

Приборы и оборудование

УДК 669.162.21.001.573

**Моторина Т.А., Курбатов Ю.Л., канд. техн. наук, доцент,
Василенко Ю.Е.**

Донецкий национальный технический университет

ул. Артема, 58, 83000 Донецк, Украина, e-mail: motorina_tatyana@bk.ru

Исследование теплообмена в фурменной зоне доменной печи с применением пылеугольного топлива

Исследование теплообмена в фурменной зоне доменной печи позволило разработать методику расчета теплообменных процессов посредством конвекции и излучения. Установлены численные значения для разного расхода пылеугольного топлива. Работа позволяет сделать вывод о степени важности вдувания пылеугольного топлива и влиянии его на экономические показатели расхода кокса в печи. *Библ. 8, рис. 2, табл. 1.*

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

В доменном производстве проблема снижения расхода дорогостоящего кокса остается актуальной до настоящего времени. Одним из решений проблемы является использование замесителей кокса: мазута, природного газа, пылеугольного топлива. Данное исследование направлено на изучение теплообменных процессов, происходящих при вдувании пылеугольного топлива (ПУТ).

Цель работы — разработка методики расчета теплообменных процессов в фурменной зоне доменной печи с условием подачи пылеугольного топлива и анализ этих процессов.

В работе фурменная зона представляется сферической полостью, в которой происходит интенсивное горение кокса и ПУТ с образованием восстановительных горновых газов, состоящих из смеси CO и H₂. Между горновыми газами и материалами на периферии фурменной зоны происходит теплообмен за счет конвекции и излучения.

Для оценки конвективного теплообмена разработана следующая методика расчета.

Плотность конвективного теплового потока определяется по закону Ньютона-Рихмана [1]:

$$q_k = \alpha_k (T_f - T_{пр}), \quad (1)$$

где α_k — коэффициент теплоотдачи конвекцией, Вт/(м²·К); T_f — температура газов в фурменной зоне, К; $T_{пр}$ — температура продуктов доменной плавки и кокса, окружающих фурменную зону, К.

Для определения коэффициента теплоотдачи конвекцией в работе предлагается модель движения газов в фурменной зоне, схема которого представлена на рис.1. Струя дутьевого воздуха, втекающая в фурменную зону, расширяется, достигает противоположной стенки и растекается по сферической поверхности. При этом можно выделить зоны с различной интенсивностью теплообмена: зону интенсивного теплообмена, которая располагается в месте удара струи с площадью $f_{инт}$ и коэффициентом теплоотдачи $\alpha_{инт}$, а также зону обратного потока струи, где $\alpha_{обр}$ значительно ниже.

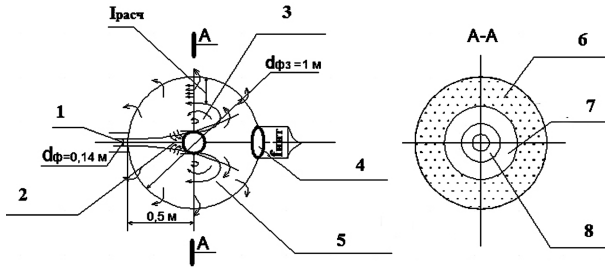


Рис.1. Модель теплообмена в фурменной зоне: 1 – фурма; 2 – прямой дутьевой поток; 3 – зона рециркуляции; 4 – зона интенсивной конвекции; 5 – обратный поток; 6 – сечение для прохода газов; 7 – зона рециркуляции потока; 8 – сечение струи прямого потока.

Коэффициенты теплоотдачи конвекцией в этих зонах находятся из критерия Нуссельта [2]:

$$Nu = (\alpha \cdot d) / \lambda, \quad (2)$$

который, в свою очередь, определяется из критериальной зависимости [3]:

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

где критерий Рейнольдса [1]:

$$Re = (w \cdot d) / \nu, \quad (4)$$

критерий Прандтля [2]:

$$Pr = a / \nu, \quad (5)$$

где d – расчетный размер, м; λ – коэффициент теплопроводности фурменных газов, Вт/(м·К); w – расчетные скорости газов в зонах, м/с; ν – коэффициент кинематической вязкости, м²/с; a – коэффициент температуропроводности, м²/с.

