

Таблица 1

Результаты измерений сигнала  $\alpha$

Расход по расходомерной установке, м <sup>3</sup> /ч	$P = 0,000;$ $S_g = 0,00785 \text{ м}^2$	$P = 0,127$ $S_g = 0,006965 \text{ м}^2$	$P = 0,243$ $S_g = 0,006315 \text{ м}^2$	$P = 0,783$ $S_g = 0,004402 \text{ м}^2$
97,945	15,344	17,107	17,998	25,080
49,007	7,723	8,580	9,035	12,495
24,848	0,8845	4,322	4,568	6,338

Таблица 2

Результаты измерений сигнала  $\beta$

Расход по расходомерной установке, м <sup>3</sup> /ч	$P = 0,000$ $S_g = 0,00785 \text{ м}^2$	$P = 0,127$ $S_g = 0,006965 \text{ м}^2$	$P = 0,243$ $S_g = 0,006315 \text{ м}^2$	$P = 0,783$ $S_g = 0,004402 \text{ м}^2$
97,945	0,000	1,524	2,679	9,929
49,007	0,000	0,775	1,424	5,107
24,848	0,000	0,427	0,740	2,585

Сигнал  $\beta$ , возникающий между электродами при встречном включении катушек, пропорционален скорости и отношению свободного от потока сечения  $S_h$  канала к «живому» сечению  $S_g$ , т. е.

$$\beta = K_S(1 + b_1P + b_2P^2)v(S/S_g - 1),$$

причем  $S$  — сечение канала;  $K_S$ ,  $b_1$ ,  $b_2$  — эмпирические

коэффициенты, определяемые при градуировке прибора.

Путем обработки двух сигналов  $\alpha$  и  $\beta$  вычисляют объемный расход  $Q$  и относительную площадь живого сечения потока  $S_g/S$  по формулам

$$Q = (S\alpha^2\bar{K}_S / \bar{K}_V) / (\bar{K}_S\alpha + \bar{K}_V\beta);$$

$$S_g/S = \bar{K}_S\alpha / (\bar{K}_S\alpha + \bar{K}_V\beta),$$

где  $\bar{K}_V = K_V(1 + a_1P + a_2P^2)$ ,  $\bar{K}_S = K_S(1 + b_1P + b_2P^2)$ .

Результаты испытаний приведены в табл. 1, 2.

По результатам измерений чувствительность прибора к структуре потока  $f \approx 0,64$ , что вполне удовлетворительно.

#### Литература

1. Вельт И. Д., Михайлова Ю. В. Электромагнитный метод измерения расхода и уровня жидкости в незаполненных трубопроводах // Датчики и системы. 1999. № 7—8. С. 22.

Дата принятия 16.04.2013 г.

## ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

006:621.783.2

### Низкотемпературный излучатель для поверки и калибровки радиационных термометров

А. В. ЗУЕВ, В. А. РОЖКОВ

НПЛ «Метропри», С.-Петербург, Россия, e-mail: av.zuev@mail.ru

Рассмотрена конструкция и особенности эксплуатации излучателя для поверки и калибровки радиационных термометров в диапазоне температуры от  $-30$  до  $+120$  °С. Исследовано распределение температуры по дну и стенкам излучающей полости в стационарном режиме на нижнем и верхнем пределах диапазона.

**Ключевые слова:** образцовый излучатель, модель абсолютно черного тела, распределение температуры, радиационный термометр.

The design and operation features of radiation thermometers in the temperature range from  $-30$  to  $+120$  °C are considered. The temperature distribution on the bottom and the walls of radiating cavity in stationary mode on the lower and upper range limits is studied.

**Key words:** standard radiator, blackbody model, temperature distribution, radiation thermometer.

Широкое распространение радиационных термометров в энергетике, жилищно-коммунальном хозяйстве, транспорте, строительстве и медицине обусловлено не-

обходимостью решения разнообразных задач по диагностике, мониторингу, энергосбережению и предотвращению аварийных ситуаций [1—4]. Организации, осуществляющие деятельность в

данных отраслях экономики, являются потребителями метрологических услуг, которые предоставляют, как правило, государственные центры стандартизации, метрологии и сертификации. Для воспроизведения и передачи единицы температуры рабочим средствам измерений в НПЛ «Метропир» разработан низкотемпературный излучатель в виде модели абсолютно черного тела (АЧТ).

