

## СИСТЕМА ДИАГНОСТИКИ ТЕПЛООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В ФУРМЕННОЙ ЗОНЕ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ

*Разработана система диагностики теплообменных процессов в фурменной зоне доменной печи, позволяющая оценивать среднюю температуру в каждой фурменной зоне доменной печи на основании обработки текущих значений температур воды на входе и выходе из фурмы и расхода воды. Предложенная система диагностики может использоваться как для доменной печи с классической технологией выплавки чугуна, так и для случая с вдуванием пылеугольного топлива.*

**Ключевые слова:** диагностика, фурма доменной печи, фурменная зона, пылеугольное топливо, температура, теплосодержание.

### Постановка проблемы

Теплообменные процессы в фурменной зоне (ФЗ) доменных печей (ДП) играют важнейшую роль. На металлические части фурмы падают тепловые потоки с плотностью, достигающей 480 кВт/м<sup>2</sup>. Эти тепловые потоки отводятся к охлаждающей воде, циркулирующей через полости элементов фурмы. Одной из актуальных проблем производства чугуна является повышение стойкости фурм доменной печи, постоянно работающих в зоне высоких температур. Для предупреждения аварийных ситуаций, связанных с прогаром фурм, и оперативной идентификации неравномерности распределения дутья и пылеугольного топлива (ПУТ) между фурмами существует необходимость отслеживания теплосъема фурмами на основании анализа повышения теплосодержания охлаждающей воды.

### Анализ последних исследований и публикаций

Внедрение технологии ПУТ оказывает существенное влияние на изменение теплового состояния доменной печи из-за более высокой температуры горения ПУТ по сравнению с природным газом на 200...250 °С, что приводит к увеличению тепловых нагрузок на фурменную зону [1]. В результате возрастают тепловые нагрузки на систему охлаждения доменной печи. Для большинства доменных печей, изначально спроектированных для использования природного газа и не предназначенных для вдувания ПУТ, увеличение тепловых нагрузок имеет негативные последствия относительно сроков межремонтной эксплуатации печи.

Для минимизации проблемы прогорания фурм предлагаются следующие решения: применение вместо сварных фурм литых или кова-

ных фурм с защитным покрытием (CrNi или FeCr) рывльной части в особо термонапряженных зонах как снаружи, так и внутри; интенсификация охлаждения фурм (двухкамерные фурмы), охлаждение химочищенной водой в замкнутом цикле). В ряде работ отмечается возможность пересчета теплового потока, падающего на элементы фурмы, на величину температуры в фурменной зоне, однако соответствующая методика не приводится. Для углубления возможностей анализа важно разработать способ диагностирования среднего значения действительной температуры в ФЗ [2...4].

### Цель (задачи) исследования

Целью данной работы является разработка способа определения средней температуры в ФЗ на основании расчетной обработки текущих значений температур воды на входе и выходе из фурмы и расхода воды.

### Основной материал исследования

Пылеугольное топливо вдувается в фурму при помощи специальной трубки, которая вводится через сопло фурмы, затем топливо воспламеняется и газифицируется. Примерно в течение 5...6 миллисекунд ПУТ находится в зоне циркуляции. Газификация ПУТ состоит из нескольких последовательных этапов, которые сменяют друг друга с некоторым наложением (рис. 1). После нагревания ПУТ и испарения из него влаги, при последующем нагревании, происходит выделение летучих веществ. Воспламенение и сгорание летучих компонентов топлива приводит к увеличению температуры, в результате чего воспламеняется и газифицируется полукокс, который образовался из частиц ПУТ [4...6].

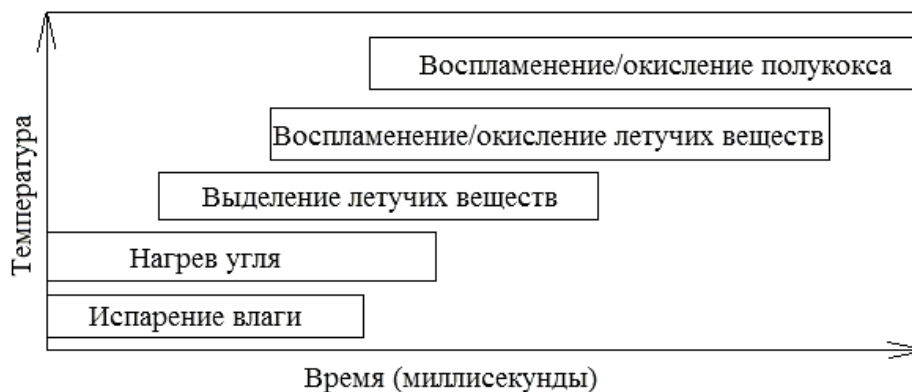


Рис. 1. Физико-химические трансформации частицы пылеугольного топлива от входа в фурменную зону до воспламенения коксового остатка частицы

