

УДК 669.162.263

## СТАЦИОНАРНЫЙ ТЕПЛООБМЕН В ОРОШАЕМОЙ РАСПЛАВОМ ЗОНЕ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ\*

**Ярошенко Ю.Г.**, д.т.н., профессор кафедры теплофизики и информатики в металлургии

**Швыдкий В.С.**, д.т.н., профессор кафедры теплофизики и информатики в металлургии

**Спирин Н.А.**, д.т.н., профессор, зав. кафедрой теплофизики и информатики

в металлургии (n.a.spirin@urfu.ru)

**Лавров В.В.**, д.т.н., профессор кафедры теплофизики и информатики в металлургии

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина

(620002, Россия, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19)

**Аннотация.** Сформулирована задача стационарного теплообмена в орошаемой зоне доменной печи, учитывающая особенности процесса фильтрации чугуна и шлака через коксовую насадку. Показано, что в этой зоне происходит одновременный нагрев газом потоков кокса, чугуна и шлака, каждый из которых находится в состоянии теплообмена между собой. Причем процессы взаимного теплообмена осуществляются как конвекцией, так и излучением. Конвекция обеспечивает теплообмен между газом и всеми нагреваемыми материалами, а также между шлаком и коксом, поскольку стекающий по коксу шлак частично покрывает его поверхность. Лучистый теплообмен развивается между коксом, чугуном и шлаком. Его интенсивность увеличивается с ростом температуры нагреваемых материалов. Установлено, что взаимный теплообмен между потоками кокса, чугуна и шлака в орошаемой зоне доменной печи оказывает значительное влияние на формирование температурного поля в этой зоне. Для расчета теплообмена в области заплечиков и горна доменной печи необходимы знания о распределении тепловых эффектов химических реакций прямого восстановления железа, кремния и марганца по высоте орошаемой зоны и доли поверхности кокса, покрываемой шлаком.

**Ключевые слова:** доменный процесс, теплообмен, зона расплава, математическое моделирование, движение шлака, чугуна, кокса.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-2-88-93

Процессы теплообмена, протекающие в высокотемпературной зоне доменной печи, в которой образовавшиеся при плавлении железорудных материалов шлак и чугун фильтруются через коксовую насадку навстречу газовому потоку, существенно влияют на показатели плавки, распределение температур газа, кокса, чугуна и шлака по высоте нижней части доменной печи [1 – 6].

При физической формулировке задачи стационарного теплообмена в орошаемой зоне доменной печи следует учитывать особенности процесса фильтрации чугуна и шлака. Эти особенности проявляются в том, что чугун и шлак вследствие различия физических свойств стекают через коксовую насадку как расслоенные потоки жидких фаз. При этом один из потоков (чугун) не смачивает куски кокса, скатываясь по ней в виде капель и струй, а второй (шлак) лишь частично покрывает поверхность кокса. В связи с этим в нижней части доменной печи (начиная с уровня плавления железорудных материалов) происходит одновременный нагрев газом трех потоков, каждый из которых находится в состоянии теплообмена между собой. Причем процесс теплообмена осуществляется как конвекцией, так и излучением. Конвективный

теплообмен существует между газом и всеми нагреваемыми материалами, а также между шлаком и коксом, поскольку стекающий по коксу шлак частично покрывает его поверхность. Кроме того, конвективный теплообмен происходит между чугуном и коксом, а также между чугуном и шлаком, но доля этого вида теплообмена между этими фазами в общем тепловом балансе относительно мала, что позволяет при математической формулировке задачи конвективным теплообменом между этими фазами пренебречь. Лучистый теплообмен происходит между тремя потоками: коксом, чугуном и шлаком.

Физическое и математическое описание задачи для исследуемого случая развивает подход, сформулированный в работах [7; 8] при изучении процессов нагрева (охлаждения) газом двухкомпонентной шихты, и заключается в следующем. В шахте высотой  $H_0$  непрерывным потоком сверху вниз опускается со скоростью  $w_1$  слой кокса. В межкусовом пространстве слоя стекают со скоростями движения  $w_2$  и  $w_3$  расслоенные потоки чугуна и шлака. Каждый из материалов, участвующих в процессах тепло- массообмена, характеризуется удельными поверхностями  $f_1, f_2, f_3$ ,  $\text{м}^2/\text{м}^3$ , плотностями  $\rho_{\text{нак}}, \rho_2, \rho_3$ ,  $\text{кг}/\text{м}^3$ , и удельными теплоемкостями  $c_1, c_2, c_3$ ,  $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ . Начальные температуры кокса, чугуна и шлака соответственно будут  $t'_{\text{м1}}, t'_{\text{м2}}, t'_{\text{м3}}$ . Навстречу

\* Работа выполнена при финансовой поддержке (постановление № 211) Правительства Российской Федерации, контракт № 02.А03.0006.

