

Несмотря на то, что параметры были взяты усреднено, удалось выявить наиболее подверженные эрозии участки и подтвердить ранее выдвигаемые предположения.

Следующим шагом планируется увеличить количество трубок воздухоподогревателя, уменьшить размеры сетки и выполнить расчет с параметрами, близкими к реальным, что позволит перейти к верификации модели.

### Список использованных источников

1. Добряков Т.С., Мигай В.К., Назаренко В.С. Воздухоподогреватели котельных установок. – Д.: «Энергия», 1977. – 184 с.
2. Апатовский Л.Е., Фомина В.Н., Халупович В.А. Подогрев воздуха на тепловых электростанциях. – М.: «Энергоатомиздат», 1986. – 120 с.
3. Мигай В.К. Моделирование теплообменного энергетического оборудования. – Л.: «Энергоатомиздат», 1987. – 264 с.
4. Levin B.F. Modeling solid-particle erosion of ductile alloys / B.F. Levin [et al.] // Metall. Mater. Trans. A. – 1999. – № 30 (7). – Pp. 1763–1774.
5. Parsi M.A comprehensive review of solid particle erosion modeling for oil and gas wells and pipelines applications / M. Parsi, [et al.] // J. Nat. Gas Sci. Eng. 2014. № 21. – Pp. 850–873.

УДК 536.5:669.187.2

**Т. Г. Сухоносова, Е. И. Васильева**

ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия

### МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ЖИДКОГО МЕТАЛЛА В МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ПЕЧИ

**Аннотация.** В работе рассмотрены контактные и бесконтактные методы измерения температуры жидкого металла в металлургической печи. В связи с высокими температурами расплава непрерывное измерение контактными методами затруднено. Рассмотрены термопары разового погружения для точного измерения температуры стали перед выпуском. Для бесконтактного контроля температуры во время процесса доводки можно использовать пирометры. Также в работе рассмотрен косвенный метод измерения температуры с помощью многозонной термопары. Многозонная термопара устанавливается в огнеупорной кладке печи и не соприкасается с расплавом, представляет собой от 3 до 5 кабельных термоэлектрических преобразователя разделенных изолирующей засыпкой и находящихся в общем чехле. Каждая термопара отличается по длине, и ее рабочий спай находится на различном расстоянии от границы кладки печи с жидкой сталью. Поэтому термопары будут измерять температуры в различных по толщине огнеупорной кладки точках. С помощью численного решения обратной задачи теплопроводности возможно рассчитать текущую температуру жидкой стали.

**Ключевые слова:** *методы измерения, многозонная термопара, измерение температуры, косвенный метод измерения, температура жидкого металла.*

**Abstract.** *The paper considers contact and non-contact methods for measuring the temperature of liquid metal in a metallurgical furnace. Due to the high melt temperatures, continuous measurement by contact methods is difficult. Single-dip thermocouples for accurate measurement of steel temperature before release are considered. For non-contact temperature control during the finishing process, pyrometers can be used. The paper also considers an indirect method of measuring temperature using a multi-zone thermocouple. The multi-zone thermocouple is installed in the refractory masonry of the furnace and does not come into contact with the melt, it consists of 3 to 5 cable thermoelectric converters separated by an insulating backfill and located in a common cover. Each thermocouple differs in length, and its working junction is located at a different distance from the boundary of the furnace masonry with liquid steel. Therefore, thermocouples will measure temperatures at points with different thicknesses of refractory masonry. Using the numerical solution of the inverse problem of thermal conductivity, it is possible to calculate the current temperature of liquid steel.*

**Key words:** *methods of measurements, multi-zone thermocouple, temperature measurement, indirect method of measurement, liquid metal temperature.*

Температура и состав жидкого металла в металлургических печах являются определяющими фактором качества получаемой марки стали. Автоматизация контроля температуры металла во время плавки способствует созданию быстродействующих систем автоматического регулирования, сокращению продолжительности плавки, экономии ресурсов. В связи с чем постоянно совершенствуются методы и средства измерения температуры жидких расплавов.

