

С.А.Фещенко, В.И.Плешков, В.Н.Логинов, И.Ф.Курунов

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРИРОДНОГО
ГАЗА В ДОМЕННОЙ ПЛАВКЕ ЗА СЧЕТ ЕГО ПОДОГРЕВА**

ОАО ЛМЗ «Свободный Сокол», ОАО «Северсталь», ОАО «НЛМК»

Показано, что в зависимости от технической реализации способа подогрева температура природного газа может быть повышена до 300⁰С и выше. Синергетический эффект от подогрева природного газа значительно превышает эффект от прихода в печь дополнительного тепла с природным газом. Выполнена оценка влияния подогрева природного газа на эффективность доменной плавки на доменных печах ОАО ЛМЗ «Свободный сокол» и ОАО «Северсталь».

Рожденная в Днепропетровске 50 лет назад с участием и под руководством академика З.И. Некрасова технология доменной плавки с вдуванием природного газа успешно используется во всех странах, где газ может конкурировать с жидким или с пылеугольным топливом (ПУТ). Вопрос эффективности использования в доменной печи, как кокса, так и вдуваемого топлива, всегда был в центре внимания технологов. В наши дни при постоянном росте цен на энергоносители актуальность этого вопроса становится все более значимой. В полной мере сказанное относится и к природному газу. Реализуемый в настоящее время на многих заводах России и Украины переход на вдувание ПУТ требует значительных финансовых и временных затрат и до его завершения природный газ остается здесь единственным радикальным средством снижения расхода кокса. Кроме того, опыт Донецкого металлургического завода и ряда заводов США, где ПУТ вдувается в доменные печи совместно с природным газом [1,2] позволяет предполагать, что такая технологическая практика может оказаться актуальной и для металлургических предприятий, где начато строительство установок для подготовки и вдувания ПУТ. Этому, без сомнения, будет способствовать не высокое качество используемого на этих заводах кокса, горячая прочность которого существенно ниже, чем на Европейских заводах или на заводах Японии, Кореи и Китая, где вдувают ПУТ в количествах 100–150 кг/т и более. Природный газ менее требователен к качеству кокса и его использование совместно с ПУТ повышает гибкость технологии плавки на комбинированном дутье.

Известно, что эффективность применения природного газа в доменной плавке определяется двумя факторами – полнотой его сгорания и степенью использования водорода в доменной печи, которые зависят от расхода природного газа и от смешивания его с дутьем в фурме [3]. За полувековой период применения природного газа в доменной плавке были опробованы десятки конструктивных способов подачи природного газа в полость воздушной фурмы, направленных на улучшение смешивания

природного газа с дутьем и увеличение проникновения его струи в поток дутья. Наибольшее применение нашел способ подачи природного газа через патрубок в водоохлаждаемой полости фурмы перпендикулярно потоку дутья. Этот способ обеспечивает жизнеспособность системы вдувания газа при попадании шлака в фурмы во время технологических расстройств печи, но не позволяет достигать скорости струи газа, превышающей скорость потока дутья в 1,2–1,4 раза, что необходимо для полного смешивания природного газа с дутьем [4,5]. При существующих на большинстве доменных печах скоростях истечения дутья из фурм 180–220 м/сек, скорость истечения природного газа должна быть в пределах 215–300 м/сек, что недостижимо при существующих параметрах дутья и природного газа (расход, давление, температура, содержание кислорода, влажность) [5].

Радикальными средствами повышения полноты сгорания при высоких расходах газообразного топлива являются его подогрев и предварительное смешивание с кислородом. Технология предварительного смешивания природного газа с кислородом и вдувание в фурмы доменных печей газокислородной смеси, предложенная в НПО «Тулачермет», нашла применение на ряде доменных печей металлургических заводов России и используется более 20 лет [6,7].

Что касается подогрева природного газа перед его вдуванием в доменные печи, то несмотря на достаточно многочисленные предложенные технические решения [8–10] они не нашли практического применения. Более 40 лет назад было высказано теоретически обоснованное предложение подогревать природный газ, используя его в качестве охлаждающей среды в холодильниках доменной печи [11]. Синергетический эффект от реализации такой технологии охлаждения доменной печи складывается за счет следующих факторов:

- дополнительный приход тепла в доменную печь с подогретым природным газом;
- повышение полноты сгорания природного газа и повышение коэффициента замены кокса природным газом за счет этого;
- повышение степени использования водорода в печи за счет более равномерного его распределения по сечению печи, обусловленного уменьшением плотности природного газа и увеличением скорости его струи, вызывающим более глубокое проникновение ее в поток дутья в фурме;
- экономия расхода охлаждающей воды и затрат на ее обработку (охлаждение);
- исключение образования накипи в холодильниках и сохранение эффективного теплоотвода в процессе всей эксплуатации холодильников;
- саморегуляция теплоотвода при изменении тепловой нагрузки на холодильники за счет изменения теплоемкости газа, а также объема и

скорости природного газа при изменениях тепловой нагрузки на холодильники.

