

УДК 669:536

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРИРОДНОГО ГАЗА ПРИ ОТОПЛЕНИИ ШАХТНЫХ ПЕЧЕЙ ВАГРАНОЧНОГО ТИПА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ВЫПЛАВКИ ЧУГУНА

**Матюхин В.И.<sup>1</sup>**, к.т.н., доцент кафедры «Теплофизика и информатика  
в металлургии» (matyhin53@mail.ru)

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

**Матюхина А.В.<sup>1</sup>**, к.т.н., доцент кафедры «Метрология, стандартизация  
и сертификация» (a.v.matiukhina@urfu.ru)

**Дудко В.А.<sup>1</sup>**, магистрант кафедры «Теплофизика и информатика  
в металлургии» (Vya4090@yandex.ru)

**Пуненков С.Е.<sup>2</sup>**, главный технолог (ore-dressing@control.uralasbest.ru)

<sup>1</sup> Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина  
(620002, Россия, Екатеринбург, ул. Мира, 19)

<sup>2</sup> ОАО «Ураласбест»  
(624261, Россия, Свердловская обл., Асбест, ул. Уральская, 66)

**Аннотация.** С целью сокращения расхода кокса в шахтной печи ваграночного типа с открытым или закрытым колошником дополнительно используется природный газ. Его сжигание с помощью горелочных устройств обычно осуществляется в выносных топках, установленных по периметру кожуха печи. В зависимости от конструкции, горелки обеспечивают частичное или полное предварительное перемешивание газа и воздуха при коэффициенте расхода воздуха 1,2 – 1,5. Далее продукты горения газа подаются непосредственно в слой шихты. При реализации этого способа расход кокса составляет 8 – 9 % к металлозавалке, а расход газообразного топлива 30 – 40 м<sup>3</sup>/т расплава. Для этих условий отмечено незначительное повышение температуры расплава (на 10 – 20 °С), рост производительности на 15 – 20 % при снижении объема газообразных вредных выбросов на 20 – 25 % (в основном СО). В работе вагранки наблюдаются периодические нарушения газодинамического режима с подвисанием слоя шихтовых материалов, похолодание получаемого расплава, увеличение химического недожога и ухудшение условий службы футеровочных материалов. При использовании слоевого способа сжигания газозооной смеси ее подают в разогретый слой кусковых материалов с коэффициентом расхода воздуха не ниже 2,5 – 3,0 с формированием высокотемпературной зоны при температуре 1350 – 1380 °С, шириной 60 – 70 мм, способной перемещаться по слою со скоростью 15 – 20 мм/мин. Для его реализации в плотном продуваемом слое необходимо обеспечить равномерное перемешивание газа и воздуха, требуемые газодинамические условия и создание заданного соотношения «газ – воздух» при коэффициенте расхода воздуха более 2,5 – 3,0. При подаче холодной газозооной смеси в слой шахтных печей через фурмы зона горения делит весь слой на две ступени: первоначальную и конечную. Высокий температурный уровень зоны горения обеспечивает значительную скорость охлаждения материалов на стадии зажигания газозооной смеси, что предотвращает ее воспламенение в свободном надслоевом пространстве. Отсутствие прямого контакта зоны высоких температур с рабочим пространством агрегата повышает надежность и экономичность использования этого процесса (отсутствуют тепловые потери). Применение слоевого способа сжигания природного газа для отопления чугунолитейной вагранки обеспечивает повышение производительности плавильного агрегата с 10 до 13,6 т/ч или на 36 % при сокращении удельного расхода кокса на 80 кг/т или на 33,3 %, уменьшении общего расхода теплоты на процесс на 25 кВт или 18,78 % и потерь тепла с отходящими газами на 25,32 кВт или 16,2 %. При этом общий тепловой КПД агрегата увеличивается с 35,58 до 42,26 % или на 15,81 %.

**Ключевые слова:** шахтная печь, выносные топки, коксогозовое отопление, условия сжигания газозооной смеси, зоны горения твердого и газообразного видов топлива, расход кокса, производительность.

DOI: 10.17073/0368-0797-2017-8-629-636

Одним из наиболее распространенных агрегатов для получения жидкого расплава (чугуна, минерально-го расплава и др.) является вагранка с открытым или закрытым колошником. Ее работа отличается возможностью широкого и относительно простого регулирования производительности, универсальностью применяемого исходного сырья по химическому составу,

высоким тепловым КПД, простотой конструкции и легкостью управления процессом [1]. В коксовой вагранке, работающей в режиме противотока, выделение теплоты, необходимой для нагрева и плавления исходных материалов, а также протекания основных физико-химических процессов, происходит в верхней части холостой колоши (коксовой колоше) над фурмами [2].

Как показывает практика эксплуатации вагранок [3, 4], управление процессами в них осуществляется преимущественно на основании закономерностей процессов тепломассообмена и газодинамики. Чем лучше контакт газа и материалов между собой при их движении, тем эффективнее процесс теплопередачи между ними. Рациональные условия для этого могут быть достигнуты только в том случае, если каждая единица твердых компонентов в слое будет активно обрабатываться продуктами горения топлива. В этом и состоит одна из основных задач технологии нагрева шихты в вагранках.

