

## МЕТОДИКА РАСЧЕТА ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ФУРМЕННОЙ ЗОНЕ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ ПРИ ПОДАЧЕ ПЫЛЕУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА

*На основе исследований, проведенных в работе, разработана методика расчета теплотехнических процессов в фурменной зоне доменной печи при подаче пылеугольного топлива (ПУТ). В случае использования ПУТ как дополнительного топлива степень важности определения излучающего теплового потока значительно возросла. Предложенная методика позволяет определить численные значения тепловых потоков в фурменной зоне, передаваемых посредством конвекции и излучения, и делает возможным их сравнение.*

**Ключевые слова:** доменная печь, фурма, кокс, дутье, пылеугольное топливо, теплообмен, конвекция, излучение.

### Постановка проблемы

Одним из решений проблемы снижения расхода дорогостоящего кокса в доменном производстве является использование заменителей кокса (мазут, природный газ, пылеугольное топливо). Разработка методики расчета теплообменных процессов в фурменной зоне доменной печи с условием подачи заменителей кокса и анализ этих процессов является необходимым условием повышения эффективности эксплуатации доменных печей.

### Анализ последних исследований и публикаций

Анализ литературных источников показал, что исследования излучения в фурменной зоне доменной печи проводились на теоретическом уровне, используя полученные экспериментальные данные в области теории горения факела. Наиболее сложной для определения является степень черноты, так как через фурменную зону проходят жидкие чугун и шлак, происходит горение пылеугольного топлива, кокса, природного газа, циркуляция кокса [1...3].

### Цель (задачи) исследования

Целью данной работы является разработка методики расчета теплообменных процессов в фурменной зоне доменной печи при подаче пылеугольного топлива и их анализ.

### Основной материал исследования

Особенности теплообменных и газодинамических процессов в доменной печи состоят в том, что они происходят в условиях неопределенных или приблизительно определяемых размеров кускового материала, объема фурменных

зон и многих других величин. Практическое отсутствие излучающих трехатомных газов ( $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$ ) в горновых газах делают преобладающим конвективный теплообмен между газами и материалами шихты и продуктов плавки. Но при использовании пылеугольного топлива, подаваемого как заменитель кокса вместе с дутьем, теплообмен излучением значительно интенсифицируется. В потоке высокотурбулизированных газов в результате образуются газообразные продукты сгорания и частички расплавленной золы. В этом случае фурменная зона представляет собой сильно запыленный объем с высокой излучательной способностью.

В нижней части доменной печи (горне) осуществляются процессы сжигания топлива, которые приводят к выделению теплоты и восстановительных газов (оксид углерода и водород) [4]. Потоки дутья поддерживают вблизи фурменных зон хаотическое движение, участниками которого становятся все продукты горения от крупных кусков кокса до наименьших частичек пыли. Постоянно двигаясь, они сталкиваются, меняя скорости и направление движения. Происходит передача тепла конвекцией.

Для оценки теплового потока, передаваемого посредством конвективного теплообмена, используем закон Ньютона-Рихмана [5,6]:

$$q_k = \alpha_k (T_f - T_{np}), \text{ Вт/м}^2, \quad (1)$$

где  $\alpha_k$  – коэффициент теплоотдачи конвекцией,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ;  $T_f$  – температура газов в фурменной зоне, К;  $T_{np}$  – температура продуктов доменной плавки и кокса, окружающих фурменную зону, К.

Дошедшие до уровня фурм раскаленные куски кокса и расплавленная шихта заполняют весь

объем горна, и лишь вблизи фурм образуются зоны, заполненные газовой средой, поступающей в горн с помощью фурменных приборов. Здесь образуются очаги горения вносимого с дутьем пылеугольного топлива и догорание уже раскаленного, загоревшегося кокса. Шихтовые материалы различных размеров собираются вокруг фурм. Они находятся в состоянии активной подвижности под воздействием дутья. Большая часть кусковых материалов, участвующих в горении у фурм, имеет мелкий и средний размер. Крупные куски кокса, располагающиеся вокруг активной струи, также находятся в движении, но скорость их движения сравнительно меньше. Такое разнообразие происходящих здесь процессов приводит к образованию каплевидных зон горения. Несимметричная овальная форма несколько неудобна для моделирования. Если принять форму зоны теплообмена в форме сферической полости, рассмотреть и рассчитать происходящие при горении процессы будет проще (рис. 1).