Исследование проведено для фурм современной конструкции, предполагающей отдельно охлаждение тела фурмы и ее рыльной части (рис. 2). Для иллюстрации сути предложенной разработки на рис. 3 показана схема одной современной фурмы ДП с указанием мест подвода и отвода охлаждающей воды к рыльной части фурмы.

Поскольку, во-первых, рыльная часть фурмы воспринимает своей наружной частью поверхности большую плотность теплового потока, чем тело фурмы, и потому работает в более тяжелых условиях, принято решение вести анализ теплообменных процессов в ФЗ на основании тепло-съемки именно для рыльной части фурмы.

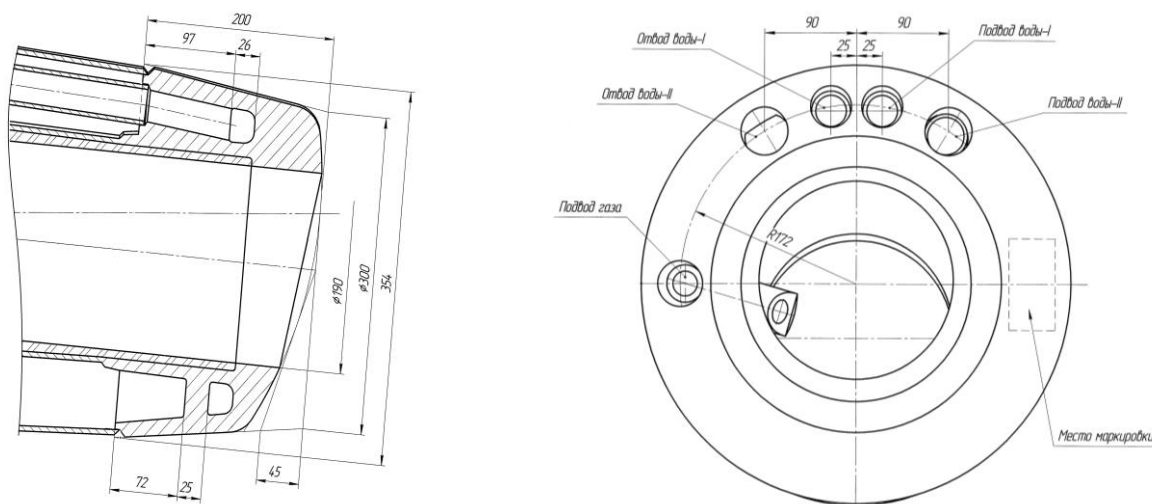


Рис. 2. Дутьевая доменная фурма

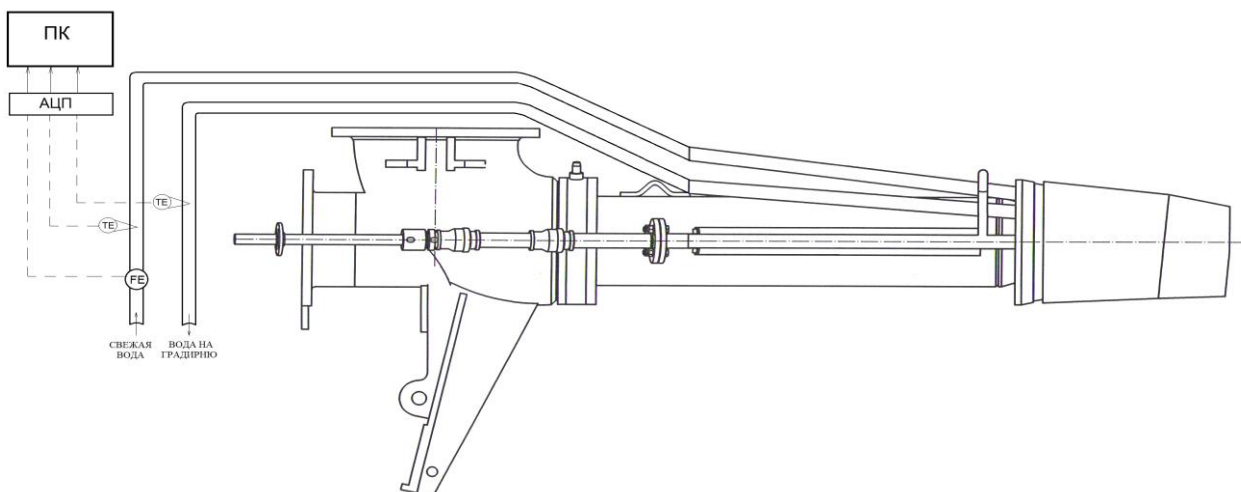


Рис. 3. Схема фурмы доменной печи с указанием мест подвода и отвода охлаждающей воды

Теплосъем данного элемента фурмы предложено определять как произведение соответствующего массового расхода воды на повышение ее энтальпии [7]:

$$Q = G \cdot c \cdot \Delta t, \quad (1)$$

где  $G$  – расход воды, кг/с;  $c$  – теплоемкость воды, кДж/(кг·К);  $\Delta t$  – перепад температуры, °С.

Тепловой поток, отведенный от элемента фурмы, формируется по двум механизмам: лучистый тепловой поток от объема ФЗ и конвективный поток от горячего дутья, идущего по внутренней поверхности фурмы.

Лучистый поток определяется как

$$Q_{\text{л}} = C_{\text{нр}} \cdot F_{\text{м}} \cdot \left[ \left( \frac{t_{\text{фз}} + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{t_{\text{м}} + 273}{100} \right)^4 \right], \quad (2)$$

где  $C_{\text{нр}}$  – приведенный коэффициент излучения, Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>);  $F_{\text{м}}$  – площадь наружной боковой поверхности элемента фурмы, м<sup>2</sup>;  $t_{\text{фз}}$  – температура фурменной зоны, °С;  $t_{\text{м}}$  – температура наружной поверхности элемента фурмы, °С.

Приведенный коэффициент излучения