В вагранках, работающих на коксе, цена этого топлива может достигать 70 % себестоимости производимой продукции. В условиях возрастающего дефицита металлургического кокса и его цены все большее значение приобретают технические разработки по частичной замене кокса более дешевыми газообразным и жидким видами топлива, а также создание эффективных способов их сжигания.

Одним из способов реализации теплового режима работы вагранки, ведущего к экономии дефицитного кокса, является способ, связанный с использованием в качестве дополнительного топлива природного газа. Подачу газо-воздушной смеси организуют через выносные топки 2 с горелочными устройствами 3 (рис. 1, а), установленными по периметру кожуха агрегата. В зависимости от конструкции, горелки обеспечивают частичное или полное предварительное смешение

газа и воздуха при коэффициенте расхода воздуха 1,2 – 1,5. Продукты горения газа и кислорода воздуха, не успевшего принять участие в горении газа, поступают непосредственно в слой кокса, обеспечивая его дополнительное сгорание. За счет улучшения горения твердого топлива выделяется дополнительная теплота, что сопровождается повышением температуры компонентов шихты. Повышенные температуры в вагранках с коксогозовым отоплением (рис. 1, б) занимают больший объем рабочего пространства печи в сравнении с чисто коксовым отоплением, что улучшает условия тепловой обработки компонентов шихты в области высоких температур.

В подобной организации работы вагранок есть и негативные особенности. Пониженная концентрация кислорода в составе продуктов горения природного газа [5, 6] и расширение протяженности зоны повышенных температур в слое открывают возможность [7, 8] для интенсификации восстановления диоксида углерода газа углеродом кокса с поглощением теплоты, увеличением удельного выхода газов и понижением их средней температуры. В продуктах горения появляется дополнительное количество CO и H<sub>2</sub>, что сокращает эффективность использования кокса. Чтобы не допустить поступление кислорода газо-воздушной смеси в слой шихты, длина выносных топок должна обеспечивать завершенность процесса факельного сжигания газообразного топлива и составлять не менее 1,0 – 1,5 м [9]. Выносные топки такой длины существенно усложняют

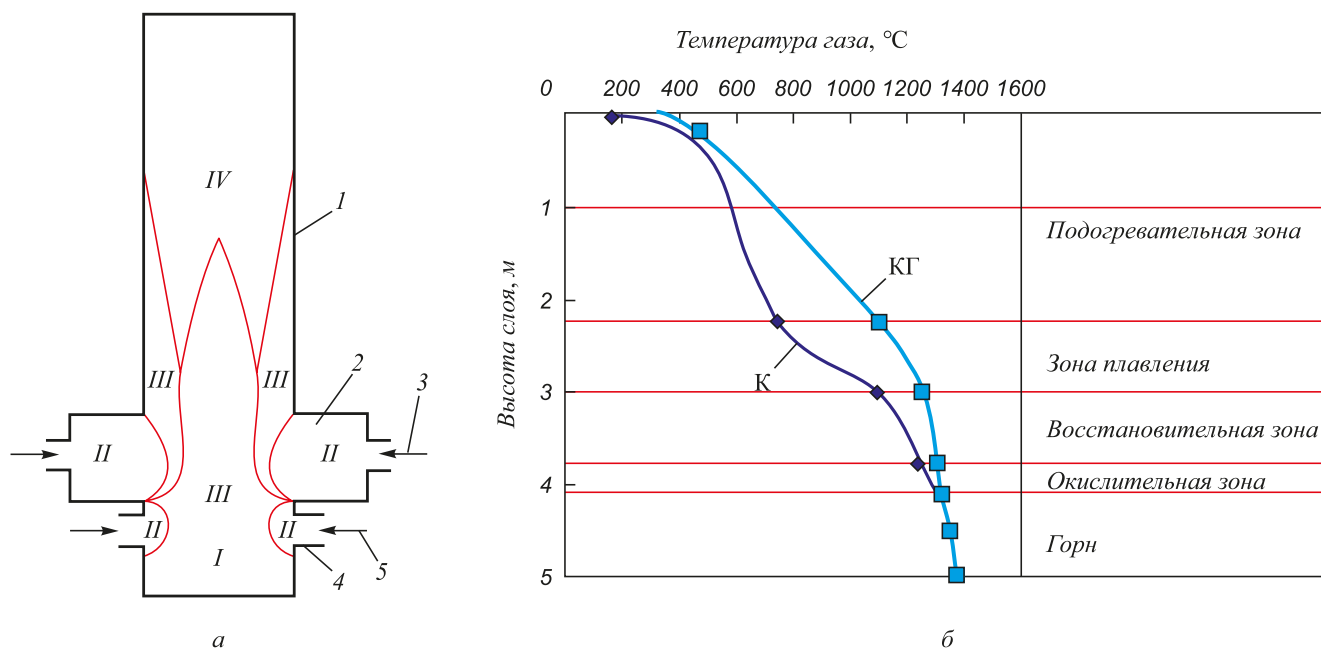


Рис. 1. Распределение тепловых зон (а) и температур газов (б) при коксовом (К) и коксо-газовом (КГ) отоплении шахтных печей: I – горн; II – окислительная зона; III – восстановительная зона; IV – подогревательная зона; 1 – шахта; 2 – выносная топка; 3 – подача газо-воздушной смеси; 4 – фурма; 5 – подача воздушного дутья

Fig. 1. Distribution of thermal zones (a) and gas temperatures (б) for coke (K) and coke-gas (KG) heating of shaft furnaces: I – well; II – oxidizing zone; III – reduction zone; IV – preheating zone; 1 – shaft; 2 – earth furnace; 3 – supply of gas-air mixture; 4 – tuyere; 5 – supply of air blowing

обслуживание горна во время выпуска металла и фурм в процессе работы вагранки.

