTRATION AND DIGITAL PROCESSING  
OF SPECTROGRAMS OF HEAT RADIATION OF HETEROGENEOUS PARTICLE  
FLOWS IN GAS-THERMAL SPRAYING PROCESS OF COATINGS**

*The article describes the functional blocks of the created software intended for registration and subsequent processing of spectrograms of thermal radiation of heterogeneous particle flows based on the BTC-110S spectrometer. Software in the form of a software package is planned for use in solving the problem of monitoring and measuring the temperature of a particle flow in the process of spraying functional coatings based on solving the “inverse” problem of restoring the temperature distribution of sprayed particles by of their “integral” thermal spectrum. The developed hardware-software complex for processing of spectrograms of thermal radiation of a particle flow can be used to optimize the regimes of gas-thermal spraying of coatings with effective performance characteristics.*

*Key words: software package, BTC-110S spectrometer, heterogeneous particle flow, “integral” thermal spectrum of particles, “inverse” problem, optimization of gas-thermal spraying regime.*

---

**Введение**

Актуальной проблемой диагностики газотермических потоков частиц в процессах напыления функциональных покрытий на технические изделия является разработка компьютеризированных приборных комплексов [1], предназначенных для измерения и контроля температурно-скоростных параметров напыляемых частиц с целью оптимального управления технологическим режимом напыления покрытий [1, 2]. Корректное решение задачи контроля и из-

мерения температурно-скоростных параметров напыляемых частиц связано с применением методов «неразрушающего контроля» процессов напыления (например, методов дистанционного зондирования теплового излучения потока частиц). Достаточно эффективными методами измерения температуры гетерогенного потока частиц зарекомендовали себя методы спектральной пирометрии [3, 4]. Линейные и матричные ПЗС-приемники, применяемые в современных спектрофотометрах в качестве детектора и позволяющие с высоким разрешением регистрировать спектры излучения объектов различной природы, позволяют передавать данные измерений через порт USB в ЭВМ с помощью управляющей программы, позволяющей производить первичную калибровку прибора с учетом количества пикселей в детекторе и линейной дисперсии дифракционной решетки [5].

**Целью работы** является разработка и создание кроссплатформенного программного обеспечения для регистрации и последующей обработки спектрограмм теплового излучения гетерогенных потоков частиц на основе спектрометра ВТС-110S [5], которое планируется к использованию при решении задачи контроля и измерения температуры частиц в процессе напыления функциональных покрытий на основе решения «обратной» задачи восстановления температурного распределения напыляемых частиц по их «интегральному» тепловому спектру [6, 7]. Разработанный программно-аппаратный комплекс обработки спектрограмм теплового излучения потока частиц может использоваться для оптимизации режимов газотермического напыления покрытий с эффективными эксплуатационными характеристиками.

### **Описание функциональных блоков программного обеспечения**

Установленное на ЭВМ под управлением ОС WindowsXP программное обеспечение (далее – ПО) предназначено для управления работой спектрометра ВТС-110S, оно обеспечивает (рисунок 1):

- передачу данных спектрограммы с выхода спектрометра ВТС-110S в ЭВМ (блок взаимодействия с последовательным портом): системный интерфейс для управления и передачи данных между ЭВМ и ВТС-110S позволяет выбирать скорость передачи, режим передачи данных:
  - а) бинарный – для непрерывного режима передачи спектра;
  - б) символьный – для одинарных команд работы со спектрометром;
- визуализацию спектра в виде графика (блок визуализации данных с последовательного порта): графический интерфейс отображает один или нескольких спектров в виде графиков с легендой и цветными обозначениями; обеспечивает навигацию по графику и масштабирование графика по координатным осям, возможность сохранения спектра в виде массива данных в файле или как изображение, обеспечивает открытие и визуализацию спектра из файла;
- по исходным данным «реперных» точек с известными длинами волн производится калибровка зарегистрированного спектра – «привязка» отсчетов ячеек ПЗС-линейки к соответствующим длинам волн;
- кроссплатформенность (чтобы в перспективе запустить программу на встраиваемых и мобильных системах);
- выполнение операций математической обработки нескольких спектров (для автоматизации и ускорения проведения экспериментов).

