

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПСИХОФИЗИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА В ОБЛАСТИ ТЕПЛОТЕХНИКИ

УДК 519.7:007.52+53.083.721

### **БАБКОВА Надежда Викторовна**

ассистент кафедры интеллектуальных компьютерных систем Национального технического университета «Харьковский политехнический институт».

**Научные интересы:** обработка изображений, математическое моделирование, интеллектуальные системы принятия решений реального времени.

**e-mail:** nadjenna@gmail.com

### **ШАРОНОВА Наталья Валериевна**

д.т.н., профессор, заведующая кафедрой интеллектуальных компьютерных систем Национального технического университета «Харьковский политехнический институт».

**Научные интересы:** математическое моделирование, искусственный интеллект, интеллектуальные компьютерные системы.

**e-mail:** nvsharonova@mail.ru

### **ВВЕДЕНИЕ**

Повсеместное применение компьютерной техники, ее быстрое развитие обусловили высокие темпы развития методов создания интеллектуальных систем (ИС) разнообразного назначения. Разработаны методологический и технический подходы к созданию и использованию информационных систем. Имеющиеся в настоящее время интеллектуальные информационные системы способны выполнять функции, которые раньше считались исключительно прерогативой человека: доказательство математических теорем, перевод текстов с одного языка на другой, диагностика болезней и выполнение многих других функций [1]. Однако в перспективе идеальная вычислительная машина должна превосходить способности человека логически мыслить, делать анализ поступающей информации, решать самые сложные задачи, взаимодействовать с окружающей средой.

Важную роль при разработке математического обеспечения информационных систем играют реляционные и логические способы представления знаний. Одним из эффективных универсальных математических средств для описания информации является ал-

гебра предикатов и предикатных операций [2]. Языком этих алгебр удобно описывать разнородную информацию, формировать запросы в базах данных и моделировать интеллектуальную деятельность человека.

Более 85% информации человек получает с помощью зрения. Для современного компьютера этот канал ввода информации также играет важную роль. Но ввести изображение в память ЭВМ нетрудно. Для машины намного сложнее «понять» изображение. Поэтому главная задача, которую приходится решать при построении систем машинного зрения, — это не создание устройств ввода изображений, а разработка методов и алгоритмов анализа визуальной информации. Проблема создания систем компьютерного зрения связана с представлением знаний, обучением, распознаванием образов [3].

Линейная теория цветового зрения указывает способ кодирования цветов, который в настоящее время широко применяется на практике [2]. Этим способом каждый цвет формально представляют в виде вектора трехмерного колориметрического пространства. Координаты цвета линейно зависят от спектра, который вызвал его световое излучение.

Область науки, изучающей законы преобразования информации органами чувств человека, называется психофизикой. Объектами исследования в психофизике служат: ощущение человека; физические процессы, которые действуют на органы чувств и вызывают ощущение; отношение, которым связаны ощущения с соответствующими им предметами внешнего мира. В психофизике выделяется два направления — экспериментальное и теоретическое. К настоящему времени экспериментальная психофизика накопила большой фактический материал [2].

Теория психофизических процессов ставит своей задачей разработку математического описания зависимости ощущений от физических процессов, которые действуют на рецепторы человека. Она рассматривается как один из разделов теории интеллекта. Эта теория прошла довольно большой путь в своем развитии и имеет многочисленные практические и технические приложения. Одной из основных задач, решаемых в рамках данной теории, является задача идентификации [4]. Математическое описание зависимости ощущений от физических процессов рассматривается как многопараметрическая задача идентификации. Однако в случае исследования высокотемпературных физических процессов она имеет определенную специфику.

Ощущения не имеют систематизированных объективных единиц измерения, что приводит к ситуации, когда выход  $y = f(x)$  в традиционном понимании [2] отсутствует. При этом присутствует реакция человека на входное влияние, которое не подвергается непосредственному физическому измерению. Поэтому в психофизике для исследования применяют компараторный метод, или метод сравнения, сущность которого сводится к использованию такого субъективного анализа ощущений испытуемого, который бы завершался его объективно регистрируемым ответом типа «да» - «нет». Во многих случаях опыты такого типа могут служить достаточным экспериментальным основанием для объективного и целиком корректного математического описания ощущений человека и процессов их формирования.

Применение компараторного метода неявно вносит проблему расширения знаний и, соответственно, оценок параметров физического процесса с целью выявле-

ния способов субъективного анализа ощущений человеком.

**Целью работы** является построение моделей высокотемпературных процессов на базе проведения психофизического эксперимента.