В ряде случаев при коксогозовом отоплении шахтных печей с использованием выносных топок наблюдались нарушения газодинамического режима их работы, которые выражались в подвисании слоя, похолодании расплава, увеличении химического недожога, ухудшении условий работы футеровочных материалов. Ограниченная стойкость выносных топок при работе с повышенной температурой существенно сокращает срок их службы, увеличивая затраты на обслуживание плавильного агрегата.

Полная замена кокса газообразным топливом с использованием выносных топок связана в первую очередь с проблемами обеспечения равномерного контакта нагреваемых материалов с газом [5]. В противном случае не удастся достичь эффективного нагрева и плавления шихты, а также перегрева получаемого расплава. В связи с этим общий расход теплоты в вагранках, использующих, например, природный газ, по сравнению с аналогичным показателем работы вагранки на коксовом отоплении возрастает примерно в 5 – 8 раз [10, 11]. Для обеспечения удовлетворительных технико-экономических и экологических показателей работы вагранок только на газообразном топливе ограничивают их производительность до уровня 1,5 – 2,0 т/ч.

Повышение эффективности использования газообразного топлива в вагранках может быть достигнуто при его сжигании непосредственно в плотном слое. В лабораторных и промышленных условиях работы слоевых установок было показано, что отличительной особенностью слоевого способа сжигания газообразного топлива является возможность его осуществления в плотном слое кусковых материалов практически любого химического состава с коэффициентом расхода воздуха как большим, так и меньшим единицы [12]. Правильное установление величины коэффициента расхода воздуха позволяет обеспечивать требуемые температурные условия тепловой обработки различных участков слоя. Поскольку процесс горения газа протекает внутри слоя, вне контакта с футеровкой агрегата, то при этом снижаются общие тепловые потери агрегата.

Механизм горения газообразного топлива достаточно полно описан в технической литературе [13, 14]. Поэтому следует остановиться лишь на тех особенностях реализации технологии выплавки чугуна в вагранке, которые возникают при сжигании природного газа непосредственно в слое шихты. Сжигание природного газа в плотном слое кускового материала должно обеспечить:

- сохранение температурно-временных условий для протекания окислительно-восстановительных и плавильных процессов непосредственно в слое шихты;
- выполнение технологических требований к качеству получаемого чугуна;

- снижение удельного расхода дорогостоящего кокса;

- снижение вредных выбросов парниковых газов в окружающую среду.

Промышленные испытания использования слоевого способа сжигания природного газа производили на чугунолитейной вагранке ОАО «Синарский трубный завод» со средней производительностью 10 т/ч. В период испытаний химический состав чугуна соответствовал содержанию, %: 2,57 Si; 0,53 Mn; 0,076 P; 0,047 S; 3,64 C; 0,068 Cr. В качестве основного топлива при ваграночной плавке использовали кокс марки КЛ-1 состава: 5 % влаги; 12,0 % золы; 0,6 % серы; 1,2 % летучих. Химический состав золы кокса представлен следующими компонентами, %: 53,0 SiO<sub>2</sub>; 29,0 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 18,0 CaO, а состав его летучих, %: 35,0 CO<sub>2</sub>; 37,0 CO; 4,0 CH<sub>4</sub>; 6,0 H<sub>2</sub>; 18,0 N<sub>2</sub>. Природный газ включал следующие компоненты, %: 98,0 CH<sub>4</sub>; 0,1 C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>; 0,3 CO<sub>2</sub> и 1,6 N<sub>2</sub>. В состав флюса – известняка, входили, %: 52,0 CaO; 1,75 SiO<sub>2</sub>; 1,0 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 1,0 FeO; 0,2 FeS; 0,02 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. В качестве составляющих металлошихты были представлены отходы собственного производства, покупной чугунный лом, стальной ломом трубного производства, ферросилиций марки ФС45 и ферромарганец марки ФМн70.

Расход дутьевого холодного воздуха составлял около 10 000 – 10 500 м<sup>3</sup>/ч при содержании в нем влаги до 9 г/м<sup>3</sup>. Футеровка вагранки выполнялась из кислых огнеупоров (шамот), содержащих 60 % SiO<sub>2</sub>, 36 % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 2 % CaO и 2 % MgO. При использовании природного газа для получения примерно одинакового состава чугуна для связывания кислых окисленных компонентов плавки повышали основность шихты с 0,69 до 0,74.

