

ТЕПЛОТЕХНІКА ТА ТЕПЛОЕНЕРГЕТИКА

УДК 669.18.001

©Харлашин П.С.¹, Куземко Р.Д.²

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗОНЫ НА ПЕРЕДАВАЕМЫЙ ЧАСТИЦЕ ТЕПЛОВОЙ ПОТОК

Используя основные законы теоретической теплотехники выполнены оценочные расчеты и показано влияние диаметра частицы, скорости их движения, температуры несущего газа, давления и температуры окружающей среды на тепловые потоки, воспринимаемые порошком, с учетом конвекции и излучения в высокотемпературной зоне.

Ключевые слова: пылеугольное топливо, фурменная зона, степень черноты, диаметр частицы.

Харлашин П.С., Куземко Р.Д. Вплив параметрів високотемпературної зони на тепловий потік, який передається частці. Використовуючи основні закони теоретичної теплотехніки виконані оціночні розрахунки та показано вплив діаметра частинок, швидкості їх руху, температури несучого газу, тиску і температури навколишнього середовища на теплові потоки, що сприймаються порошком, з урахуванням конвекції і випромінювання в високотемпературній зоні.

Ключові слова: пилоугільне паливо, фурмена зона, ступінь чорноти, діаметр частинок.

P.S. Kharlashin, R.D. Kuzemko. Influence of the parameters of high temperature area upon the thermal flow, passed to a particle. Using the basic laws of theoretical estimations were made and the influence of particles diameter, the velocity of their motion, the temperature of carrying gas and the temperature and pressure of their media upon thermal stream, received by powder, with due regard to convection and radiation inside the high temperature area.

Key words: pulverized coal, lance zone, the degree of blackness, the diameter of the particles.

Постановка проблемы. В последнее время в связи с резким удорожанием энергоносителей проблема рационального использования топлива обострилась. На металлургических комбинатах Украины наиболее энергоемким является доменное производство - расходует до 70% всех энергоносителей. Чтобы при производстве чугуна радикально сократить расход энергоресурсов в настоящее время более 120 доменных печей металлургических комбинатов стран мира работают с вдуванием в горн пылеугольного топлива (ПУТ). Мировой практикой доказано, что при внедрении ПУТ расход кокса снижается от традиционных ~500-530 кг/т чугуна до ~230 кг/т и ниже. Переводу доменных печей меткомбинатов Украины на пылеугольное вдувание альтернативы нет. Однако ПУТ-технология требует совершенствования.

Принятые обозначения: t_1, t_2 – температура газа окружающей среды, текущее значение температуры частицы, °С; T – абсолютная температура, К; w – скорость частицы, м/с; δ – эквивалентный диаметр частицы, м; ρ_2 – плотность порошка, кг/м³; τ – время нагрева частицы, с; λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); c_p, c_2 – изобарная теплоёмкость окружающего газа и порошка, кДж/(кг·К); ν – кинематическая вязкость окружающего газа, м²/с; α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К); q – плотность теплового потока, Вт/м²; σ_{np} – приведенный коэффициент излучения, Вт/(м²·К⁴); $\sigma_0 = 5,67 \cdot 10^{-8}$ – константа излучения абсолютно чёрного тела, Вт/(м²·К⁴);

¹ д-р техн. наук, проф., ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь
² канд. техн. наук, доцент, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

ε – степень черноты; Re , Nu , Bi – числа Рейнольдса, Нуссельта и Био.

Индексы обозначают параметры: k – конечное значение, l – передача теплоты излучением, k – передача теплоты конвекцией; 1 – параметры газа окружающей среды; 2 – параметры частицы; o – торможения; a – на срезе сопла; 20 – начального состояния частицы.