В целях повышения технологичности цилиндрико-коническая модель АЧТ, изготовленная из алюминиевого сплава высокой теплопроводности, и система регулирования температуры объединены в один блок. Для увеличения эффективной излучательной способности угол при вершине конического дна составляет  $120^\circ$ , в боковых стенках сделаны продольные канавки. Излучающая полость имеет термостойкое матовое покрытие [5].

Технические характеристики термостойкого покрытия

Диапазон рабочей температуры . . . . .  $-60... +700^\circ\text{C}$   
 Адгезия по методу решетчатых надрезов, не более . . . . . 1 балл  
 Предел прочности при ударе по прибору У-2, не менее . . . . . 30 см  
 Электрическая прочность, не менее . . . . . 10 кВ/мм  
 Удельное электрическое сопротивление, не менее . . . . .  $1 \cdot 10^{12}$  Ом·см

Нормальную излучательную способность покрытия определяли методом сравнения с эффективной излучательной способностью 0,996 излучателя в виде модели АЧТ [6]. Энергию излучения фиксировали фурье-спектрометром Lloyd FT600 в направлении нормали к излучающей полости излучателя и поверхности испытываемых образцов при значениях отсчитываемого от нормали телесного угла  $0-5^\circ$ . Испытания проводили в атмосфере в интервале длин волн  $5-15$  мкм при температурах излучающей поверхности  $-20, 0, 50, 120^\circ\text{C}$ . Интегральная нормальная излучательная способность покрытия составила не менее 0,93.

Нагрев и охлаждение модели АЧТ осуществляли со стороны дна при помощи термоэлектрических модулей, принцип действия которых основан на эффекте Пельтье. Для отвода тепла с их горячей стороны применяли радиаторы водяного охлаждения. Управляли температурным режимом при помощи пропорционально-интегрально-дифференциального регулятора JUMO dTRON 308. Датчиком температуры служил платиновый термометр сопротивления Pt100, который является носителем температурной шкалы. В качестве теплоизоляции использовали пенополиуретан.

Система охлаждения излучателя с замкнутым контуром аналогична применяемой в серийной продукции и состоит из помпы, охладителя и индикатора движения воды, соединительных шлангов. Помпа обеспечивает циркуляцию воды в системе охлаждения и обладает высокой производительностью при малом расходе электроэнергии. Ее конструкция практически исключает шум и вибрацию, а также перегрев двигателя при любых условиях эксплуатации. Охладитель компрессорного типа предназначен для охлаждения циркулирующей воды. В нем использован безопасный для окружающей среды безфреоновый хладагент R134A. Охлаждающая камера и змеевик изготовлены из коррозионно-стойкого титанового сплава. Цифровой регулятор температуры позволяет задавать и поддерживать температуру воды в диапазоне  $4-28^\circ\text{C}$ . При достижении заданной температуры двигатель компрессора автоматически выключается и снова включается при повышении температуры воды на  $1^\circ\text{C}$  относительно уставки. В одном из шлангов расположен индикатор движения воды с вращающейся крыльчаткой, а под системой охлаждения — поддон с аварийным сливом.

В области отрицательных температур содержащиеся в воздухе водяные пары конденсируются на стенках излучающей полости. Вокруг входного отверстия зарождаются и растут кристаллы инея, переходящие в глубь полости. Постепенно образуется замкнутый фронт кристаллизации с рыхлой структурой. Диффузия водяных паров сквозь слой инея к охлаждающей поверхности приводит к увеличению и стабилизации плотности инея примерно на одном уровне [7]. Через 60 мин работы с открытым входным отверстием при температуре  $-30^\circ\text{C}$  модель АЧТ покрывается изнутри слоем инея, термическое сопротивление которого может оказывать влияние на радиационную температуру излучающей полости. Указанный отрезок времени рекомендуется как максимально допустимый при работе на нижнем пределе температурного диапазона излучателя. При этом входное отверстие излучателя следует держать, по возможности, закрытым.