материалам со скоростью  $w_r$  движется газовый поток, конечная температура которого  $t_r''$ , а его теплоемкость и плотность –  $c_r$ , кДж/(м<sup>3</sup>·К), и  $\rho_r$ , кг/м<sup>3</sup>.

Поставленная задача решена для случая, когда материалы обладают бесконечно большой теплопроводностью, а внутренние источники и стоки тепла учитываются кажущейся теплоемкостью материалов. При этом сделаны допущения, обычно принимаемые для такого рода задач [7 – 13].

Теплообмен в рассматриваемом случае описан следующей системой уравнений [7; 8; 11]:

для потока кокса

$$c_1 \rho_{1\text{нас}} w_1 \frac{dt_{m1}}{dy} = \alpha_{r-1} f_1(t_r - t_{m1}) + \alpha_{k13} f_1(t_{m3} - t_{m1}) + \alpha_{л12} f_1(t_{m3} - t_{m1}) + \alpha_{л31} f_1(t_{m3} - t_{m1}); \quad (1)$$

для потока чугуна

$$c_2 \rho_{2\text{нас}} w_2 \frac{dt_{m2}}{dy} = \alpha_{r-2} f_2(t_r - t_{m2}) + \alpha_{л12} f_2(t_{m1} - t_{m2}) + \alpha_{л32} f_2(t_{m3} - t_{m2}); \quad (2)$$

для потока шлака

$$c_3 \rho_3 w_3 \frac{dt_{m3}}{dy} = \alpha_{r-3} f_3(t_r - t_{m3}) - \alpha_{k13} f_1(t_{m3} - t_{m1}) - \alpha_{л32} f_2(t_{m3} - t_{m2}) - \alpha_{л31} f_1(t_{m3} - t_{m1}); \quad (3)$$

для потока газа

$$c_r \rho_r w_r \frac{dt_{m2}}{dy} = \alpha_{r-1} f_1(t_r - t_{m1}) + \alpha_{r-2} f_2(t_r - t_{m2}) + \alpha_{r-3} f_3(t_r - t_{m3}); \quad (4)$$

граничные условия имеют вид

$$y = H_0; \quad t_{m1} = t'_{m1}; \quad t_{m2} = t'_{m2}; \quad t_{m3} = t'_{m3}; \quad t_r = t_r''. \quad (5)$$

В этих уравнениях  $\alpha_{r-1}$ ,  $\alpha_{r-2}$ ,  $\alpha_{r-3}$  – коэффициенты конвективного теплообмена между газом и коксом, а также между продуктами плавки – чугуном и шлаком, кВт/(м<sup>2</sup>·К);  $\alpha_{k13}$  – коэффициент конвективного теплообмена между коксом и шлаком, кВт/(м<sup>2</sup>·К);  $\alpha_{л21}$ ,  $\alpha_{л31}$ ,  $\alpha_{л32}$  – коэффициенты лучистого теплообмена между чугуном и коксом, шлаком и коксом, а также между шлаком и чугуном, кВт/(м<sup>2</sup>·К).

Уравнение теплообмена для газового потока целесообразно заменить уравнением теплового баланса, указывающим, что разность энтальпий (теплосодержаний) между потоком газа и потоками материалов в любом горизонтальном сечении слоя равна аналогичной разности энтальпий в начальном по ходу материалов участке.

Решение дифференциальных уравнений (1) – (4) при граничных условиях (5) осуществлялось методом Рунге–Кутты. Коэффициенты теплоотдачи конвекцией

( $\alpha_{r-1}$ ,  $\alpha_{r-2}$ ,  $\alpha_{r-3}$ ,  $\alpha_{k13}$ ) и коэффициенты взаимного теплообмена излучением между нагреваемыми материалами ( $\alpha_{л21}$ ,  $\alpha_{л31}$ ,  $\alpha_{л32}$ ) были приняты по данным работ [7 – 11]. Высоту зоны плавления определяли из условия необходимости нагрева чугуна от температуры плавления железорудных материалов до требуемой по технологии конечной температуры, принятой равной 1440 °С.

