

УДК 669.162.21.001.573

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ СТЕПЕНИ ЧЕРНОТЫ ФУРМЕННОЙ ЗОНЫ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ ПРИ ВДУВАНИИ ПЫЛЕУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА

А.Б. БИРЮКОВ, Ю.Е. РУБАН

ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет», г. Донецк, Украина

E-mail: birukov.tff@gmail.com, k-j-e@yandex.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса. Современным направлением совершенствования технологии производства чугуна в доменных печах является вдувание пылеугольного топлива. При этом оказывается существенное влияние на протекание теплообмена в фурменной зоне. Известна методика для расчета лучистого теплообмена в фурменной зоне доменной печи. Однако в ее рамках учтено только влияние золовых частиц. В связи с этим актуальным является создание методики для определения степени черноты фурменной зоны и исследование влияния различных факторов на эту величину.

Материалы и методы. За основу взяты элементы апробированной методики расчета теплообмена в топках. Параметрическая чувствительность исследована путем поочередной имитации погрешностей каждой из входных величин и определения ее влияния на искомую величину.

Результаты. На основании анализа сущности процессов предложены зависимости для определения концентрации золовых частиц и трехатомных газов. Определены степени черноты фурменной зоны по закону Бугера при одновременном учете излучения горящих коксовых частиц, золовых частиц и трехатомных газов. Установлено, что при изменении удельного расхода пылеугольного топлива от 0 до 250 кг/т чугуна степень черноты фурменной зоны изменяется от 0,067 до 0,243, изменение степени черноты фурменной зоны при увеличении на 1 % давления, концентрации трехатомных газов, эффективной длины луча, температуры в фурменной зоне, размера золовых частиц составляет 0,714, 0,151, 0,72, -1,557 и -0,176 % соответственно.

Выводы. Выполненные расчеты показали примерно равное влияние коксовых частиц, трехатомных газов и золовых частиц на искомую величину. Работа по ранее применявшейся методике приводит к занижению результата примерно в 2 раза, в то время как даже для оценочных расчетов погрешности 10–15 % являются предельными. Разработанная методика, учитывающая все факторы, дает погрешность не более 5 %. Она важна для проектирования фурм и холодильников фурменной зоны.

Ключевые слова: доменная печь, фурменная зоны, вдувание пылеугольного топлива, степень черноты, лучистый теплообмен

METHOD FOR DETERMINING BLAST FURNACE TUYERE ZONE BLACKNESS DEGREE ON PULVERIZED COAL FUEL INJECTION

A.B. BIRYUKOV, Yu.A. RUBAN

Donetsk National Technical University, Donetsk, Ukraine

E-mail: birukov.tff@gmail.com, k-j-e@yandex.ru

Abstract

Background. Pulverized coal fuel (PCF) supply is one of the modern methods of improving the cast iron production technology in blast furnaces (BF). It has a significant effect on the heat exchange in the tuyere zone (TZ). The known method of radiant heat transfer calculation in TZ accounts only for the ash particle effect on the TZ blackness degree. The aim of this work is to develop a method for determining TZ blackness degree and to investigate the effect of different factors on this value.

Materials and methods. The work was based on the elements of the proven method of calculating heat exchange in boiler furnaces. Parametric sensitivity was investigated by alternately simulating an error in each of the input values and determining its effect on the sought value.

Results. By analysing the processes, the authors have derived dependences for obtaining the concentration of ash particles and triatomic gases and determined the degrees of TZ blackness by Bouguer's law simultaneously taking into account the radiation of the burning coke and ash particles, and triatomic gases. It has been established that an increase in the PCF consumption from 0 to 250 kg/t of pig iron changes the TZ blackness degree from 0,067 to 0,243; and a 1 % increase in the pressure, concentration of triatomic gases,

ray effective length, TZ temperature and ash particle size changes the TZ blackness by 0,714 %, 0,151 %, 0,72 %, -1,557 % and -0,176 %, respectively.

Conclusions. The calculations have shown that the effects of coke particles, triatomic gases and ash particles on the sought value are approximately equal. In contrast, when the conventional method is applied, it results in an approximately 2-time underestimation of the values, while even for evaluation calculations, the maximum permissible error is 10–15 %. The developed method accounting for all factors has the maximum error of 5 %. It is important for designing tuyeres and TZ refrigerators.