Однако впервые практическое применение природного газа в качестве охлаждающей среды для охлаждения фурменных приборов было реализовано на доменной печи ОАО ЛМЗ «Свободный сокол» в 2005 г. Предложенное техническое решение (Патент на изобретение № 2294377 «Способ подачи природного газа в доменную печь» от 3.10.2005. Патентообладатели ОАО «Северсталь», ОАО ЛМЗ «Свободный сокол») позволяет простым и малозатратным способом нагреть вдуваемый в фурмы доменной печи природный газ, в зависимости от его расхода и числа ступеней нагрева, до 300 °С и выше.

Этот способ многоступенчатого нагрева природного газа легко реализуется, обеспечивает надежное охлаждение элементов фурменного прибора и существенно повышает эффективность доменной плавки благодаря действию по меньшей мере трех из перечисленных выше факторов.

Оценка влияния подогрева природного газа на процесс его горения в фурме была выполнена с помощью математической модели, основанной на решении записанных в трехмерной постановке уравнений Навье–Стокса, неразрывности, энергии и конвективной диффузии, которые выражают законы сохранения импульса, массы смеси, энергии и массы примеси, соответственно [12]. Описание процессов переноса массы метана, кислорода, азота, паров воды и диоксида углерода, происходящих в фурме, в модели осуществлено с помощью 5 дифференциальных уравнений конвективной диффузии. Процедура решения была реализована на персональном компьютере с процессором Intel Pentium с тактовой частотой 3 ГГц с помощью программно–вычислительного комплекса PHOENICS, разработанного фирмой CHAM Ltd [12]. Решение одного варианта занимало около 3–х часов.

Моделирование показало, что с увеличением температуры природного газа на входе в поток дутья от 0 до 300 °С содержание метана на выходе из фурмы уменьшается с 3,1 % до 2,2 % (рис.1) [12].

Это связано с уменьшением плотности природного газа при увеличении его температуры, что при, неизменной площади сечения выходного патрубка, приводит к увеличению скорости истечения природного газа. Кроме того, увеличение температуры газа вызывает рост скорости звука в этой среде, а, следовательно, увеличения потока импульса, пропорционального квадрату скорости. Это, совместно с уменьшением плотности природного газа, приводит к увеличению интенсивности его перемешивания с дутьем и уменьшению времени его турбулентного горения, что и приводит к уменьшению концентрации метана на выходе из фурмы. Помимо этого, ускорению окисления метана в фурме способствует и сокращение времени его нагрева в струе дутья до температуры воспламенения.

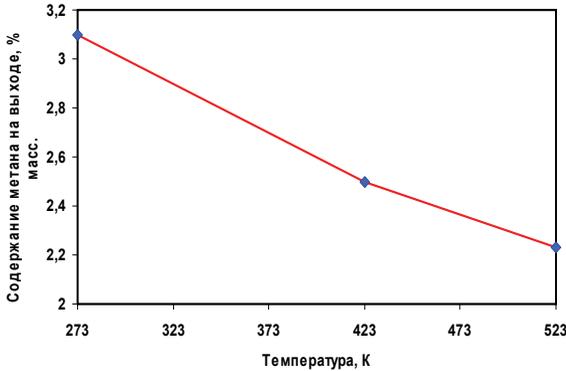


Рис. 1. Зависимость концентрации CH_4 в дутье на выходе из фурмы от температуры подогрева природного газа

При практической реализации предложенного способа нагрева природного газа на доменной печи №1 ОАО ЛМЗ «Свободный сокол» (при тем-

пературе дутья на печи 1100°C) путем охлаждения им вместо воды нижнего и верхнего фланцев колена фурменного прибора (рис.2, 3) температура вдуваемого в фурмы природного газа при его расходе на одну фурму $350 \text{ м}^3/\text{час}$ повысилась до 200°C . Дополнительный приход тепла в доменную печь за счет этого равен теплу, которое выделяется при сгорании в фурменной зоне кокса в количестве $4\text{--}5 \text{ кг/т}$ чугуна. При этом на 25°C повышается теоретическая температура горения, что позволяет, сохранив эту температуру на прежнем уровне (2020°C), увеличить расход природного газа на $11 \text{ м}^3/\text{т}$ чугуна.