В нижней части печи протекают процессы плавления железорудных материалов, прямого восстановления оксидов железа, кремния, марганца и науглероживания железа. Поэтому в расчетах тепловые эффекты этих процессов учитывались через кажущуюся теплоемкость шихты ( $c_{м, \text{каж}}$ ). Определение кажущихся теплоемкостей материалов осуществляли делением тепловых эффектов химических реакций на температурный интервал нагрева каждого из составляющих потоков шихты. В расчетах принято допущение о том, что плавление железорудных материалов происходит мгновенно. В этом случае тепловые эффекты плавления железорудных материалов были отнесены к кажущимся теплоемкостям чугуна и шлака. Затраты тепла на прямое восстановление железа, кремния и марганца отнесли к кажущейся теплоемкости кокса, а тепловой эффект науглероживания железа – к кажущейся теплоемкости чугуна. Кажущуюся теплоемкость каждой составляющей потока материалов рассчитывали с помощью метода последовательных приближений, что позволило достичь погрешности, не превышающей 0,5 %.

Из анализа результатов расчетов (рис. 1) следует основной вывод: взаимный теплообмен между потоками значительно влияет на температурное поле в орошаемой зоне доменной печи. Так, разность температур между чугуном и коксом без учета теплообмена излучением составляет более 400 °С, а при его учете – всего лишь 90 – 130 °С. Кроме того, при теплообмене излучением между нагреваемыми потоками высота орошаемой зоны сокращается в 1,5 – 2,0 раза.

Влияние доли поверхности кокса, покрытой шлаком ( $\phi$ ), проявляется в том, что с увеличением этого показателя интенсивность нагрева материалов уменьшается (рис. 2), а высота зоны увеличивается от 2,25 м (при  $\phi = 0,1$ ) до 4,35 м (при  $\phi = 0,8$ ). Эта особенность развития тепловых процессов объясняется тем, что чем меньше поверхность контакта газа с коксом, тем менее развит конвективный теплообмен между газом и нагреваемыми материалами, так как коэффициент теплоотдачи от газа к коксу ( $\alpha_{r-2}$ ) больше, чем от газа к шлаку ( $\alpha_{r-3}$ ). В сравниваемых случаях эти значения равны 40 и 20 Вт/(м<sup>2</sup>·К) соответственно.

По этой же причине с ростом показателя  $\phi$  изменяется соотношение конечных температур указанных потоков. Так, при  $\phi = 0,1$  температура кокса превышает примерно на 40 °С температуру шлака, при  $\phi = 0,4$  их значения сближаются, а при  $\phi = 0,8$  уже температура шлака становится на 20 °С выше температуры кокса.

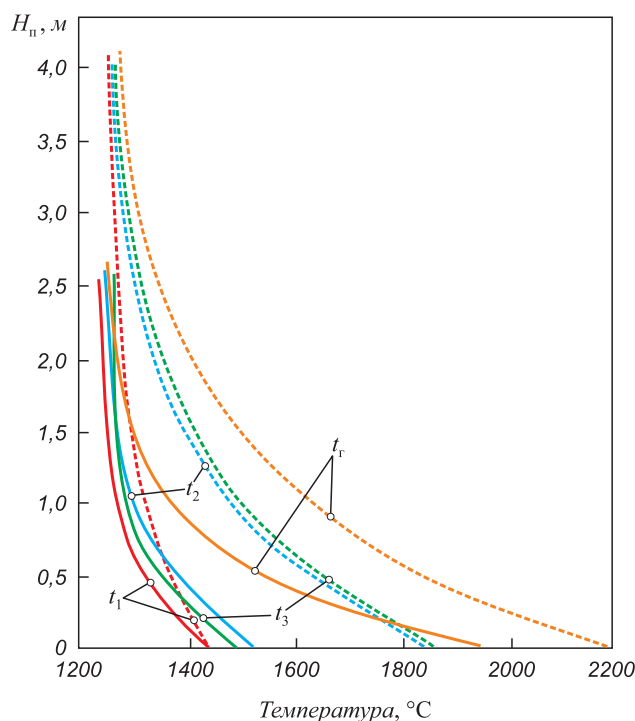


Рис. 1. Распределение температур потоков по высоте орошаемой зоны доменной печи при  $\varphi = 0,1$  с учетом теплообмена излучением (—) и без учета теплообмена излучением (---)

Fig. 1. Distribution of the flow temperature adjustment of the irrigated zone of the blast furnace at  $\varphi = 0,1$  considering radiation heat transfer (—) and without radiation heat transfer (---)

При этом разность температур между коксом и чугуном возрастает от 90 до 130 °С. Основные причины, которые определяют установленные особенности, заключаются в следующем.