Подвод природного газа к вагранке осуществляли от отдельного газопровода через распределительный коллектор на газовое распределительное сопло, из которого природный газ поступал в поток воздушного дутья, направляемого для горения кокса (рис. 2). Регулирование расхода газа на каждую фурму осуществляли пробковым краном.

Режим слоевого сжигания природного газа характеризовался следующими показателями:

- расходом природного газа на одну фурму не более 25 – 30 м<sup>3</sup>/ч;
- расходом воздушного дутья на одну фурму до 1250 – 1300 м<sup>3</sup>/ч;
- средним коэффициентом расхода воздуха при подаче в зажженный слой кокса не ниже 5,0 – 6,0;
- общим расходом природного газа на вагранку не выше 200 – 250 м<sup>3</sup>/ч;
- общим расходом воздушного дутья не более 10 000 – 10 500 м<sup>3</sup>/ч;
- скоростью выхода газо-воздушной смеси из фурм в слой 35 – 50 м/с;
- давлением природного газа не ниже 0,3 атм.;
- давлением воздушного дутья не выше 0,22 атм.

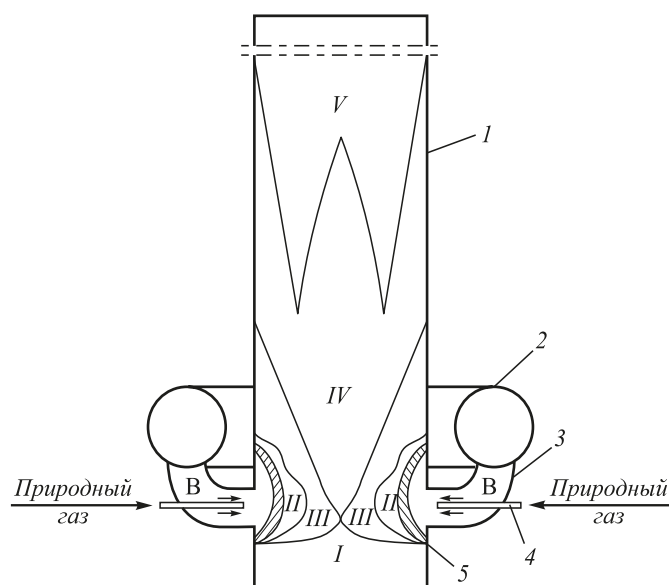


Рис. 2. Схема работы шахтной печи с использованием комбинированного топлива:

1 – шахта; 2 – воздушный распределительный коллектор; 3 – воздушная фурма; 4 – газовое сопло; 5 – зона горения газовой смеси; I – зона горна; II – зона горения кокса; III – окислительная зона горения кокса и природного газа; IV – восстановительная зона; V – подогревательная зона; В – воздушное дутье

Fig. 2. Operation scheme of shaft furnace with the use of combined fuel:  
1 – shaft; 2 – air distribution manifold; 3 – air tuyere; 4 – gas nozzle; 5 – zone of combustion of the gas-air mixture; I – zone of the well; II – zone of coke burning; III – oxidizing zone of burning of coke and natural gas; IV – reduction zone; V – preheating zone; В – air blowing

Для поддержания заданных технологических параметров и обеспечения подачи добавок природного газа в зажженный слой кокса чугунолитейной вагранки были предусмотрены элементы автоматики, включающие контроль и регулирование расхода и давления воздушного дутья, природного газа.

Использование комбинированного топлива при ваграночной плавке чугуна требует организации совместного сжигания кокса и природного газа. Такая организация процессов сжигания двух различных видов топлива позволяет обеспечивать подачу дополнительной тепловой энергии непосредственно в зону получения расплава.

Процесс организации слоевого горения газовой смеси в плотном слое кусковых материалов можно представить как ряд последовательно проходящих стадий. Прежде всего, поток смеси газов, попадая в плотный слой шихты и сталкиваясь с твердыми кусками шихты, подвергается дополнительной турбулизации [15, 16], что улучшает перемешивание природного газа и воздуха. Одновременно с указанным явлением происходит нагрев холодной газовой смеси в опускающемся нагретом слое кусковых материалов. При этом существенного охлаждения шихты не происходит. Для устойчивого зажигания газовой смеси в плотном слое целесообразно при подаче ее в

разогретый слой поддерживать общий коэффициент расхода воздуха не ниже 2,5 – 3,0.

Горение в слое холодной газовой смеси с повышенными значениями коэффициента расхода воздуха может происходить только при обеспечении ее предварительного подогрева. Эти условия создаются при формировании холостой колоши, когда температура кусков кокса по всей ее высоте становится стабильной, а процесс горения кокса происходит в верхней части выше места установки воздушных фурм. В условиях стабильности процесса горения кокса холодная газозовоздушная смесь, проходя через горячий слой кокса холостой колоши, подогревается до температуры воспламенения и образует высокотемпературную зону горения природного газа с температурой до 1350 – 1380 °С непосредственно в слое протяженностью 60 – 70 мм. При повышенных значениях коэффициента расхода воздуха уровень предварительного подогрева газовой смеси для организации самостоятельного горения должен быть выше температуры воспламенения твердого топлива (700 – 800 °С) [17, 18] и составлять 850 – 1050 °С. Воздушное дутье, предназначенное для горения кокса, проходя через эту область горения природного газа подогревается до 250 – 300 °С.