Исходя из рис. 1, можно заметить неравномерное распределение вовлекающегося в фурменную зону кокса под действием потока фурменных газов. Следовательно, можно сделать вывод о неравномерном распределении скоростей, а также теплообмене в целом. В фурменной зоне наблюдаются зоны с различной интенсивностью теплообмена. Принимая во внимание все факторы, влияющие на процесс образования теплоты в этом объеме, включая как участников горения, так и их физические свойства, удалось создать модель, которая демонстрирует распо-

ложение исследуемых зон теплообмена (рис. 2).

Поток частиц дополнительного топлива и дутья движется к середине фурменной зоны с шириной, равной диаметру фурменного прибора, постепенно расширяясь до диаметра струи прямого потока, сформировавшегося к середине всей зоны. Струя расширяется незначительно, но диаметр ее увеличивается, что видно из рис. 2. На этом участке истечение происходит еще под давлением дутья, но необходимо заметить, что вокруг струи создается препятствие, располагающееся в виде рециркулирующего обратного потока. В центре фурменной зоны образуется среда, представляющая собой смесь дутья, пылеугольного топлива, а также вовлеченных раскаленных кусков кокса. Эта среда, получившая прибавление в скорости от потока рециркуляции, расширяясь теперь беспрепятственно, ударяется о слой малоподвижных и более объемных кусков кокса, которые образуют такую область вокруг зон горения у каждой из фурм и заполняют все пространство горна. Здесь образуется еще одна, очень важная в теплообмене, так называемая зона интенсивной конвекции (место удара струи), имеющая площадь  $f_{инт}$  и коэффициент теплоотдачи  $\alpha_{инт}$ . Большая роль данного участка в образовании зоны рециркуляции и обратного потока объясняется тем, что движущаяся оттолкнувшаяся среда резко меняет направление и совершает движение, противоположное движению прямого дутьевого потока. Хаотичность раскаленных частиц, кружащих в газовом объеме, приводит к их сгоранию.