Рассмотрим метод измерения температуры жидкого металла в металлургической печи с помощью термопары разового погружения. Предложенный термоэлектрический преобразователь изготовлен из термопарного кабеля с минеральной изоляцией, включающего термоэлектроды и металлическую оболочку, часть которого со стороны рабочего спая помещена в защитный металлический наконечник, отличающийся тем, что рабочий спай выполнен изолированным от оболочки, а оболочка термопарного кабеля припаяна к защитному наконечнику в зоне рабочего спая. Этот преобразователь, изображённый на рисунке 1, используется для контроля температуры жидких расплавов металлов.

Термоэлектрический преобразователь изготавливают следующим образом. Для изготовления защитного наконечника используют капилляр, заваренный, с одной стороны. Из термопарного кабеля, включающего минеральную изоляцию 1, термоэлектроды 2 и металлическую оболочку 3 изготавливают термопару с изолированным рабочим спаем 4. В защитный наконечник, расположенный заваренной стороной вниз, бросают кусочек припоя, например, кусочек медной проволоки. В защитный наконечник 5 вставляют термопару рабочим спаем 4 вниз и разогревают припой 6 с помощью горелки. В момент плавления термопару «проталкивают» до упора, горелку выключают. Процесс занимает меньше минуты [1].

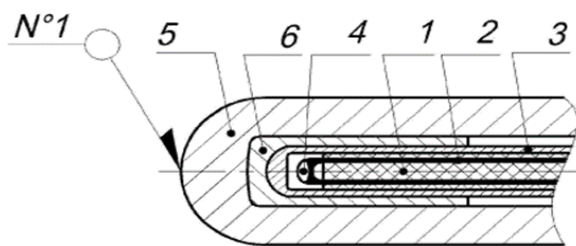


Рис. 1. Термоэлектрический преобразователь:

1 – минеральная изоляция; 2 – термоэлектроды; 3 – металлическая оболочка;  
4 – рабочий спай; 5 – защитный наконечник; 6 – припой

Отличительной особенностью предлагаемого термоэлектрического преобразователя является то, что рабочий спай выполнен изолированным от оболочки, а оболочка термопарного кабеля припаяна к защитному наконечнику в зоне рабочего спая. Дополнительно предлагается оболочку кабеля термопарного припаять к наконечнику в зоне рабочего спая припоем с температурой плавления выше температуры термометрируемой среды. В качестве припоя могут использоваться чистые металлы или сплавы на их основе.

Выполнение термопреобразователя с изолированным от оболочки рабочим спаем предотвращает обрыв термоэлектродов в зоне спая в момент погружения датчика в термометрируемую среду и в момент извлечения термопреобразователя из среды. Припайвание оболочки кабеля к защитному наконечнику в зоне рабочего спая устраняет зазор между оболочкой и внутренней поверхностью металлического наконечника, препятствующий быстрой передаче теплового потока к оболочке кабельной термопары. Причём зазор заполнен припоем на основе металлов, имеющих высокий коэффициент теплопроводности, что позволяет снизить показатель тепловой инерции, а, следовательно, и время взаимодействия термопреобразователя со средой. Таким образом достигается увеличение ресурса – количества замеров, которое напрямую зависит от времени проведения замера, т.к. во время взаимодействия со средой происходит химическое взаимодействие, разрушающее термопреобразователь.

В последнее время в литейном производстве находят все большее применение бесконтактные пирометрические методы контроля температуры (рис. 2). Их используют для измерения температуры струи жидкого металла, например при сливе его из печи или ковша, когда применение термопары практически невозможно.

Пирометр состоит из оптического преобразователя, содержащего в своём составе первичный преобразователь и устройства для охлаждения и защиты, вторичного прибора и электронного блока для градуировки пирометра по термопаре непосредственно на объекте.