Key words: blast furnace, tuyere zone, pulverized coal injection, blackness degree, radiant heat transfer

DOI: 10.17588/2072-2672.2019.2.025-031

Введение. Несмотря на появление альтернативных технологий производства железа и железобитуминозных сплавов из железных руд, возникшая много столетий назад технология доменного производства по-прежнему удерживает ведущие позиции и продолжает совершенствоваться. Одним из направлений совершенствования технологии производства чугуна в доменных печах (ДП) является вдувание пылеугольного топлива (ПУТ) в фурменную зону вместе с потоком горячего дутья. Реализация этого мероприятия позволяет сократить расход дорогостоящего кокса и тем самым достичь снижения себестоимости производимого чугуна. В то же время при вдувании ПУТ в ДП существенно изменяется ход многих процессов внутри печи, что требует реализации компенсирующих мероприятий (более строгих требований к подготовке шихтовых материалов, обогащения дутья кислородом и т.д.).

Также вдувание ПУТ оказывает существенное влияние на протекание теплообменных процессов в фурменной зоне (ФЗ). Именно эти процессы определяют тепловые потоки, падающие на футеровку фурменной зоны и находящуюся в печи поверхность фурм, что в свою очередь определяет требования к системам охлаждения футеровки и фурм.

Этот вопрос в недостаточной мере освещен в литературе. Тепловое состояние горна ДП можно контролировать при помощи системы диагностики [1]. Одним из первых необходимость теоретического изучения этих процессов обосновал профессор Ю.Л. Курбатов [2]. При попытках оценить параметры лучистого теплообмена в фурменной зоне степень черноты газового объема определялась как для запыленного газового потока по методике

Кутателадзе-Боришанского¹, однако при этом не учитывалось излучение трехатомных газов и горящих коксовых частиц ПУТ. Кроме того, при использовании любой методики для определения степени черноты ФЗ необходимо учитывать, что исходные данные могут содержать существенные погрешности, поэтому для их использования необходимо детальное исследование их параметрической чувствительности.

В связи с этим актуальным является создание методики для определения степени черноты ФЗ, максимально учитывающей все факторы, влияющие на протекание лучистого теплообмена, и исследование влияния различных факторов на эту величину.

Методика исследования. Рассмотрим схему протекания процессов в фурменной зоне (рис. 1).

Важнейшим процессом, протекающим в горне печи, является горение углерода горючего в фурменной зоне, так как при этом выделяется необходимое для процесса тепло и образуются восстановительные газы [3–5].

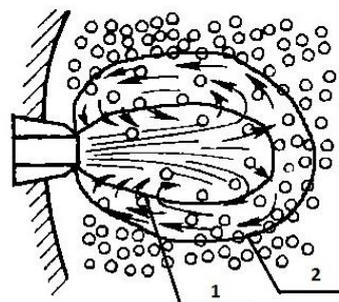
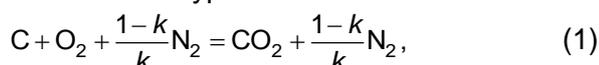


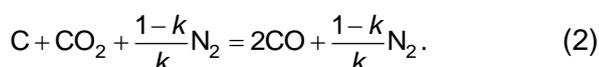
Рис. 1. Схема движения газов в фурменной зоне: 1 – граница окислительной зоны; 2 – граница восстановительной зоны

¹ Кутателадзе С.С., Боришанский В.М. Справочник по теплопередаче. – М.: Государственное энергетическое издательство, 1958. – 414 с.

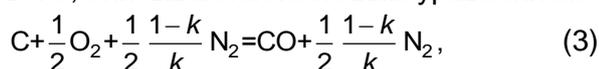
Процесс горения топлива является гетерогенным и протекает на границе двух фаз – твердой и газообразной. В газообразной различают две зоны: окислительную и восстановительную. В окислительной зоне концентрация углерода падает от начального значения до 0, при этом углерод топлива окисляется преимущественно до CO_2 . В восстановительной зоне протекает эндотермическая реакция взаимодействия углерода газа с углеродом топлива с образованием CO . Упрощенно процесс, происходящий в окислительной зоне, описывается уравнением



в восстановительной зоне



Интегрально процессы, протекающие в ФЗ, описываются итоговым уравнением



где k – коэффициент обогащения дутья кислородом.