Коэффициент влияния угла встречи струи β и обратного потока с поверхностью фурменной зоны φ определяется по таблице [3].

Зависимость коэффициента φ от угла β

β	0	10	40	60	70	90
φ	1,00	1,05	1,85	2,32	2,42	2,50

Для зоны интенсивного теплообмена $\varphi = 2,5$, для запыленного потока $\varphi = (1 + 2,5) / 2 = 1,7$.

Расчетные скорости газов в зоне интенсивной конвекции рассчитываются с использованием формул Г.Н.Абрамовича [4]:

$$w = w_0 \cdot 0,96 (0,152 d_{ф.з} / d_0 + 0,29)^{-1},$$

где w_0 – скорость истечения газа из фурмы, м/с; $d_{ф.з}$ – диаметр фурменной зоны, м; d_0 – диаметр фурмы, м.

Расчетная толщина обратного потока $l_{расч}$ определяется как половина разницы радиуса фурменной зоны и радиуса струи в середине фурменной зоны $r_{стр}$. Последний определяется по такой формуле Г.Н.Абрамовича [4]:

$$r_{стр} = r_0 (0,517 r_{ф.з} / r_0 + 1),$$

где r_0 – радиус фурмы, м; $r_{ф.з}$ – радиус фурменной зоны, м.

Пример расчета плотности конвективного теплового потока приведен для фурменной зоны с расходом дутья $V_{д.(1)} = 1,881$ м³/с, температурой дутья $t_{д.} = 1000$ °С, $d_{ф.з} = 1$ м, $d_0 = 0,14$ м. В исследовании определено, что площадь интенсивного теплообмена равна 12 % общей поверхности фурменной зоны.

В случае максимально возможного расхода ПУТ, равного 250 кг/т чугуна, в работе получены такие величины: $\alpha_{инт} = 111$ Вт/(м²·К), $\alpha_{обр} = 29$ Вт/(м²·К); средний коэффициент теплоотдачи $\alpha_{ср} = 0,12 \cdot 111 + 0,88 \cdot 29 = 35,2$ Вт/(м²·К). Плотность теплового потока по формуле (1) для $t_{ф} = 2000$ °С и $t_{пр} = 1500$ °С составила $q_k = 17600$ Вт/м².

Плотность теплового потока излучением определяется по формуле Стефана-Больцмана [1]:

$$q_{изл} = c_{пр} [(T_{ф}/100)^4 - (T_{пр}/100)^4], \quad (6)$$

где $c_{пр}$ – приведенный коэффициент излучения, Вт/(м²·К⁴); $c_{пр} = \epsilon_{ф.з} c_0$ [1]; приведенная степень черноты объема фурменной зоны определяется так [5, 6]:

$$\epsilon_{ф.з} = 1 / (1 / \epsilon_r + 1 / \epsilon_{в.п} - 1),$$

где ϵ_r – степень черноты объема фурменной зоны; $\epsilon_{в.п}$ – 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 ϵ , равна поглощающей способности тела a . В связи с тем, что горение кокса и ПУТ в фурменной зоне происходит с образованием двухатомных газов (СО, Н₂), которые практически не участвуют в радиационном теплообмене, излучать тепло могут, главным образом, плотные частицы. В объеме фурменной зоны происходит практически мгновенное сгорание частиц ПУТ, в результате чего образуется запыленный поток, состоящий из расплавленных частиц золы. Поглощательная способность запыленного потока может быть определена по закону Бугера-Ламберта-Бера [1, 5, 7, 8], представленного в методике Кутателадзе-Боришанского [5]:

$$\varepsilon_r = a = 1 - e^{-Kl}, \quad (7)$$

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

Расчет поглощательной способности производится в следующей последовательности.

1. Выбор вида топлива, участвующего в горении: ПУТ и кокс.

