

---

# ПРОБЛЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ, МЕХАНИЗАЦИИ И КОМПЬЮТЕРИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ ЛИТЬЯ

УДК 536.521.3

**Л. Ф. Жуков, А. Л. Корниенко, Д. А. Петренко, А. В. Богдан**

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

## УСТАНОВКА ДЛЯ ПРЕЦИЗИОННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ГРАДУИРОВКИ СИСТЕМ МНОГОЦВЕТОВОЙ ПИРОМЕТРИИ ИЗЛУЧЕНИЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

*Для обеспечения прецизионных экспериментальных исследований и градуировки многоцветовых пирометрических систем на базе медных абсолютно чёрных тел разработана и исследована экспериментальная установка. В результате исследований установлено, что изотермичность медной модели АЧТ в 4 и 12 раз выше изотермичности моделей соответственно из графита и стали. Установка, в основном, состоит из высокоизотермичной ( $\Delta t \leq 0,5$  °C) модели АЧТ, нагревательной печи с источником электропитания и прецизионным термоэлектрическим термометром.*

**Ключевые слова:** многоцветовая пирометрия излучения, излучательная способность, термодинамически равновесное излучение, модель АЧТ, теплопроводность, изотермичность, экспериментальная установка.

*Для забезпечення прецизійних експериментальних досліджень і градуювання багатокольорових пірометричних систем на базі мідних абсолютно чорних тіл розроблено та досліджено експериментальну установку. В результаті досліджень встановлено, що ізотермічність мідної моделі АЧТ в 4 та 12 разів перевищує ізотермічність моделей відповідно зі сталі та графіту. Установка, в основному, складається із високоізотермічної ( $\Delta t \leq 0,5$  °C) моделі АЧТ, нагрівальної печі із джерелом живлення та прецизійним термоелектричним термометром.*

**Ключові слова:** багатокольорова пірометрія випромінювання, випромінювальна здатність, термодинамічно рівноважне випромінювання, модель АЧТ, теплопровідність, ізотермічність, експериментальна установка.

*To provide precision experimental researches and calibration of multiwavelength pyrometry systems, experimental set was developed and studied on base of copper absolute black body model. Consequently it's determined that isothermality of ABB copper model of absolute black body is 4 and 12 times higher than isothermality of correspondingly graphite and steel models. In general, set consists of high isothermality ( $\Delta t \leq 0,5$  °C) ABB model, heating furnace with electrical power source and precision thermoelectrical thermometer.*

**Keywords:** multiwavelength pyrometry of emission, emissivity, thermodynamically equilibrium emission, ABB model, thermal conductivity, isothermality, experimental set.

**В** наиболее характерных для металлургии термометрических условиях случайно изменяющейся излучательной способности и пропускания сопутствующей промежуточной среды контролируемых объектов многоцветовая пирометрия излучения не имеет альтернативы [1]. Многоцветовая пирометрия излучения значительно повышает метрологические характеристики и расширяет область применения разработанного ФТИМС НАН Украины световодного и бесконтактного непрерывного термоконтроля. В соответствии с требованиями государственных стандартов при разработке средств измерительной техники (СИТ) в обязательном порядке должны разрабатываться средства поверки, достаточные для обеспечения поверочных и градуировочных работ при разработке, производстве и эксплуатации СИТ. В нашем случае для многоцветовых технологий необходимо разработать соответствующие методики и экспериментальное оборудование, в том числе прецизионную установку для их градуировки.

С целью реализации методики экспериментальных исследований необходим источник термодинамически равновесного излучения, то есть модель абсолютно чёрного тела (АЧТ) с задаваемыми температурами в требуемом диапазоне исследований. Наиболее простые и доступные модели АЧТ часто выполняются из графита и имеют диаметр излучающей полости 50-100 мм. При нагреве модели графит окисляется и её полость заполняется двуокисью углерода, обладающей резко селективным поглощением электромагнитного излучения в рабочем спектральном диапазоне кремневых детекторов. Кроме того, относительно низкая теплопроводность графита (таблица) и значительный диаметр излучающей полости не обеспечивают требуемую её изотермичность и, соответственно, равную единице нормальную эффективную излучательную способность, а также метрологические характеристики исследований. Для обеспечения экспериментальных исследований методическая погрешность, обусловленная отклонением значения нормальной эффективной излучательной способности дна модели АЧТ от единицы, должна быть незначимой по сравнению с погрешностью измерений одноцветовых температур излучения на рабочих длинах волн СВПИ ( $\leq 0,2\%$ ).