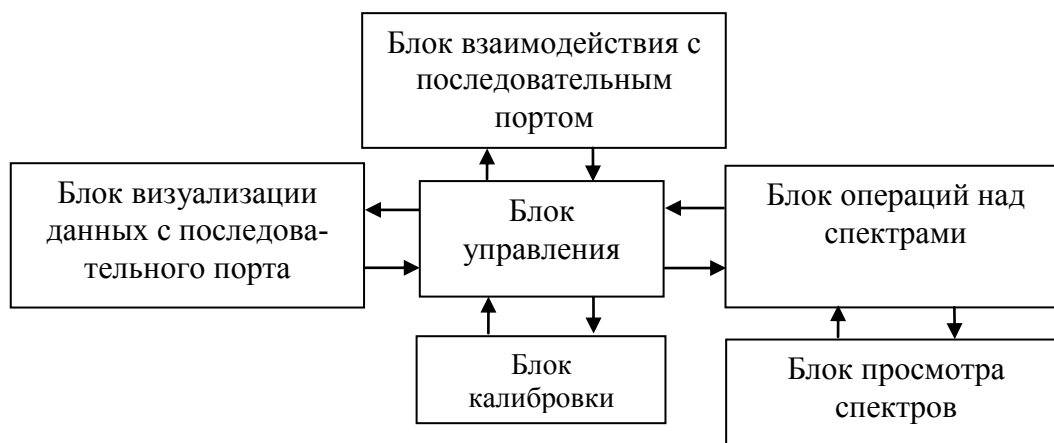


Рисунок 1 – Структурная схема взаимодействия функциональных блоков программного комплекса

Краткое описание основных функциональных возможностей ПО приведено ниже.

1. *Кроссплатформенность.* При разработке ПО использовались инструменты для кроссплатформенной работы, чтобы данное ПО можно было запустить на ЭВМ под управлением большинства современных операционных систем, в мобильных устройствах или встроенных системах. В качестве таких инструментов использовались: фреймворк Qt, библиотека boost::asio и среда QtCreator.

2. *Калибровка зависимости длины волны от номера ячейки линейного ПЗС-приемника* (рисунок 2). Для калибровки зависимости длины волны от номера ячейки ПЗС-линейки  $\lambda = \lambda(n)$  использовались натриевая лампа SON-TB 150 W E40 Philips, ртутно-кадмиевая лампа СМРК-2. Линейчатые спектры, сведенные на один график (Рисунок 3, правое окно), регистрируются и сохраняются в виде файлов в памяти ПЭВМ. Для аппроксимации  $\lambda = \lambda(n)$  в виде многочлена  $m$ -й степени

$$\lambda = c_0 + c_1 n + \dots + c_m n^m \quad (1)$$

были использованы длины волн линий наибольшей интенсивности, взятые из справочников и соответствующие «пикам» интенсивностей этих линий номера ячеек ПЗС-линейки.

По исходным данным реперных точек с помощью метода «наименьших квадратов» программное обеспечение позволяет рассчитывать коэффициенты калибровки  $c_i$ , где  $i=0,1,2,\dots,m$ . Для расчета коэффициентов калибровки  $c_i$  данные реперных точек представлены в виде пары чисел: номер ячейки – длина волны (рисунок 2).

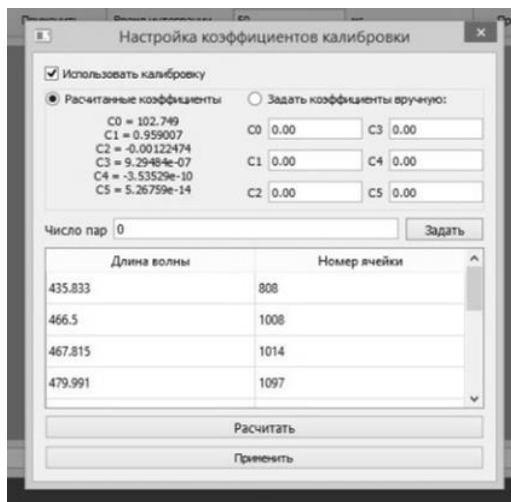


Рисунок 2 – Окно расчета коэффициентов калибровки

3. *Математическая обработка спектра.* Интерфейс ПО позволяет отображать в рабочей области экрана несколько спектров и проводить математические операции над ними: сложение интенсивностей нескольких спектров, вычитание интенсивности одного спектра из другого, «поточечное» деление интенсивностей одного спектра на другой или «поточечное» умножение на константу. Для применения математических операций используется консоль и набор команд для нее или кнопки интерфейса. Например, можно показать несколько окон со спектрами (рисунок 3) либо несколько спектров в одном окне (рисунок 4).