В промышленных условиях зафиксированы результаты работы одной и той же вагранки, реализующей традиционный способ отопления на коксе и исследуемый способ отопления с использованием добавок природного газа. Сравнение показателей работы чугунолитейной вагранки в этих условиях представлено в табл. 1. Анализ показал, что применение слоевого способа сжигания природного газа для отопления чугунолитейной вагранки обеспечивает повышение производительности плавильного агрегата с 10 до 13,6 т/ч или на 36 %. При этом удельный расход кокса сократился на 80 кг/т или на 33,3 %.

Совмещение сжигания кокса и природного газа непосредственно в слое шихты с технологическим процессом нагрева и плавления материалов открывает возможность значительного улучшения управляемости качеством готовой продукции в результате тепловой обработки без существенных капитальных затрат.

Материальные балансы плавов, отражающие работу вагранки при отоплении ее только коксом (К) и с применением добавок природного газа (коксогазовое отопление – КГ), представлены в табл. 2. Сравнительный анализ этих данных показал, что при использовании слоевого способа сжигания природного газа в коксовой вагранке увеличивается удельный расход воздушного дутья на 3,7 % (отн.) при снижении общей массы материалов, участвующих в процессе на 3,01 % (отн.) в основном за счет снижения расхода кокса. Следует также отметить повышение выхода чугуна на 3,1 % (отн.) при сокращении выхода шлака на 9,87 % (отн.) и колошниковых газов на 10,58 % (отн.). Образующаяся при этом невязка баланса связана с неравномерностью теп-

Таблица 1

## Усредненные показатели работы чугунолитейной вагранки

Table 1. Average operational parameters of pig iron casting cupola

Показатель	Традиционный режим	Режим при слоевом способе сжигания природного газа
Производительность по чугуну, т/ч	10,0	13,6
Удельный расход кокса, кг/т чугуна	240	160
Температура перегрева расплава, °С	1450	1440
Средний состав отходящих газов, %		
CO	12,05	8,9
CO <sub>2</sub>	18,80	13,61
SO <sub>2</sub>	0,10	0,08
N <sub>2</sub>	66,65	75,26
H <sub>2</sub> O	2,40	2,24
Коэффициент расхода воздуха, доли ед	0,63	1,05
Расход шихтовых материалов, кг/100 кг:		
отходы собственного производства	40	40
покупной чугун	40	40
стальной лом	20	20
ферромарганец	1,0	1,0
ферросилиций	5,4	5,4
известняк	3,88	3,576
Основность шлака, доли ед.	0,69	0,74

Таблица 2

## Материальные балансы ваграночных плавов на 100 кг чугуна

Table 2. Material balances of cupola melts per 100 kg of pig iron

Статья прихода	Масса				Статья расхода	Масса			
	К		КГ при слоевом сжигании газа			К		КГ при слоевом сжигании газа	
	Кг	%	Кг	%		Кг	%	Кг	%
1. Металлическая шихта	100,00	38,68	100,00	39,88	1. Жидкий чугун	99,357	38,44	99,36	39,63
2. Кокс	24,0	9,28	16,00	6,38	2. Шлак	10,222	3,95	8,93	3,56
3. Природный газ	0	0	0,53	0,21	3. Колошниковый газ	168,61	65,23	146,25	58,33
3. Известняк	3,89	1,50	3,58	1,43	4. Невязка	-19,70	-7,62	-3,81	-1,52
4. Оплавленная футеровка (в шлак)	0,8	0,30	0,8	0,31					
5. Песок шихты	0,5	0,19	0,5	0,20					
6. Воздух дутья	129,32	50,05	129,32	51,90					
ИТОГО	258,51	100,00	250,73	100,0	ИТОГО	258,49	100,00	250,73	100,00

ловой работы вагранки в горизонтальном сечении ее рабочего пространства.

Тепловые балансы ваграночных плавов чугуна рассчитаны на основании данных материальных балансов. Результаты расчетов приведены в табл. 3.

Из анализа представленных данных следует, что общий расход тепловой энергии в ваграночном процессе при использовании слоевого способа сжигания природ-

ного газа сокращается с 133,12 до 108,12 кВт на каждые 100 кг полученного чугуна, т. е. на 18,78 %. Следствием этого результата является увеличение теплового КПД процесса выплавки чугуна с 35,58 до 42,26 % или на 15,81 %. При этом доля тепловой энергии, получаемой в результате горения кокса, сокращается с 92,16 до 88,05 %, т. е. на 4,46 % за счет более эффективного совместного сжигания твердого и газообразного топлива.