Для создания методики расчетного определения степени черноты фурменной зоны необходимо опереться на известную апробированную методику расчета лучистого теплообмена в подобных условиях.

Анализ возможных вариантов показал, что в достаточной мере предъявляемым требованиям соответствует методика расчета лучистого теплообмена в топках парогенераторов, сжигающих пылеугольное топливо [6].

Эффективную степень черноты факела при сжигании твердых топлив, которая зависит от излучательной способности трехатомных газов (CO_2 и H_2O) и твердых частиц золы и кокса, рассчитывают по формуле

$$\varepsilon_{\text{ф}} = 1 - e^{-kps}, \quad (4)$$

где e – основание натуральных логарифмов; kps – суммарная сила поглощения топочного объема; k – коэффициент ослабления лучей топочной средой; p – давление в топке, МПа; s – эффективная толщина излучающего слоя, м, определяемая по формуле

$$s = 3,6 \frac{V}{F}, \quad (5)$$

где V – активный газовый объем, м^3 ; F – площадь поверхности, ограничивающей излучающий объем, м^2 .

Коэффициент ослабления лучей топочной среды, $1/(\text{м} \cdot \text{МПа})$, рассчитывают при температуре газов на выходе из топки:

$$k = k_{\text{ис}} + k_{\text{зп}} \mu_{\text{зп}} + 10 \cdot \chi_1 \chi_2, \quad (6)$$

где $k_{\text{ис}}$ – коэффициент ослабления лучей несветящейся частью топочной среды, $1/(\text{м} \cdot \text{МПа})$; $k_{\text{зп}}$ – коэффициент ослабления лучей золовыми частицами, $1/(\text{м} \cdot \text{МПа})$; $\mu_{\text{зп}}$ – средняя концентрация золы в газах, $\text{г}/\text{м}^3$; χ_1 – безразмерный параметр, учитывающий влияние концентрации коксовых частиц в факеле (зависит от вида топлива); χ_2 – безразмерный параметр, учитывающий влияние концентрации коксовых частиц в факеле (зависит от способа сжигания топлива).

Коэффициент ослабления лучей несветящейся частью топочной среды, состоящей из трехатомных газов, рассчитывается как

$$k_{\text{ис}} = r_n k_r, \quad (7)$$

где $r_n = r_{\text{CO}_2} + r_{\text{H}_2\text{O}}$ – суммарная объемная доля трехатомных газов; k_r – коэффициент ослабления лучей трехатомными газами, $1/(\text{м} \cdot \text{МПа})$, определяемый по формуле

$$k_r = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot r_{\text{H}_2\text{O}}}{3,16 \sqrt{p_n s}} \right) \cdot \left(1 - 0,37 \frac{t_g + 273}{1000} \right), \quad (8)$$

где t_g – температура газов, $^{\circ}\text{C}$; $p_n = p r_n$ – суммарное парциальное давление трехатомных газов, МПа; p – давление в топке, МПа.

Коэффициент ослабления лучей золовыми частицами, $1/(\text{м} \cdot \text{МПа})$, рассчитывают по формуле

$$k_{\text{зп}} = \frac{44}{\sqrt[3]{(T_r)^2 d_{\text{зп}}^2}}, \quad (9)$$

где $d_{\text{зп}}$ – среднее значение эффективного диаметра золовых частиц, мкм.

При сжигании твердых топлив концентрацию золы в дымовых газах рассчитывают по формуле

$$\mu_{\text{зп}} = \frac{10 \cdot A^p a_{\text{yh}}}{V_r}, \quad (10)$$

где A^p – зольность; a_{yh} – доля золы топлива, уносимая газами; V_r – суммарный объем газов от сжигания единицы топлива, $\text{м}^3/\text{кг}$.

Для обеспечения возможности использования вышеприведенной методики

для расчета степени черноты ФЗ необходимо определить концентрацию золовых частиц в ФЗ, а также расчетную концентрацию трехатомных газов. Кроме того, делается допущение о том, что поверхность ФЗ является сферической, а трехатомные газы представлены только CO_2 .

Для определения концентрации золовых частиц по (10) необходимо определить выход газов с единицы топлива.

Эта задача решается при помощи итогового выражения:

$$\frac{100 - A}{100} \frac{M_c}{V_\mu} \left(1 + \frac{1 - k}{2k} \right), \quad (11)$$

где M_c – молярная масса углерода, кг/кмоль; V_μ – молярный объем, $\text{м}^3/\text{кмоль}$.

