

## ПИРОМЕТР ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ РАСПЛАВОВ

В статье описан новый подход к измерениям температуры расплавов при помощи оптоволоконного пирометра. Проведен аналитический обзор методов и средств измерения температуры высокотемпературных расплавов. Приведены эксплуатационные характеристики материалов чехлов для контактной термометрии. Представлены расчеты и экспериментальные результаты по обоснованию спектральных характеристик материалов тигля излучателя, тип модели абсолютно черного тела. Отражен расчет конструкции тигля. Приведены результаты натуральных испытаний предложенного пирометра при измерениях температуры расплава в закалочной печи на Омском предприятии ОАО «Омсктрансаш».

**Ключевые слова:** абсолютно черное тело, температура расплавов, коэффициент черноты, тигель, пирометр, визирная труба.

**Введение.** В современной металлургической промышленности большинство технологических процессов связано с необходимостью обеспечения и контроля заданных температурных режимов. В связи с этим особую роль играют точные температурные измерения в наиболее распространенных процессах выплавки металлов [1].

Для решения задач измерений температуры расплавов в разное время предлагались различные методы. Например, пирометрическое измерение по излучению открытой поверхности, метод визирной трубы, метод продуваемой трубы, погружение контактных термопреобразователей в расплав и др. [2, 3].

Анализ задачи показал, что для решения вопросов измерения температуры расплавов известные способы измерения можно разделить на две группы: контактные и бесконтактные (пирометрические).

К достоинствам контактных способов измерений можно отнести их простоту и достаточную точность измерений, а к недостаткам — большую инерционность процесса измерений, недолговечность защитных чехлов. В работе [4–6] предложено использование одноразовых термоэлектрических преобразователей без защитных чехлов, что приводит к значительному удорожанию измерительного процесса за период плавки, а сам процесс становится дискретным.

Примером широкого применения контактных измерений в промышленной термометрии для измерения температуры расплавов является применение термопреобразователей со сменными чехлами. В таких преобразователях предусматривается простая замена чехла при его повреждении, при этом основное внимание уделяется выбору материала чехла.

В табл. 1 приведены сравнительные характеристики сталей для защитных чехлов.

Для температур в диапазоне 1000–1600° С используются керамические материалы из карбида кремния, бериллия, титаната бария.

К достоинствам пирометрического способа измерения температуры можно отнести возможность проводить измерения бесконтактно и с высоким быстродействием. Общим недостатком пирометрических измерений является высокая погрешность при измерениях, связанная, прежде всего, с неопределенностями коэффициентов черноты, зависящих от состояния поверхностей расплавов и контролируемой температуры, влияния поглощенной промежуточной среды. Кроме того, процессы выплавки сопровождаются шлакообразованиями, которые также не позволяют вести измерения с необходимой точностью.

Для исключения этих неопределенностей в [7, 8] был предложен пирометрический метод с визирной погружной трубой. При измерении температуры этим методом пирометр визируется на дно погруженного в расплав наконечника трубы. Если расстояние от чувствительного элемента до дна наконечника в 10 раз больше внутреннего радиуса визирной трубы, то в этом методе практически воспроизводится полость абсолютно черного тела и пирометр показывает истинную температуру независимо от того, из какого материала изготовлена труба. Основной проблемой при применении этого метода является выбор материала визирной трубы. Следует отметить, что проблема выбора термостойких материалов для визирного метода измерения температур является менее сложной, чем при применении высокотемпературных термопар в чехлах с однозначной взаимозаменяемой градуировкой,

Сравнительные характеристики сталей по стойкости арматуры

Марка сплава	Рекомендуемая температура применения, °С	Температура окалинообразования, °С	Срок работы, ч
15X25T	1000	1050	1000
08X13	650	750	1000
12X18H10T	800	850	10000
08X20H14C2	—	1000...1050	1000
08X17H15M3T	600	—	
10X17H13M2T	600–900	—	
12X18H9T	800	850	10000
ХН45Ю	1250...1300	—	1000
08X18H10T	800	850	1000
X23Ю5	1200	1300	1000
ХН78Т	1000	1050	1000

так как к термостойким материалам термоэлектродов и их армировке предъявляется ряд дополнительных жестких требований.

В работе [9] предлагалось визирную трубу изготавливать из графита, так как это единственный материал, прочность которого увеличивается с повышением температуры. Но из-за склонности к окислению и относительно большой тепловой инерционности графит не получил широкого применения для изготовления визирных труб.

