

ЭВОЛЮЦИЯ СХЕМ ТЕПЛООБМЕНА В ДОМЕННОЙ ПЕЧИ*

Ярошенко Ю.Г.¹, д.т.н., профессор кафедры «Теплофизика и информатика в металлургии» (yury-y@planet-a.ru)

Спириин Н.А.¹, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Теплофизика и информатика в металлургии» (n.a.spirin@urfu.ru)

Швыдкий В.С.¹, д.т.н., профессор кафедры «Теплофизика и информатика в металлургии» (vshvit@isnet.ru)

Гордон Я.М.², д.т.н., технический директор департамента черной металлургии (igordon@hatch.ca)

Лавров В.В.¹, д.т.н., профессор кафедры «Теплофизика и информатика в металлургии» (v.v.lavrov@urfu.ru)

¹ Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (620002, Россия, Екатеринбург, ул. Мира, 28)

² Инженерно-консалтинговая компания «Hatch» (2800 Speakman Drive, Mississauga, Ontario, ON L5K 2R7, Canada)

Аннотация. Рассмотрено развитие схем теплообмена в доменной печи по мере совершенствования технологии доменной плавки. Отмечено, что для оценки теплового состояния доменную печь как объект управления целесообразно делить на две тепловые зоны, верхнюю и нижнюю, граница раздела между которыми располагается в верхней части области смешанного восстановления между уровнем начала газификации углерода кокса и горизонтом, ниже которого оксиды железа восстанавливаются прямым путем. Верхний участок замедленного теплообмена с точки зрения теплообмена является резервной высотой, обеспечивающей улучшение тепловой и восстановительной работы печи. Нижний участок замедленного теплообмена в качестве резерва для улучшения тепловой и восстановительной работы доменной печи использоваться не должен. Показано, что наличие двух зон интенсивного теплообмена и в современных условиях при плавке различного вида железорудного сырья, использовании комбинированного дутья высоких параметров является обязательным условием устойчивости хода доменного процесса и экономичности плавки.

Ключевые слова: черная металлургия, доменный процесс, теплообмен, массообмен, закономерности, принципы, схема.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-8-523-530

В процессе совершенствования доменной плавки, при развитии теории теплообмена в доменной печи и при углублении познаний процессов произошли существенные ее уточнения. Главным итогом эволюционного развития доменной плавки является сокращение расхода кокса и повышение интенсивности процесса.

Математическая модель, которая описывает теплофизические и физико-химические явления доменной плавки, была предложена проф. Б.И. Китаевым в 1944 г. [1]. Полное описание модели дано в монографиях [2 – 6]. Используя результаты анализа изменения теплоемкостей потоков шихты и газа по высоте печи, Б.И. Китаев сформулировал основные положения теории теплообмена в доменной печи, которые сводятся к следующему [1, 2]:

- интенсивная теплоотдача от газа-теплоносителя к материалу осуществляется в двух ступенях теплообмена: верхней и нижней. Ступени тепло-

обмена разделены зоной замедленного теплообмена, где температурный градиент по высоте достигает минимального значения;

- тепловая работа каждой из ступеней теплообмена отличается самостоятельностью (автономностью) и характеризуется существенным различием в отношениях теплоемкостей потоков шихты $W_{ш}$ и газа $W_{г}$. Зона замедленного теплообмена, разделяющая зоны активного теплообмена, характеризуется отношением теплоемкостей потоков $m = W_{ш} / W_{г}$, близким к 1. На верхней ступени теплообмена $W_{ш} < W_{г}$ (то есть $m < 1,0$), на нижней $W_{ш} > W_{г}$ (то есть $m > 1,0$);
- теплообмен в доменной печи завершен, что подтверждается существованием зоны замедленного теплообмена. В этой зоне теплоемкости потоков газа и шихты близки $W_{ш} \approx W_{г}$, $m \approx 1$.

Характер изменения температур газа ($t_{г}$) и шихты ($t_{ш}$), отношения теплоемкостей потоков по высоте печи показаны на рис. 1, а. Таким образом, по высоте доменной печи при ровном ходе наблюдается типичное S-образное распределение температур.

* Работа выполнена при финансовой поддержке, постановление № 211 Правительства Российской Федерации, контракт № 02.А03.21.0006.

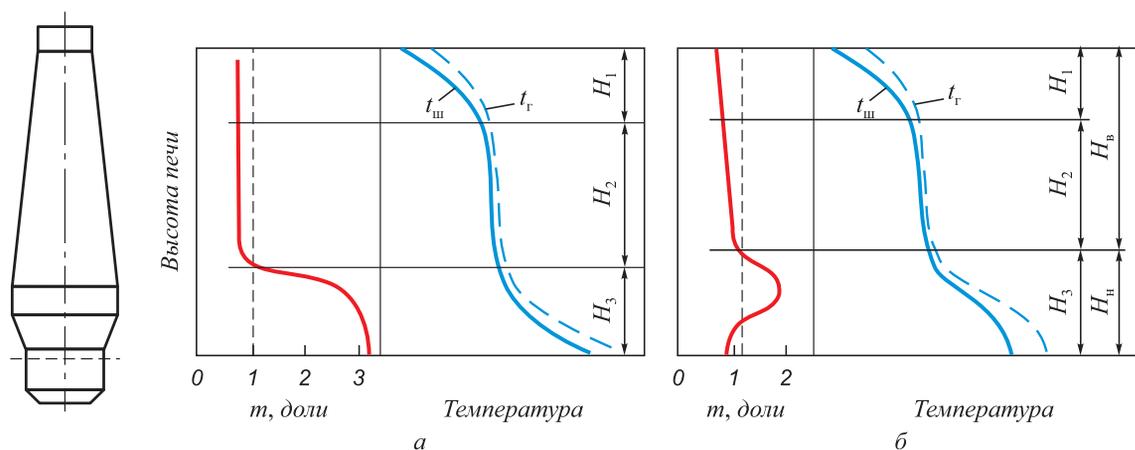


Рис. 1. Схемы теплообмена 1944 г. (а) и 1961 г. (б) в доменной печи:
 H_1 – верхняя ступень теплообмена; H_2 – зона замедленного теплообмена; H_3 – нижняя ступень теплообмена;
 $H_в$ – верхняя тепловая зона; $H_н$ – нижняя тепловая зона