Во-первых, с ростом доли поверхности кокса, покрытой шлаком, сокращается конвективный поток тепла от газа не только на кокс и шлак, но и на чугун и, как следствие, падают их температуры, которые оказывают существенное влияние на коэффициенты излучения ( $\alpha_{\text{л}}$ ) между нагреваемыми материалами. Эти коэффициенты зависят от температуры поверхности твердых и жидких фаз в третьей степени. Снижение температур, таким образом, одновременно уменьшает лучистые потоки тепловой энергии на все составляющие материалов, участвующих в теплообмене. Расчеты показали, что при увеличении доли поверхности кокса, покрытой шлаком, температура чугуна снижается в большей степени, чем температуры кокса и шлака.

Во-вторых, при увеличении доли  $\varphi$  происходит дополнительное снижение интенсивности теплообмена излучением, обусловленное тем, что степень черноты шлака меньше степени черноты кокса.

Влияние коэффициента  $\alpha_{\text{л}}$  от газа к коксу на температурное поле в орошаемой зоне доменной печи представлено на рис. 3. Из анализа приведенных на этом рисунке данных следует, что при увеличении  $\alpha_{\text{л}12}$  от 20 до 40 Вт/(м<sup>2</sup>·К) высота орошаемой зоны сокращает-

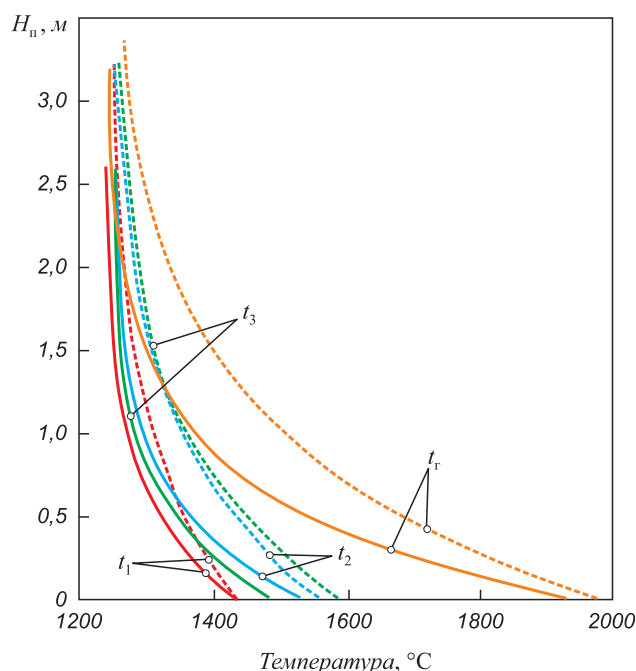


Рис. 2. Распределение температур потоков по высоте орошаемой зоны доменной печи при  $\varphi = 0,1$  (—) и при  $\varphi = 0,8$  (---)

Fig. 2. Distribution of the flow temperature adjustment of the irrigated area in the blast furnace at  $\varphi = 0,1$  (—) and at  $\varphi = 0,8$  (---)

ся примерно на 30 %. При этом необходимо отметить, что влияние значения  $\alpha_{\text{л}12}$  в верхней и нижней частях доменной печи различно. В верхней части печи нагрев материалов газом осуществляется при соотношении те-