Например, для зольности кокса и ПУТ 10 % и $k = 0,25$ получим $V_r = 4,2 \text{ м}^3/\text{кг}$.

Однако следует иметь в виду, что только зола от ПУТ будет определять степень черноты факела, так как зола кокса стекает с него довольно крупными каплями и их влияние на лучистый теплообмен, согласно зависимости (9), будет крайне незначительно. Для этого предложено в зависимость (9) ввести множитель, представляющий собой отношение удельного расхода ПУТ к полному удельному расходу топлива (кокс и ПУТ). Тогда получим

$$K_{\text{зл}} \mu_{\text{зл}} = \frac{44}{(T^2 d_{\text{зл}}^2)^{1/3}} \frac{10 \cdot A}{V_r} \frac{G_{\text{пут}}}{G_{\text{кокс}} + G_{\text{пут}}}, \quad (12)$$

где $G_{\text{пут}}$, $G_{\text{кокс}}$ – удельный расход ПУТ и кокса на тонну чугуна, кг/т.

Также для оценки вклада горящих коксовых частиц в формирование степени черноты ФЗ необходимо учесть существенное отличие исследуемого процесса от процессов в топке парогенератора. В исследуемом случае мелкие горящие коксовые частицы получаются только при горении частиц ПУТ, раскаленные куски кокса, имеющие размер несколько десятков миллиметров, в малой степени влияют на лучистые свойства ФЗ. Поэтому к комплексу $10 \cdot \chi_1 \chi_2$, определяющему влияние излучения коксовых частиц, предложено ввести дополнительный множитель $G_{\text{пут}}/G_0$, где G_0 – количество топлива, выход продуктов полного сгорания которого при $k = 0,21$ равен выходу газов от полного количества топлива, подаваемого в ДП по реакции (3).

Определение концентрации трехатомных газов предложено вести по следующей схеме:

– находим концентрацию углекислого газа в окислительной зоне как отношение половины объема углекислого газа, соответствующего по реакции (1) полному окислению углерода 1 кг топлива, к полному объему газов, образовавшихся по реакции (1);

– находим концентрацию углекислого газа в восстановительной зоне как отношение половины объема углекислого газа, соответствующего по реакции (2) полному окислению углерода 1 кг топлива, к полному объему газов, образовавшихся по реакции (2);

– находим действующую концентрацию углекислого газа в фурменной зоне как среднее арифметическое от концентраций углекислого газа в окислительной и восстановительной зонах.

Результаты. Дальнейший анализ влияния различных факторов на степень черноты ФЗ и исследование параметрической чувствительности методики выполнены для следующих исходных данных: $k = 0,25$; диаметр ФЗ $D_{\text{фз}} = 1 \text{ м}$; средняя температура газов в ФЗ $t = 2000^\circ\text{C}$; $p = 0,35 \text{ Мпа}$; размер частиц золы 12 мкм; $A = 10 \%$; $G_{\text{кокс}} + G_{\text{пут}} = 550 \text{ кг/т}$.

Промежуточные результаты: эффективная длина луча $l_{\text{эф}} = 0,6 \text{ м}$; $C_{\text{CO}_2} = 17,5 \%$; $V_r = 4,2 \text{ м}^3/\text{кг}$; $G_0 = 290 \text{ кг/т}$. На рис. 2 представлены результаты определения степени черноты ФЗ в зависимости от удельного расхода ПУТ.

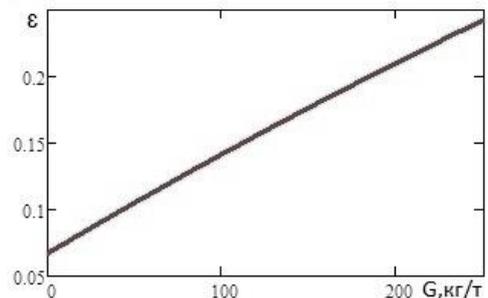


Рис. 2. Зависимость степени черноты ФЗ от удельного расхода ПУТ для принятых исходных данных

Анализ полученной зависимости (рис. 2) показывает, что степень черноты ФЗ практически линейно изменяется от

0,067 до 0,243 при изменении удельного расхода ПУТ от 0 до 250 кг/ т чугуна.