Fig. 1. Scheme of heat exchange in the blast furnace in 1944 (а) and 1961 (б):
 H_1 – upper stage of heat exchange; H_2 – slow heat exchange zone; H_3 – bottom stage of heat exchange;
 $H_в$ – upper thermal zone; $H_н$ – bottom thermal zone

Эксперименты на действующих печах в последующие годы показали, что высота нижней ступени теплообмена в действительности несколько больше, чем получается в результате расчета по схеме рис. 1, а. Накопленные данные об особенностях теплообмена в нижней ступени создали условия для дальнейшего развития схемы теплообмена. Б.И. Китаевым, Б.Л. Лазаревым, Ю.Г. Ярошенко [4 – 6] были внесены дополнения в схему теплообмена, в соответствии с которыми верхняя ступень теплообмена и зона замедленного теплообмена остаются без изменений, но был принят другой характер изменения отношения теплоемкостей по высоте нижней ступени теплообмена. С приближением к горизонту воздушных фурм отношение, как и в старой схеме, сначала растет, но мере снижения интенсивности реакции прямого восстановления это отношение уменьшается и становится меньше единицы. При этом у температурных кривых шихты и газа в нижней ступени теплообмена появился характерный изгиб в сторону снижения градиента температур. Общий вид уточненной схемы теплообмена по высоте доменной печи приведен на рис. 1, б. Отличие от схемы рис. 1, а в том, что нижняя ступень теплообмена разделена на две части: в верхней $W_{ш} > W_{г}$, в нижней $W_{ш} < W_{г}$. Это обусловлено окончанием процессов прямого восстановления оксидов железа к нижнему горизонту. Следовательно, общее теплопоглощение шихты существенно уменьшается.

Исследования работы доменных печей в последующие десятилетия показывают, что температурное поле по высоте доменных печей претерпевает заметную деформацию. Сущность этой тенденции заключается в наличии у температурных кривых по высоте печи нескольких локальных участков замедленного теплообмена. Впервые это было замечено Н.Н. Бабарькиным и Ф.А. Юшиным при рассмотрении температурного

поля, полученного методом вертикального зондирования доменных печей Магнитогорского металлургического комбината (ММК). Серия измерений при плавке различного железорудного сырья показала наличие по высоте шахты доменной печи в некоторых случаях двух участков с малоизменяющейся температурой (рис. 2) [7].

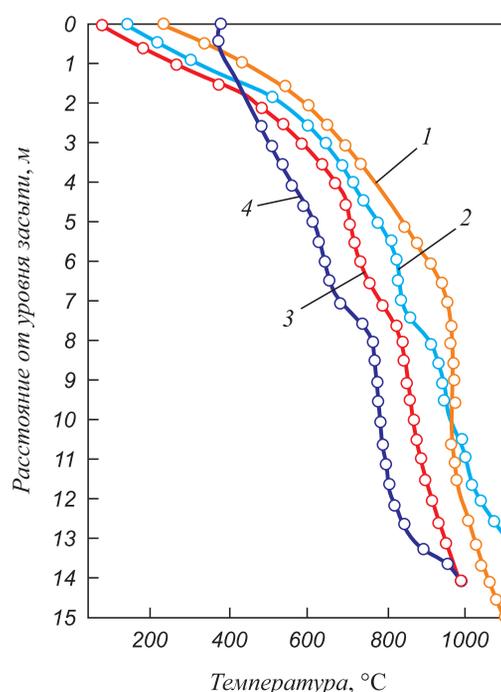


Рис. 2. Изменение температуры газа по высоте доменной печи при плавке окатышей, офлюсованных известняком (1), доломитом (2), нефлюсованных окатышей (3) и агломерата (4)

Fig. 2. Change of the gas temperature at the height of the blast furnace when melting pellets, fluxed by limestone (1), dolomite (2) non-fluxed pellets (3) and sinter (4)

Обобщая экспериментальные данные по тепловой и восстановительной работе доменных печей, профессор Н.Н. Бабарыкин [8] предложил схему теплообмена, приведенную на рис. 3. Наблюдаемые в экспериментах два участка замедленного теплообмена по высоте шахты образуются в результате действия химических реакций с отрицательными тепловыми эффектами. Формирование верхнего участка обусловлено действием эндотермических реакций восстановления магнетита оксидом углерода, а образование нижнего участка связывается с действием теплопоглощения при заметном развитии реакции газификации углерода кокса диоксидом углерода.

Опубликованные данные по математическому моделированию процессов тепло- и массообмена в доменных печах показывают, что при формировании температурных полей в шахте печи не всегда проявляются два участка замедленного теплообмена [9 – 11]. И это вполне объяснимо, так как результаты моделирования во многом зависят от принятых значений коэффициентов настройки моделей и, в частности, от кинетических характеристик железорудного сырья и коэффициентов теплопередачи. При этом одним из ключевых параметров в расчетах является коэффициент теплопередачи, значения которого в ранних расчетах определяли малую разность температур шихты и газа [1 – 4]. По расчетам А.Н. Рамма при заниженных значениях коэффициента теплопередачи эта разность достигает 50 – 150 °С [12].