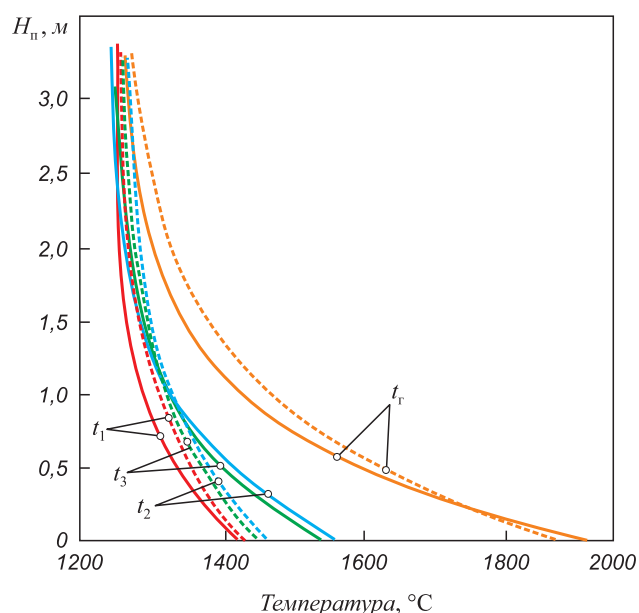


Рис. 3. Распределение температур потоков по высоте орошаемой зоны доменной печи при  $\varphi = 0,4$ ;  $\alpha_{\text{r}-2} = 40$  Вт/(м<sup>2</sup>·К) (—) и  $\alpha_{\text{r}-2} = 20$  Вт/(м<sup>2</sup>·К) (---)

Fig. 3. Distribution of the flow temperature adjustment of the irrigated area in the blast furnace at  $\varphi = 0,4$ ;  $\alpha_{\text{r}-2} = 40$  Вт/(м<sup>2</sup>·К) (—) and  $\alpha_{\text{r}-2} = 20$  Вт/(м<sup>2</sup>·К) (---)

плоемкостей потоков шихты и газа  $m = (w_m/w_g) < 1$ , поэтому разность температур между газом и материалами по мере опускания последних уменьшается. В связи с этим лимитирующим звеном в теплообмене являются не значения  $\alpha_{r-1}$ ,  $\alpha_{r-2}$ ,  $\alpha_{r-3}$ , которые достаточно велики, а разность температур между газом и материалами. В нижней части доменной печи отношение теплоемкостей потоков шихты и газа больше единицы ( $m > 1$ ), поэтому по мере опускания кокса, чугуна и шлака разность температур между ними и газом достигает 300–400 °С. Вследствие этого изменение значений  $\alpha_{r-1}$ ,  $\alpha_{r-2}$ ,  $\alpha_{r-3}$  от газа к материалам значительно влияет на интенсивность нагрева кокса, чугуна и шлака в орошаемой зоне доменных печей.

В работах С.В. Шаврина [14], О.П. Онорина [15] и др. показано, что шлак не вытекает из коксовой насадки вследствие и интенсивного восстановления закиси железа до тех пор, пока содержание ее в шлаке не снизится до 2–3 %. Следовательно, процессы прямого восстановления в основном завершаются в верхней части орошаемой зоны и сопровождаются значительными стоками тепла. Учитывая, что реакции прямого восстановления в основном сосредоточены в верхней части орошаемой зоны печи (в зоне плавления), а в нижней части (в зоне жидких фаз) происходит нагрев материалов при  $m < 1$ , были определены температурные поля для двух вариантов распределения тепловых эффектов физико-химических процессов:

1 – все тепловые эффекты равномерно распределены по всей высоте орошаемой зоны печи;

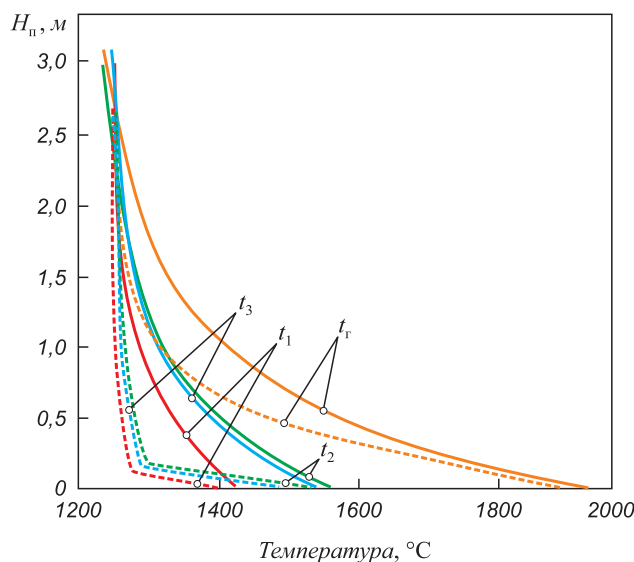


Рис. 4. Распределение температур потоков по высоте орошаемой зоны доменной печи при  $\varphi = 0,4$ ; равномерное распределение тепловых эффектов по высоте зоны (—); тепловые эффекты отнесены к зоне плавления (---)

Fig. 4. Distribution of the flow temperature adjustment of the irrigated zone of the blast furnace at  $\varphi = 0,4$ ; even distribution of the thermal effects of altitude zone (—); thermal effects attributed to the melting zone (---)

2 – все тепловые эффекты сосредоточены только в зоне плавления железорудных материалов.