Анализ последних исследований и публикаций. В работе [1] показано, что при высоких расходах ПУТ (150-200 кг/т) степень сгорания частиц угля в фурменном очаге (ФО), даже с учетом реакции Будуара, составляет ~70%. Недогоревшие в фурменной зоне частицы могут попадать в шлак, налипать на куски кокса. Возникают и другие реакции вторичной газификации. При производстве чугуна в количестве ~5 млн т/год расход пылеугольного топлива, например, на ПАО «ММК им. Ильича» из расчета 200 кг/т чугуна, составит ~1 млн т/год. Если в фурменном очаге сгорает пусть даже 80% угля, то не проходит стадию первичного окисления ~200 тыс. тонн угля/год, а это ~3330 вагонов угля в год только на одном меткомбинате.

Покажем некоторые, порой трудно поддающиеся анализу, но важные для понимания детали движения и нагрева частиц в ФО. Применительно к одной из доменных печей ММК им.Ильича принимаем, что абсолютное давление торможения воздуха перед фурмой составляет $p_o = 0,4$ МПа, а в фурменном очаге статическое давление $p = 0,35$ МПа. Температура нагрева воздуха $t_o = 1100^\circ\text{C}$. По газодинамической функции давления $\pi(\lambda_a) = p/p_o = 0,4/0,35 = 0,89$ в таблицах находим, что приведенная скорость $\lambda_a = 0,45$. Тогда скорость истечения воздуха из фурмы составит

$$w_a = \lambda_a a_{cp} = 0,45 \cdot 1,08 \sqrt{RT_o} = 0,45 \cdot 1,08 \sqrt{287 \cdot 1373} = 305 \text{ м/с}.$$

Частицы несколько отстают от несущего их воздуха. Тогда легко оценить скорость порошка на срезе фурмы: $w_{a2} \approx 0,8w_a = 0,8 \cdot 305 = 244$ м/с. Заметим, что по расчетам, приведенным в работе [2], скорость истечения воздуха из фурмы составляет $w = 240$ м/с. Отличие объясняется разным значением $\pi(\lambda_a)$ и t_o . Если длина фурменного очага $l \sim 2,3$ м, то средняя скорость полета частицы $w_{cp} = 122$ м/с, а время её пребывания в фурменном очаге составляет $\tau = l/w_{cp} = 2,3/122 = 0,019$ с. Крупная частица за столь короткое время ее пребывания в ФО не успевает нагреться до выхода летучих и полностью сгореть. Естественно, что более тонкий помол и другие мероприятия (нагрев воздуха, его обогащение кислородом) частично решают проблему полного сжигания частиц угля в фурменном очаге. В работе [3] при решении уравнения баланса для нереагирующей круглой частицы, которая прогревается за счет конвекции и излучения, установлено, как плотность и диаметр частиц, их начальная скорость, время полета влияют на конечную температуру частиц применительно к условиям фурменного очага доменной печи. Недостатком этой работы является то, что факторы, влияющие на тепловые потоки, передаваемые частице конвекцией и излучением, не изучены. Поэтому, проводя исследования по энерго- и ресурсосбережению при производстве чугуна нельзя пренебрегать важными для пылеугольной технологии фактами.

Цель настоящей работы – установить влияние степени черноты запыленного газа ε_1 и технологического порошка ε_2 , их температуры t_1 и t_2 , скорости w и диаметра частиц δ , плотности порошка ρ_2 на тепловой поток, передаваемого излучением q_l и конвекцией q_k , и показать, как плотность ρ_2 и диаметр δ частиц влияют на конечную температуру t_k в высокотемпературной зоне.

Изложение основного материала. Физическая модель и методика расчета. Учитывая сложность проблемы, на данном этапе исследования горение частиц топлива не рассматривали. Тепловые потоки, действующие на частицу, рассчитывали только до выхода летучих или для порошка, не содержащего горючие элементы. Такие порошки также вдувают в горн доменной печи – это смесь пылевидной железной руды, известняка или флюсов и целый ряд других.