Таблица 3

Тепловые балансы ваграночной плавки на 100 кг чугуна

Table 3. Thermal balances of cupola melting per 100 kg of pig iron

Статья прихода	Количество теплоты				Статья расхода	Количество теплоты			
	К		КГ при слоевом сжигании газа			К		КГ при слоевом сжигании газа	
	кВт	%	кВт	%		кВт	%	кВт	%
1. Теплота от сгорания кокса	122,69	92,16	95,20	88,05	1. Физическая теплота жидкого чугуна	36,65	27,53	36,64	33,88
2. Теплота от сгорания природного газа	0	0	7,35	6,80	2.Теплота расплавления и перегрева шлака	4,99	3,75	4,36	4,03
2.Окисление примесей чугуна, в т. ч.:	4,74	3,56	4,74	4,42	3.Теплота разложения известняка	4,37	3,28	4,02	3,72
железо	0,31	0,23	0,31	0,29					
кремний	3,96	2,97	3,96	3,66					
марганец	0,47	0,35	0,47	0,47					
3.Теплота шлакообразования	0,95	0,73	0,83	0,73	4.Теплота испарения влаги кокса	0,55	0,41	0,43	0,40
Всего	133,12	100,0	108,12	100,0	5.Теплота испарения влаги дутья	0,81	0,61	0,81	0,75
					6. Физическая теплота отходящих газов	32,91	24,72	19,59	18,12
					7. Химическая теплота ваграночных газов	46,14	34,66	34,21	31,64
					8. Потери теплоты в окружающую среду	6,14	4,61	6,14	5,68
					Невязка	0,56	0,43	1,92	1,78
					Всего:	133,12	100,0	108,12	100,00

По результатам плавки при переходе на использование совместного слоевого сжигания природного газа и кокса холостой колоши было отмечено увеличение доли физического теплосодержания чугуна с 27,53 до 36,64 % или на 33,09 %, доли физического теплосодержания шлака с 3,75 до 4,03 % или на 7,47 % (отн.).

Следует также отметить уменьшение доли физической теплоты отходящих газов с 24,72 до 18,12 % или на 26,7 % (отн.), а также химической теплоты ваграночных газов (химический недожог) с 34,66 до 31,64 % или на 8,71 %, что связано с более полным завершением процессов горения и тепломассообмена в слое.

Таким образом, использование природного газа при отоплении шахтных печей ваграночного типа позволяет существенно воздействовать на показатели их работы, улучшая процесс переплава исходных компонентов и обеспечивая более полное использование тепловой энергии. При этом удельный расход твердого топлива (кокса) снижается на 15 – 20 %. При сохранении удельного расхода кокса может быть повышена производительность вагранки на такую же величину.

Относительная простота реализации процесса сжигания газа в плотном слое открывает широкие воз-

можности его применения для интенсификации процессов тепломассообмена в шахтных печах ваграночного типа.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Матюхин В.И., Матюхина А.В. Расчет и проектирование ваграночного комплекса плавки чугуна. – Екатеринбург: УрФУ, 2015. – 364 с.
2. Селянин И.Ф., Маркс Г.Л., Вальдман Л.М., Соколов Б.М. Экспериментальное исследование газообразования в слое кокса холостой колоши вагранки с расширенной зоной горения // Изв. вузов. Черная металлургия. 1991. № 10. С. 74 – 77.
3. Тепловая работа шахтных печей и агрегатов с плотным слоем / Я.М. Гордон, Б.А. Боковиков, В.С. Швыдкий и др. – М.: Металлургия, 1989. – 120 с.
4. Dong H., Cai J.-J., Wang G.-S., Yang J. Numerical simulation on gas flow affected by constructional parameters of pelletizing shaft furnaces // Dongbei Daxue Xuebao. Ziran Kexue Ban. J. Northeast. Univ. Natur. Sci. 2013. Vol. 34. No. 7. P. 980 – 984.
5. Чаплыгин Ю.В., Еринов А.Е. Использование природного газа при плавке чугуна. – Киев: Наукова думка, 1976. – 237 с.
6. Natsui S., Kon T., Ueda S. etc. Analysis of heat and mass transfer in a packed bed by considering particle arrangement. Institute of Multidisciplinary Research for Advanced Materials (IMRAM), Tohoku University, 2-1-1 Katahira Aoba-ku Sendai 980-8577, Japan.