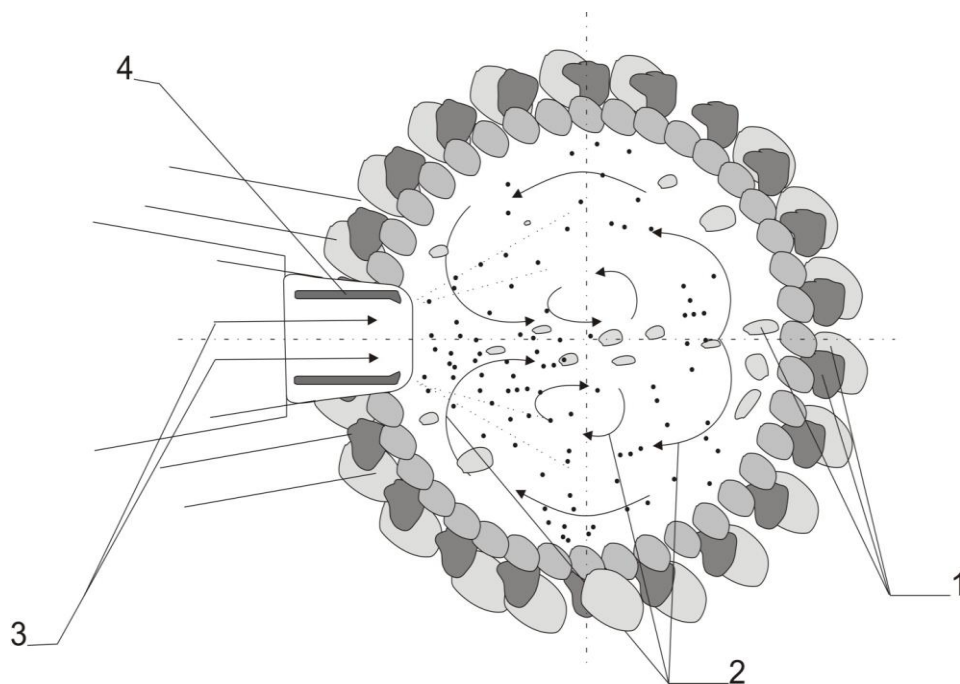


Рис. 1. Модель фурменной зоны, вид сверху:  
1 – кокс; 2 – ПУТ; 3 – дутье; 4 – фурма

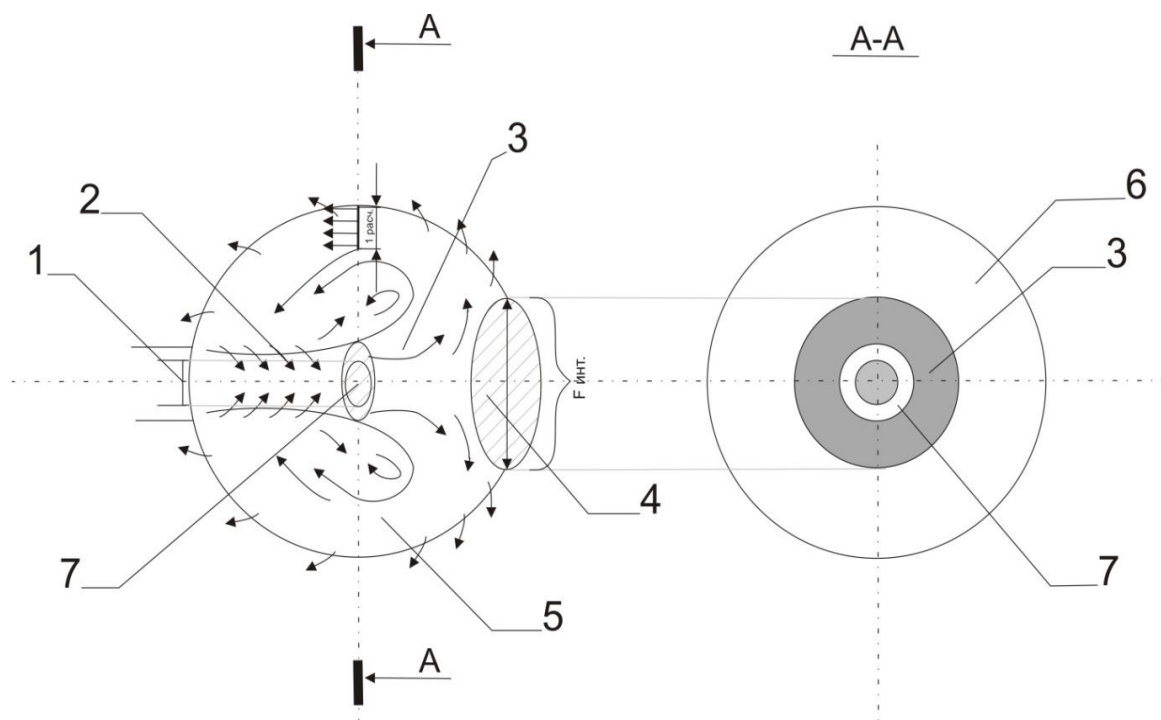


Рис. 2. Зоны теплообмена в фурменной зоне:  
 1 – фурма; 2 – прямой дутьевой поток; 3 – зона рециркуляции потока;  
 4 – зона интенсивной конвекции; 5 – обратный поток; 6 – сечение для прохода газов;  
 7 – сечение струи прямого потока

Так, непрерывно подающийся поток дутья и ПУТ, постепенно вовлекающийся в фурменную зону, и куски кокса участвуют в процессе горения. Конвективный теплообмен в этой области проходит особо активно. Коэффициенты теплоотдачи образовавшихся в фурменном процессе зон имеют различное значение, также как зоны составляют разное соотношение площадей по отношению ко всей площади фурменной зоны.