Плотность теплового потока, который передается частице конвекцией q_k рассчитывали как

$$q_k = \alpha(t_2 - t_1), \quad \alpha = Nu\lambda / \delta, \quad (1)$$

где

$$Nu = 2 + 0,03 Re^{0,54} Pr^{0,33} + 0,35 Re^{0,58} Pr^{0,36}, \quad Re = w\delta / \nu; Pr = \nu c_p / (\lambda_1 \rho_1).$$

Лучистый тепловой поток определяли по уравнению

$$q_{\text{л}} = \sigma_{\text{нр}}(T_1^4 - T_2^4), \quad \sigma_{\text{нр}} = \frac{\sigma_0}{1/\varepsilon_1 + 1/\varepsilon_2 - 1}. \quad (2)$$

Напомним, что степень черноты ε_2 физических тел изменяется в широком диапазоне. Например, ε_2 для угля – 0,85, угольной нити – 0,53, расплавленного чугуна – 0,29, окисленного алюминия ($t = 200\text{-}600^\circ\text{C}$) – 0,11-0,19. Как правило, с увеличением температуры вещества ε_2 возрастает.

Степень черноты ε_1 трех и более атомных газов тем ниже, чем выше температура газа, но существенно зависит от его парциального давления, причем, чем выше это давление, тем больше ε_1 . Но, так как в фурменном очаге лучепрозрачных газов не бывает, следует считать, что для сильно запыленного газа интегральная степень черноты может находиться в пределах $\varepsilon_1 = 0,1\text{-}0,6$.

Если $Bi < 1$, то уравнение теплового баланса для частицы при отсутствии градиента температур по сечению имеет вид

$$\frac{dT_2}{d\tau} = \frac{6Nu\lambda_1}{c_2\rho_2\delta^2}(T_1 - T_2) + \frac{6\sigma_0\varepsilon_2}{c_2\rho_2\delta}(T_1^4 - T_2^4). \quad (3)$$

В работе [2] показано что при высокой скорости w частиц конвективный поток, передаваемый частице, меньше лучистого. Пренебрегая лучистым теплообменом уравнения (3) можно проинтегрировать. Для такого случая текущую температуру частиц определяли по формуле

$$T_2 = T_1 - (T_1 - T_{20}) \exp\left(-\frac{6Nu\lambda_1}{c_2\rho_2\delta^2} \tau\right). \quad (4)$$

В настоящей работе исследования проведены при условии, что существует температурная зависимость $\lambda(t)$ и $c_p(t)$. Расчеты в интервале температур $t_1 = 100\text{-}1800^\circ\text{C}$ выполняли по формулам.

$$\lambda_1 = -14,1 + 7,6 \cdot 10^{-3} t + 15360 / T;$$

$$c_p = 1,126 + 0,126 \cdot 10^{-3} T - 0,347 \cdot 10^5 / T^2.$$

Исходные данные. Численные расчеты были проведены по следующим исходным данным. Диаметр частицы изменяли в диапазоне $\delta = 0,01\text{-}0,6$ мм, давление $p = 0,3\text{-}0,5$ МПа. Температуру окружающего газа поддерживали в диапазоне $t_1 = 1700\text{-}2200^\circ\text{C}$, $w = 50\text{-}300$ м/с. Принимали, что степень черноты газа составляла $\varepsilon_1 = 0,1\text{-}0,6$, а частицы $\varepsilon_2 = 0,2\text{-}0,8$. Температуру частицы изменяли в интервале $t_2 = 50\text{-}1400^\circ\text{C}$. Вязкость газа окружающей среды в зависимости от температуры и давления изменялась в диапазоне $\eta = 63,7 \cdot 10^{-6} - 73,7 \cdot 10^{-6}$ Па·с.

Результаты расчета и их анализ. Из рис. 1 следует, что чем ниже температура несущего газа, тем влияние степени черноты ε_1 меньше, и, следовательно, плотность теплового потока $q_{\text{л}}$ также снижается.