**Теплопроводность материалов АЧТ при различных температурах**

Температура, °С	Теплопроводность, Вт/(м·К)		
	медь М1	графит МПГ-6	сталь Зсп
100	392	120	55
300	377	100	50
500	361	80	39
700	349	70	30
900	328	65	27
1000	323	62	26

Требуемая модель должна иметь минимально возможный диаметр полости ( $\leq 10$  мм) и для обеспечения необходимой изотермичности должна быть выполнена из материала с максимально возможной теплопроводностью. Наиболее приемлемым материалом для экспериментальных исследований является обладающая высокой теплопроводностью медь. Теплопроводность меди в значительной степени зависит от её чистоты. Для модели АЧТ с диаметром полости 10 мм была использована медь М1 (99,9 % ГОСТ 1535-2006), теплопроводность которой при 100 °С в 3,3 и 7,1 раз выше теплопроводности соответственно графита МПГ-6 и

## Проблемы автоматизации, механизации и компьютеризации процессов литья

стали Зсп [2]. Наружный диаметр модели согласован с внутренним диаметром рабочей огнеупорной керамической трубы нагревательной печи и составляет 20 мм, а длина полости и модели соответственно – 100 и 110 мм. Для изучения влияния материала и заглубления модели в печь на изотермичность её излучающей полости, а также для обеспечения последующих экспериментальных исследований разработана и изготовлена соответствующая установка (рис. 1).

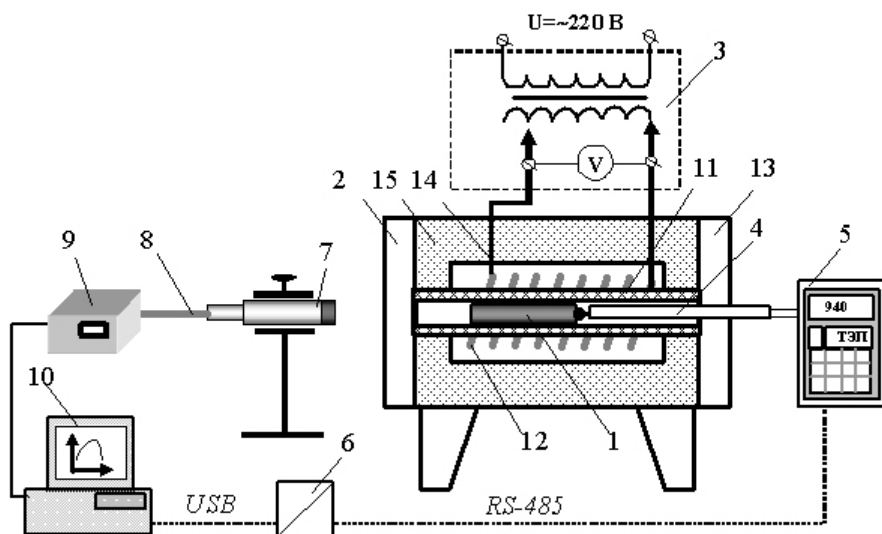
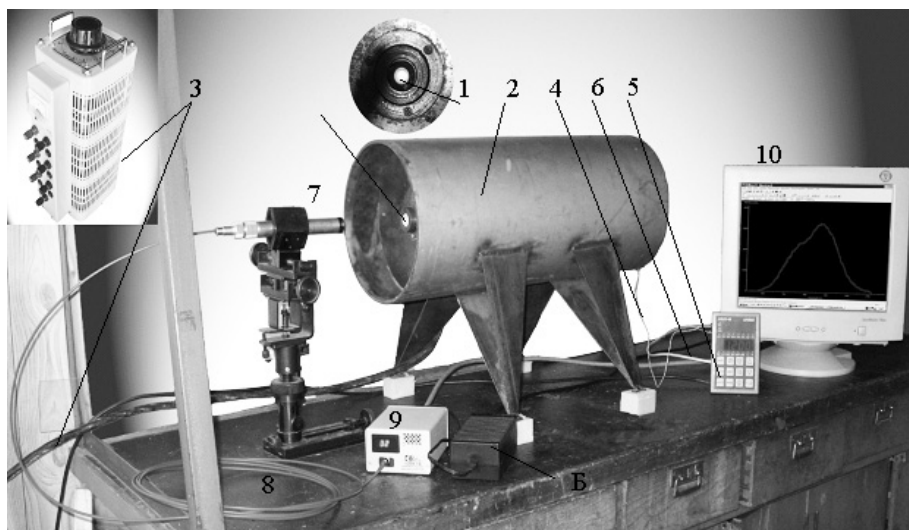