**1. Алгоритм работы эксперта.** Одним из результативных направлений развития информационных технологий искусственного интеллекта является использование принципа «формального содержания» [1] при разработке интеллектуальных систем. Это направление включает моделирование восприятия или поведения человека и технологического процесса, а также службы коррекции моделей на основании исходных данных и данных результирующих отчетов. Среди реализованных результативных продуктов в этой области известны информационные системы, информационно-управляющие, экспертные системы, системы диагностики и управления объектами и процессами и т.д. Почти все эти системы — программные продукты, использующие широкий спектр информационных технологий искусственного интеллекта. В связи с этим задача адаптации математических моделей технологических процессов при использовании в технологиях искусственного интеллекта актуальна и сводится к выбору вариантов с возможностью получения решений в дискретном виде (1 = «да», 0 = «нет»).

Известный в изучении и контроле состояния высокотемпературных процессов (ВТП) принцип, реализованный в пирометрии [2], стал аналогом базовых идей при разработке программы эксперта ВТП. Привлекательно для разработчиков то, что пирометр в момент измерения не имеет непосредственного контакта с объектом контроля при высокой температуре. Это определило направление его дальнейшего развития. На рис. 1 показана принятая начальная структура эксперта ВТП.

Источником исходной информации является любое устройство (рис.1), позволяющее представить изображение ВТП в виде файла *bmp*-формата. Далее, модель зрения попиксельно «рассматривает» картинку и с помощью вектора чувствительности (ВЧ) устанавливает длину волны и частоту цветовой температуры. Величины составляющих ВЧ в итерационном процессе уточняются, и связано это с различными спектральными характеристиками источников исходных файлов *bmp*-

формата. Используя частотный спектр «излучения» пикселя, соответствующая поставленной задаче тепловая модель итерационно устанавливает «интегральную» температуру выбранного пикселя. Поэтому в основе всех запросов к эксперту лежит распределение температур. Подстановка значений температур в тепловую модель запроса позволяет определить распределение коэффициента теплопроводности для материала поверхности высокотемпературного объекта

(ВТО). Отчеты и интерпретация результатов представлены в виде распределений и величин измеряемых параметров по заданным на изображении пространственным координатам.

Для реализации приведенного алгоритма потребовалось следующее оборудование: персональный компьютер со сканером и цифровая фотокамера. Никакого специального приборного обеспечения разработчики не применяли.

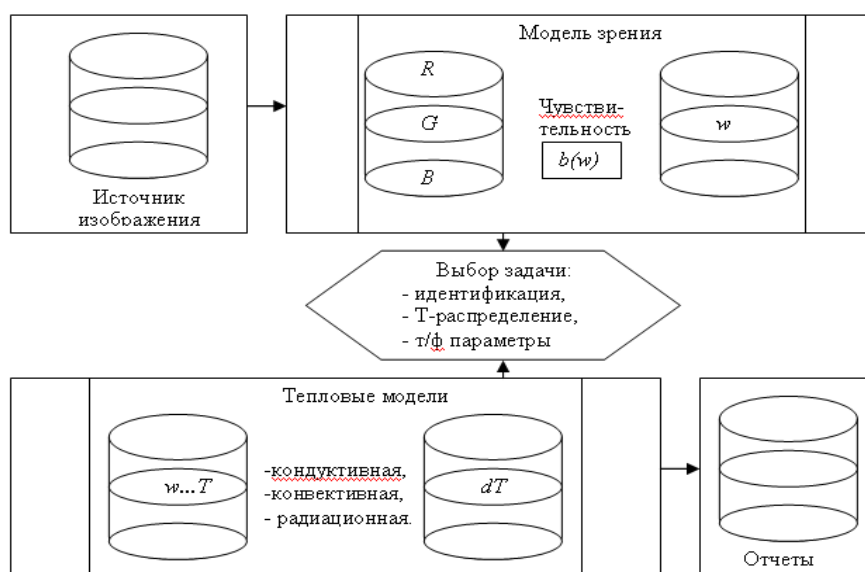


Рисунок 1 – Структура программы-эксперта высокотемпературных процессов

**2. Достоверность отчетов эксперта.** Решение-отчет, предлагаемое экспертом, получается при допущениях, принимаемых на любом из шагов его работы. Таких условий накапливается достаточно много, анализ их влияния позволяет его успешно использовать.