В связи с этим интерес представляют результаты имитационного моделирования совместного развития теплообменных и восстановительных процессов по высоте шахты доменной печи, выполненные Б.И. Китаевым с учениками. При этом сделано допущение о чисто ступенчатом характере восстановления оксидов железа. На рис. 4 и 5 представлены результаты моделирования применительно к условиям работы доменной

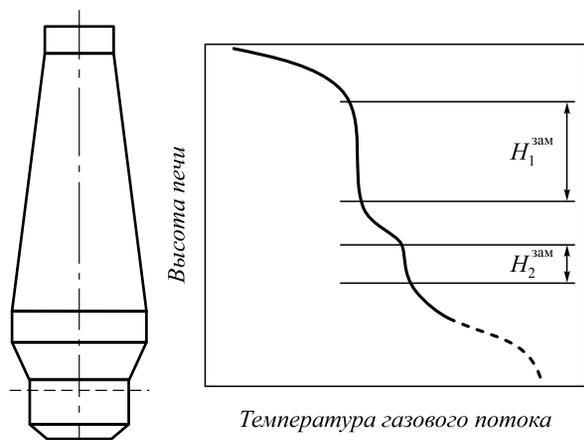


Рис. 3. Схема распределения температур по высоте печи по данным Н.Н. Бабарыкина ($H_1^{зам}$ и $H_2^{зам}$ – верхний и нижний участки замедленного теплообмена)

Fig. 3. Scheme of the temperature distribution along the furnace height according to N.N. Babarykin ($H_1^{зам}$ and $H_2^{зам}$ – upper and bottom sections of slow heat exchange)

печи 3 объемом 3000 м³ Западно-Сибирского металлургического комбината [13, 14].

Общая картина теплообменных и восстановительных процессов (рис. 4) представляет наиболее сложный случай проявления взаимосвязи теплообмена и восстановления в верхней части шахты доменной печи, когда поток шихты перегревается встречным потоком газа. Эта область характеризуется сравнительно небольшой разностью между температурами газа и шихты. Поэтому эта область, а также прилегающие к ней горизонты отличаются относительно низкими тепловыми потоками (Q) от греющего теплоносителя к нагреваемому материалу и образуют в верхней части доменной печи участок замедленного теплообмена. Температуры на этом участке находятся в пределах 700 – 760 °С.

На рис. 5 представлены результаты математического моделирования других условий работы доменной печи, когда перегрева шихты относительно газа не происходит. При отсутствии перегрева шихты по сравнению с газом в верхних слоях шахты доменной печи вертикальные и слабонаклонные участки температурных кривых также образуют область замедленного теплообмена. Восстановительные процессы в этой области представлены недостаточно развитыми реакциями второй стадии восстановления. Ниже верхнего участка замедленного теплообмена тепловой поток от газа к

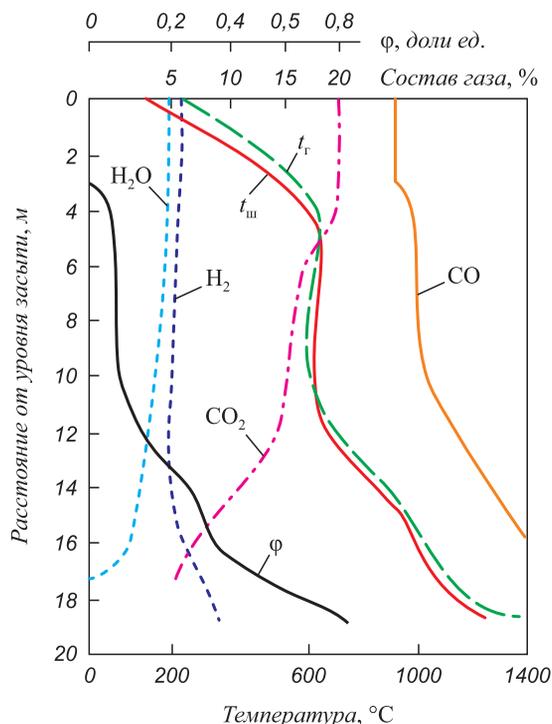


Рис. 4. Изменение степени восстановления материалов (ϕ) и расхода газифицированного углерода кокса (q_r) по высоте шахты доменной печи при наличии локального перегрева шихты относительно газа

Fig. 4. Change of the material recovery level (ϕ) and expense of gasified carbon coke (q_r) along the blast-furnace shaft in the presence of local overheating of the charge regarding gas