В настоящей работе предлагается аналог метода с визирной трубой, но излучатель в виде полости модели АЧТ необходимо изготавливать в виде отдельного тигля из прозрачного для теплового излучения материала [10]. При этом в качестве радиационного пирометра целесообразно использовать оптоволоконный пирометр. Принципиальным отличием нового метода является то, что в качестве материала тигля предлагается использовать материал прозрачный в спектральном диапазоне излучений расплавов. При этом сам расплав, излучающий через стенки тигля, будет формировать излучающую полость типа модели АЧТ.

Функциональная схема реализации предлагаемого метода представлена на рис. 1. Тигель 3 из оптически прозрачного материала помещается в ванну 1 с расплавом 2. На дно тигля визируется оптическая головка пирометра 4.

Обоснование выбора спектральной прозрачности материала тигля проводилось на основе расчётов по функции Планка:

$$r(\lambda) = \frac{2\pi c^2}{\lambda^5} \frac{h}{e^{\frac{hc}{k\lambda T}} - 1},$$

где  $h$  — постоянная Планка,  $c$  — скорость света,  $k$  — постоянная Больцмана,  $\lambda$  — длина волны,  $\pi$  — математическая константа.

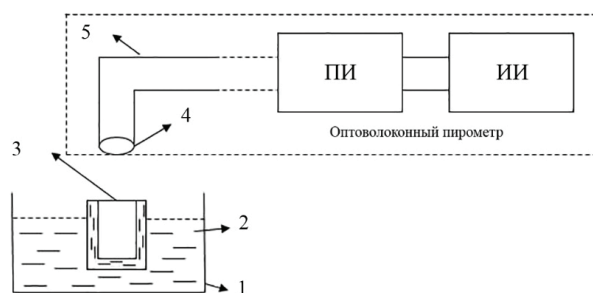


Рис. 1 Функциональная схема метода:

- 1 — ванна; 2 — расплав металла; 3 — тигель;  
4 — оптическая линза на торце оптоволоконного пирометра;  
5 — оптоволоконно; ПИ — преобразователь излучения;  
ИИ — измерительный индикатор

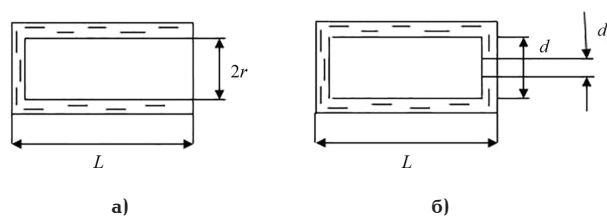


Рис. 2. Эскиз полости АЧТ:

- а — без диафрагмы; б — с диафрагмой;  
L — длина цилиндра; r — радиус цилиндра;  
 $d_0$  — диаметр отверстия диафрагмы; d — диаметр цилиндра

По результатам полученных расчётных кривых были обоснованы требования к диапазону спектральной прозрачности материала тигля, который составил 1,5–5 мкм. Анализ справочных данных по оптическим материалам [11] позволил выбрать удовлетворяющие этим требованиям кварцевые стёкла марок КИ и КВ. Спектральные характери-