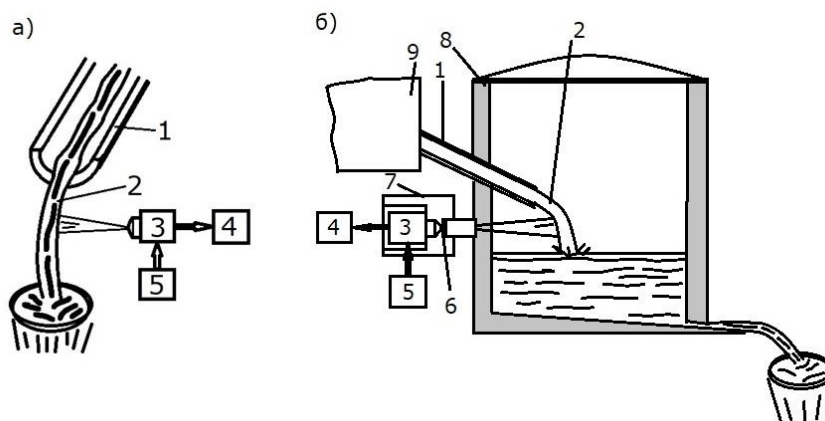


Рис. 2. Схема бесконтактного измерения температуры ваграночного чугуна:  
*а* – открытой струи; *б* – струи в копильнике: 1 – желоб; 2 – струя металла;  
 3 – пирометр; 4 – измерительный прибор; 5 – блок питания;  
 6 – кварцевое защитное стекло; 7 – кожух; 8 – копильник; 9 – вагранка

В качестве приёмников излучения в пирометрах используют германиевый или кремниевый фотодиоды, которые могут работать в двух режимах: генераторном и фотодиодном. Подбирают такой режим работы фотодиода, при котором обеспечивается сигнал, достаточный для регистрации вторичным прибором без предварительного преобразования.

Новым направлением в пирометрии является использование для передачи светового сигнала к системе измерения специальных световодов, уложенных в футеровку тигля. Такой способ температурного контроля может решить задачу автоматизации теплового режима индукционной плавки и обеспечить стабильное получение качественного металла при минимальных затратах [2]. Измерение температуры при этом не мешает технологическому циклу плавки, не требует затрат рабочего времени на установку и контроль положения пирометра.

Рассмотрим косвенный метод измерения температуры жидкого металла с помощью многозонной термопары (рис. 3), расположенной в кладке печи и не соприкасающейся с расплавленным металлом [4].

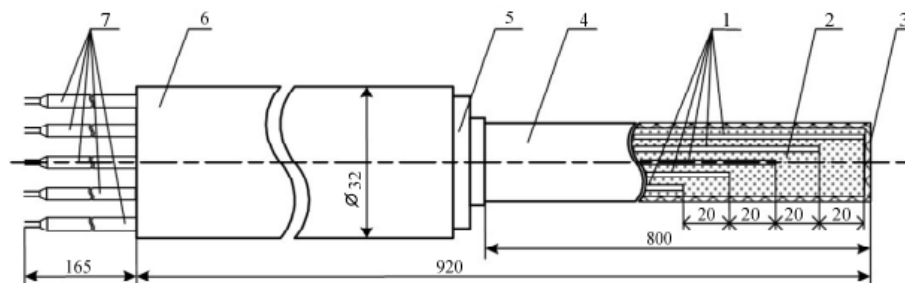


Рис. 3. Многозонная термопара:  
 1 – кабельные термопары градуировки ТХА или ТНН (нихросил-нисил);  
 2 – изолирующая засыпка из порошка  $Al_2O_3$ ; 3 – крышка рабочей части;  
 4 – рабочая часть термопары (жароупорная сталь); 5 – сварочный шов;  
 6 – внешний чехол (сталь 12X18H10T);  
 7 – компенсационные кабели для термопар

В основе этого метода лежит измерение температуры по толщине огнеупорной кладки дуговой сталеплавильной печи с помощью термодатчиков, замурованных в кладку печи. Температура активного слоя огнеупорной кладки измеряется в 3-5 равноотстоящих точках по толщине (до 80 мм) от границы раздела «жидкая сталь – огнеупорная кладка».

Определение текущего изменения температуры во времени и по толщине активного слоя кладки осуществляется путём численного решения типового одномерного уравнения теплопроводности при двух пограничных условиях: на границе жидкой стали с кладкой ( $x=0$ ) и на границе кладка – окружающая среда ( $x=S$ ).

$$c'(t) \frac{\partial t(x,\tau)}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \lambda(t) \frac{\partial t(x,\tau)}{\partial x} \right], \quad (1)$$
$$0 \leq x \leq S,$$

где  $t(x, \tau)$  – распределение температуры по толщине огнеупорной кладки во времени, К;  $\tau$  – текущее время, с;  $S$  – толщина огнеупорной кладки, м;  $c'(t)$  – удельная объемная теплоемкость материала кладки, Дж/(м<sup>3</sup>·К);  $\lambda(t)$  – теплопроводность материала, Вт/(м·К),  $c'(t)$  и  $\lambda(t)$  – функции температуры [5].