2. Определение диаметра частиц золы ПУТ и кокса. Расчет диаметра частицы золы выбранного вида топлива проводится с учетом их зольности и плотности.

3. Расчет эффективного значения коэффициента ослабления лучей в данной среде [5]:

$$K = K_n \mu F,$$

где K_n — эффективный коэффициент ослабления, доли ед.; μ — плотность запыленного газового потока, г/м³; F — средняя удельная поверхность пыли, м²/г,

$$K_n = 0,42 (A/c) \cdot 273 (T_n^2 d^2)^{-1/3},$$

где c — плотность горючих веществ, кг/м³; d — средний диаметр золы, мкм;

$$\mu = (A^c G) / V_{гг},$$

где A^c — содержание золы в используемом топливе, доли ед.; G — расход топлива, кг/т чугуна; $V_{гг}$ — выход горновых газов, м³/т чугуна.

4. Расчет поглощательной способности по формуле (7).

Зависимость степени черноты газового потока от размера частицы и расхода ПУТ представлена на рис.2, откуда видно, что степень черноты объема достигает единицы уже при достаточно малой подаче ПУТ и любом размере частицы.

Степень черноты поверхности фурменной зоны $\varepsilon_{пов}$ определяется как средневзвешенная величина для чугуна, кокса и шлака и составляет 0,47–0,51. Приведенная степень черноты с

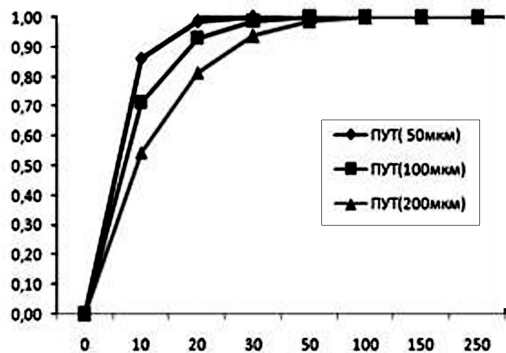


Рис.2. Зависимость $\varepsilon_r = f(G_{\text{ПУТ}})$.

применением ПУТ практически равна $\varepsilon_{пов}$, а плотность теплового потока q (по формуле (6)) достигает 450 кВт/м² для $t_{ф} = 2000$ °С и $t_{пр} = 1500$ °С. Плотность теплового потока без ПУТ, то есть при сжигании только кокса, составляет всего 1,1 кВт/м². Следовательно, тепловые потоки, передаваемые конвекцией и излучением, составляют при сжигании только кокса $q_{\Sigma} = 17,6 + 1,1 = 18,7$ кВт/м², а при использовании ПУТ $q_{\Sigma} = 17,6 + 450 = 467,6$ кВт/м².

Выводы

На основе проведенных исследований была разработана методика определения тепловых потоков от образовавшегося в фурменной зоне горячего газового объема к дошедшим до уровня фурм шихтовым материалам, передаваемых посредством конвекции и излучения. Предложенная методика позволяет определить численные значения тепловых потоков и делает возможным их сравнение. Величины потоков численно существенно различаются. Тепловой поток при использовании ПУТ в 25 раз больше, чем при сжигании только кокса. С учетом данных выводов в дальнейшем исследовании будут направлены на изучение параметров, влияющих на значение теоретической и калориметрической температур с условием подачи ПУТ, на расчет перегрева продуктов доменной плавки.

Список литературы

- Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. — М.: Энергия, 1975. — 488 с.
- Казанцев Е.И. Промышленные печи: Справочное руководство для расчетов и проектирования. — М.: Металлургия, 1975. — 368 с.
- Курбатов Ю.Л., Василенко Ю.Е. Металлургические печи: Учеб. пособие. — Донецк: Донецк. нац. техн. ун-т, 2013. — 388 с.
- Курбатов Ю.Л., Масс М.С., Кравцов В.В. Гидрогазодинамика в теплотехнике. — Донецк: Норд-Пресс, 2009. — 234 с.
- Кутателадзе С.С., Боришанский В.М. Справочник по теплопередаче. — М.: Госэнергоиздат, 1959. — 414 с.
- Мишин И.В., Курбатов Ю.Л., Ярошевский С.Л. Методика расчета температуры продуктов плавки на выпуске при вдувании в горн дополнительных топлив // Тр. Междунар. науч.-практ. конф. «Теория и практика тепловых процессов в металлургии», Екатеринбург, 18–21 сент. 2012 г. — Екатеринбург: Урал. федерал. ун-т, 2012.
- Мак-Адамс В.Х. Теплопередача. — М.: Металлургия, 1961. — 686 с.
- Гинкул С.И., Шелудченко В.И., Кравцов В.В., Палкина С.В. Теплообмен: Учеб. пособие для вузов. — Донецк: Норд-Пресс, 2006. — 298 с.