СУЩЕСТВУЮЩАЯ СХЕМА ВОДЯНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ

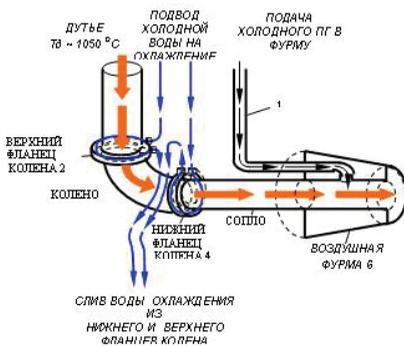


Рис.2 Существующая схема водяного охлаждения фурменного прибора

РЕАЛИЗОВАННАЯ СХЕМА ПОДАЧИ ПРИРОДНОГО ГАЗА ДЛЯ ПОДОГРЕВА

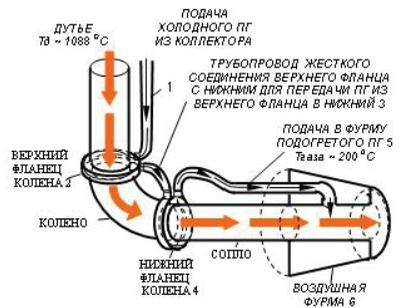


Рис. 3. Схема 2-х ступенчатого нагрева природного газа путем пропускания его через охлаждаемые полости колена фурменного прибора

Увеличение объема природного газа, в результате его нагрева до 200⁰С, повышает скорость истечения природного газа в 1,6 раза, улучшая смешивание природного газа с дутьем, сокращает время нагрева природного газа до температуры его воспламенения и, следовательно, приближает точку воспламенения к месту ввода природного газа в воздушную фурму и увеличивает полноту его сжигания [13].

Сопоставление (табл.1) основных показателей доменной плавки за 3–х месячные периоды ее стабильной работы доменной печи без подогрева вдуваемого природного газа (август–октябрь 2005 года – базовый период) и с подогревом его по предложенному способу (апрель– июнь 2006г. – опытный период) показало, что расход кокса за счет нагрева природного газа на печи был снижен на 16,6 кг/т, а с учетом достигнутого за счет нагрева газа увеличения его расхода на 20 м³/т – на 32, 6 кг/т.

Таблица 1. Основные показатели работы доменной печи №1 ОАО ЛМЗ «Свободный Сокол» в периоды ее работы с подогревом и без подогрева вдуваемого природного газа.

№ п/п	Наименование показателей	Ед. изм.	База	Опыт
1.	Фактическая производительность	т/сут	1334	1374
2	Фактический расход сухого скипового кокса	кг/т	497	464
3.	Простои	%	2,41	1,22
4.	Тихий ход	%	0,59	0,51
5.	Содержание Fe в офлюсованной шихте	%	55,23	55,39
6.	Расход металлодобавки	кг/т	45	29
7.	Расход известняка	кг/т	175	177
8.	Расход доломита	кг/т	95	84
9.	Расход шунгита	кг/т	8	11
10.	Содержание золы в коксе	%	12,1	12,2
11.	Содержание серы в коксе	%	0,49	0,47
12.	Горячая прочность кокса (CSR)	%	54,5	43,7
13.	Температура дутья	⁰ С	1050	1088
14.	Давление колошникового газа	Ати	0,69	0,73
15.	Расход природного газа	м ³ /т	61	81
16.	Температура природного газа	⁰ С	30	200
17.	Содержание Si в чугуне	%	0,68	0,61
18.	Приведенный расход сухого скипового кокса	кг/т	497	480,4
19.	Приведенная производительность	т/сут	1334	1391

Примечания: 1) Коэффициент замены кокса шунгитом, получен экспериментальным путем и равен 0,56 кг/кг.

2) Коэффициент замены кокса природным газом принят равным 0,8 кг/м³

3) Влияние горячей прочности кокса на его расход и производительность печи принято по усредненным данным 12 металлургических компаний США [14].

Расчетное сокращение расхода кокса за счет дополнительного тепла в количестве 38170 кДж/т чугуна, внесенного в печь природным газом, составило 4,4 кг/т чугуна. Таким образом, экономия кокса, обусловленная увеличением полноты сгорания природного газа и увеличением степени использования водорода благодаря подогреву природного газа составили в этом случае $16,6 - 4,4 = 12,2$ кг/т, а увеличение коэффициента замены кокса природным газом за счет последних факторов составило $0,15$ кг/м³.