$$C_{\text{нр}} = \frac{5,67 \cdot \varepsilon_{\text{фз}} \cdot \varepsilon_{\text{м}}}{\varepsilon_{\text{фз}} + \varphi_{\text{гм}} \cdot \varepsilon_{\text{м}} (1 - \varepsilon_{\text{фз}})}, \quad (3)$$

где  $\varepsilon_{\text{фз}}$  – степень черноты фурменной зоны [8];  $\varepsilon_{\text{м}}$  – степень черноты поверхности фурмы;  $\varphi_{\text{гм}}$  – угловой коэффициент для системы «граница фурменной зоны – поверхность элемента фурмы».

$$\varphi_{\text{гм}} = \frac{F_{\text{м}}}{F_{\text{г}}},$$

где  $F_{\text{м}}$ ,  $F_{\text{г}}$  – площади боковых поверхностей элемента фурмы и границы фурменной зоны, м<sup>2</sup>.

Выражение для определения приведенного коэффициента излучения в системе тел «газовое пространство – граница фурменной зоны – поверхность элемента фурмы» составлено по шаблону, используемому для описания лучистого теплообмена в пламенных печах. Выражение, устанавливающее величину итогового теплового потока на поверхность элемента фурмы, разрешено относительно неизвестного значения средней действительной температуры в ФЗ.

Конвективный тепловой поток определяется следующим образом:

$$Q_{\text{к}} = \alpha_{\text{к}} \cdot F_{\text{вн}} \cdot (t_{\text{д}} - t_{\text{охл}}), \quad (4)$$

где  $\alpha_{\text{к}}$  – коэффициент конвективной теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $F_{\text{вн}}$  – площадь внутренней поверхности рьяльной части фурмы, м<sup>2</sup>;  $t_{\text{д}}$  – температура горячего дутья, °С;  $t_{\text{охл}}$  – средняя температура охлаждающей воды, °С.

В выражении (4) вместо температуры внутренней поверхности элемента фурмы использовано известное значение средней температуры охлаждающей воды. Такой подход значительно упрощает дальнейшие расчеты и вносит крайне незначительную погрешность, поскольку термические сопротивления передаче теплоты теплопроводностью через медную стенку и конвекцией к охлаждающей воде в десятки раз меньше сопротивлений передаче теплоты от горячего дутья к внутренней поверхности элемента фурмы.