При переводе излучателя в область положительных температур образовавшийся в полости иней начинает таять. Гидрофобность покрытия способствует быстрому стеканию влаги со дна модели АЧТ. Для исключения влияния влаги на радиационную температуру достаточно провести сушку полости при температуре выше  $40^\circ\text{C}$  в течение 20 мин.

В стационарном режиме работы излучателя существует неравномерность распределения температуры по дну и стенкам излучающей полости, вызванная потерями теплоты в связи с кондукцией через теплоизоляцию, отводом теплоты по стенке, конвекцией и излучением через выходное отверстие. Учет этой неравномерности необходим при расчете эффективной излучательной способности, выражающей степень приближения излучателя к АЧТ.

Для моделирования распределения температуры по дну и стенкам излучающей полости построена трехмерная тепловая модель (рис. 1). Боковые стенки с канавками заменены эквивалентным цилиндром. Сделано допущение, что тепловой поток от термоэлектрических модулей ко дну излучающей полости является равномерным. Построение и расчеты осуществляли при помощи программного продукта Ansys 11.0, использующего метод конечных элементов. За начало координат выбран центр дна. При построении тепловой модели АЧТ заданы следующие граничные условия: ось вращения модели — адиабата (показатель адиабаты  $q = 0$ ); на внутренней поверхности излучающей полости граничное условие 3-го рода (конвекция и излучение в окружающую среду); на внешней поверхности модели граничное условие 2-го рода (тепловой поток, определяемый излучением и кондукцией через воздушный зазор к пенополиуретану).

Теплофизические свойства материалов взяты в [8, 9]. Коэффициент конвективного теплообмена и теплообмена излучением рассчитывали в программе Ansys 11.0 статистическими методами.

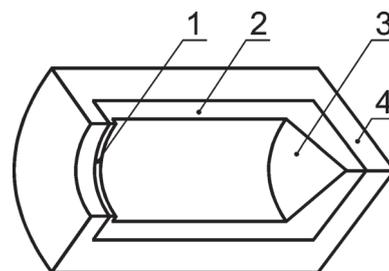


Рис. 1. Трехмерная тепловая модель АЧТ из алюминиевого сплава:  
 1 — диафрагма; 2 — боковая стенка; 3 — коническое дно;  
 4 — тепловая изоляция

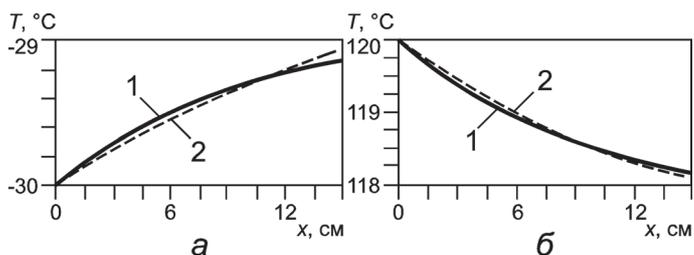


Рис. 2. Распределение температуры  $T$  по стенкам излучающей полости:

1 — расчетное; 2 — измеренное термопарой;  $x$  — расстояние от основания дна

Для проверки достоверности вычислений проведено экспериментальное измерение температуры конического дна и цилиндрических стенок излучающей полости. В качестве датчика температуры использовали термопару ТХА (тип L) 2-го класса точности по стандарту [10] с диаметром термоэлектродов 0,3 мм, откалиброванную в крайних точках температурного диапазона излучателя. Температуру измеряли в стационарном температурном режиме при перемещении датчика вдоль стенок излучающей полости с шагом 15 мм. Погрешность измерений рассчитывали, используя [11].

Согласно результатам расчета радиальный перепад температуры по дну модели АЧТ не превышает 0,04 °С, что обусловлено незначительной передачей теплоты кондукцией через теплоизоляцию. Распределение температуры от центра дна к периферии практически линейное и имеет, как правило, случайный характер. Измерения при помощи термопары и эталонного пирометра Ranger MX4TD DCI 1-го разряда [12] показали, что неравномерность распределения температуры по дну в крайних точках диапазона составляет около 0,2—0,3 °С. Это объясняется технологическим разбросом электрического сопротивления термоэлектрических модулей, из-за которого возникает разница в значении выделяемой ими энергии и неравномерность кондуктивного теплового потока от дна к выходному отверстию модели АЧТ.