7. Фуклеев В.А. О работе коксгазовых вагранок // Литейное производство. 1964. № 8. С. 34 – 35.
8. Меркер Э.Э., Карпенко Г.А., Тынников И.М. Энергосбережение в промышленности и эксергетический анализ технологических процессов – Старый Оскол: ТНТ, 2010. – 316 с.
9. Часов Л.И., Протопопов Л.П. Обобщение некоторых данных о плавке чугуна на коксгазовых вагранках // ВНИИТИиЭПСМ: Сб. тр. 1971. Вып. 3. С. 346 – 349.
10. Светлов Ю.В. Интенсификация тепловых и гидродинамических процессов в аппаратах с турбулизаторами потока. Теория, эксперимент, методы расчета. – М.: Энергоатомиздат, 2003. – 304 с.
11. Лисиенко В.Г., Лобанов В.И., Китаев Б.И. Теплофизика металлургических процессов. – М.: Металлургия, 1982. – 240 с.
12. Лобанов В.И., Матюхин В.И., Гольцев В.А., Ярошенко Ю.Г. Исследование условий формирования зоны горения в слое железорудных окатышей для улучшения их металлургических свойств // Изв. вуз. Черная металлургия. 1987. № 6. С. 103 – 104.
13. Селянин И.Ф., Феоктистов А.В., Бедарев С.А. Теория и практика интенсификации технологического процесса в шахтных агрегатах малого диаметра. – М.: Теплотехник, 2010. – 379 с.
14. Теория и практика теплогенерации / С.Н. Гушин, М.Д. Казяев, Ю.В. Крюченков, В.И. Лобанов; Под ред. В.И. Лобанова, С.Н. Гушина. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2005. – 379 с.
15. Механика жидкости и газов / В.С. Швыдкий, Ю.Г. Ярошенко, Я.М. Гордон и др.; Под научн. ред. В.С. Швыдкого. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2003. – 464 с.
16. Телегин А.С., Швыдкий В.С., Ярошенко Ю.Г. Тепломассоперенос: Учебник для вузов / Под ред. Ю.Г. Ярошенко. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2002. – 455 с.
17. Лисиенко В.Г., Щелоков Я.М., Ладыгичев М.Г. Топливо. Рациональное сжигание, управление и технологическое использование: Справочное издание. – М.: Теплотехник, 2002. – 688 с.
18. Равич М.Б. Поверхностное беспламенное горение. – М.-Л.: АН СССР, 1949. – 353 с.

Поступила 12 апреля 2017 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2017. Vol. 60. No. 8, pp. 629–636.

## THE USE OF NATURAL GAS FOR HEATING OF SHAFT FURNACES OF CUPOLA TYPE TO INCREASE THE TECHNOLOGICAL PROCESSES EFFICIENCY OF PIG IRON SMELTING

V.I. Matyukhin<sup>1</sup>, Yu.G. Yaroshenko<sup>1</sup>, A.V. Matyukhina<sup>1</sup>,  
V.A. Dudko<sup>1</sup>, S.E. Punenkov<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup> JSC “URALASBEST”, Asbest, Sverdlovsk region, Russia

**Abstract.** Natural gas can be additionally used to reduce coke consumption in a shaft furnace of cupola type with an open or closed furnace top. Its burning is typically made in the external hearths installed around the perimeter of the furnace shell. Depending on design, the burners provide a partial or complete pre-mixing of gas and air at air flow rate of 1.2 to 1.5. Further, the combustion gas is fed directly to a charge layer. When implementing this method, the coke consumption was 8 – 9 % of furnace charge and fuel gas consumption was 30 – 40 m<sup>3</sup>/t of melt. For these conditions, there were observed a slight increase in the temperature of the melt (10 – 20 °C) and productivity growth of 15 – 20 % while reducing the amount of harmful gaseous emissions by 20 – 25 % (mostly of CO). In the work of the cupola, periodic disruptions of the gas-dynamical regime were observed accompanied by the suspension of the charge material layer, as well as cooling of the resulting melt, an increase in chemical underburn and deterioration of service conditions of the lining materials. When using the layered method for the gas mixture combustion, it is fed into the heated layer of bulk materials with the air flow rate not below 2.5 – 3.0 with formation of a high-temperature zone of 1350 – 1380 °C and the width of 60 – 70 mm, able to move through the layer at a speed of 15 – 20 mm/min. To implement it in the thick ventilated layer it is necessary to ensure uniform mixing of gas and air, required gas-dynamic conditions and formation of set “gas-air” ratio in the air flow rate more than 2.5 and 3.0. When supplying the cold gas-air mixture in a layer of shaft furnaces by tuyeres, the combustion zone divides the whole layer into two stages: initial and final. The high temperature level of combustion zone provides substantial cooling rate of the materials at the stage of gas-air mixture ignition, which prevents it from fire in free upperlayer space. The absence of direct contact of high temperatures zone with a unit working space increases the reliability and efficiency of this process (no heat losses). The use of the layered method of natural gas burning to heat the cast iron cupola increase the productivity of the melting unit from 10 to 13.6 t/h, or 36 % while reducing specific consumption of coke for 80 kg/t or 33.3 %, decrease in the total consumption of heat for the process by 25 kW, or 18.78 % and heat losses in the exhaust

gases by 25.32 kW, or 16.2 %. The overall thermal efficiency of the unit increased from 35.58 to 42.26 % or by 15.81 %.

**Keywords:** shaft furnace, external furnace, coke oven heating, combustion conditions of the gas-air mixture, combustion of solid and gaseous fuels, coke consumption, productivity.