Влияние учитываемых факторов на степень черноты фурменной зоны приведено в табл. 1 (для $G = 150$ кг/т).

Вклад факторов $k_{зл} \mu_{зл} = 0,315$, $10 \cdot \chi_1 \chi_2 = 0,253$, $k_{ис} = 0,33$.

Таблица 1. Влияние различных факторов на степень черноты ФЗ

Виды учитываемых факторов *			ϵ_r
Золовые частицы	Горящие коксовые частицы	Трехатомные газы	
+	+	+	0,173
+	-	+	0,127
-	+	+	0,116
+	+	-	0,114
+	-	-	0,064
-	+	-	0,053
-	-	+	0,067

* – при заполнении соответствующих столбцов знак «+» обозначает, что фактор учитывается, знак «-» – фактор не учитывается.

На основании анализа данных табл. 1 можно сделать вывод, что горящие коксовые частицы, трехатомные газы и золовые

частицы оказывают примерно одинаковое влияние на степень черноты ФЗ. Неучет одной или двух составляющих приводит к недопустимой погрешности.

Получение уточненных данных о степени черноты ФЗ позволяет с большей точностью рассчитать значения характерных тепловых потоков в ФЗ. При помощи стандартных расчетных методик [2] установлено, что для крайних, полученных в работе степеней черноты ФЗ 0,067 и 0,173 отличие характерных тепловых потоков может достигать 20–30 %.

Разработанная методика важна для расчета теплообменных процессов в ФЗ, что необходимо при проектировании фурм и холодильников ФЗ для ДП, использующих вдвудание ПУТ.

Результаты исследования влияния различных факторов на степень черноты ФЗ приведены на рис. 3.

Анализ полученных зависимостей (рис. 3) показывает, что увеличение давления, концентрации углекислоты и эффективной длины луча приводит к росту степени черноты ФЗ, причем в случае p и $l_{эф}$ практически по линейному закону. Рост температуры ФЗ и размера золовых частиц, напротив, обуславливает понижение степени черноты ФЗ. Для температуры эта зависимость практически линейна.