Степень черноты газа ε_1 существенно влияет на плотность теплового потока $q_{\text{л}}$. Так, при изменении степени черноты ε_1 от 0,1 до 0,6 при температуре газа, равной 2200°C , плотность теплового потока $q_{\text{л}}$ увеличивается от 0,2 МВт/м² до 0,9 МВт/м². Степень черноты частицы технологического порошка ε_2 также существенно влияет на плотность теплового потока $q_{\text{л}}$. Например, если $t_1 = 2000^\circ\text{C}$, то при изменении ε_2 от 0,2 до 0,8 поток $q_{\text{л}}$ увеличивается от 0,17 МВт/м² до 0,28 МВт/м².

Так как при истечении газопылевого потока в фурменном очаге скорость w находится в пределах $\sim 300\text{-}50$ м/с, то она оказывают решающее влияние на плотность теплового потока $q_{\text{к}}$, передаваемого конвекцией. Из рис. 2 видно, что при изменении w в указанном выше интервале при температуре газа $t_1 = 2000^\circ\text{C}$ тепловой поток $q_{\text{к}}$ увеличивается от 14,1 МВт/м² до 22,5 МВт/м².

Как следует из рис. 3а, при постоянной температуре частиц t_2 с увеличением диаметра δ плотность теплового потока $q_{\text{к}}$ значительно снижается. Так, если температура частицы равна $t_2 = 1000^\circ\text{C}$, то при увеличении диаметра δ от 0,05 мм до 0,6 мм тепловой поток $q_{\text{к}}$ уменьшается от 19,8 МВт/м² до 5,6 МВт/м².

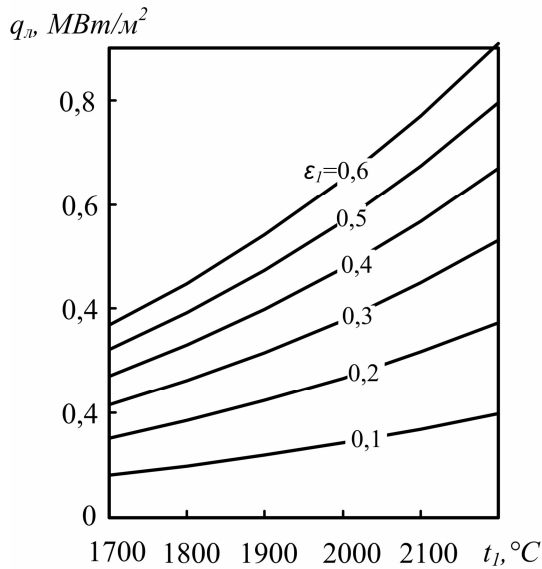


Рис. 1 – Изменение плотности теплового потока, передаваемого излучением q_r при различной температуре газа t_1 в зависимости от степени черноты ϵ_1 сильно запыленного газа. Исходные данные: $\delta = 0,01$ мм; $p = 0,4$ МПа; $w = 50$ м/с; $t_2 = 50$ °С; $\epsilon_2 = 0,6$