В каждый момент времени необходимо осуществлять подбор такого значения температуры жидкой стали, при котором непрерывное распределение температуры по толщине кладки, полученное при решении прямой задачи (1) теплопроводности, совпадало бы с измеренными температурами в дискретных точках.

В результате проверки метода на опытном стенде было выяснено, что для снижения погрешности измерения температуры расположение датчиков по толщине огнеупорной кладки должно быть на одном уровне в виде многозонной термопары. С увеличением глубины закладки датчиков температуры максимальная величина погрешности возрастает практически по линейной зависимости [6].

Для более точной установки многозонной термопары в месте удобном для обслуживания необходимо использовать огнеупорный блок из материала огнеупорной кладки, установленный заподлицо с поверхностью кладки. При установке блока обязательно тщательно заполняется густым раствором из материала огнеупорной кладки. Огнеупорный блок в центре имеет установочное отверстие, диаметр которого соответствует размеру рабочей части термопары.

Косвенный метод определения температуры жидкого металла с помощью многозонной термопары характеризуется достаточно высокой точностью  $\pm 9$  °С, простотой эксплуатации, высокой надежностью и долговечностью.

### Список использованных источников

1. Термоэлектрический преобразователь для измерения температуры методом кратковременного погружения в термометрируемую среду / А.В. Каржавин, В.А. Каржавин // Международная патентная классификация: Измерение температуры на основании использования термочувствительных электрических

или магнитных элементов с использованием термоэлектрических элементов, например термопар. 2013.

2. Автоматизация контроля параметров плавки / С.Ю. Калякулин, Э.В. Митин, Т.В. Травкина // XLVI Огарёвские чтения. Издательство: Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва. 2017. – С. 150-154.

3. Информационные системы в металлургии / Н.А. Спиринов, Ю.В. Ипатов, В.Н. Лобанов [и др.]. – Екатеринбург: УГТУ–УПИ, 2001. – 617 с.

4. Непрерывный контроль температуры жидкой стали в технологических агрегатах металлургического производства / Б.Н. Парсункин., С.М. Андреев, А.Р. Бондарева, У.Б. Ахметов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». 2018. Т. 18, № 3. – С. 33-41.

5. Арутюнов В.А. Математическое моделирование тепловой работы промышленных печей: учебник для вузов / В.А. Арутюнов, В.В. Бухмиров, С.А. Крупенников. – М.: Металлургия, 1990. – 239 с.

6. Автоматизация и оптимизация управления технологическими процессами внепечной доводки стали / Е.Н. Ишметьев, С.М. Андреев, Б.Н. Парсункин [и др.]. – Магнитогорск: изд-во Магнитогорского гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2008. – 311 с.

УДК 662.613.1

**Е. А. Ткаченко, Г. Е. Масленников, Т. Ф. Богатова**

ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет

имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия

## **КАРБОНИЗАЦИЯ ОКСИДА КАЛЬЦИЯ И ЛЕТУЧЕЙ ЗОЛЫ МУСОРΟΣЖИГАТЕЛЬНОГО ЗАВОДА ДЛЯ СЕКВЕСТРАЦИИ ДИОКСИДА УГЛЕРОДА**

***Аннотация.** Рассмотрена основная движущая сила изменения климата – выбросы парниковых газов, основным источником которых является двуокись углерода. В статье описана стратегия улавливания и связывания углекислого газа, которая включает одну из перспективных технологий – карбонизацию. Проведены экспериментальные исследования методом термогравиметрического анализа процесса взаимодействия образца оксида кальция и образца летучей золы мусоросжигательного завода с характерными газовыми компонентами уходящих газов ТЭС. Получены данные термического и газового анализа для каждого образца. По методике, предложенной Университетом Ньюкасл (Австралия), найдены такие ключевые параметры карбонизации оксида кальция и летучей золы, как степень конверсии, энергия активации, и предэкспоненциальный множитель. Проведено сравнение взаимодействия оксида кальция и летучей золы мусоросжигательного завода с диоксидом углерода.*

**Ключевые слова:** карбонизация; летучая зола; оксид кальция; улавливание и связывание углекислого газа; термогравиметрический анализ.