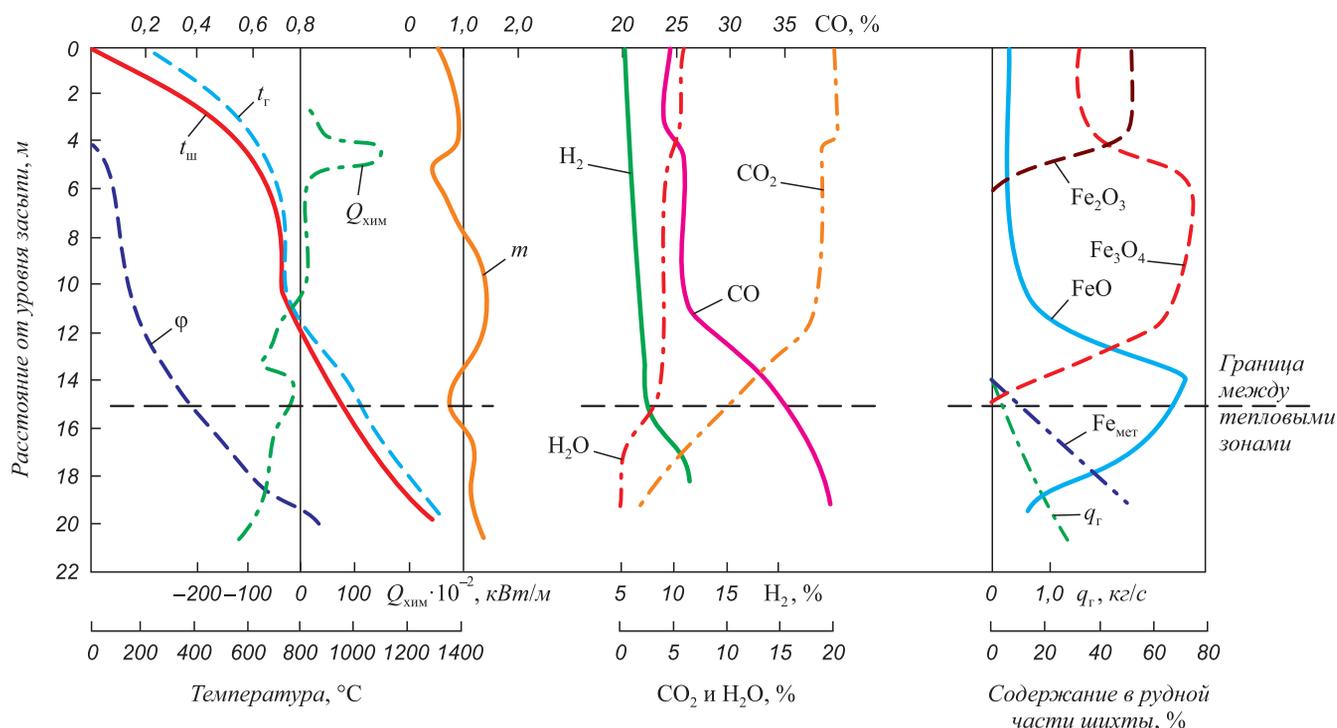


Рис. 5. Результаты моделирования совместного развития теплообменных и восстановительных процессов при отсутствии локального перегрева шихты относительно газа

Fig. 5. The simulation results of the joint development of heat exchanging and recovery processes in the absence of local overheating of the charge regarding gas

шихте увеличивается, температура шихты сравнительно быстро растет.

Высота второго (нижнего) участка замедленного теплообмена зависит от соотношения тепловых эффектов экзо- и эндотермических реакций последней стадии восстановления оксидов железа. Однако значительно большую роль в теплоснабжении на этом участке высоты шахты начинает играть реакция газификации углерода кокса, которая отличается высоким значением теплового эффекта.

Полученные при моделировании особенности развития теплообмена в шахте доменной печи показывают, что разность между температурами газа и шихты по ходу теплоносителя может неоднократно уменьшаться и увеличиваться, отражая сложный процесс взаимного влияния теплообмена и восстановления.

Обобщая экспериментальные и теоретические исследования развития процессов в шахте печи и полученные ранее данные о работе нижней части доменной печи, Б.И. Китаев с учениками предложили уточненную схему теплообмена по высоте печи [15 – 16], представленную на рис. 6, которая позволяет проиллюстрировать особенности развития теплообмена в доменной печи при современной технологии производства чугуна.

Конкретные режимы доменной плавки могут отличаться горизонтами выделенных схем отдельных участков теплообмена и восстановления, а также конкретными температурами на этих участках.

При наличии по высоте шахты двух участков замедленного теплообмена возникает вопрос, касающийся сложившейся ранее концепции разделения доменной печи по высоте на тепловые зоны. В связи с этим отметим следующее.

Верхний участок замедленного теплообмена по результатам математического моделирования характеризуется как невысокой интенсивностью теплообмена, так и низкими скоростями восстановительных реакций. Таким образом, верхний участок замедленного теплообмена с точки зрения теплообмена является резервной высотой, обеспечивающей улучшение тепловой и восстановительной работы печи.

Нижний участок замедленного теплообмена отличается тем, что при малых тепловых потоках от газа к шихте в общем случае скорости химических реакций достаточно высоки. Усиление восстановительной работы в этой области шахты вызовет ускорение реакций газификации углерода кокса диоксидом углерода и водяным паром, что, в свою очередь, приведет к увеличению расхода кокса. Исходя из этого, можно утверждать, что нижний участок замедленного теплообмена в качестве резерва для улучшения тепловой и восстановительной работы доменной печи использоваться не должен.

В связи с этим для исследования и оценки теплового состояния доменную печь как объект управления целесообразно делить по-прежнему на две тепловые зоны, верхнюю и нижнюю, граница раздела между