Результаты этих расчетов приведены на рис. 4, откуда следует, что для принятых условий высота орошаемой зоны сокращается примерно в 1,5 раза. Это можно объяснить тем, что в зоне плавления потребляется значительное количество тепловой энергии, так как все затраты тепла на протекание реакций прямого восстановления отнесены только к этой зоне. В связи с этим на входе в зону жидких фаз разность температур между газом и материалами достигает 500 °С. Поэтому чисто физический нагрев потоков кокса, чугуна и шлака в нижней части орошаемой зоны доменной печи осуществляется на очень малой высоте. Таким образом, анализ полученных результатов показал, что на стационарное температурное поле в орошаемой зоне доменной печи существенное влияние оказывают доля поверхности кокса, покрытой шлаком, и характер распределения тепловых эффектов по высоте зоны. Для определения точных значений этих параметров необходимы специальные исследования.

Анализ стационарных тепловых процессов в области горна и заплечиков показал, что нижняя ступень теплообмена за счет «растянутых» процессов плавления и процессов прямого восстановления оксидов железа, кремния, марганца и других увеличивается по высоте в сравнении с тем случаем, когда нагрев материалов до конечных температур осуществляется без учета этих особенностей.

**Выводы.** Взаимный теплообмен между потоками в орошаемой зоне доменной печи оказывает значительное влияние на температурное поле в этой зоне. В частности, разность конечных температур между коксом и чугуном без учета взаимного теплового излучения составляет около 400 °С, а при учете уменьшается до 90–130 °С. Из анализа полученных результатов также следует, что для расчета теплообмена в области заплечиков и горна доменной печи необходимы знания о распределении тепловых эффектов химических реакций прямого восстановления железа, кремния и марганца по высоте орошаемой зоны и доли поверхности кокса, покрываемой шлаком.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Mathematical model of blast furnace Progress and Application to New Technology Development / Jun-ichiro Yagi. 6th International congress on the science and technology of ironmaking – ICSTI, 42nd International Meeting on ironmaking and 13th International Symposium on Iron Ore, October 14th to 18th, 2012, Rio de Janeiro, RJ, Brazil. Pp. 1660 – 1674.
2. Numerical simulation on dynamic and static holdups of powder inside pre-reduction shaft furnace / Jian Xu, Sheng-li Wu, Xin-ying Guo, Kai-ping Du. Technical contribution to the 6th International congress on the science and technology of ironmaking – ICSTI, 42nd International Meeting on ironmaking and 13th International Symposium on Iron Ore, October 14th to 18th, 2012, Rio de Janeiro, RJ, Brazil. Pp. 414 – 424.