Для определения коэффициента конвективной теплоотдачи используется известное критериальное уравнение, соответствующее продольному течению среды:

$$Nu = 0,021 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,43}, \quad (5)$$

где  $Nu$  – критерий Нуссельта;  $Re$  – критерий Рейнольдса;  $Pr$  – критерий Прандтля.

После установления количественного значения критерия Нуссельта коэффициент конвективной теплоотдачи определяется как

$$\alpha_{\text{к}} = \frac{Nu \cdot \lambda}{d_{\text{вн}}},$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности воздуха, Вт/(м·К);  $d_{\text{вн}}$  – внутренний диаметр рьяльной части фурмы, м.

В результате, при работе печи в реальном времени диагностируется общий теплосъем рьяльной части фурмы  $Q$ , в зависимости от текущей температуры горячего дутья вычисляется конвективный тепловой поток, что позволяет определить значение лучистого теплового потока

$$Q_{\text{л}} = Q - Q_{\text{к}}. \quad (6)$$

После этого выражение (2) разрешается относительно искомой температуры фурменной зоны:

$$t_{\text{фз}} = \left[ \frac{Q_{\text{л}}}{C_{\text{нр}} \cdot F_{\text{м}}} + \left( \frac{t_{\text{м}} + 273}{100} \right)^4 \right]^{0,25} \cdot 100 - 273. \quad (7)$$

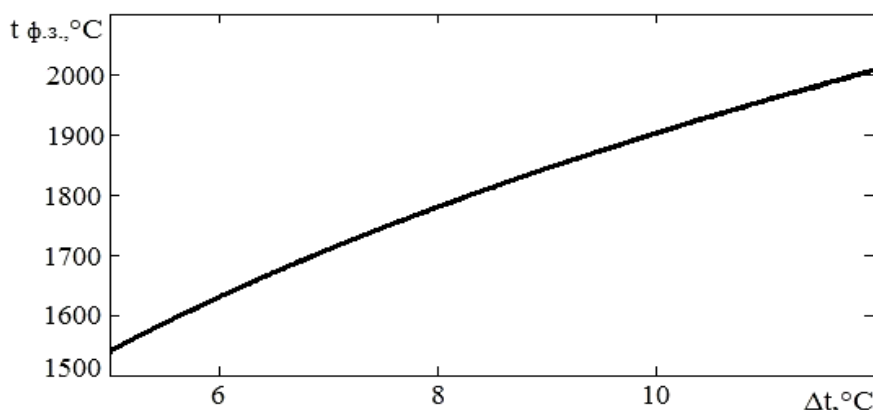


Рис. 4. Диагностированные значения температуры в фурменной зоне от перепада температур охлаждающей воды, для зафиксированного расхода воды

Для иллюстрации использования разработанной методики она проверялась в условиях Филиала №2 «Енакиевский металлургический завод» ЗАО «Внешторгсервис» (ЕМЗ). Для расчета были использованы реальные геометрические характеристики фурм. Расход воды на рьяльную часть фурмы, согласно практическим данным, был установлен на уровне 17 м<sup>3</sup>/ч, а температура дутья принята 1200 °С. Для расчетов согласно [8] взято значение степени черноты ФЗ 0,191, соответствующее следующему набору исходных данных: расход ПУТ 150 кг/т, концентрация СО<sub>2</sub> 17,5 %, давление в фурменной зоне 0,4 атм, эффективная длина луча 0,6 м, средний размер частиц 0,12 мкм.

На рис. 4 показана зависимость  $t_{фз}$  от повышения температуры охлаждающей воды, полученная при помощи выражения (7). С учетом того, что типовое повышение температуры охлаждающей воды для условий ЕМЗ составляет порядка 10 °С, получаемые при помощи выражения (7) величины вполне согласуются с экспериментальными значениями этой величины, находящимися в диапазоне 1800...1900 °С.

### Выводы

Разработана система диагностики теплообменных процессов в фурменной зоне доменной печи, позволяющая оценивать среднюю температуру в каждой фурменной зоне ДП на основании обработки текущих значений температур воды на входе и выходе из фурмы и расхода воды. Предложенная система диагностики может использоваться как для ДП с классической технологией выплавки чугуна, так и для случая с вдуванием ПУТ. Решение данной проблемы позволяет диагностировать перекосы в температурном состоянии различных ФЗ, которые могут возникать при неравномерном распределении ПУТ между фурмами или других отклонениях протекания технологического процесса от нормы.