Коэффициенты теплоотдачи конвекцией в этих зонах находятся из критерия Нуссельта [7]:

$$Nu = \frac{\alpha \cdot d}{\lambda}, \quad (2)$$

который, в свою очередь, определяется из критериальной зависимости [8]:

$$Nu = \varphi \cdot 0,037 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,43}, \quad (3)$$

где  $Re$  – критерий Рейнольдса [9]:

$$Re = \frac{w \cdot d}{\nu}, \quad (4)$$

$Pr$  – критерий Прандтля [7]:

$$Pr = \frac{\nu}{a}, \quad (5)$$

В формулах (2)-(5):  $\varphi$  – коэффициент, учитывающий влияние угла, под которым происходит встреча струи и обратного потока с поверхностью фурменной зоны (табличное значение) [7];  $w$  – скорость дутья, распределенного по поверхности фурменной зоны, м/с;  $d$  – расчетный линейный размер для зоны интенсивного конвективного теплообмена, принимаем равным диаметру сечения данной зоны  $d_{инт.}$ , м;  $\nu$  – коэффициент кинематической вязкости фурменных газов, м<sup>2</sup>/с;  $a$  – коэффициент температуропроводности, м<sup>2</sup>/с;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности фурменных газов, Вт/(м·К).

Скорость дутья, распределенного по поверхности фурменной зоны (сферы):

$$w = \frac{V_{\partial,1}}{F_{сф}}, \text{ м/с,}$$

где  $V_{\partial,1}$  – расход дутья на одну фурму, м<sup>3</sup>/с;  $F_{сф}$  – площадь поверхности фурменной зоны (сферы), м<sup>2</sup>.

Расход дутья на одну фурму:

$$V_{\partial,1} = \frac{V_{\partial}}{n}, \text{ м}^3/\text{с,}$$

где  $V_{\partial}$  – расход дутья в доменной печи, м<sup>3</sup>/ч;  $n$  – количество фурм, шт.

Расход дутья в доменной печи [10]:

$$V_d = V \cdot G_{\text{чуг}}, \text{ м}^3/\text{ч},$$

где  $V$  – расход дутья,  $\text{м}^3/\text{т}$  чугуна;  $G_{\text{чуг}}$  – производительность печи,  $\text{т}/\text{ч}$ .

Площадь поверхности фурменной зоны (сферы):

$$F_{\text{сф}} = \pi \cdot D^2, \text{ м}^2.$$

Исходя из результатов исследований [10], принимаем диаметр фурменной зоны  $D \approx 1 \text{ м}$ . Диаметры для зон интенсивного теплообмена и обратного потока можно определить как характеристики свободных турбулентных потоков по формулам Г.Н. Абрамовича. Диаметр потока на расстоянии полусферы [9]:

$$\frac{d_{\text{смп}}}{d_0} = 0,517 \frac{l}{d_0} + 1,$$

где  $d_0 = d_{\text{фурмы}} = 0,14 \text{ м}$  – диаметр фурмы;  $l = 0,5 \text{ м}$  – расстояние полусферы.

Соответственно:

$$r_{\text{смп}} = \frac{d_{\text{смп}}}{2}, \text{ м}.$$

Таким образом, расчетный линейный размер рассчитываем как половину разницы радиуса фурменной зоны и радиуса струи в середине фурменной зоны  $r_{\text{смп}}$ , принимаем в формулах для определения критерия Рейнольдса и Нуссельта для обратного потока:

$$l = \frac{r_{\text{сф}} - r_{\text{смп}}}{2}, \text{ м},$$

(деление величины на 2 учитывает вихрь рециркуляции).