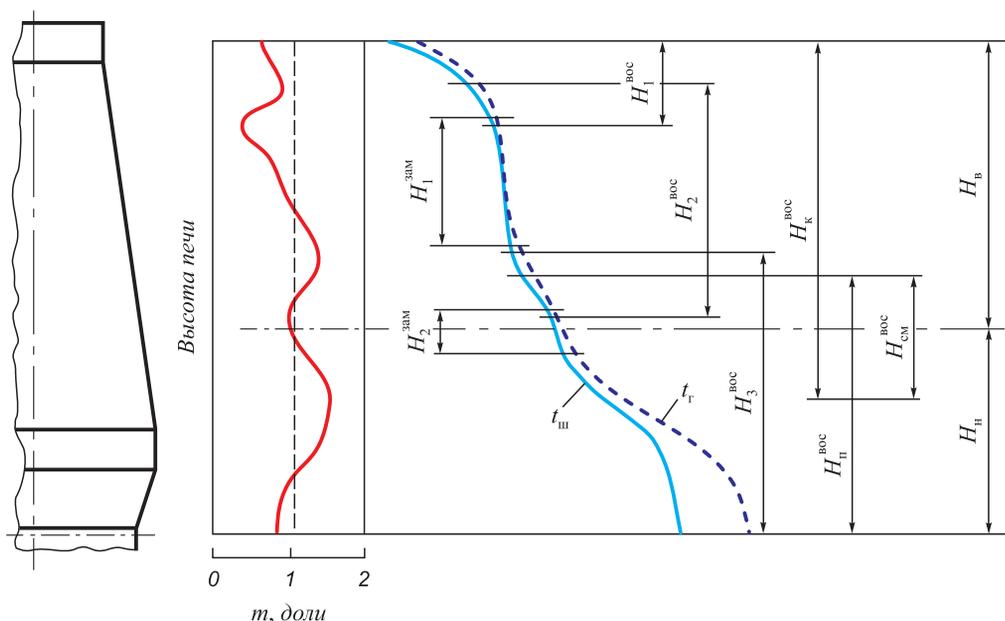


Рис. 6. Схема теплообмена по высоте доменной печи при современной технологии доменной плавки:
 $H_1^{\text{вос}}, H_2^{\text{вос}}, H_3^{\text{вос}}$ – зоны восстановления гематита, магнетита и вюстита; $H_{\text{к}}^{\text{вос}}, H_{\text{п}}^{\text{вос}}, H_{\text{см}}^{\text{вос}}$ – зоны косвенного, прямого и смешанного восстановления; $H_{\text{в}}$ и $H_{\text{н}}$ – верхняя и нижняя тепловые зоны

Fig. 6. Heat exchange scheme along the adjustment of blast furnace with a modern blast-furnace smelting technology:
 $H_1^{\text{вос}}, H_2^{\text{вос}}, H_3^{\text{вос}}$ – reduction zone of hematite, magnetite and wustite; $H_{\text{к}}^{\text{вос}}, H_{\text{п}}^{\text{вос}}, H_{\text{см}}^{\text{вос}}$ – the direct and indirect areas of mixed recovery;
 $H_{\text{в}}, H_{\text{н}}$ – upper and bottom heat zones

которыми располагает в верхней части области смешанного восстановления между уровнем начала газификации углерода кокса и горизонтом, ниже которого оксиды железа восстанавливаются прямым путем.

При интенсификации процессов доменной плавки за счет применения комбинированного дутья происходят изменения в теплообменных процессах. На основании расчетно-аналитических исследований [17, 18]

делается вывод, что по мере обогащения дутья кислородом и увеличения теоретической температуры горения величина отношения теплоемкостей потоков газа и шихты (m) в верхней ступени теплообмена растет, и при приближении к критическому пределу обогащения дутья кислородом возможно вырождение верхней ступени теплообмена (рис. 7). Такой характер обогащения дутья кислородом был теоретически установлен еще

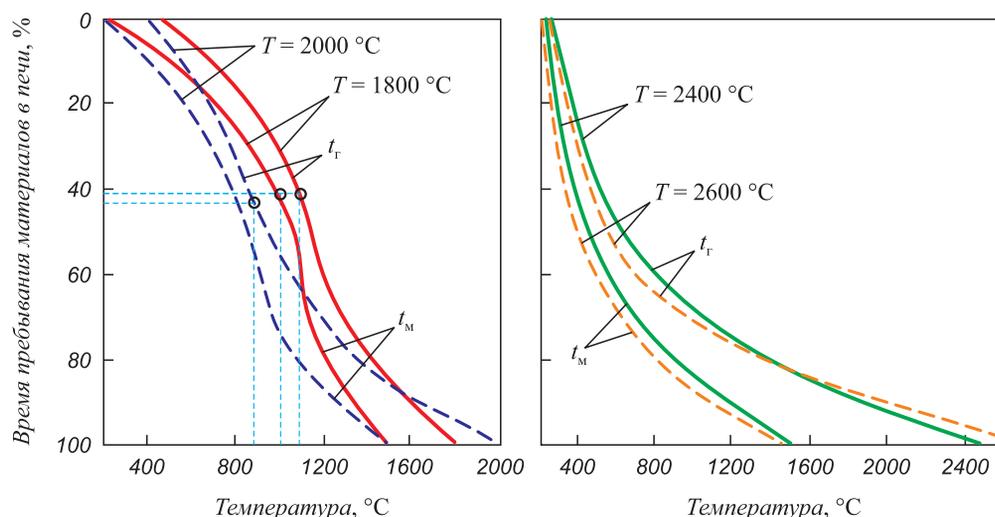


Рис. 7. Изменение температуры материалов (t_m) и газов (t_g) во времени пребывания материалов в доменной печи при различных значениях начальной температуры газов (T) у фурм (при обогащении дутья кислородом) по данным работы [17]

Fig. 7. The material and gas temperature changes during operation time in the blast furnace at different values of the initial temperature of the gases at the tuyere (oxygen enriched air blowing) according to [17]

Б.И. Китаевым (рис. 8). Идентичность температурных полей по высоте печи на рис. 7 и 8 очевидна.

Однако вырождение верхней ступени теплообмена при глубоком обогащении дутья кислородом возможно только теоретически без учета внутренних свойств доменного процесса и действия обратных связей. Практически же такая схема нереализуема. В этом случае существенно уменьшается область косвенного восстановления, неизбежно увеличивается степень прямого восстановления, для чего и необходим дополнительный углерод. В результате следует увеличивать либо расход кокса, либо расход инжестируемого топлива, что, в свою очередь, приведет к восстановлению двухступенчатой схемы теплообмена. Это положение широко подтверждено как экспериментальными, так и теоретическими исследованиями [19, 20]. Таким образом, понятие «автономность верхней и нижней зон теплообмена» нельзя понимать буквально, они взаимодействуют через степень прямого восстановления.