**3. Модель зрения.** Модель зрения – одно из разработанных направлений в искусственном интеллекте. Определение цветовой температуры по стандартам RGB или CYMK осуществляется с помощью табулированных функций чувствительности глаза [3]. Если рассматривать излучение поверхности ВТО, координаты цвета  $u_1, u_2, u_3$ , соответствующего цветовому излучению  $b(\lambda)$ , можно представить выражение для смеси отраженного и излучаемого света:

$$u_i = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} b(\lambda) K_i(\lambda) d\lambda ; i=1, 2, 3, \quad (1)$$

где  $b(\lambda)$  – зависимость плотности энергии  $b$  светового излучения от его длины волны  $\lambda$ ;

$K_1(\lambda), K_2(\lambda), K_3(\lambda)$  – некоторые весовые функции, характеризующие чувствительность глаза к лучам с различной длиной волны (после исследований Максвелла, получивших название функций спектральной чувствительности зрения, и в настоящее время, их значения определяют с весьма высокой точностью);

$\lambda_1$  и  $\lambda_2$  – минимальная и максимальная длины волн электромагнитного излучения, воспринимаемого глазом.

Обозначим как « $O_1$ » предположение о том, что зона контакта поверхности ВТО с окружающей средой не вносит искажений в его спектр излучения. А так как « $O_2$ » – спектр электромагнитного излучения, отраженный ВТО нейтрален по отношению к его собственному

тепловому излучению, и возможно выделение теплового излучения.

Тем самым сужается область достоверности решения эксперта при изучении ВТП с активной зоной контакта, что само по себе не требует комментария. Даже с учетом примененной спектральной коррекции значений  $K_1(\lambda), K_2(\lambda), K_3(\lambda)$ , это потребует дополнительных разработок в области оценки точности выводов эксперта.

**4. Температура и частота теплового излучения.** Собственное излучение поверхности тела  $E(T)$  можно представить [4] в виде:

$$E(T) = \varepsilon(T) \cdot E_0(T), \quad (2)$$

где  $\varepsilon(T)$  – интегральный коэффициент теплового излучения тела,

$E_0(T)$  – интегральная плотность потока излучения абсолютно черного тела от температуры.

В большинстве случаев коэффициент  $\varepsilon$  достаточно слабо зависит от температуры  $T$ . Выражение (2), с учетом  $\varepsilon(T) = \varepsilon \cdot \sigma$ , где  $\sigma$  – величина площади излучения, позволяет собственное излучение поверхности твердого тела при высоких температурах  $E(T)$  определить по закону Стефана-Больцмана  $E(T) = \varepsilon \cdot E_0(T) = \varepsilon \cdot \sigma T^4$ , где  $E_0(T)$  – спектральная плотность излучения абсолютно черного тела. Согласно закону Планка, спектральная плотность излучения абсолютно черного тела равна:

$$E_0 = \frac{c_1^* V^5}{e^{\frac{c_2^*}{T}} - 1}, \quad c_1^* = c_1 \cdot c^5, \quad C_2^* = C_1 \cdot c,$$

где  $c = 3 \times 10^8$  м/с – скорость света,

$c_1$  и  $C_2$  – известные константы Планка.

Зрение человека преобразует в цвет только излучения, частоты которых находятся в диапазоне  $\nu_{\min} = 4,17 \cdot 10^4$  Гц,  $\nu_{\max} = 7,9 \cdot 10^{14}$  Гц, то по закону Стефана-Больцмана можно получить уравнение  $T(\nu) = \sigma T^4$ , которое решается относительно  $T$  итерационным методом:

$$T_n = \sqrt[4]{\frac{c}{\sigma} \int_{\nu_{\min}}^{\nu_{\max}} \frac{c_1^* V^5}{1 - e^{\frac{C_2^*}{T_{n-1}}}} d\nu}. \quad (3)$$

Аналогично (3) получается итерационная формула для зависимости  $T(\lambda) = \sigma T^4$ . Учитывая противона-

правленность диапазона интегрирования

$$\lambda_{\min} = \frac{c}{\nu_{\max}} = 380 \text{ нм}, \quad \lambda_{\max} = \frac{c}{\nu_{\min}} = 720 \text{ нм},$$

получаем итерационную формулу:

$$T_n = \sqrt[4]{\frac{1}{\sigma} \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \frac{c_1}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{C_2}{\lambda T_{n-1}}} - 1}} d\lambda} \quad (4)$$

Итерационные процессы (3, 4) вносят дополнительную ошибку, величину которой можно оценить с помощью анализа работы вычислительного устройства, однако мы ограничимся общим утверждением, что приведенные в данном разделе алгоритмы необходимо аккуратно использовать. Это также является общим существенным ограничением достоверности результатов работы эксперта.