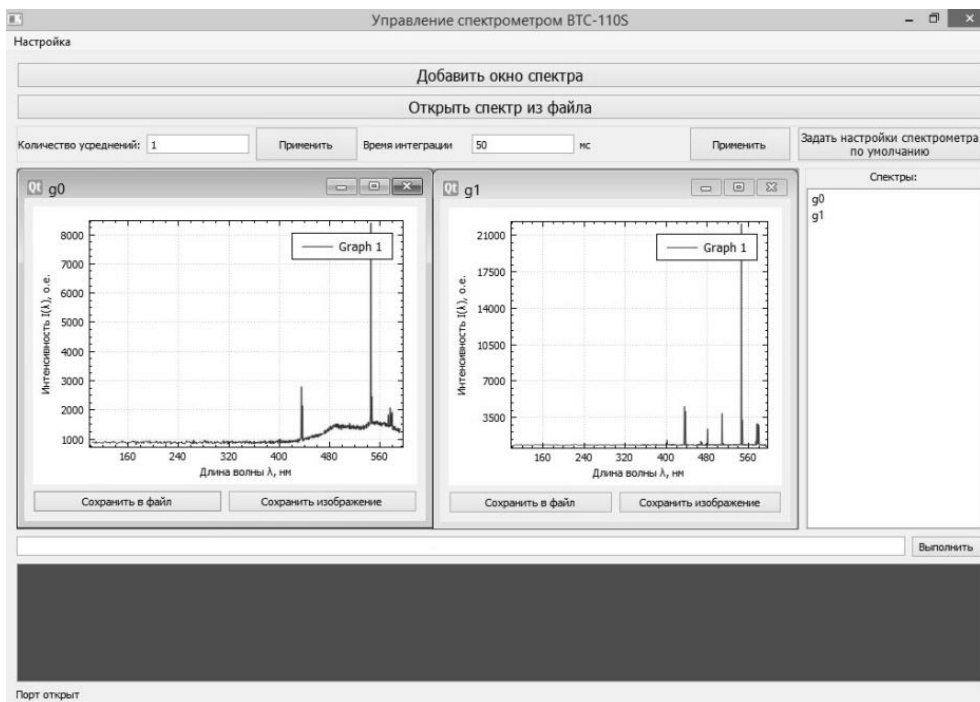


Рисунок 3 – В рабочей области несколько окон с графиками

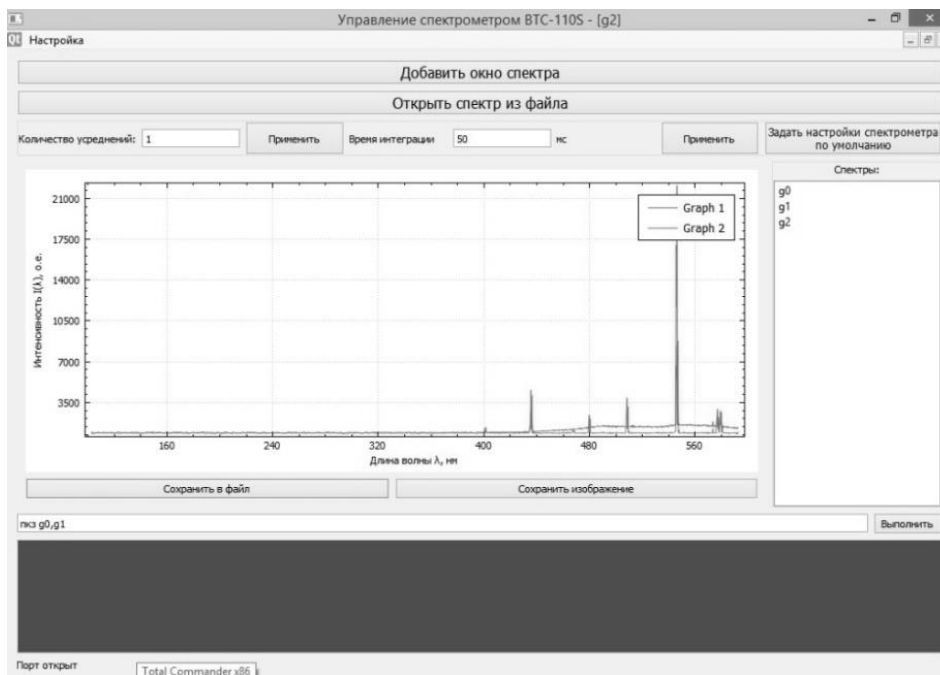


Рисунок 4 – Результат выполнения команды ПКЗ

Команда «ПКЗ» используется для показа нескольких спектров в одном окне. Команда «СУМ» используется для суммирования интенсивностей нескольких спектров (рисунок 5). Форматы этих команд приведены ниже:

ПКЗ <заголовок окна 1>, <заголовок окна 2>, <заголовок окна n>  
СУМ <заголовок окна 1>, <заголовок окна 2> ... <заголовок окна n>

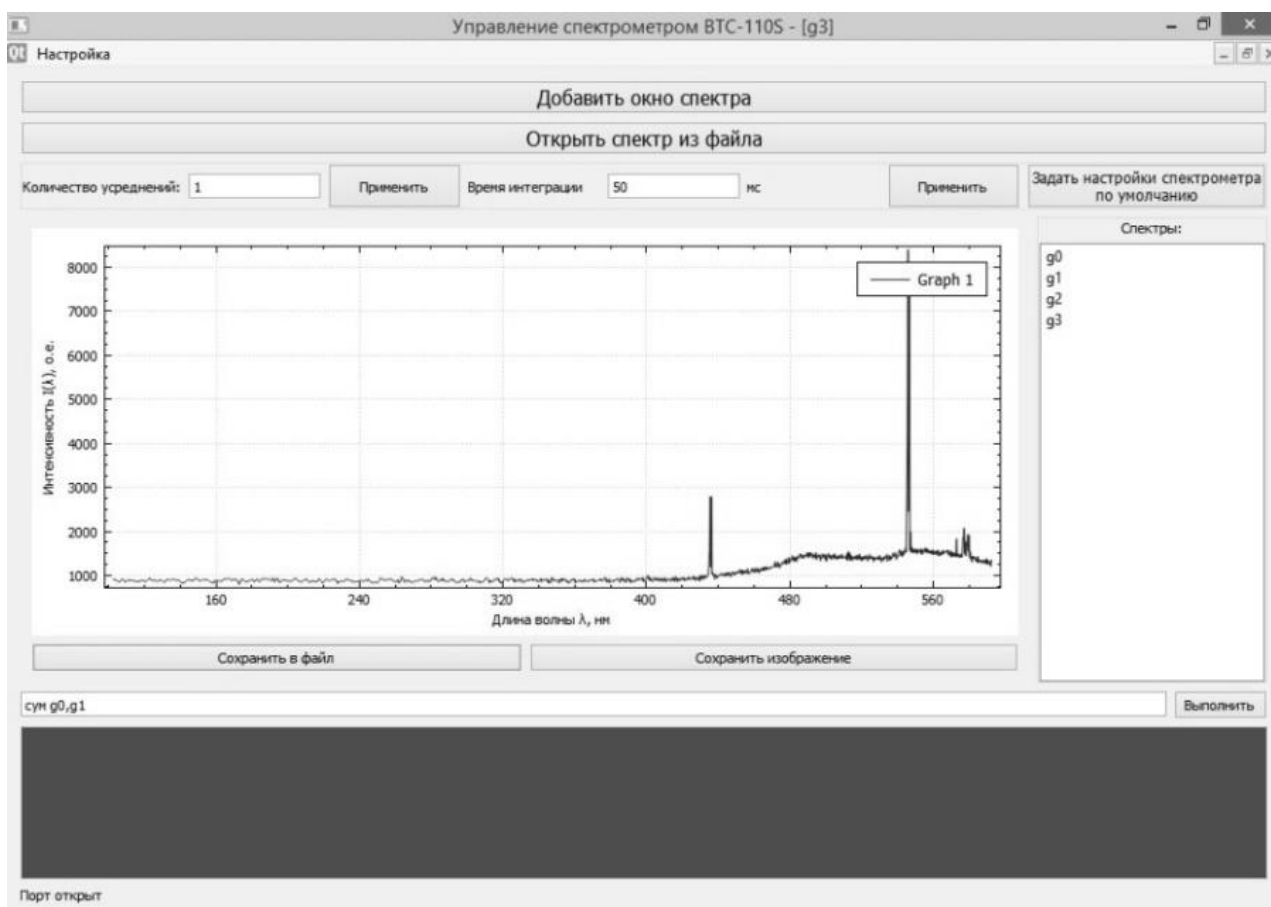


Рисунок 5 – Результат выполнения команды СУМ

Для вычитания интенсивностей одного спектра из другого и их поточечного деления используются команды «ВЫЧ» и «Дел»: ВЫЧ <заголовок окна 1>, <заголовок окна 2>, аналогично команда ДЕЛ.