Рис. 1. Установка для градуировки системы многоцветовой СВПИ: установка состоит из модели АЧТ – 1, нагревательной печи 2 с источником электропитания 3, термоэлектрического преобразователя 4 с вторичным измерительным преобразователем 5, преобразователя интерфейса 6 и многоцветовой пирометрической системы, которая включает фокусирующее устройство 7, волоконно-оптический кабель 8, многоцветовое детектирующее устройство 9 и персональный компьютер 10. Нагревательная печь 2 состоит из рабочей огнеупорной керамической трубы 11, спирального резистивного электронагревателя 12, металлического кожуха 13, защитной керамической трубы 14. Зазор между кожухом 13, а также трубами 14 и 11 уплотнён корундовой ватой 15

На рис. 2 представлены результаты исследований для выполненных из меди, графита и углеродистой стали моделей АЧТ. Медь и сталь обладают максимальной и

минимальной соответственно, для исследованных материалов теплопроводностью и поэтому находятся в крайних (по максимальной и минимальной изотермичности) положениях. Часто используемый для моделей АЧТ графит по своей теплопроводности и изотермичности полости занимает промежуточное положение. Изотермичность оценивалась перепадом температур ( $\Delta t$ ) поверхности дна и удалённого от него на 5-10 радиусов выхода полости. На указанной безразмерной относительной длине нормальная эффективная излучательная способность дна изотермической полости из графита, а также меди и стали соответственно составляет 0,996 и 0,999, а также 0,991 и 0,998. В реальных условиях, за счёт установленных более низкой изотермичности графитовой и стальной моделей, эффективная излучательная способность их дна будет ниже указанных значений. Существенное повышение эффективной излучательной способности металлических моделей АЧТ связано с окислением и значительным повышением  $\varepsilon$  поверхности их излучающей полости. Излучательная способность открытой поверхности графита и окисленных не ниже 0,9 и 0,8 меди и стали повышается со временем за счёт пористости и степени окисления [3]. Методические погрешности измерений температуры на  $\lambda_1 = 0,75$ ,  $\lambda_2 = 0,85$  и  $\lambda_3 = 0,95$  мкм для 5-ти, а также 10-ти радиусов и указанных для изотермических условий значений излучательной способности графитовой полости соответственно не превышают 0,019; 0,022 и 0,024, а также 0,004; 0,005 и 0,006 %, а металлических – 0,044; 0,050 и 0,056, а также 0,009; 0,011 и 0,012 %. Указанные погрешности, как минимум, в 4...50 раз меньше погрешностей измерений одноцветовых температур излучения, удовлетворяют требования экспериментальных исследований и поэтому являются незначительными. Однако приведённые количественные оценки приемлемы только для изотермических условий, то есть для меди. Для графита и стали за счёт более низкой изотермичности нормальная эффективная излучательная способность дна полости будет ниже, а погрешности выше приведённых значений.