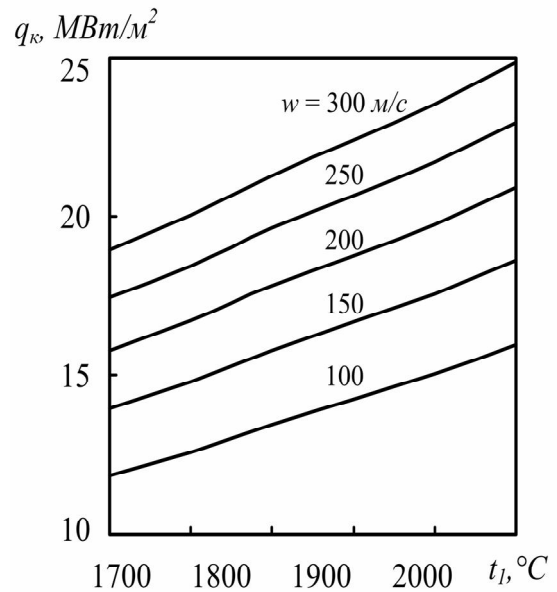
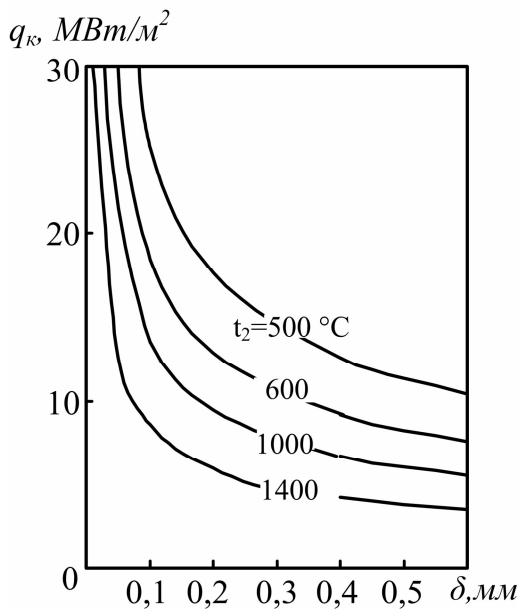
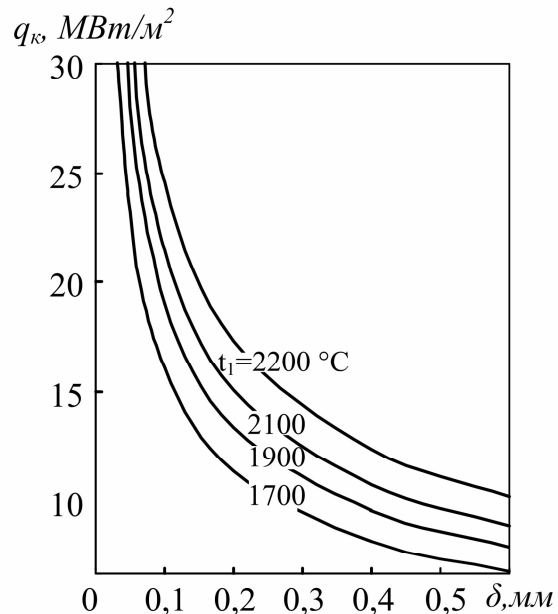


Рис. 2 – Изменение плотности конвективного теплового потока q_k при различной температуре газа t_1 в зависимости от скорости движения w . Исходные данные: $\delta = 0,1$ мм; $p = 0,4$ МПа; $t_2 = 50$ °С, $\epsilon_1 = 0,18$, $\epsilon_2 = 0,25$

Из рис. 3,б видно, что температура газа существенно влияет на q_k . Так, при изменении t_1 от 1700 до 2200 °С (диаметр частиц $\delta = 0,4$ мм) поток q_k возрастает с 8,2 МВт/м² до 12,4 МВт/м².



(а)



(б)

Рис. 3 – Изменение плотности конвективного теплового потока q_k при различном диаметре частиц δ в зависимости от температуры частиц t_2 (а) и газа t_1 (б)
Исходные данные: $p = 0,5$ МПа; $w = 250$ м/с; $\epsilon_1 = 0,18$, $\epsilon_2 = 0,25$, а) $t_1 = 2100$ °С; б) $t_2 = 600$ °С

С увеличением скорости движения w и уменьшением диаметра δ частиц тепловой поток

q_k , передаваемый конвекцией, значительно возрастает (рис. 4). Так, при уменьшении диаметра δ с 0,6 мм до 0,05 мм при скорости движения частиц $w = 150$ м/с плотность q_k увеличивается с 5 МВт/м² до 22 МВт/м².

Из рис. 3,б видно, что температура газа существенно влияет на q_k . Так, при изменении t_1 от 1700 до 2200 °С (диаметр частиц $\delta = 0,4$ мм) плотность q_k возрастает с 8,2 МВт/м² до 12,4 МВт/м². С увеличением скорости движения w и уменьшением диаметра δ частиц тепловой поток q_k , передаваемый конвекцией значительно возрастает (рис. 4). Так, при уменьшении диаметра δ с 0,6 мм до 0,05 мм при скорости движения частиц $w = 150$ м/с поток q_k увеличивается с 5 МВт/м² до 22 МВт/м².