На рис. 9, а – в приведены диаграммы расчета распределения температур и теплоемкостей потоков материалов и газов, выполненные И.Г. Товаровским [17], для трех случаев:

- 1 – обычный режим с вдуванием атмосферного дутья температурой 1100 °С и природного газа (100 м³/т) при производительности 1,5 т/(м³ сут.) (а);
- 2 – интенсивный режим с вдуванием обогащенного кислородом дутья (до 40 %) температурой 1300 °С и природного газа (180 м³/т) при производительности 2,7 т/(м³ сут.) (б);
- 3 – интенсивный режим с вдуванием обогащенного кислородом дутья (до 40 %) температурой 1300 °С при производительности 3 т/(м³ сут.) (в).

В случае 1 имеет место обычный двухступенчатый теплообмен, при котором в шахте (верхняя ступень)

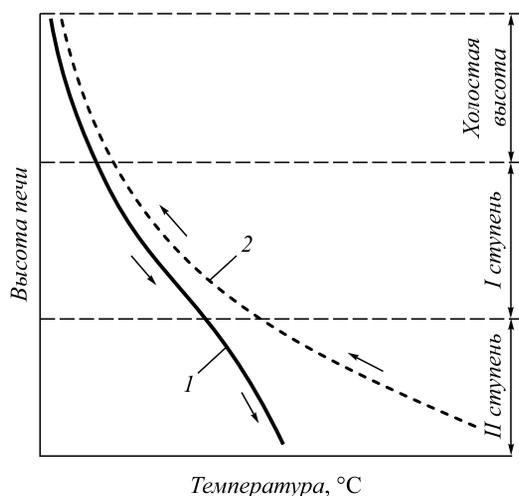


Рис. 8. Распределение температур при обогащении дутья кислородом выше критического (по данным Б.И. Китаева) [2]

Fig. 8. The temperature distribution in the enrichment of the oxygen blowing above the critical one (according to Kitaev B.I.) [2]

теплоемкость потока газов превышает теплоемкость потока материалов, а по мере опускания материалов и их прогрева разность температур газов и материалов уменьшается до некоторого минимума при достижении $m = 1$, после чего $m > 1,0$ и разность температур увеличивается.

Случай 2 характерен тем, что вследствие уменьшения количества газов интенсивность теплообмена в верхней зоне уменьшается, а разность температур газа и шихты на границе зон теплообмена увеличивается с переносом части тепловой работы в нижнюю часть печи.

В случае 3 наблюдаются предельные условия теплообмена, при которых вследствие малого количества

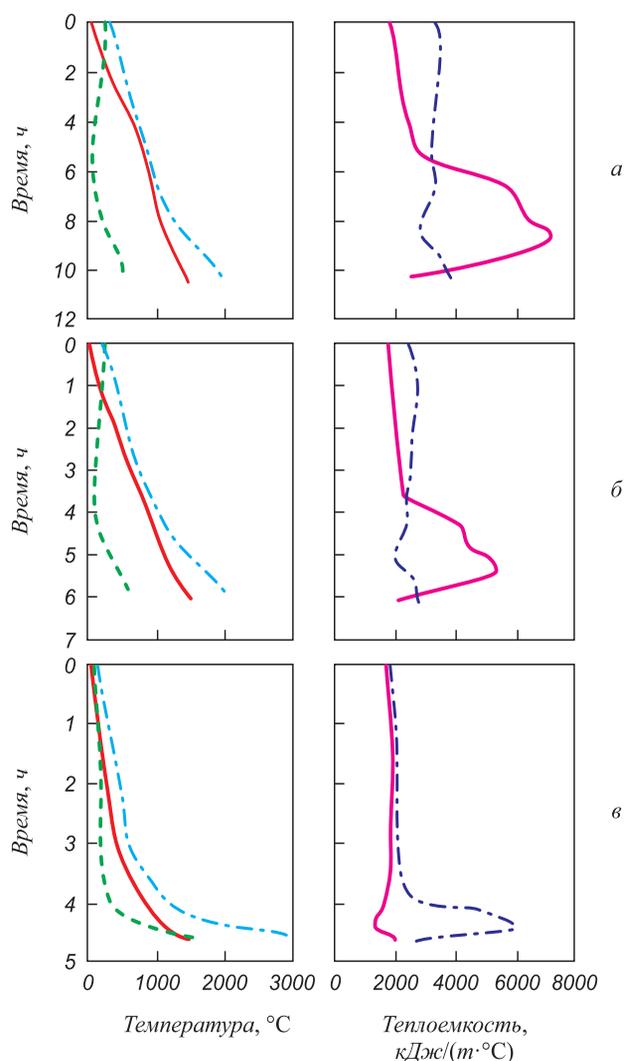


Рис. 9. Распределение температур и теплоемкостей потоков газа и шихты во время пребывания материалов в печи для случаев 1 – 3 (а – в):

- температура и теплоемкость потока газа;
- температура и теплоемкость потока шихты;
- · - разность температур газа и шихты

Fig. 9. Distribution of temperatures and gas flows and heat capacities of the charge materials during their stay in the furnace:

- temperature and heat capacity of the gas flow;
- temperature and heat capacity of the charge flow;
- · - temperature difference between gas and charge

газа на единицу шихты шахта «холодает», разность температур газов и материалов увеличивается и мало меняется по мере опускания материалов, а $m \approx 1$ по всей высоте шахты. Происходит «вырождение» верхней ступени теплообмена и локализация всех процессов в нижней ступени. Такой случай характерен неустойчивостью процессов, и в реальной практике он не встречается.