Поступила в редакцию 20.05.13

Моторіна Т.О., Курбатов Ю.Л., канд. техн. наук, доцент,
Василенко Ю.Є.

Донецький національний технічний університет

вул. Артема, 58, 83000 Донецьк, Україна, e-mail: motorina_tatyana@bk.ru

Дослідження теплообміну у фурменій зоні доменної печі із застосуванням пиловугільного палива

Дослідження теплообміну у фурменій зоні доменної печі дало змогу розробити методіку розрахунку теплообмінних процесів за допомогою конвекції та випромінювання. Встановлено чисельні значення для різних витрат пиловугільного палива. Робота дає змогу зробити висновок про міру важливості вдунання пиловугільного палива та вплив його на економічні показники витрати коксу у печі. *Бібл. 8, рис. 2, табл. 1.*

Ключові слова: доменна піч, фурма, кокс, пиловугільне паливо, конвекція, випромінювання.

Motorina T.A.,

Kurbatov Yu.L., Candidate of Technical Science, Associate Professor,
Vasilenko Yu.Ye.

Donetsk National Technical University

58, Artema Str., 83000 Donetsk, Ukraine, e-mail: motorina_tatyana@bk.ru

Research of Heat Exchange in Blast Zone of Blast Furnace Using Coal-Dust Fuel

Research of heat exchange in the blast zone of blast furnace allowed to develop methodology of calculating heat exchange processes by means convection and radiation. Numerical values for a different consumption of coal-dust fuel are established. Work allows to make a conclusion about degree of importance of inflation of coal-dust fuel and its influence on economic indicators of a consumption of coke in the furnace.

Key words: blast furnace, lance, coke, coal-dust fuel, convection, radiation.

References

1. Isachenko V.P., Osipova V.A., Sukomel A.S. Heat transfer. Moscow : Energy, 1975, 488 p. (Rus.)
2. Kazancev E.I. Industrial furnaces : Reference guide for calculations and design. Moscow : Metallurgiya, 1975, 368 p. (Rus.)
3. Kurbatov Yu.L., Vasilenko Yu.E. Metallurgical furnaces. Donetsk : Donetsk National Technical University, 2013, 388 p. (Rus.)
4. Kurbatov Yu.L., Mass M.S., Kravcov V.V. Hydraulic gas dynamics in the heating engineer. Donetsk : Nord-Press, 2009, 234 p. (Rus.)
5. Kutateladze S.S., Borishanskij V.M. Directory on a heat transfer. Moscow : Gosenergoizdat, 1959, 414 p. (Rus.)
6. Mishin I.V., Kurbatov Yu.L., Yaroshevsky S.L. Method of Calculation of Temperature of Products of Melting on Release at Inflation in a Horn of Additional Fuels. *Works of the International Scientific and Practical Conference «The Theory and Practice of Thermal Processes in Metallurgy»*, Yekaterinburg, Russia, Sept. 18–21, 2012, Yekaterinburg : The Ural Federal University, 2012. (Rus.)
7. McAdams W.H. Heat transfer. Moscow : Metallurgizdat, 1961, 686 p. (Rus.)
8. Ginkul S.I., Sheludchenko V.I., Kravtsov V.V., Palkina S.V., Heat and Mass Transfer. Donetsk : Nord-Press, 2006, 298 p. (Rus.)

Received May 20, 2013