Данные команды упрощают и ускоряют анализ спектров и проведение ряда экспериментов, так как не требуется выгружать регистрируемые спектры и пользоваться сторонними программами.

4. «Расширяемость» программного комплекса. При разработке ПО применялось объектно-ориентированное и модульное программирование. Программный код представлен несколькими модулями, что позволяет добавлять новые модули. Например, кроме модулей регистрации и первичной обработки спектров был добавлен модуль определения температурного распределения частиц по их «интегральному» спектру теплового излучения, теоретические основы для которого изложены в [6, 7] и кратко в следующем подразделе 2. Кроме того, методы спектральной пирометрии применимы, например, для измерения температуры и исследования тепловой структуры волны горения самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) и измерения температуры во фронте волны горения СВС [8].

Отметим дополнительные возможности ПО: масштабирование спектров по осям; изменение некоторых параметров спектрометра: количество усреднений и скорость интеграции; сохранение спектров в виде файлов; загрузка спектров из файлов; возможность сохранения спектров в виде изображений.

**Обратная задача восстановления температурного распределения частиц  
в гетерогенном потоке по их интегральному спектру**

Математическая модель «измерительного» уравнения, представляющего собой интегральное уравнение Фредгольма 1-го рода в виде

$$B(\lambda) = \beta(\lambda) \cdot \Theta(\lambda) = \beta(\lambda) \cdot S_{\Sigma} \cdot R(\lambda), \quad (2)$$

теоретически обоснована в работах [6, 7]. В выражении (2) выходной сигнал  $B(\lambda)$ , регистрируемый линейным многоэлементным фотоприемником, установленным в фокальной плоскости спектрофотометра, пропорционален интегральному (суммарному) спектральному распределению энергии  $\Theta(\lambda)$  теплового излучения от потока частиц, прошедших зону регистрации. Функция  $\Theta(\lambda) = S_{\Sigma} \cdot R(\lambda)$  пропорциональна суммарной площади  $S_{\Sigma}$  поверхности частиц, излучающих тепловое излучение, и испускательной (излучательной) способности  $R(\lambda)$  каждой частицы, осредненной по всем частицам с помощью функции плотности вероятности распределения  $f(T)$  по значениям температур частиц в «измерительном» объеме:

$$R(\lambda) = \int_{T_{\min}}^{T_{\max}} \varphi(\lambda, T) \cdot \varepsilon_{\text{ч}}(T) \cdot f(T) dT, \quad (3)$$

где  $\varphi(\lambda, T)$  – излучательная способность «абсолютно черного тела» (функция Планка), а  $\varepsilon_{\text{ч}}(T)$  – «интегральный коэффициент черноты» для частиц, учитывающий поправку для частиц как на модель «серого» тела. В формуле (2) в регистрируемом спектре коэффициент  $\beta(\lambda)$  представляет собой функцию «искажений», вносимых элементами и устройствами оптического «тракта» спектрометра. На этапе калибровки спектрометра по «эталонным» источникам излучения можно определить функцию «искажений»  $S_{\Sigma} \cdot \beta(\lambda)$  и использовать ее в дальнейших измерениях, а именно  $R(\lambda) = B(\lambda) / (S_{\Sigma} \cdot \beta(\lambda))$ . В формуле (3) можно перейти к функции  $f_1(T) = \varepsilon_{\text{ч}}(T) \cdot f(T)$ . Используя замены переменных  $\omega = 2\pi c / \lambda$ ,  $t = A_2 / T$ , переход с учетом замены переменных к функциям  $f_1(t)$  и  $\varphi(\omega, t)$ , а также разложение по переменной  $t$  функции Планка, в работах [6, 7] было получено аналитическое решение «обратной» задачи в виде

$$f_1(t) = \frac{1}{2\pi i} \sum_{m=1}^{\infty} \mu(m) \cdot \int_{\sigma-i\infty}^{\sigma+i\infty} e^{s \cdot t} \Phi(ms) ds = \sum_{m=1}^{\infty} \mu(m) \cdot G(mt), \quad (4)$$