Диаметр потока на расстоянии длины фурменной зоны будет являться диаметром зоны интенсивного конвективного теплообмена. Площадь сечения зоны интенсивного теплообмена равна:

$$F_{\text{инт}} = \frac{\pi \cdot D^2}{4}, \text{ м}^2.$$

Площадь сечения обратного потока:

$$F_{\text{обр}} = \frac{\pi}{4 \cdot (D_{\text{сф}}^2 - D_{\text{инт}}^2)}, \text{ м}^2.$$

Скорость на участке интенсивного теплообмена (на расстоянии  $l = 1 \text{ м}$ ) по формуле Г.Н. Абрамовича [9]:

$$\frac{w_m}{w} = 0,96 \cdot \left( 0,152 \cdot \frac{l}{d_0} + 0,29 \right)^{-1}, \text{ м}/\text{с}.$$

Средний коэффициент теплоотдачи конвекцией:

$$\alpha_{\text{ср}} = \left( 1 - \frac{F_{\text{инт}}}{F_{\text{сф}}} \right) \cdot \alpha_{\kappa(\text{обр})} + \left( \frac{F_{\text{инт}}}{F_{\text{сф}}} \right) \cdot \alpha_{\kappa(\text{инт})}, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Пример расчета плотности конвективного теплового потока приведен для фурменной зоны с расходом дутья  $V_{d,(1)} = 1,881 \text{ м}^3/\text{с}$ , температурой дутья  $t_{\text{дутья}} = 1000 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $d_{\text{ф.з.}} = 1 \text{ м}$ ,  $d_0 = 0,14 \text{ м}$ . В исследовании определено, что площадь интенсивного теплообмена равна 12 % от общей поверхности фурменной зоны.

В случае максимально возможного расхода ПУТ, равного 250  $\text{кг}/\text{т}$  чугуна, в работе получены следующие величины:  $\alpha_{\text{инт}} = 111 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ,  $\alpha_{\text{обр}} = 29 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ; средний коэффициент теплоотдачи равен  $\alpha_{\text{ср}} = 0,12 \cdot 111 + 0,88 \cdot 29 = 35,2 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ . Плотность теплового потока (1) для  $t_{\text{ф}} = 2000 \text{ }^\circ\text{C}$  и  $t_{\text{нр}} = 1500 \text{ }^\circ\text{C}$ , составила величину  $q_{\kappa} = 17600 \text{ Вт}/\text{м}^2$ .

Для расчета теплового потока, передаваемого излучением в фурменной зоне, воспользуемся законом Стефана – Больцмана [8]:

$$q_{\text{изл}} = c_{\text{нр}} \cdot \left[ \left( \frac{T_{\text{ф}}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{\text{нр}}}{100} \right)^4 \right], \text{ Вт}/\text{м}^2, \quad (6)$$

где приведенный коэффициент излучения  $c_{\text{нр}} = \varepsilon_{\text{ф.з.}} \cdot c_0$ ,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ , приведенная степень черноты объема фурменной зоны определяется по формуле [10,11]:

$$\varepsilon_{\text{ф.з.}} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_2} + \frac{1}{\varepsilon_{\text{поверх}}} - 1},$$

где  $\varepsilon_2$  – степень черноты объема фурменной зоны;  $\varepsilon_{\text{поверх}}$  – степень черноты внутренней поверхности фурменной зоны.

Степень черноты объема фурменной зоны определяется с учетом известного положения закона Кирхгофа о том, что степень черноты, характеризующая интенсивность излучения  $\varepsilon$ , равна поглощающей способности тела «а». В

связи с тем, что горение кокса и ПУТ в фурменной зоне происходит с образованием двухатомных газов (СО, Н<sub>2</sub>), которые, как известно, практически не участвуют в радиационном теплообмене, излучать тепло могут только плотные частицы. В объеме фурменной зоны происходит практически мгновенное сгорание частиц ПУТ, в результате чего образуется запыленный поток. Поглощательная способность запыленного потока может быть определена по методике Кутателадзе-Боришанского [11]:

$$\varepsilon_z = a = 1 - e^{-Kl},$$

где  $K$  – эффективное значение коэффициента ослабления лучей в данной среде;  $l$  – длина пути луча, м.