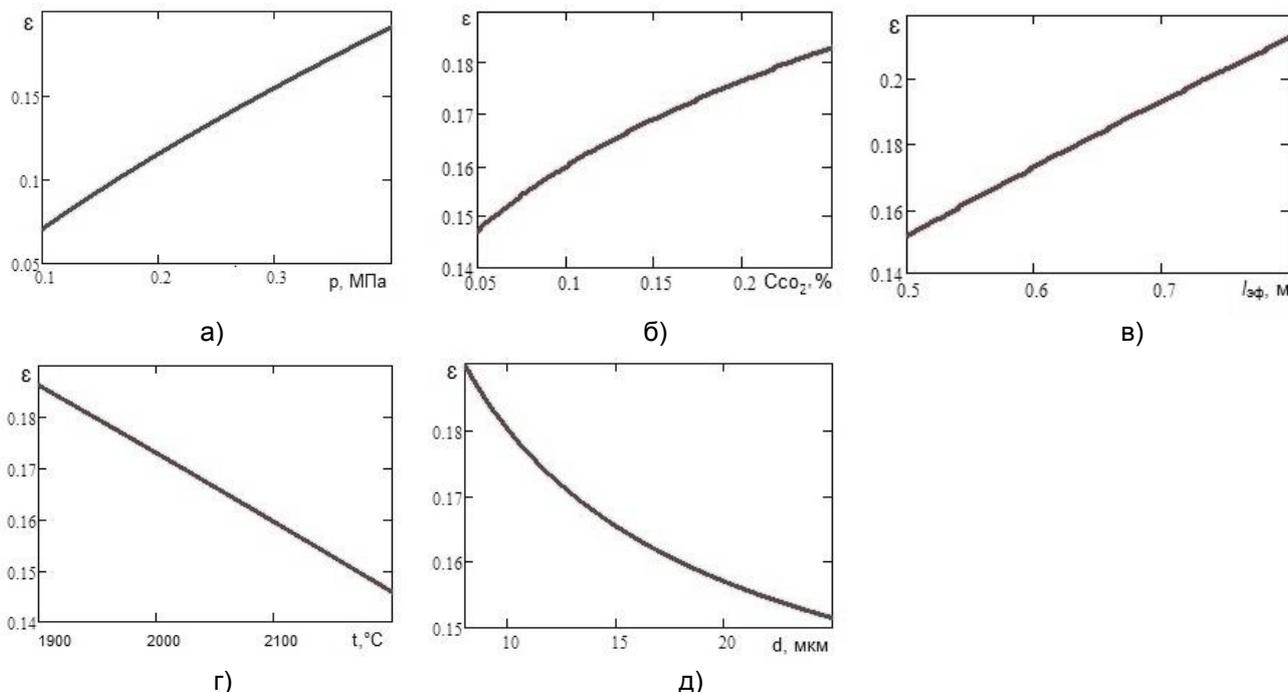


Рис. 3. Зависимость степени черноты ФЗ от различных факторов: а – от давления; б – от концентрации трехатомных газов; в – от эффективной длины луча; г – от температуры; д – от среднего размера золовых частиц

Для исследования параметрической чувствительности использован оригинальный подход, представленный в [7]. С его помощью для каждого из факторов, определяющих значение степени черноты ФЗ, определены количественные значения параметрической чувствительности в районе базового значения факторов (табл. 2). Приведенные значения показывают, на сколько процентов изменяется степень черноты ФЗ при увеличении значения фактора (относительно базового) на 1 %. Знак «+» указывает на то, что значение искомой величины при этом увеличивается, «-» – уменьшается.

Таблица 2. Количественные значения параметрической чувствительности

Наименование фактора	Чувствительность искомой величины к изменению фактора, %/%
Давление в ФЗ	0,714
Концентрация трехатомных газов	0,151
Эффективная длина луча	0,72
Температура в ФЗ	-1,557
Средний размер золых частиц от сгорания ПУТ	-0,176

Полученные данные о параметрической чувствительности результатов расчета к погрешностям задания исходных данных позволяют в первом приближении установить требования к точности их задания. В дальнейшем для уточнения этой информации планируется изучить парные взаимодействия факторов.

Выводы. Предложенная методика определения степени черноты газового объема ФЗ учитывает наряду с влиянием золых частиц излучение горящих коксовых частиц и излучательную способность трехатомных газов.

В результате проведения расчетов при помощи созданной методики установлено примерно равное влияние горящих коксовых частиц, трехатомных газов и золых частиц на степень черноты ФЗ. Неучет одной или двух составляющих приводит к недопустимой погрешности.

Установлено, что степень черноты ФЗ практически линейно изменяется от 0,067 до 0,243 при изменении удельного расхода ПУТ от 0 до 250 кг/т чугуна. Увеличение давления, концентрации углекислоты и эффективной длины луча приводит к росту степени черноты ФЗ, а рост температуры ФЗ и размера золых частиц, напротив, обуславливает понижение степени черноты ФЗ.

Исследование параметрической чувствительности показало, что в районе базовых значений факторов наибольшее влияние на степень черноты оказывает температура в ФЗ. Для всех остальных факторов 1 %-ная погрешность приводит к изменению степени черноты ФЗ менее чем на 1 %.

Следует иметь в виду, что предложенная методика базируется на результатах статистической обработки данных испытаний пылеугольных котлов, поэтому приведенные оценки влияния отдельных факторов следует считать приблизительными. Для более точной оценки потребуются проведение промышленных испытаний с соответствующей схемой сжигания.

Разработанная методика важна для расчета теплообменных процессов в ФЗ, что необходимо при проектировании фурм и холодильников ФЗ для ДП, использующих вдувание ПУТ.

Список литературы

1. **The Determination** of Thermocouples Optimum Number in the Blast Furnace Hearth for Control of Its Condition / M.O. Zolotikh, A.N. Dmitriev, Y.A. Chesnokov et al. // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – Vol. 741. – P. 302–308.
2. **Влияние** пылеугольного топлива на степень черноты фурменной зоны и тепловой режим горна доменной печи / С.Л. Ярошевский, Ю.Л. Курбатов, И.В. Мишин, А.В. Кузин // *Металлург.* – 2013. – № 4. – С. 48–53.
3. **Замена** топлива металлургических агрегатов угольной пылью / В.М. Паршаков, Ю.М. Кузнецов, М.Г. Ладыгичев и др. // *Международный конгресс «Пече-трубостроение, тепловые режимы, автоматизация и экология».* – М.: Теплотехник, 2004. – С. 197–227.
4. **Чернятевич А.Г., Крамарь Н.С., Крамарь В.С.** Установка и методика высокотемпературного моделирования процессов в фурменной зоне доменной печи // *Металлургиче-*

ская и горнорудная промышленность. – 2012. – № 7. – С. 34–35.