где  $G(mt) = \frac{1}{2\pi i} \int_{\sigma-i\infty}^{\sigma+i\infty} e^{s \cdot t} \Phi(m \cdot s) ds$ ,  $\mu(m)$  – функция Мебиуса. Для функции  $\Phi(m \cdot s)$  выполняются выражения:

$$\Phi(m \cdot s) = \sum_{n=1}^{\infty} F(m \cdot n \cdot s), \quad (5)$$

$$F(m \cdot n \cdot s) = \int_{t_{\min}}^{t_{\max}} e^{-m \cdot n \cdot s \cdot t} f_1(t) dt = \int_0^{\infty} e^{-m \cdot n \cdot s \cdot t} f_1(t) dt. \quad (6)$$

В частном случае, заменяя переменную Лапласа  $s$  на частотную переменную  $\omega = 2\pi c / \lambda$ , функция  $\Phi(m \cdot s)$  при  $m=1$  является функцией  $\Phi(s)$ , и с учетом замены переменной аргумента  $s$  на  $\lambda$  ее можно обозначить как  $\Phi_1(\lambda)$ . Учитывая подробный вывод формул (4)-(6), приведенный в работах [6, 7], функция  $\Phi_1(\lambda)$  связана через калибровочную функцию  $\gamma(\lambda)$  с экспериментальным спектром  $B(\lambda)$ . Следовательно, располагая экспериментально зарегистри-

стрированным спектром  $B(\lambda)$ , с учетом связи спектра  $B(\lambda)$  с функцией  $\Phi_1(\lambda)$  и выражений (4)–(6) можно определить функцию  $f_1(t)$ , от которой с учетом замены  $t = A_2 / T$  можно перейти к функции плотности вероятности распределения  $f(T)$  по значениям температур частиц, т. е.  $f(T) = f_1(T) / \varepsilon_\nu(T)$ .

### **Выводы**

Основываясь на выражениях (4)–(6), средствами моделирования можно исследовать наилучшим образом «подходящие» модельные функции плотности вероятности распределения  $f(T)$  по значениям температур частиц в потоке, создав соответствующий программный модуль для решения обратной задачи определения температурного распределения частиц в потоке по их интегральному тепловому спектру. Результаты моделирования могут использоваться при решении задачи оптимизации режимов газотермического напыления покрытий на поверхности технических деталей с эффективными эксплуатационными характеристиками.

### **Литература**

1. Бледнов, В. А. Моделирование формирования слоистой структуры и пористости плазменных порошковых покрытий с учетом изменяемой топологии поверхности при напылении [Текст] / В. А. Бледнов, В. И. Иордан, О. П. Солоненко // Известия Томского политехнического университета. – 2010. – Т. 317. – № 5. – С. 82–87.
2. Оценка скорости и температуры дисперсной фазы в струях плазменно-дугового напыления [Текст] / М. П. Бороненко, И. П. Гуляев, П. Ю. Гуляев [и др.] // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 11 (ч. 10). – С. 2135–2140.
3. Свет, Д. Я. Объективные методы высокотемпературной пирометрии при непрерывном спектре излучения [Текст] / Д. Я. Свет. – Москва : Наука, 1968. – 240 с.
4. Магунов, А. Н. Спектральная пирометрия (обзор) [Текст] / А. Н. Магунов // Приборы и техника эксперимента. – 2009. – № 4. – С. 5–28.
5. Spectrometer Model BTC-110S [Electronic resource] // Science-Surplus.com. – URL: // <http://www.science-surplus.com/products/spectrometers>.
6. Иордан, В. И. Теоретические аспекты решения обратной задачи определения температурного распределения частиц гетерогенного потока по их интегральному тепловому спектру [Текст] / В. И. Иордан // Известия Алтайского государственного университета. Серия Физика. – 2013. – № 1/1 (77). – С. 167–171.
7. Иордан, В. И. Обратное интегральное преобразование для восстановления температурного распределения частиц гетерогенного потока по их интегральному тепловому спектру [Текст] / В. И. Иордан // Известия вузов. Физика. – 2013. – Т. 56. – № 8/3. – С. 293–299.
8. Калачёв, А. В. Исследование тепловой структуры волны горения самораспространяющегося высокотемпературного синтеза [Текст] / А. В. Калачёв, П. Ю. Гуляев, В. И. Иордан // Известия Алтайского государственного университета. – 2005. – № 1 (35). – С. 104–109.