Выводы. Путем обобщения и анализа экспериментальных и теоретических исследований показано, что двухступенчатая схема теплообмена в современных условиях работы доменной печи при плавке различного вида железорудного сырья при использовании комбинированного дутья высоких параметров, при существенном сокращении расхода кокса и повышении интенсивности плавки является обязательным условием устойчивости хода доменного процесса и экономичности плавки. Любые изменения технологии современной доменной плавки не должны менять этой схемы. Работа верхней и нижней ступеней теплообмена связаны между собой развитием процессов прямого восстановления, что исключает полную автономность этих ступеней теплообмена.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Китаев Б.И. Схема теплообмена в доменной печи и подготовка руд к плавке // *Сталь*. 1944. № 7-8. С. 5 – 8.
2. Китаев Б.И. Теплообмен в шахтных печах. – Свердловск–Москва: Metallurgizdat, 1945. – 152 с.
3. Kitaev B.I., Yaroshenko Yu.G., Suchkov V.D. Heat exchange in shaft furnaces. Translated from the Russian by M.M. Page and B. Simons and edited by Young. Oxford: Pergamon press, 1967. – 299 p.
4. Китаев Б.И., Ярошенко Ю.Г., Лазарев Б.Д. Теплообмен в доменной печи. – М.: Metallurgiya, 1966. – 355 с.
5. Теплотехника доменного процесса / Б.И. Китаев, Ю.Г. Ярошенко, Е.Л. Суханов и др. – М.: Metallurgiya, 1978. – 248 с.
6. Лазарев Б.Л., Китаев Б.И., Ярошенко Ю.Г. Анализ процессов теплообмена в доменных печах // *Сталь*. 1961. № 3. С. 200 – 206.
7. Бабарыкин Н.Н., Марсуверский Б.А., Новиков В.С. Свойства окатышей ССГОК и их поведение в доменной печи. – В кн.: Производство чугуна. Вып. 4. – Свердловск: изд. УПИ, 1978. С. 66 – 79.
8. Бабарыкин Н.Н. Влияние восстановительных процессов на теплообмен в доменной печи // *Сталь*. 1981. № 3. С. 5 – 9.
9. Дмитриев А.Н. Математическое моделирование доменного процесса. – Екатеринбург: изд. УрО РАН, 2011. – 162 с.
10. Доброскок В.А., Туманов А.И., Ганчев А.В. Метод разработки новых технологических режимов доменной плавки на основе комплекса математических моделей // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 1987. № 5. С. 146, 147.
11. Мойкин В.И., Бабушкин Н.М., Боковиков Б.А. Анализ работы доменной печи на комбинированном дутье с применением метода математического моделирования // *Сталь*. 1984. № 4. С. 9 – 14.
12. Рамм А.Н. Современный доменный процесс. – М.: Metallurgiya, 1980. – 304 с.
13. Драничников Н.А., Китаев Б.И., Суханов Е.Л. и др. О взаимном влиянии теплообменных и восстановительных процессов в шахте доменной печи. Сообщение 1 // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 1982. № 2. С. 6 – 9.
14. Драничников Н.А., Китаев Б.И., Суханов Е.Л. и др. О взаимном влиянии теплообменных и восстановительных процессов в шахте доменной печи. Сообщение 2 // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 1982. № 4. С. 8 – 11.
15. Теплообмен и повышение эффективности доменной плавки / Н.А. Спиринов, Ю.Н. Овчинников, В.С. Швыдкий, Ю.Г. Ярошенко. – Екатеринбург: изд. УГТУ, 1995. – 243 с.
16. Спиринов Н.А., Овчинников Ю.Н., Федулов Ю.В., Юсфин Ю.С. О схемах теплообмена в доменной печи // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 1991. № 9. С. 16 – 18.
17. Товаровский И.Г. Доменная плавка. Монография. – Днепропетровск: ПОРОГИ, 2009. – 768 с.
18. Товаровский И.Г. Развитие теории и совершенствование технологии доменной плавки с использованием теории теплообмена в доменной печи. – В кн.: Творческое наследие Б.И. Китаева: труды Междунар. науч.-практ. конф. – Екатеринбург: изд. УГТУ-УПИ, 2009. С. 101 – 109.
19. Андо Р., Миясита Ц., Симоцума Т. и др. Исследование и совершенствование новых технологических приемов доменной плавки на экспериментальной доменной печи // *Черная металлургия: Экспресс-информация ВИНТИ*. 1972. № 33. Реф. 146. С. 1 – 30.
20. Модельные системы поддержки принятия решений в АСУ ТП доменной плавки / Н.А. Спиринов, В.В. Лавров, В.Ю. Рыболовлев и др. – Екатеринбург: изд. УрФУ, 2011. – 462 с.

Поступила 4 февраля 2016 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2016. Vol. 59. No. 8, pp. 523–530.

EVOLUTION OF SCHEMES OF HEAT EXCHANGE IN A BLAST FURNACE

Yu.G. Yaroshenko¹, N.A. Spirin¹, V.S. Shvydkii¹, Ya.M. Gordon², V.V. Lavrov¹

¹Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

²Hatch Ltd., Ontario, Canada

Abstract. The development of schemes of heat exchange in a blast furnace was considered with the improvement of the blast furnace smelting technology. It was noted that for the estimation of the thermal state of blast furnace as a control object it is expedient to divide it into two thermal zones, upper and bottom. The interface between them is in the top of the mixed recovery between the level of the beginning of

the carbon gasification of coke and the horizon, below which iron oxides are directly reduced. Upper slow heat exchange section in terms of heat exchange is reserve height providing better thermal and regenerative operation of the furnace. The bottom section of slow heat exchange should not be used as a reserve for improvement of thermal and reduction work of the blast furnace. It is shown that the presence of two zones of intense heat exchange in the present conditions of smelting of various types of iron ore using the combined blowing of high parameters is a prerequisite for the stability of the course of the blast furnace process and efficiency of smelting.