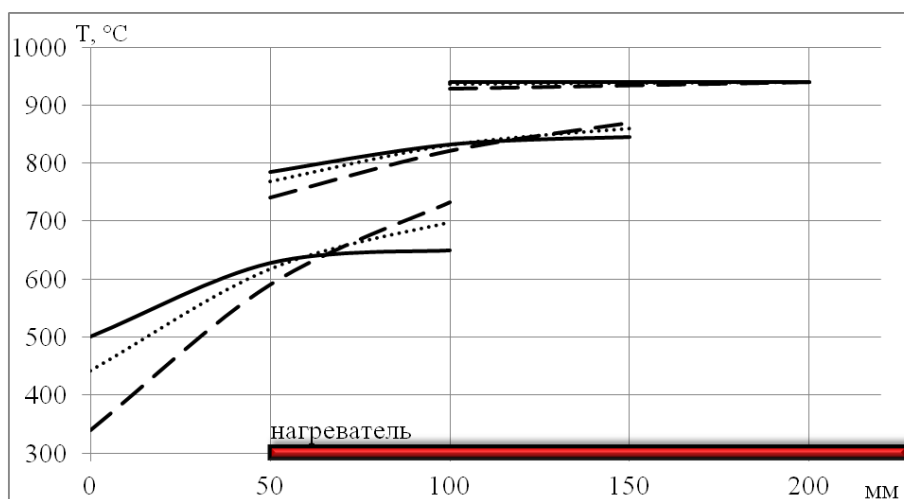


Рис. 2. Изменение изотермичности моделей АЧТ от заглублиения в печь

При одинаковом заглублиении в печь  $\Delta t$  минимален для медного, возрастает для графитового и максимален для стального АЧТ. Например, при температуре нагревательной печи 940 °C, для заглублиения АЧТ в печь 100 мм, на безразмерной длине 10 радиусов полости  $\Delta t$  для указанных материалов соответственно составляет  $\leq 0,5$ ; 2,0 и 6,0 °C. В целом для остальных исследованных заглублиений 0 и 50 мм  $\Delta t$  для меди, графита и стали – 22, 81, 142 и 13, 28, 48 °C. Для безразмерной длины полости 5-ти радиусов  $\Delta t$  ниже указанных величин – практически в 2 раза. При температурах ниже 940 °C  $\Delta t$  будет снижаться за счёт уменьшения отвода тепла излучением из полости

## **Проблемы автоматизации, механизации и компьютеризации процессов литья**

в соответствии с термодинамическим законом Стефана-Больцмана, включающим температуру в четвертой степени. Кроме того,  $\Delta t$  дополнительно снижается из-за более высокой теплопроводности меди при температурах  $< 940$  °С.

Таким образом, в результате исследований влияния материалов и заглабления модели АЧТ на её изотермичность доказана перспективность использования для средних температур меди, а также разработаны схемы размещения моделей в нагревательной печи и экспериментальная установка.

Установлено, что в одинаковых условиях нагрева изотермичность медной модели в 3,3 раза выше, чем у графитовой, и тем более стальной. Оптимальное заглабление для изотермичности на 10-ти радиусах минимально для медной модели и составляет 100 мм. При одинаковом заглаблении в печь перепад температур поверхности дна и выхода полости минимален для медного, возрастает для графитового и максимален для стального АЧТ. Например, при заглаблении 100 мм  $\Delta t$  на безразмерной длине полости 10-ти радиусов для медной, графитовой и стальной моделей соответственно составляет  $\leq 0,5$ ; 2,0 и 6,0 °С.

Установка состоит из модели АЧТ, нагревательной печи с источником электропитания, термоэлектрического преобразователя с вторичным измерительным преобразователем, преобразователя интерфейса и многоцветовой пирометрической системы, которая включает фокусирующее устройство, волоконно-оптический кабель, многоцветовое детектирующее устройство и персональный компьютер.



### **Список литературы**

1. Жуков Л. Ф. Новые технологии многоцветовой симметрично-волновой термометрии и их метрологические характеристики / Л. Ф. Жуков, А. Л. Корниенко // Инженерно-физический журнал. – 2014. – № 2 (87). – С. 473-482.
2. Измерения теплофизических свойств графитовых композитов для конвертора нейтронной мишени / Е. И. Жмуриков, И. В. Савченко, С. В. Станкус, L. Teschio // Вестник НГУ. – 2011. – № 2. – С. 77–84.
3. Излучательные свойства твёрдых материалов: Справочник. / Под ред. А. Е. Шейндлина. – Москва: Энергия. – 1974.

Поступила 05.10.2015