Анализ представленных на рис. 5 зависимостей показал, что температура t_k зависит от ρ_2 и δ . Например, увеличение плотности ρ_2 с 2000 до 3000 кг/м³ при $\delta = 0,25$ мм и $\tau = 0,03$ с приводит к снижению t_k с 1680 °С до 1590 °С, так как более тяжелая частица за заданное время τ разогревается медленнее.

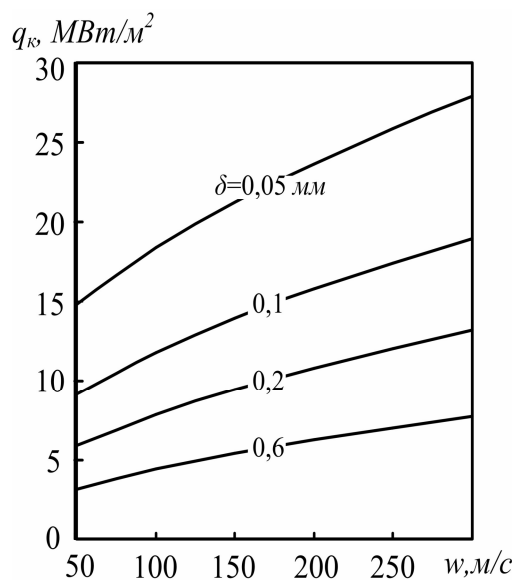


Рис. 4 – Изменение плотности конвективного теплового потока q_k в зависимости от скорости w и от диаметра частиц δ . Исходные данные: $p = 0,4$ МПа; $t_1 = 1700$ °С; $t_2 = 50$ °С, $\varepsilon_1 = 0,18$, $\varepsilon_2 = 0,25$

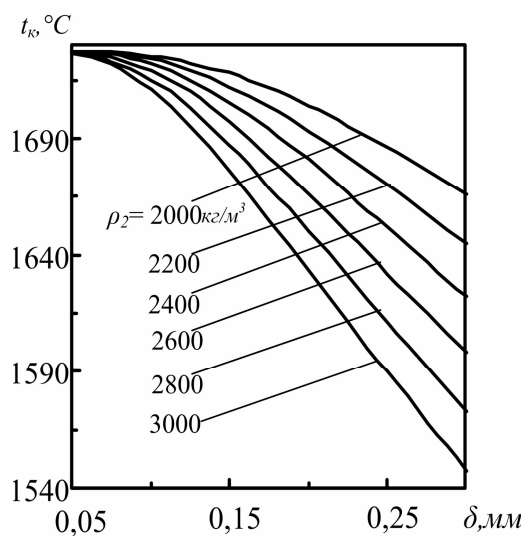


Рис. 5 – Влияние плотности ρ_2 частицы на конечную температуру t_k при различном диаметре δ . Исходные данные: $\tau = 0,03$ с; $w_2 = 50$ м/с; $p = 0,5$ МПа, $t_0 = 100$ °С, $\varepsilon_1 = 0,154$; $\varepsilon_2 = 0,129$

Проверка адекватности модели. Выполнить эксперимент в условиях фурменного очага практически невозможно. Для доказательства адекватности модели применим метод анализа частных случаев. Так, если

- температура несущего газа $t_1 \rightarrow 0$, то и поток $q_k \rightarrow 0$ при любой степени черноты ε_1 (рис. 1);
- температура газа $t_1 \rightarrow 0$, то при любой скорости w газа плотность теплового потока $q_k \rightarrow 0$, что физически легко объяснимо (рис. 2);
- частица любого диаметра δ нагревается, а в фурменной зоне температура газа t_1 остается постоянной, то тепловой поток q_k снижается (рис. 3,а);
- диаметр частицы δ возрастает, то числа Re и Nu увеличиваются, однако коэффициент теплоотдачи α падает (формула 1) и в этом случае тепловой поток слабо зависит от скорости w (рис. 4);
- диаметр $\delta \rightarrow 0$, то масса частицы $m_2 \rightarrow 0$ и тогда $t_k \rightarrow t_1$ при любой плотности ρ_2 (рис. 5).