**5. Тепловые модели.** Все предположения, принятые в тепловых моделях, сужают область приложения эксперта. Допущения о непрерывности материала ВТО – « $O_3$ », изотропности его свойств – « $O_4$ », отсутствии внутренних – « $O_5$ » и поверхностных источников – « $O_6$ » тепла удобны при использовании простых и быстродействующих методов решения задач, на уровне дифференциальных уравнений в частных производных. Отметим возможность связи между элементами  $O_2$  и  $O_4, O_5$ .

Модель кондуктивного теплообмена, используется в режиме выделения границ ВТО и для определения теплофизических параметров материала поверхности ВТО. В постановке для избыточных температур  $\nu(x, y) = T(x, y) - T_f$ , если  $T_f$  – фиксированная величина, например, температура окружающей среды, а  $T(x, y) = \nu(x, y) + T_f$  – значение температуры в точке  $(x, y)$ . Дифференциальное уравнение Лапласа описывает распределение избыточных температур  $\nu(x, y)$  при выполнении предположений, принятых в данном изложении, и, соответственно, в рамках ограничений  $O_3, O_4$  и  $O_5$ :

$$\frac{\partial^2 \nu}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \nu}{\partial y^2} = 0. \quad (5)$$

Уравнение (5) совместно с граничными условиями можно решить стержневым методом [5]. Для соседних пикселей изображения поверхности ВТО приводится к эквиваленту закона Фурье:

$$q_{i+1 \rightarrow i} = \lambda \frac{\Delta y}{\Delta x} (T_{i+1} - T_i),$$

где  $i$  - номер пикселя,  $\Delta x, \Delta y$  - координатные сдвиги между пикселями и  $\lambda$  - коэффициент теплопроводности материала поверхности твердого тела. Считая  $\Delta x = \Delta y = d$  ( $d$  - разрешение фотоснимка) и  $q_{i+1 \rightarrow i} = q_{i \rightarrow i-1}$ , решаем итерационно систему двух уравнений относительно  $\lambda$

$$\lambda_i = \frac{T_{i+1} - T_i}{q_{i \rightarrow i-1}}, i = 1 \dots N. \quad (6)$$

Решением (6) эксперт определяет для тройки пикселей величину  $\lambda$ , а с использованием параметра графического разрешения  $d$  - распределение  $\lambda(x, y)$  с пространственным разрешением  $2d$ .

### ВЫВОДЫ

Система, заменяющая эксперта, специалиста по теплофизике, в процессе исследования позволяет использовать как входной источник информации оцифрованные фотоснимки высокотемпературных процессов. В связи с этим, уменьшается риск непосредственного

контакта оператора и аппаратуры в опасной зоне. Кроме того, существенно снижаются затраты на организацию и проведение экспериментов. Отметим факт, что исходные данные для тестирования эксперта получены исключительно с помощью доступной «бытовой аппаратуры». Выделенные в работе ограничения « $O_1, \dots, O_6$ » не являются критичными, однако могут влиять на точность отчетов эксперта.

Для достижения эффективности способа измерений теплофизических параметров, повышения точности измерений и расширения их ассортимента, необходимы дополнительные исследования с целью уточнения абсолютных значений температуры при определении ее методом компараторной идентификации, а также выявления и реализации возможности расширения диапазонов и условий достоверности использования результатов. Результаты могут быть использованы при разработке экспертных систем, основанных на базах знаний.

### ЛИТЕРАТУРА:

1. Bondarenko M.F., Shabanov-Kushnarenko Ju.P. Teorija intelekta. – Harkov: «Smit», 2006. – 594 s.
2. Smirnov A.D. Matematicheskie modeli teorii peredachi izobrazhenij – M.: «Svjaz'», 1979. – 96 s.
3. Vavilov V.P. Teplovyje metody nerazrushajushhego kontrolja: Spravochnik – M.: «Mashinostroenie». – 1991. – 240 s.
4. Fokin V.M., Bojkov G.P., Vidin Ju.V. Osnovy tehniczeskoj teplofiziki: Monografija – M.: «Izdatelstvo Mashinostroenie-1», 2004. – 131 s.
5. Babkova N.V., Petruhin S.Ju., Sharonova N.V. Informacionno-parametricheskij kontrol teplofiziceskih parametrov vysokotemperaturnyh processov //Vestnik HNTU. – #1 (46). – 2013 – S.372-376.
6. Bondarenko M.F., Dudar Z.V., Efimova I.A., Leshhinskij V.A., Shabanov-Kushnarenko S.Ju. O mozgopodobnyh EVM. //Radioelektronika i informatika. – 2004. – #3 (04). – S.21-38.

**Рецензент:** д.т.н., проф. Шарко А.В.,  
Херсонский национальный технический университет.