Эффективное значение коэффициента ослабления лучей в данной среде [11]:

$$K = K_n \cdot \mu \cdot F_{y0},$$

где  $K_n$  – эффективный коэффициент ослабления, доли ед.;  $\mu$  – плотность запыленного газового потока,  $F$  – средняя удельная поверхность пыли, м<sup>2</sup>/г,

$$K_n = 0,42 \cdot \left(\frac{A}{\rho}\right) \cdot 273 \cdot \sqrt[3]{\frac{1}{T_n^2 \cdot d^2}},$$

где  $d$  – средний диаметр золы, мкм;  $\rho$  – плотность горючих веществ, кг/м<sup>3</sup>;

$$\mu = \frac{A^c \cdot G}{V_{z2}},$$

где  $A^c$  – содержание золы в используемом топливе, доли ед.;  $G$  – расход топлива, кг/т чугуна;  $V_{z2}$  – выход горновых газов, м<sup>3</sup>/т чугуна.

Средняя удельная поверхность частицы, м<sup>2</sup>/г [11]:

$$F_{y0} = \frac{F}{V \cdot \rho} = \frac{0,187}{R \cdot \rho},$$

где  $R$  – радиус частицы (ПУТ или кокса).  
Длина луча равна [11]:

$$l = 0,60 \cdot D,$$

где  $D$  – диаметр фурменной зоны,  $D \approx 1$  м.

Проанализировав зависимость степени черноты газового потока от размера частицы и рас-

хода ПУТ, мы увидели, что степень черноты объема достигает единицы уже при достаточно малой подаче ПУТ и любом размере частицы.

Степень черноты поверхности фурменной зоны рассчитывается как средневзвешенная (по чугуно, шлаку и коксу) величина и составляет 0,47...0,51 [11]:

$$\varepsilon_{нов} = \frac{\varepsilon_{чуг} \cdot G_{чуг} + \varepsilon_{шлак} \cdot G_{шлак} + \varepsilon_{кокс} \cdot G_{кокс}}{G_{чуг} + G_{шлак} + G_{кокс}},$$

где  $\varepsilon_{чуг}$ ,  $\varepsilon_{шлак}$ ,  $\varepsilon_{кокс}$  – степени черноты, соответственно, чугуна, шлака и кокса [7];  $G_{чуг}$ ,  $G_{шлак}$ ,  $G_{кокс}$  – расходы чугуна, шлака и кокса, кг/т чугуна [9].

Приведенная степень черноты с применением ПУТ составляет величину практически равную  $\varepsilon_{поверх}$ . Для  $t_{ф} = 2000$  °С и  $t_{пр} = 1500$  °С плотность теплового потока  $q$  (6), передаваемого излучением в фурменной зоне, при использовании ПУТ достигает 450000 Вт/м<sup>2</sup>, что доказывает важность его определения.

## Выводы

На основе исследований, проведенных в работе, разработана методика определения тепловых потоков в фурменной зоне, передаваемых посредством конвекции и излучения. Предложенная методика позволяет определить численные значения тепловых потоков и делает возможным их сравнение. Для режима с максимальной подачей ПУТ 250 кг/т чугуна установлены значения конвективного и лучистого тепловых потоков продуктов плавки, которые составляют соответственно 17,6 кВт/м<sup>2</sup> и 450 кВт/м<sup>2</sup>. Таким образом, в случае использования ПУТ как дополнительного топлива степень важности определения излучающего теплового потока значительно возрастает.