Полученное значение увеличения коэффициента замены кокса хорошо соответствует результатам компьютерного моделирования, согласно которому при содержании железа в шихте 59 %, температуре дутья 1100⁰С и содержании в нем 24 % кислорода повышение полноты сгорания природного газа с 70 до 100 % приводит к увеличению коэффициента замены кокса природным газом на $0,178$ кг/м³т [15].

Таким образом, подогрев природного газа до 200⁰С на доменной печи №1 ОАО ЛМЗ «Свободный сокол» привел к снижению расхода кокса на 16,6 кг/т (3,34 %) и к увеличению производительности печи на 57 т/сутки (4,15 %). Дополнительный эффект от нагрева природного газа был получен за счет сокращения расхода воды на охлаждение доменной печи на 400 тыс.м³ воды в год. Затраты на реализацию нагрева природного газа были на порядки ниже полученного экономического эффекта.

Дальнейшее совершенствование техники нагрева природного газа путем создания трехступенчатой системы теплообмена (нижний и верхний фланцы колена и охлаждаемая часть сопла) позволило поднять температуру природного газа вдуваемого в доменную печь до 290⁰С, при расходе газа на одну фурму 460 м³/час, и до 350⁰С – при расходе 208 м³/час. В настоящее время нагрев природного газа применяется на обеих доменных печах ОАО ЛМЗ «Свободный сокол».

В ОАО «Северсталь» внедрение нагрева природного газа потребовало изготовления новых элементов фурменных приборов, чтобы обеспечить необходимую пропускную способность трактов подачи природного газа в фурмы.

В 2007 году после модернизации фурменных приборов подогрев природного газа был внедрен на доменной печи №2. Полученные результаты соответствуют достигнутому уровню нагрева природного газа (табл.2).

Подогрев природного газа до 105⁰С на доменной печи №2 ОАО «Северсталь» привел к снижению расхода кокса на 9,1 кг/т., из которых 3,6 кг/т – за счет дополнительного тепла (30800 кДж/т), внесенного природным газом. Экономия кокса, обусловленная другими факторами, вызванными подогревом природного газа (увеличение полноты сгорания природного газа и увеличение степени использования водорода) составили в этом случае $9,1 - 3,6 = 5,5$ кг/т.

Увеличение коэффициента замены кокса природным газом за счет этих факторов составило: $5,5 : 147,2 = 0,037$ кг/м³

Таблица 2. Основные показатели работы доменной печи №2 ОАО «Северсталь» в периоды ее работы с нагревом и без нагрева двухамного природного газа.

№ п/п	Наименование показателей	Ед. изм.	База 05.03– 27.03. 2007 г.	Опыт 05.05.– 27.07. 2007 г.	
2.	Фактическая производительность	т/сут	3303	3285	
3	Фактический расход сухого скипового кокса	кг/т	420,2	403,0	
4.	Простои	%	0,72	0,20	
5.	Тихий ход	%	0,06	0,09	
6.	Содержание Fe в офлюсованной шихте	%	59,61	59,36	
7.	Содержание золы в коксе	%	11,35	11,42	
8.	Содержание серы в коксе	%	0,519	0,527	
9.	Прочность кокса по М40	%	71,73	72,35	
10.	Прочность кокса по М10	%	8,37	8,23	
11.	Расход природного газа ¹⁾	м ³ /т	126,7	147,2	
12	Температура природного газа	°С	30	105	
12.	Давление колошникового газа	Ати	1,44	1,45	
13.	Содержание O ₂ в дутье	%	31,57 ²⁾	31,52	
14.	Температура дутья	°С	1181	1182	
15.	Интенсивность по углероду	т/м ³ в сут.	1,344	1,327	
16.	Содержание в чугунае	Si	%	0,52	0,49
		Mn	%	0,36	0,38
		S	%	0,15	0,015
18.	Приведенный расход сухого скипового кокса	кг/т	420,2	411,1	
22.	Приведенная производительность	т/сут	3303	3277	

Примечания: 1) В базовом периоде печь работала с вдвухением газокислородной смеси, которая обеспечивает полное сжигание природного газа. Коэффициент замены кокса при этом составлял 0,8 кг/м³. В опытном периоде установка газокислородного смешивания не работала, природный газ сгорал не полностью и коэффициент замены кокса природным газом составлял не более 0,7 кг/м³. С учетом этого коррекция расхода кокса на изменение расхода природного газа в опытном и базовом периодах составила: $147,2 - 0,7 \cdot 126,7 = 1,68$ кг/т

2) Содержание O₂ в дутье с учетом количества кислорода, поступающего в печь с газокислородной смесью

Меньшее (по сравнению с ДП №1 ОАО ЛМЗ «Свободный сокол») увеличение коэффициента замены кокса природным газом, обусловленное нагревом природного газа, логично объясняется меньшим влиянием на полноту сгорания природного газа и на степень использования водорода в печи из-за меньшего увеличения скорости струи природного газа при росте температуры газа всего на 75⁰С.