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2017-8-629-636

## REFERENCES

1. Matyukhin V.I., Matyukhina A.V. *Raschet i proektirovanie va-granochnogo kompleksa plavki chuguna* [Calculation and design of complex cupola melting of iron]. Ekaterinburg: UrFU, 2015, 364 p. (In Russ.).
2. Selyanin I.F. Marks G.L., Val’dman L.M., Sokolov B.M. Experimental study of gas formation in coke layer of cupola bed charge with extended combustion zone. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1991, no. 10, pp. 74–77. (In Russ.).
3. Gordon Ya.M., Bokovikov B.A., Shvydkii V.S. *Teplovaya rabota shakhtnykh pechei i agregatov s plotnym sloem* [Thermal operation of shaft furnaces and aggregates with a dense layer]. Moscow: Metallurgiya, 1989, 120 p. (In Russ.).
4. Dong H., Cai J.-J., Wang G.-S., Yang J. Numerical simulation on gas flow affected by constructional parameters of pelletizing shaft furnaces. *Dongbei Daxue Xuebao. Ziran Kexue Ban. J. Northeast. Univ. Natur. Sci.* 2013, vol. 34, no. 7, pp. 980–984.
5. Chaplygin Yu.V., Erinov A.E. *Ispol'zovanie prirodnogo gaza pri plavke chuguna* [The use of natural gas at smelting of pig iron]. Kiev: Naukova dumka, 1976, 237 p. (In Russ.).
6. Natsui S., Kon T., Ueda S., Kano J., Inoue R., Ariyama T., Noga-mi H. *Analysis of heat and mass transfer in a packed bed by considering particle arrangement*. Institute of Multidisciplinary Research for Advanced Materials (IMRAM), Tohoku University, 2-1-1 Kata-hira Aoba-ku Sendai 980-8577, Japan.
7. Fukleev V.A. Coke-gas cupola operation. *Liteinoe proizvodstvo*. 1964, no. 8, pp. 34–35. (In Russ.).
8. Merker E.E., Karpenko G.A., Tynnikov I.M. *Energoberezhenie v promyshlennosti i eksergeticheskii analiz tekhnologicheskikh protsessov* [Energy efficiency in industry and exergy analysis of technological processes]. Stary Oskol: TNT, 2010, 316 p. (In Russ.).

9. Chasov L.I., Protopopov L.P. Generalization of some data on iron smelting in coke-gas cupola. In: *VNIINTIiEPSM: sb.tr.* 1971, Issue 3, pp. 346–349. (In Russ.).
10. Svetlov Yu.V. *Intensifikatsiya teplovykh i gidrodinamicheskikh protsessov v apparatakh s turbulizatorami potoka. Teoriya, eksperiment, metody rascheta* [Intensification of thermal and hydrodynamic processes in devices with turbulence flow. Theory, experiment, calculation methods]. Moscow: Energoatomizdat, 2003, 304 p. (In Russ.).
11. Lisienko V.G., Lobanov V.I., Kitaev B.I. *Teplofizika metallurgicheskikh protsessov* [Thermophysics of metallurgical processes]. Moscow: Metallurgiya, 1982, 240 p. (In Russ.).
12. Lobanov V.I., Matyukhin V.I., Gol'tsev V.A., Yaroshenko Yu.G. Investigation of formation conditions of the combustion zone in a layer of iron ore pellets to improve their metallurgical properties. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1987, no. 6, pp. 103–104. (In Russ.).
13. Selyanin I.F., Feoktistov A.V., Bedarev S.A. *Teoriya i praktika intensifikatsii tekhnologicheskogo protsessa v shakhtnykh agregatakh malogo diametra* [Theory and practice of process intensification in shaft units of small diameter]. Moscow: Teplotekhnika, 2010, 379 p. (In Russ.).
14. Gushchin S.N., Kazyayev M.D., Kryuchenkov Yu.V. *Teoriya i praktika teplogeneratsii* [Theory and practice of heat generation]. Lobanov V.I., Gushchin S.N. eds. Ekaterinburg: UGTU-UPI, 2005, 379 p. (In Russ.).
15. Shvydkii V.S., Yaroshenko Yu.G., Gordon Ya.M. etc. *Mekhanika zhidkosti i gazov* [Mechanics of liquids and gases]. Shvydkii V.S. ed. Moscow: Akademkniga, 2003, 464 p. (In Russ.).
16. Telegin A.S., Shvydkii V.S., Yaroshenko Yu.G. *Teplomassoperenos: uchebnik dlya vuzov* [Heat and mass transfer: Textbook for universities]. Yaroshenko Yu.G. ed. Moscow: Akademkniga, 2002, 455 p. (In Russ.).
17. Lisienko V.G., Shchelokov Ya.M., Ladygichev M.G. *Topливо. Ratsional'noe szhiganie, upravlenie i tekhnologicheskoe ispol'zovanie: spravochnoe izdanie* [Fuel. Efficient combustion, control and technological use: Reference book]. Moscow: Teplotekhnika, 2002, 688 p. (In Russ.).
18. Ravich M.B. *Poverkhnostnoe besplamennoe gorenie* [Surface flameless combustion]. Moscow-Leningrad: AN SSSR, 1949, 353 p. (In Russ.).

**Information about the authors:**

**V.I. Matyukhin**, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair “Thermal Physics and Informatics in Metallurgy”  
(matyhin53@mail.ru)

**Yu.G. Yaroshenko**, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair “Thermal Physics and Informatics in Metallurgy” (yury-y@planet-a.ru)

**A.V. Matyukhina**, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair “Metrology, Standardization and Certification”  
(a.v.matiukhina@urfu.ru)

**V.A. Dudko**, MA Student of the Chair “Thermal Physics and Informatics in Metallurgy” (Vya4090@yandex.ru)

**S.E. Punenkov**, Chief Technologist  
(ore-dressing@control.uralasbest.ru)

Received April 12, 2017