## Список литературы

1. Влияние пылеугольного топлива на степень черноты фурменной зоны и тепловой режим горна доменной печи / С.Л. Ярошевский, Ю.Л. Курбатов, И.В. Мишин и др. // *Металлург.* – 2013. – №4. – С. 48-53.
2. Ishii, K. *Advanced pulverized coal injection technology and blast furnace operation.* – Hokkaido: Pergamon, 2000. – 324 p.
3. Определение траектории потока газа при вдувании в доменную печь пылеугольного топлива / В.П. Лялюк [и др.] // *Сталь.* – 2017. – №4. – С. 2-4.
4. Trinks, W. *Industrial furnaces* / W. Trinks,

- М.Н. Mawhinney. – New-York; London: John Wiley & Sons inc., 2003. – 496 p.
5. Теплообмен: теория и практика: учебник для высших образовательных учреждений / В.В. Карнаух [и др.]. – Донецк: ГО ВПО «ДонНУЭТ», 2018. – 328 с.
  6. Ginkul, S.I. Heat and Mass Transfer / S.I. Ginkul, V.V. Kravtsov, A.B. Virukov. – Donetsk: Nord-Press, 2006. – 291 p.
  7. Казанцев, Е.И. Промышленные печи. Справочное руководство для расчетов и проектирования / Е.И. Казанцев. – М.: Metallurgy, 1975. – 368 с.
  8. Курбатов, Ю.Л. Metallurgical furnaces: a textbook / Ю.Л. Курбатов, А.Б. Бирюков, Ю.Е. Рубан. – Донецк: ГОУ ВПО «ДонНТУ», 2016. – 433 с.
  9. Гидрогазодинамика в теплотехнике / Ю.Л. Курбатов [и др.]. – Донецк: Норд-Пресс, 2009. – 234 с.
  10. Мишин, И.В. Methodology of calculation of temperature of products of melting on release at blowing in additional fuels / И.В. Мишин, Ю.Л. Курбатов, С.Л. Ярошевский // Труды Международной научно-практической конференции «Теория и практика тепловых процессов в металлургии». Уральский федеральный университет, Екатеринбург, 18-21 сентября 2012 г. – 7 с.
  11. Кутателадзе, С.С. Справочник по теплопередаче / С.С. Кутателадзе, В.М. Боришанский. – М.: Гос. энергетическое издательство, 1959. – 414 с.

**Yu.E. Ruban**

*Donetsk National Technical University (Donetsk)*

**THE METHOD FOR CALCULATING THERMAL PROCESSES  
IN THE TUYERE ZONE OF THE BLAST FURNACE  
WITH THE PULVERIZED COAL FEED**

**Background.** *One of the solutions to the problem of reducing the consumption of expensive coke in blast furnace production is the use of coke substitutes (fuel oil, natural gas, pulverized coal). Development of a method for calculating heat exchange processes in the tuyere zone of the blast furnace with the supply of coke substitutes and analysis of these processes is a necessary condition for improving the efficiency of blast furnaces operation.*

**Materials and/or methods.** *The developed technique based on the determination of the numerical values of heat fluxes in the tuyere zone transferred by convection and radiation. In the tuyere zone, there is almost instantaneous combustion of pulverized coal particles, resulting in a dusty stream, the absorption capacity of which determined by the method of Kutateladze-Borishansky.*

**Results.** *The proposed method allows determining the numerical values of heat fluxes and makes it possible to compare them. For the mode with a maximum supply of pulverized coal – 250 kg/t of pig iron, the values of convective and radiant heat fluxes of the smelting products set, which are respectively 17.6 kW/m<sup>2</sup> and 450 kW/m<sup>2</sup>.*

**Conclusion.** *On the basis of research, a method developed for determining the heat flux in the tuyere zone transferred by convection and radiation. In the case of using pulverized coal as an additional fuel, the importance of determining the radiant heat flux increases significantly.*

**Keywords:** *blast furnace, tuyere, coke, blast, pulverized coal, heat exchange, convection, radiation.*

**Сведения об авторе**

**Ю.Е. Рубан**

SPIN-код: 4225-4029  
ORCID iD: 0000-0001-8496-4824  
Телефон: +380 (71) 303-45-02  
Эл. почта: k-j-e@yandex.ru

*Статья поступила 30.10.2018 г.*

*© Ю.Е. Рубан, 2018*

*Рецензент д.т.н., доц. Н.И. Захаров*