5. **Применение** пылеугольного топлива для выплавки чугуна / С.Л. Ярошевский, А.И. Рябенко, А.А. Антонов и др. – Киев: Техника, 1974. – 188 с.

6. **Частухин В.И.** Тепловой расчет промышленных парогенераторов. – Киев: Вища школа, 1980. – 181 с.

7. **Васильева А.В., Бирюков А.Б.** Исследование погрешностей системы диагностики при определении величин, характеризующих тепловую работу кристаллизаторов МНЛЗ // Вестник ДонНТУ. – 2016. – № 5. – С. 31–36.

References

1. Zolotykh, M.O., Dmitriev, A.N., Chesnokov, Y.A., Chen, K., Ivanov, O.Y., Vitkina, G.Yu. The Determination of Thermocouples Optimum Number in the Blast Furnace Hearth for Control of Its Condition. *Applied Mechanics and Materials*, 2015, vol. 741, pp. 302–308.

2. Yaroshevskiy, S.L., Kurbatov, Yu.L., Mishin, I.V., Kuzin, A.V. Vliyanie pyleugol'nogo topliva na stepen' chernoty furmennoy zony i teplovoy rezhim gorna domennoy pechi [Effect of pulverized coal fuel on tuyere zone blackness degree and thermal conditions of the blast furnace hearth]. *Metallurg*, 2013, no. 4, pp. 48–53.

3. Parshakov, V.M., Kuznetsov, Yu.M., Ladygichev, M.G. Zamena topliva

metallurgicheskikh agregatov ugol'noy pyl'yu [Fuel replacement in pulverized coal melting facilities]. *Mezhdunarodnyy kongress «Peche-trubostroenie, teplovye rezhimy, avtomatizatsiya i ekologiya»* [International Congress «Furnace and Pipe Building, Thermal Conditions, Automation and Ecology»]. Moscow: Teplotekhnika, 2004, pp. 197–227.

4. Chernyatevich, A.G., Kramar', N.S., Kramar', V.S. Ustanovka i metodika vysokotemperaturnogo modelirovaniya protsessov v furmennoy zone domennoy pechi [Installation and method of high-temperature simulation of processes in the blast furnace tuyere zone]. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'*, 2012, no. 7, pp. 34–35.

5. Yaroshevskiy, S.L., Ryabenko, A.I., Antonov, A.A. *Primenenie pyleugol'nogo topliva dlya vyplavki chuguna* [Use of pulverized coal fuel for cast iron melting]. Kiev: Tekhnika, 1974. 188 p.

6. Chastukhin, V.I. *Teplovoy raschet promyshlennykh parogeneratorov* [Thermal design of industrial steam generators]. Kiev, 1980. 181 p.

7. Vasil'eva, A.V., Biryukov, A.B. Issledovanie pogreshnostey sistemy diagnostiki pri opredelenii velichin, kharakterizuyushchikh teplovuyu rabotu kristallizatorov MNLZ [Investigation into the errors of the diagnostics system at determining the values characterizing thermal conditions of continuous casting machine crystal-lizers]. *Vestnik DonNTU*, 2016, no. 5, pp. 31–36.

Бирюков Алексей Борисович,

ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет», доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой технической теплофизики, адрес: г. Донецк, ул. Кобозева, д. 15, ауд. 145а, e-mail: birukov.ttf@gmail.com

Biryukov Aleksei Borisovich,

Donetsk National Technical University, Doctor of Engineering Sciences (Post-Doctoral degree), Professor, Head of the Engineering Thermophysics Department, address: Donetsk, No. 15 Kobozeva St., Room 145a, e-mail: birukov.ttf@gmail.com

Рубан Юлия Евгеньевна,

ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет», аспирант кафедры технической теплофизики, адрес: г. Донецк, ул. Кобозева, д. 15, ауд. 145а, e-mail: k-j-e@yandex.ru

Ruban Yulia Evgenyevna,

Donetsk National Technical University, Post graduate student of the Department of Engineering Thermophysics, address: Donetsk, No. 15 Kobozeva St., Room 145a, e-mail: k-j-e@yandex.ru