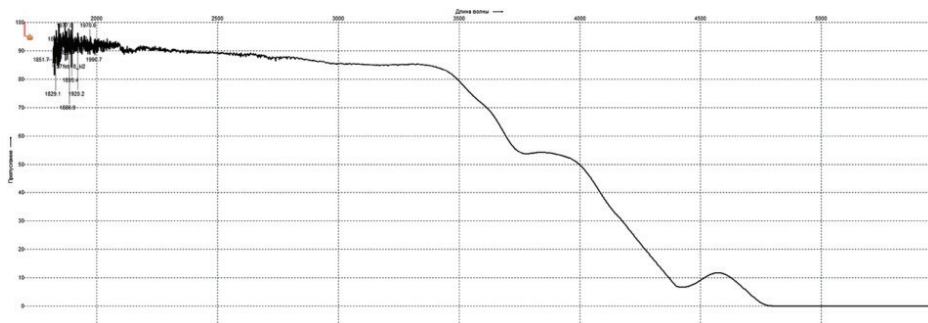


Рис. 3. Спектральная характеристика кварцевого стекла марки КИ

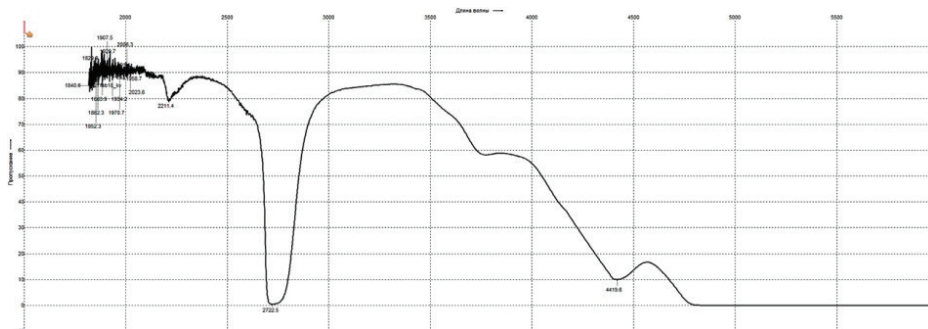


Рис. 4. Спектральная характеристика кварцевого стекла марки КВ

стики образцов выбранных материалов были экспериментально проверены на ИК фурье-спектрометре «ФТ 801».

Для конструктивных расчётов излучателя типа модели АЧТ была выбрана цилиндрическая форма модели АЧТ, так как эта форма полости удобна для практического изготовления. Для такой модели на основании методики расчётов, приведённой [12], были проведены, расчёты геометрических параметров излучателя в виде модели АЧТ.

Расчёт излучателя производился по формуле Гуффе (1)

$$\xi' = \frac{\xi(1 + (1 - \xi)\left(\frac{\sigma}{S} - \frac{\sigma}{S_0}\right))}{\xi\left(1 - \frac{\sigma}{S}\right) + \frac{\sigma}{S}}, \quad (1)$$

где  $\xi$  — коэффициент излучения стенок полости;  $\sigma$  — площадь отверстия в полости;  $S$  — полная площадь поверхности полости;  $S_0$  — расстояние между плоскостью отверстия и самой дальней точкой полости.

Тогда при коэффициенте излучения материала тигля  $\sigma = 0,9$  (для стекла марки КИ) и соотношении  $L/r = 10$  рассчитанная по формуле (1) относительная излучательная способность полости будет равна  $\xi' = 0,999$ .

Эскиз излучающей полости приведён на рис. 2а.

Конструкции тигля после диафрагмирования с целью обеспечения большей изотермичности полости представлена на рис. 2б.

Упрощённая расчётная формула для диафрагмированной цилиндрической полости представится как:

$$\xi' = 1 - \frac{\rho \cdot r_g^2}{\left(\frac{L}{r}\right)^2},$$

где  $r_g$  — радиус отверстия диафрагмы;  $\rho$  — коэффициент отражения материала стенки полости.

После диафрагмирования при коэффициенте излучения материала тигля  $\xi = 0,9$  и соотношении  $d_0/d = 0,1$ , и сохранении условия  $L/r = 10$ , расчётный коэффициент излучения увеличивается до  $\xi' > 0,999$ .

По результатам расчетов были получены следующие геометрические размеры конструкции излучательного тигля:  $L = 100$  мм;  $r = 10$  мм;  $d_0 = 2$  мм.

На рис. 3 и 4 представлены результаты экспериментальных исследований спектральных характеристик материалов для тигля.

Особый интерес для этой задачи представляют зависимости коэффициента поглощения выбранных материалов от температуры среды. В работе была проведена серия экспериментов по выявлению этой зависимости, т.к. в литературе такие сведения отсутствуют.

Для выявления влияния температуры на характеристики стекла были проведены исследования на установке, функциональная схема которой представлена на рис. 5.

На рис. 6 приведено семейство экспериментальных зависимостей поглощения для стекла марки КИ при изменении температуры стекла от  $500$  °С до  $1100$  °С.

Опытные испытания оптоволоконного пирометра с тиглем из кварцевого стекла марки КИ были проведены на печи для изотермической закалки режущего инструмента в расплаве хлор-бариевой соли на омском предприятии ОАО «Омсктрансмаш». Параллельно измерениям, считываемым с пирометра, осуществлялся контроль температуры расплава при помощи вольфрам-рениевой термопары с чехлом из стали марки ХН45Ю, штатно установленной на печи.