3. B.I. Kitaev, Ju.G. Jaroshenko, V.D. Suchkov. Heat Exchange in shaft furnaces. – London: Pergamon Press, 1967. – 320 p.
4. Металлургия чугуна. Учебник для вузов. 3-е изд., перераб. и доп. / Е.Ф. Вегман, Б.Н. Жеребин, А.Н. Похвиснев, Ю.С. Юсфин и др.; Под ред. Ю.С. Юсфина. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2004. – 774 с.
5. Товаровский И.Г. Познание процессов и развитие технологии доменной плавки. – Днепропетровск: изд. «Журфонд», 2015. – 912 с.
6. Математическое моделирование металлургических процессов в АСУ ТП / Н.А.Спирин, В.В.Лавров, В.Ю.Рыболовлев и др. – Екатеринбург: УрФУ, 2014. – 558 с.
7. Тепло- и массообмен в плотном слое / Б.И. Китаев, В.Н. Тимофеев, Б.А. Боковиков, В.М. Малкин, В.С. Швыдкий, Ф.Р. Шкляр, Ю.Г. Ярошенко. – М.: Металлургия, 1972. – 432 с.
8. Теплотехника доменного процесса / Б.И. Китаев, Ю.Г. Ярошенко, Е.Л. Суханов, Ю.Н. Овчинников, В.С. Швыдкий. – М.: Металлургия, 1978. – 248 с.
9. Тепловая работа шахтных печей и агрегатов с плотным слоем / Я.М. Гордон, Б.А. Боковиков, В.С. Швыдкий, Ю.Г. Ярошенко. – М.: Металлургия, 1989. – 120 с.
10. Теплообмен и повышение эффективности доменной плавки / Н.А. Спирин, Ю.Н. Овчинников, В.С. Швыдкий, Ю.Г. Ярошенко. – Екатеринбург: изд. УГТУ–УПИ, 1995. – 243 с.
11. Мысик А.Ф., Кукаркин А.С., Китаев Б.И., Швыдкий В.С. Расчет процесса нагрева кокса, чугуна и шлака в нижней части доменной печи // Изв. вуз. Черная металлургия. 1976. № 12. С. 125 – 129.
12. Yaroshenko Yu.G., Shvydkii V.S., Spirin N.A., Lavrov V.V. & Noskov V.Yu. Nosteady heat transfer and transient processes in blast furnaces // Steel in Translation. 2015. Vol. 45, no 9, pp. 654 – 657.
13. Spirin N., Shvydkiy V., Yaroshenko Y. and Gordon Y. Improvement in Energy Efficiency of Blast Furnace, Düsseldorf, 15 – 19 June 2015, s. 114 – 122.
14. Восстановление, теплообмен и гидродинамика в доменном процессе / Под ред. С.В. Шаврина. Труды института металлургии УФАН СССР. Ч. 1, вып. 24, 1970. – 130 с; Ч. 2, вып. 26, 1972. – 140 с.
15. Онорин О.П., Гладышев В.И., Каплун Л.И. Фильтрация железистых шлаковых расплавов через коксовую насадку // Изв. вуз. Черная металлургия. 1997. № 2. С. 11 – 14.

Поступила 19 февраля 2015 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2016. Vol. 59. No. 2, pp. 88–93.

## STATIONARY HEAT EXCHANGE IN THE BLAST FURNACE SMELTING ZONE IRRIGATED WITH MELT

**Yu.G. Yaroshenko, V.S. Shvydkii, N.A. Spirin, V.V. Lavrov**

**Ural Federal University named after the first President of Russia  
B.N. Yel'tsin, Ekaterinburg, Russia**

**Abstract.** The problem of stationary heat exchange in the blast furnace smelting zone irrigated with melt, considering features of process of a filtration of pig-iron and slag through coke nozzle is formulated. It is shown, that in this zone there is a simultaneous heating by gas of streams of coke, pig-iron and slag, each of which is in a heat exchange condition among themselves. The processes of mutual heat exchange are carried out as convection and radiation. Convection provides heat interchange among gas and all the heated up materials, and also between slag and coke as slag flowing down on coke partially coats its surface. Radiant heat exchange develops between coke, pig-iron and slag. Its intensity increases with the growth of temperature of heated up materials. It is fixed, that mutual heat exchange among streams of coke, pig-iron and slag in an irrigated zone of a blast furnace makes considerable impact on formation of a temperature field in this zone. The knowledge of thermal effects distribution of chemical reactions of direct restoration of iron, silicium and manganese are necessary for calculation of heat interchange in the field of bosh and a blast-furnace well on height of an irrigated zone and a fraction of a surface of the coke, coated with slag.

**Keywords:** blast-furnace process, heat exchange, smelting zone, mathematical modeling, motion of slag, pig-iron, coke.