Keywords: ferrous metallurgy, blast furnace, heat exchange, mass transfer, regularity, principles, scheme.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-8-523-530

REFERENCES

1. Kitaev B.I. Heat exchange scheme of a blast furnace and the preparation of ores for smelting. *Stal'*. 1944, no. 7–8, pp. 5–8 (In Russ.).
2. Kitaev B.I. *Teploobmen v shakhtnykh pechakh* [Heat exchange in a shaft furnace]. Sverdlovsk–Moscow: Metallurgizdat, 1945, 152 p. (In Russ.).
3. Kitaev B.I., Yaroshenko Yu.G., Suchkov V.D. *Heat exchange in shaft furnaces*. Yoynig P.A. ed. Oxford: Pergamon Press, 1967, 299 p.
4. Kitaev B.I., Yaroshenko Yu.G., Lazarev B.D. *Teploobmen v domennoi pechi* [Heat exchange in a blast furnace]. Moscow: Metallurgiya, 1966, 355 p. (In Russ.).
5. Kitaev B.I., Yaroshenko Yu.G., Sukhanov E.L., Ovchinnikov Yu.N., Shvydkii V.S. *Teplotekhnika domennogo protsessa* [Heating engineering of blast-furnace process]. Moscow: Metallurgiya, 1978, 248 p. (In Russ.).
6. Lazarev B.L., Kitaev B.I., Yaroshenko Yu.G. Analysis of heat exchange processes in blast furnaces. *Stal'*. 1961, no. 3, pp. 200–206. (In Russ.).
7. Babarykin N.N., Marsuverskii B.A., Novikov V.S. Properties of pellets from Sokolovsko-Sarbaevskiy mining-and-processing integrated works and their behavior in a blast furnace. In: *Proizvodstvo chuguna. Vyp. 4* [Pig-iron production. Issue 4]. Sverdlovsk: izd. UPI, 1978, pp. 66–79. (In Russ.).
8. Babarykin N.N. Influence of the reducing processes on heat exchange in a blast furnace. *Stal'*. 1981, no. 3, pp. 5–9. (In Russ.).
9. Dmitriev A.N. *Matematicheskoe modelirovanie domennogo protsessa* [Mathematical modeling of a blast-furnace process]. Ekaterinburg: UrO RAN, 2011, 162 p. (In Russ.).
10. Dobroskok V.A., Tumanov A.I., Ganchev A.V. Development method of new technological modes of blast-furnace smelting based on the complex of mathematical models. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1987, no. 5, pp. 146–147. (In Russ.).
11. Moikin V.I., Babushkin N.M., Bokovikov B.A. Analysis of blast furnace work on a fuel-enriched blast with the use of mathematical modeling method. *Stal'*. 1984, no. 4, pp. 9–14. (In Russ.).
12. Ramm A.N. *Sovremenniy domennyi protsess* [Modern blast-furnace process]. Moscow: Metallurgiya, 1980, 304 p. (In Russ.).
13. Dranichnikov N.A., Kitaev B.I., Sukhanov E.L., Zagainov S.A., Bychkova N.V. On an interference of heat exchanging and reducing processes in a shaft blast furnace. Report 1. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1982, no. 2, pp. 6–9. (In Russ.).
14. Dranichnikov N.A., Kitaev B.I., Sukhanov E.L., Zagainov S.A., Bychkova N.V. On an interference of heat exchanging and reducing processes in a shaft blast furnace. Report 2. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1982, no. 4, pp. 8–11. (In Russ.).
15. Spirin N.A., Ovchinnikov Yu.N., Shvydkii B.C., Yaroshenko Yu.G. *Teploobmen i povyshenie effektivnosti domennoi plavki* [Heat exchange and effectiveness increase of blast-furnace smelting]. Ekaterinburg: UGTU, 1995, 243 p. (In Russ.).
16. Spirin N.A., Ovchinnikov Yu.N., Fedulov Yu.V., Yusfin Yu.S. On heat exchange scheme of a blast furnace. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1991, no. 9, pp. 16–18. (In Russ.).
17. Tovarovskii I.G. *Domennaya plavka. Monografiya* [Blast-furnace smelting. Monograph]. Dnepropetrovsk: POROGI, 2009, 768 p. (In Russ.).
18. Tovarovskii I.G. Theory development and the improvement of blast-furnace smelting technology with the use of the theory of heat exchange in a blast furnace. In: *Tvorcheskoe nasledie B.I. Kitaeva: trudy Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* [Oeuvre of B.I. Kitaev: Proceedings of International Theoretical and Practical Conf.]. Ekaterinburg: UGTU-UPI, 2009, pp. 101–109. (In Russ.).
19. Ando R., Miyasita Ts., Simotsuma T. etc. Research and improvement of new processing methods of blast-furnace smelting on a test blast furnace. *Chernaya metallurgiya: Ekspres-informatsiya VINITI*. 1972, no. 33, Ref. 146, pp. 1–30. (In Russ.).
20. Spirin N.A., Lavrov V.V., Rybolovlev V.Yu. etc. *Model'nye sistemy podderzhki prinyatiya reshenii v ASU TP domennoi plavki* [Model support systems of decision making in Automatic Process Control System of a blast-furnace smelting]. Ekaterinburg: UrFU, 2011, 462 p. (In Russ.).

Acknowledgements. The work was supported by the Act 211 of the Government of the Russian Federation, contract no. 02.A03.21.000.

Information about the authors:

Yu.G. Yaroshenko, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair “Thermal Physics and Informatics in Metallurgy” (yury-y@planet-a.ru)
N.A. Spirin, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Chair “Thermal Physics and Informatics in Metallurgy” (n.a.spirin@urfu.ru)
V.S. Shvydkii, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair “Thermal Physics and Informatics in Metallurgy” (vshvit@isnet.ru)
Yu.M. Gordon, Dr. Sci. (Eng.), Head of the Department of Ferrous Metallurgy (igordon@hatch.ca)
V.V. Lavrov, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair “Thermal Physics and Informatics in Metallurgy” (v.v.lavrov@urfu.ru)

Received February 4, 2016