Выводы

1) Многоступенчатый подогрев природного газа путем его пропускания через охлаждаемые полости элементов фурменного прибора вместо охлаждающей воды прост в техническом исполнении, легко реализуется и позволяет нагреть природный газ до 300⁰С и выше, в зависимости от его расхода. Затраты на реализацию подогрева вдуваемого в фурмы природного газа на порядки меньше экономического эффекта, получаемого при вдувании подогретого газа.

2) Синергетический эффект от вдувания в доменную печь нагретого природного газа достигается за счет:

- вносимого в печь дополнительного тепла,
- повышения расхода вдуваемого газа без снижения теоретической температуры горения,
- увеличения коэффициента замены кокса природным газом за счет повышения полноты сгорания природного газа и увеличения степени использования водорода в результате более равномерного его распределения по сечению печи,
- снижения расхода воды на охлаждение печи.

3) Нагрев природного газа до температуры 200⁰С на ДП–1 ОАО ЛМЗ «Свободный сокол» позволил снизить расход кокса на 16,6 кг/т чугуна, в том числе:

- 12,2 кг/т за счет повышения полноты сгорания природного газа и увеличения степени использования водорода в печи,
- 4,4 кг/т за счет внесения дополнительного тепла подогретым природным газом;

4) На доменной печи ОАО «Северсталь» за счет нагрева вдуваемого природного газа до 105⁰С расход кокса был снижен на 9,1 кг/т, в том числе за счет увеличения полноты сгорания газа и степени использования водорода в печи – на 5,5 кг/т.

1. *Технология* плавки с использованием пылеугольного топлива и природного газа на дутье, обогащенном кислородом. /А.Н.Рыженков, С.Л.Ярошевский, Б.П.Крикунов и др. // *Сталь*. – №12. – 2005 г. – С.13–17.
2. *Совместное* вдувание пылевидного топлива и природного газа в доменные печи. // *Новости черной металлургии за рубежом*. – №6. – 2006 г. – С.19–25.
3. *Рамм А.Н.* Современный доменный процесс» – М., «Металлургия», 1980г.
4. *Бугаев К.М.* Распределение газов в доменных печах. – М., «Металлургия», 1974. – 175 с. с ил.
5. *Андронов В.Н.* Современная доменная плавка. Учебное пособие. – СПбГТУ, г.Санкт–Петербург, 2001 г.
6. *О возможности* повышения эффективности использования природного газа в доменной плавке / В.К.Корнев, В.Е.Гаспарян., В.Г.Тихонов, В.И.Юхименко // *Сталь*. – 1991. – №1. – С.7–9.

7. *Опыт работы доменных печей с вдуванием в горн газокислородной смеси.*/ Ю.В. Липухин, И.Ф. Курунов, В.К. Корнев. и др // *Сталь*. – 1998. – №2. – С.8–10.
8. *Авторское свидетельство* SU № 1771486 АЗ кл. СИ 7/16 20.02.1991 г.
9. *Авторское свидетельство* RU 2009201 С1 кл. СИ В 5/00 15.03.1994 г.
10. *Авторское свидетельство* № 840116 кл. С 21 В 7/16 05.12.1977 г.
11. *Сенько Г.Е.* Охлаждение доменных печей природным газом // *Сталь*. – 10. – 1964 г.
12. *Математическое моделирование процесса горения природного газа в фурме доменной печи.* /Т.Б.Ибадуллаев, В.А.Арутюнов, И.А.Левицкий, и др. // *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*. – №11. – 2007 г. – С.50–54.
13. *К вопросу об эффективности вдувания в доменные печи газо–кислородной смеси.*/ Г.В.Торохов, И.Ф.Курунов, В.К.Корнев // *Сталь*. – 1996. – №5. – С.5–7.
14. *Новости черной металлургии за рубежом. Приложение аглодоменное производство*». – ОАО «Черметинформация». – 2003 г.
15. *Береснева М.П., Курунов И.Ф.* Влияние эффективности использования природного газа на показатели работы доменной печи. // *Металлург*. – №5. – 2001. – С.34.

Сведения о докладчике:

Курунов Иван Филиппович, докт.техн.наук, профессор, главный доменщик ОАО «НЛМК»

Фещенко С.А., Плешков В.И., ОАО ЛМЗ «Свободный Сокол»,

Логинов В.Н., ОАО «Северсталь»,