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2016-2-88-93

### REFERENCES

1. Jun-ichiro Yagi. Mathematical model of blast furnace Progress and Application to New Technology Development. *6th International congress on the science and technology of ironmaking – ICSTI, 42nd International Meeting on ironmaking and 13th International Symposium on Iron Ore, October 14th to 18th, 2012, Rio de Janeiro, RJ, Brazil.* pp. 1660–1674.
2. Jian Xu, Sheng-li Wu, Xin-ying Guo, Kai-ping Du. Numerical simulation on dynamic and static holdups of powder inside pre-re-
- duction shaft furnace. *Technical contribution to the 6th International congress on the science and technology of ironmaking – ICSTI, 42nd International Meeting on ironmaking and 13th International Symposium on Iron Ore, October 14th to 18th, 2012, Rio de Janeiro, RJ, Brazil.* pp. 414–424.
3. Kitaev B.I., Jaroshenko Ju.G., Suchkov V.D. *Heat Exchange in shaft furnaces.* London: Pergamon Press, 1967, 320 p.
4. Vegman E.F., Zherebin B.N., Pokhvisnev A.N., Yusfin Yu.S. etc. *Metallurgiya chuguna. Uchebnik dlya vuzov* [Cast-iron metallurgy. Textbook for universities]. Moscow: IKTs “Akademkniga”, 2004, 774 p. (In Russ.).
5. Tovarovskii I.G. *Poznanie protsessov i razvitie tekhnologii domennoi plavki* [Knowledge of the processes and technology development of blast furnace mel-ting]. Dnepropetrovsk. Izd. “Zhurfond”, 2015. 912 p. (In Russ.).
6. Spirin N.A., Lavrov V.V., Rybolovlev V.Yu. etc. *Matematicheskoe modelirovanie metallurgicheskikh protsessov v ASU TP* [Mathematical modeling of metallurgical processes in automatic control system of technological processes]. Ekaterinburg: UrFU, 2014, 558 p. (In Russ.).
7. Kitaev B.I., Timofeev V.N., Bokovikov B.A., Malkin V.M., Shvydkii V.S., Shklyar F.R., Yaroshenko Yu.G. *Teplo- i massoobmen v plotnom sloe* [Heat- and mass exchange in a dense layer]. Moscow: Metallurgiya, 1972, 432 p. (In Russ.).
8. Kitaev B.I., Yaroshenko Yu.G., Sukhanov E.L., Ovchinnikov Yu.N., Shvydkii V.S. *Teplotekhnika domennogo protsesssa* [Heat engineering of a blast furnace process]. Moscow: Metallurgiya, 1978, 248 p. (In Russ.).
9. Gordon Ya.M., Bokovikov B.A., Shvydkii V.S., Yaroshenko Yu.G. *Teplovaya rabota shakhtnykh pechei i agregatov s plotnym sloem* [Heat work of shaft furnaces and units with a dense layer]. Moscow: Metallurgiya. 1989, 120 p. (In Russ.).
10. Spirin N.A., Ovchinnikov Yu.N., Shvydkii V.S., Yaroshenko Yu.G. *Teploobmen i povyschenie effektivnosti domennoi plavki* [Heat exchange and efficiency increase of a blast furnace melting]. Ekaterinburg: izd. UGTU–UPI, 1995, 243 p. (In Russ.).
11. Mysik A.F., Kukarkin A.S., Kitaev B.I., Shvydkii V.S. Calculation of the heating process of coke, cast iron and slag in a bottom part

- of a blast furnace. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya. = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1976, no. 12, pp. 125–129. (In Russ.).
12. Yaroshenko Yu.G., Shvydkii V.S., Spirin N.A., Lavrov V.V., Noskov V.Yu. Nosteady heat transfer and transient processes in blast furnaces. *Steel in Translation*. 2015, vol. 45, no 9, pp. 654–657.
  13. Spirin N., Shvidkii V., Yaroshenko Y., Gordon Y. Improvement in Energy Efficiency of Blast Furnace. *METEC and 2nd ESTAD 2015, Düsseldorf, 15–19 June 2015*, pp. 114–122.
  14. *Vosstanovlenie, teploobmen i gidrodinamika v domennom protsesse* [Reduction, heat exchange and hydrodynamics in a blast furnace process] Shavrin S.V. ed. *Trudy instituta metallurgii UFAN SSSR*. Part. 1, vol. 24, 1970, 130 p; Part. 2, vol. 26, 1972, 140 p. (In Russ.).
  15. Onorin O.P., Gladyshev V.I., Kaplun L.I. Filtering of ferrous slag melts through coke packing. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya. = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1997, no. 2, pp. 11–14. (In Russ.).

**Acknowledgements.** The work was financially supported by decree no. 211 of the Government of the Russian Federation, the contract no. 02.A03.0006.

**Information about the authors:**

**Yu.G. Yaroshenko**, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair “Thermal Physics and Informatics in Metallurgy”

**V.S. Shvydkii**, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair “Thermal Physics and Informatics in Metallurgy”

**N.A. Spirin**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Chair “Thermal Physics and Informatics in Metallurgy” (n.a.spirin@urfu.ru)

**V.V. Lavrov**, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair “Thermal Physics and Informatics in Metallurgy”

Received February 19, 2015