Распределение температуры по стенкам излучающей полости представлено на рис. 2. Неравномерность температуры вызвана, в первую очередь, возрастанием теплообмена излучением стенок с окружающей средой при переходе от дна к выходному отверстию. Качественное сравнение кривых указывает на сходимость численных расчетов и экспериментальных данных, они пересекаются в доверительных областях. Количественная оценка результатов свидетельствует о большей неравномерности температуры при экспериментах, что может быть обусловлено погрешностью измерений.

Эффективная излучательная способность низкотемпературного излучателя без конденсации, рассчитанная по [13, 14] с использованием расчетных и экспериментальных данных о распределении температуры, составляет  $0,996 \pm 0,001$ .

Технические характеристики излучателя

Диапазон воспроизводимой температуры . . . . . -30 . . . +120 °С  
Диаметр апертуры . . . . . 70 мм  
Глубина излучающей полости . . . . . 180 мм  
Время выхода излучателя на заданный стационарный температурный режим, не более . . . . . 70 мин  
Дрейф температуры излучателя в заданном стационарном температурном режиме, не более . . . . .  $\pm 0,2$  °С/15 мин  
Погрешность поддержания температуры в заданном стационарном температурном режиме, не более . . . . .  $\pm 0,2$  °С

Доверительная погрешность температуры излучателя с доверительной вероятностью 0,95 в диапазоне от -30 до 120 °С:

для 1-го разряда . . . . . 0,60—0,84 °С  
для 2-го разряда . . . . . 1,00—1,47 °С  
Дискретность цифровой индикации температуры . . . . . 0,1 °С  
Эффективная излучательная способность без конденсации . . . 0,996  
Напряжение питания . . . . . (220 ± 22) В  
Частота питающей сети . . . . . (50 ± 1) Гц  
Потребляемая мощность . . . . . 0,7 кВт · А  
Ширина, глубина, высота . . . . . 230×410×380 мм  
Масса . . . . . 18 кг.

После проведения испытаний и внесения в государственный реестр средств измерений излучатель данной модификации будет запущен в серийное производство вместо выпускаемого аналога. Прибор предназначен для применения в качестве рабочего эталона 1-го или 2-го разряда согласно стандарту [12].

#### Л и т е р а т у р а

1. Госсорг Ж. Инфракрасная термография. Основы, техника, применение. М.: Мир, 1988.
2. Ткаченко Ю. А., Голованова М. В., Овечкин А. М. Клиническая термография (обзор основных возможностей). Н. Новгород: Изд-во «ЗАО Союз Восточной и Западной Медицины», 1998.
3. Будадин О. Н. и др. Тепловой неразрушающий контроль изделий. М.: Наука, 2002.
4. Вавилов В. П. Инфракрасная термография и тепловой контроль. М.: ИД Спектр, 2009.
5. ТУ 84-725—78. Композиции органосиликатные. Технические условия.
6. Аметистов Е. В. и др. Тепло- и массообмен. Тепло-технический эксперимент: Справочник / Под ред. В. А. Григорьева, В. М. Зорина. М.: Энергоатомиздат, 1982.
7. Напалков Г. Н. Теплообмен в условиях образования инея. М.: Машиностроение, 1983.
8. Новицкий Л. А., Кожевников И. Г. Теплофизические свойства материалов при низких температурах: Справочник. М.: Машиностроение, 1975.
9. Физические величины: Справочник / Под ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991.
10. ГОСТ 8.585—2001. ГСИ. Термопары. Номинальные статические характеристики преобразования.
11. Гордов А. Н. и др. Точность контактных методов измерения температуры. М.: Изд-во стандартов, 1976.
12. ГОСТ 8.558—2009. ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений температуры.
13. Peavy B. A. A note on the numerical evaluation of thermal radiation characteristics of diffuse cylindrical and conical cavities // J. Res. NBS. 1966. V. 70 C. N 2. P. 139—147.
14. Русин С. П. Расчет на ЭЦВМ радиационного теплообмена в осесимметричной системе тел на примере полости, ограниченной поверхностью конуса и цилиндра // Инженерно-физический журнал. 1977. Т. 32. № 1. С. 143—144.

Дата принятия 19.03.2013 г.