Тестовый анализ показал, что полученные закономерности полностью соответствуют физическим представлениям.

В дальнейшем необходимо исследовать влияния различных факторов на нагрев и горение

реагирующих частиц в фурменном очаге.

Выводы

1. Численные расчеты показали, что при нагреве инертной частицы, перемещающейся в высокотемпературной зоне, на величину конвективного теплового потока q_k наибольшее влияние оказывает диаметр частиц δ , а так же скорость её полёта w . Показано, что чем меньше δ , тем выше поток теплоты q_k .
2. Чем выше плотность порошка ρ_2 , тем до меньшей конечной температуры t_k за одно и тоже время нагревается частица.

Список использованных источников:

1. Исследование превращения вдуваемых углей и других порошков в шахтных печах / А.И. Бабич, Д.Г. Зенк, Г.В. Гуденау [и др.] // Труды междунар. науч. – техн. конф. «Пылеугольное топливо – альтернатива природному газу при выплавке чугуна». – Донецк : ООО «Технопарк ДонГТУ «УНИТЕХ». – 2006. – С. 181 – 192.
2. Исследование разогрева частиц порошка в фурменном очаге доменной печи / Н.В. Косолап, П.С. Харлашин // Металл и литье Украины. – 2008. – № 11–12. – С. 11–14.
3. Аналитическое исследование процессов в фурменной зоне доменной печи. / А.Г. Байбуз, А.П. Васильев, А.Л. Чайка // Изв. вузов. Черная металлургия. – 2002. – №7. – С.72-73.
4. Основы практической теории горения / В.В. Померанцев, К.М. Арефьев, Д.Б. Ахмедов и [др]. Л. : Энергоатомиздат. – 1986. – 312с.

Bibliography:

1. Study of injected coal conversion and other powders in blast furnaces /A.I Babich, D.G. Sönke, G.V. Gudenau [and others] // Proceedings of the Intern. researcher. - Technical. conference. "Pulverized coal - an alternative to natural gas for smelting iron." – Donetsk : "Technopark DonSTU Unitech ". - 2006. - P. 181 - 192.
2. Investigation of the heating of the powder particles in the blast furnace hearth tuyeres /N.V.Kosolap, P.S. Kharlashin // Metal and casting of Ukraine. - 2008. - № 11-12. - P. 11-14.
3. Analytical study of the processes in the fur-variable zone BF /A.G. Baybuz, A.P. Vasiliev, A.L. Chayka // Math. universities. Iron and steel industry. - 2002. - № 7. - P.72-73.
4. Fundamentals of practical combustion theory / V.V. Pomerantsev, K.M. Arefyev, D.B.Akhmedov and [others]. L. : Energoatomizdat. - 1986. – 312p.

Рецензент: В.А. Маслов
д-р техн. наук, проф. ГВУЗ «ПГТУ»

Статья поступила 23.04.2012

УДК 533.6.011.72:681.121.089

©Лухтура Ф.И.*

**ГАЗОДИНАМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРОБЛЕМЫ
ЭРОЗИОННОГО ИЗНОСА СОПЕЛ НАКОНЕЧНИКОВ
КИСЛОРОДНО-КОНВЕРТЕРНЫХ ФУРМ**

Рассмотрены причины образования мощных конвективных течений в присопловой области наконечников фурм, индуцированных высокоскоростными струями окислителя в этой зоне. Определены диапазоны изменения скорости конвекции конвертерных газов, уточнены причины и механизм эрозионного износа выходных участков сопел в фурмах кислородного конвертера.

Ключевые слова: конвертер, фурма, сопло, эжекция, сверхзвуковой поток, эрозия.

* ст. преподаватель, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Марциполь