Эксплуатационные характеристики печи приведены в табл. 2.



Рис. 5. Функциональная схема экспериментальной установки

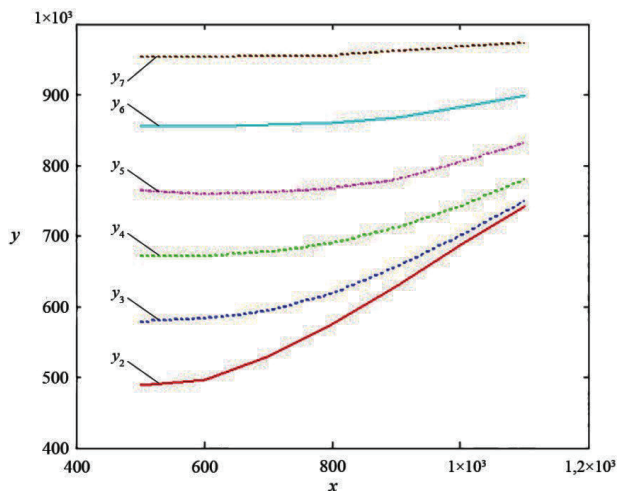


Рис. 6. Семейство зависимостей в диапазоне 500–1100 °С:  $y_2$  — АЧТ 500;  $y_3$  — АЧТ 600;  $y_4$  — АЧТ 700;  $y_5$  — АЧТ 800;  $y_6$  — АЧТ 900;  $y_7$  — АЧТ 1000;  $x$  — температура стекла;  $y$  — показания пирометра

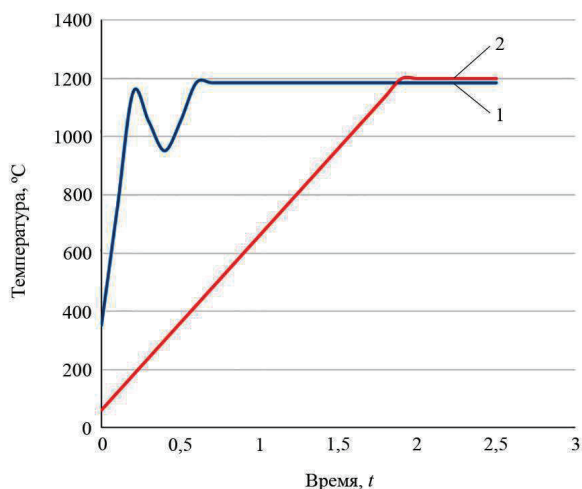


Рис. 7. Результаты сравнительных измерений температуры расплава: 1 — пирометром; 2 — термопарой

На рис. 7 приведены результаты опытных испытаний пирометра.

**Выводы.** Результаты испытаний подтвердили возможность измерений температуры расплавов оптоволоконным пирометром с тиглем из кварцевого стекла.

Анализ полученных результатов экспериментальных данных, представленных на рис. 6, позволил сделать вывод о прозрачности стекла марки КИ в диапазоне температур 900–1100 °С.

Уменьшение показаний пирометра на интервале от 0,2 до 0,6 с после начала измерений объ-

Общие характеристики исследуемой закалочной печи

Характеристика	Расшифровка
Тип	Печь закалки инструмента (ПЗИ)
Размеры ванны	Диаметр ванны 500 мм, глубина 1000 мм
Среда закалки	Соль хлор-бариевая
Тип нагрева	Электродуговой
Наименование	Печь для изотермической закалки режущего инструмента
Тип СИ для контроля и регулирования температуры	Потенциометр самопишущий КСП-3 класс точности 0,5 совместно с термопарой типа ТПР(В) 001-2-1250-3-0,5/0,5
Рабочая температура	1240 °С

ясняется, как видно из приведённых на рис. 6 экспериментальных кривых, значительным поглощением материала тигля при температурах от 500 до 900 °С.

На участке установившихся показаний температуры результаты измерений с выхода пирометра и термопары отличаются не более чем на 1,4 %, что объясняется незначительным поглощением излучения тиглем при температурах более 900 °С. При этом быстродействие измерений пирометром относительно термопары уменьшается с 1,7 минуты до 0,6 минуты, что позволит реализовать релейное регулирование температуры расплава, избежать его перегрев и уменьшить электропотребление печи.