### Список литературы

1. Эффективность и ресурсы пылеугольной технологии выплавки чугуна / С.Л. Ярошевский [и др.] // *Металл и литье Украины*. – 2018. – №9-10(304-305). – С. 7-22.
2. Study of heath losses in a blast furnace with the injection of pulverized-coal fuel into the hearth / V.I. Andreev [et al.] // *Metallurgist*. – 2015. – No.1-2. Vol.59. – P. 16-24.
3. Освоение и эффективность технологии доменной плавки с применением пылеугольного топлива на ЧАО «Енакиевский металлургический завод» / А.М. Кузнецов [и др.] // *Металл и литье Украины*. – 2017. – №8-10. – С. 4-11.
4. Бирюков, А.Б. Сжигание и термическая переработка органических топлив. Твердое топливо: учебное пособие / А.Б. Бирюков, И.П. Дробышевская, Ю.Е. Рубан. – Донецк: Ноулизд, 2014. – 232 с.
5. Курбатов, Ю.Л. Металлургические печи: учебное пособие / Ю.Л. Курбатов, А.Б. Бирюков, Ю.Е. Рубан. – Донецк: ГОУ ВПО «ДонНТУ», 2016. – 433 с.
6. Yaroshevskiy, S.L. The Principle of Full and Complex Compensation at Replacement of Coke with Pulverized Coal; Resources of Technology / S.L. Yaroshevskiy, V.V. Kochura // *The 5th International Congress on the Science and Technology of Ironmaking (ICSTI'99)*, November 19-23, 2009, Shanghai, China. – Shanghai, 2009. – P. 70-78.
7. Ginkul, S.I. Heat and Mass Transfer / S.I. Ginkul, V.V. Kravtsov, A.B. Birukov. – Donetsk: Nord-Press, 2006. – 291 p.
8. Бирюков, А.Б. Методика определения степени черноты фурменной зоны доменной печи при вдувании пылеугольного топлива / А.Б. Бирюков, Ю.Е. Рубан // *Вестник ИГЭУ*. – 2019. – №2. – С. 25-31.

**A.B. Biryukov /Dr. Sci. (Eng.)/, Yu.E. Ruban**  
*Donetsk National Technical University (Donetsk)*

**THE SYSTEM OF HEAT-EXCHANGE PROCESS DIAGNOSTICS  
 IN THE TUYERE ZONE OF THE BLAST FURNACE**

**Background.** *One of the most urgent problems of pig iron production is to increase the resistance of blast furnace tuyeres that are continually working in a high-temperature zone. To prevent accidents related to the burnout of tuyeres, and to quickly identify the uneven distribution of blast and pulverized coal fuel (PCF) between tuyeres, it is necessary to track the heat removal of tuyeres based on the analysis of the increase in the heat content of cooling water.*

**Materials and/or methods.** *The proposed diagnostic system is based on simultaneous consideration of the thermal balance of the tuyere element and determination of the convective and radiant heat flows supplied to it. As a result, a final formula is formed that is solved relative to the average temperature of the tuyere zone.*

**Results.** *A system for diagnostics of heat exchange processes in the tuyere zone of a blast furnace (BF) developed, which allows estimating the average temperature in each tuyere zone of the BF based on processing the current values of water temperatures at the inlet and outlet of the tuyere element and water flow.*

**Conclusion.** *The proposed diagnostic system can be used both for BF with the standard technology of cast iron smelting and for the case with the injection of PCF. The solution to this problem allows us to diagnose distortions in the temperature state of various tuyere zones, which may occur when there is an uneven distribution of PCF between tuyeres or other deviations in the flow of the technological process from the norm.*

**Keywords:** *diagnostics, blast furnace tuyere, tuyere zone, pulverized coal fuel, temperature, heat content.*

**Сведения об авторах**

**А.Б. Бирюков**

SPIN-код: 3186-0680  
 Author ID: 7006918782  
 ORCID iD: 0000-0002-8146-2017  
 Телефон: +380 (62) 301-08-61  
 Эл. почта: birukov.ttf@gmail.com

**Ю.Е. Рубан**

SPIN-код: 4225-4029  
 ORCID iD: 0000-0001-8496-4824  
 Телефон: +380 (62) 301-08-61  
 Эл. почта: k-j-e@yandex.ru

*Статья поступила 07.05.2020 г.  
 © А.Б. Бирюков, Ю.Е. Рубан, 2020  
 Рецензент д.т.н., доц. Н.И. Захаров*