Следует отметить, что срок службы чехла из материала ХН45Ю не превышает 1000 часов (табл. 1), после чего происходит разрушение всей дорогостоящей термопары. В предложенном пирометре разрушение тигля не приведёт к выходу из строя всего пирометра.

Библиографический список

- Смирнов А. Н., Неделькович Л., Джурджевич М. [и др.]. Расчет температуры ликвидус стали // *Сталь*. 1996. № 3. С. 15–19.
- Жуков Л. Ф., Гончаров А. Л., Бунза А. Б. [и др.]. Термoeлектрический и оптический периодический контроль температуры металла // *Литье-2013: материалы IX Междунар. науч.-практ. конф.*, 21–24 мая 2013 г / под общ. ред. О. И. Пономаренко. Запорожье, 2013. С. 80–81.
- Жуков Л. Ф., Захарченко Э. В., Сиренко Е. А. Термографический экспрессный контроль химического состава чугуна // *Литье-2013: материалы IX Междунар. науч.-практ. конф.*, 21–24 мая 2013 г / под общ. ред. О. И. Пономаренко. Запорожье, 2013. С. 81–83.
- Белевцев А., Богатов В., Каржавин А. [и др.]. Термoeлектрические преобразователи температуры. Теория, практика, развитие // *В записную книжку инженера*. 2004. № 2. С. 66–76.
- Неделько А. Ю. Замена термoeлектрических преобразователей бесконтактными ИК-преобразователями // *Изве-*

стия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2010. № 4. С. 138–141.

6. Santos M. C., Araujo J. S., Filho M. [et al.]. Development and application of a temperature measurement device using the tool-workpiece thermocouple method in turning at high cutting speeds // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2017. Vol. 89, Issue 5-8. P. 2287–2298. DOI: 10.1007/s00170-016-9281-1.

7. Khokhryakov A. A., Paivin A. S., Noritsyn S. I. Spectral-analytical system for recording the electronic spectra of high temperature melts and its technical frontier // Russian Metallurgy (Metally). 2014. Vol. 2014, Issue 2. P. 166–171. DOI: 10.1134/S0036029514020074.

8. Gancarz T., Gasior W., Henein H. The Discharge Crucible Method for Making Measurements of the Physical Properties of Melts: An Overview // International Journal of Thermophysics. 2014. Vol. 35, Issue 9-10. P. 1725–1748. DOI: 10.1007/s10765-014-1748-4.

9. Вапник М. А. Некоторые вопросы измерения высоких температур сливаемых расплавов методом / Институт металлургии (Академия наук СССР), 1966.

10. Sanditov D. S., Mashanov A. A., Darmaev M. V. Cooling rate of melts and glass transition temperature // Physics of the Solid State. 2017. Vol. 59, Issue 2. P. 348–350. DOI: 10.1134/S106378341702024X.

11. Гусевский стекольный завод имени Ф. Э. Дзержинского. URL: [http://www.szd.rusglass.ru/product\\_02.html](http://www.szd.rusglass.ru/product_02.html) (дата обращения: 14.03.2017).

12. Криксунов Л. З. Справочник по основам инфракрасной техники. М.: Советское Радио, 1978. 400 с.

**ЗАХАРЕНКО Владимир Андреевич**, доктор технических наук, доцент (Россия), заведующий кафедрой «Электроника» Омского государственного технического университета (ОмГТУ).

SPIN-код: 2501-4655

AuthorID (РИНЦ): 685994

AuthorID (SCOPUS): 7006028243

Адрес для переписки: zaha\_vl@mail.ru

**ВЕПРИКОВА Яна Романовна**, студентка группы ЭН-141 радиотехнического факультета ОмГТУ.

SPIN-код: 4531-3266

AuthorID (РИНЦ): 828172

AuthorID (SCOPUS): 57193402451

Адрес для переписки: yana.veprikova.1996@mail.ru

**КРОПАЧЕВ Денис Юрьевич**, главный инженер АО НПП «Эталон», г. Омск.

AuthorID (РИНЦ): 500286

Адрес для переписки: mazila79@yandex.ru

#### Для цитирования

Захаренко В. А., Веприкова Я. Р., Кропачев Д. Ю. Пирометр для измерения температуры расплавов // Омский научный вестник. 2018. № 4 (160). С. 114–118. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-160-114-118.

Статья поступила в редакцию 18.04.2018 г.

**В. А. Захаренко, Я. Р. Веприкова, Д. Ю. Кропачев**