

А.В.Бородулин¹, А.Л.Чайка¹, А.А.Сохацкий¹,
Г.П.Костенко, П.И.Оторвин, С.В.Нынь,

К ВОПРОСУ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТОПЛИВНЫХ ДОБАВОК В ДОМЕННОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

ИЧМ НАНУ¹, ОАО «АрселорМиттал Кривой Рог»

Рассмотрено направление повышения эффективности использования природного газа за счет его нагрева и контроля степени термической диссоциации метана. Приведены результаты анализа перспектив использования природного газа в доменном производстве. Показано, что обратный теплоэнергетический метод расчета доменной плавки позволяет по выходным параметрам работы печи и некоторым входным параметрам шихты и дутья определять потери доменного дутья, степень разложения природного газа в фурменной зоне на углерод и водород

доменная печь, природный газ, теплоэнергетический метод расчета доменной плавки, параметры работы печи и шихты

Состояние вопроса. Природный газ остается основной топливной добавкой, применяемой в доменных печах стран СНГ. Экспериментальные и теоретические данные показывают, что имеются резервы повышения эквивалента замены кокса природным газом (рис.1). Для повышения эффективности использования природного газа М.А.Шаповалов, Г.Е.Сенько, Б.Н.Старшинов, З.И.Некрасов, И.Б.Страшников, В.А.Сорокин, сотрудники ВНИИМТа, ИЧМ НАНУ, Донничермета и др. предлагали предварительно его нагревать перед подачей в доменные печи и различные устройства для реализации этого предложения. В настоящее время на ряде предприятий это предложение реализовано.

Анализ технико-экономических показателей работы доменных печей Кривого Рога объемом 2000 м³ с подогретым природным газом и поиск решений реализации этой технологии, были выполнены еще в [1, 2] Выполненные расчеты показали, что подогрев природного газа до 500 – 700⁰С увеличивает производительность печи на 3 – 7% и сокращает удельный расход кокса на 1 – 2%. Увеличение расхода природного газа на 10 – 25% сокращает удельный расход кокса на 3 – 14% и увеличивает производительность печи на 2 – 6%. Эквивалент замены кокса нагретым природным газом достигает величины 1,2 – 1,5 кг кокса/м³ природного газа, по сравнению с 0,7–1,0 кг кокса/м³ при вдувании холодного природного газа в доменную печь. Эффективность подогрева природного газа возрастает с повышением концентрации кислорода в дутье.

Постановка задачи. В связи с подорожанием природного газа, на сегодняшний день исследования по его рациональному использованию были возобновлены. Выполненная аналитическая оценка подачи нагретого природного газа в горн доменной печи в современных условиях доменной

плавки так же подтвердила высокую эффективность этой технологии. На рисунке 2 сопоставлены результаты расчетов с привязкой их к условиям работы ДП №8 ОАО «АрселорМиттал Кривой Рог» в 2008 году и плавок с вдуванием нагретого природного газа на ОАО «Северсталь» и «Свободный Сокол» [3 – 5].

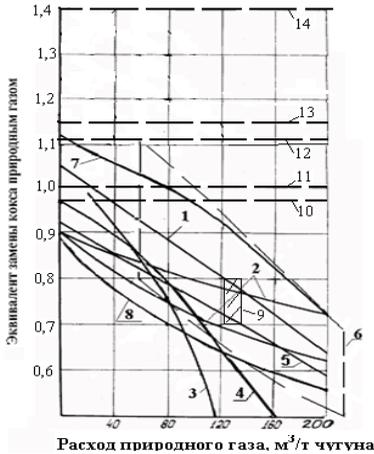


Рис.1. Эквивалент замены кокса природным газом, $\text{кг}/\text{м}^3$ по И.Г. Товаровскому – (1), Н.Е. Дунаеву – (2), А.В. Ченцову 1972 г. – (3), А.В. Ченцову 1991 г. – (4), А.В. Бородулину и В.П. Бородулиной – (5), Ф.Н. Москалине – (6), А.Н. Рамму – (7), неизвестному автору (8), ОАО «Северсталь» – (9), «Russian-Algerian», Алжир – (10); «Esfahan Steel», Иран – (11), ОАО НЛМК – (12), Taranto, Италия – (13), «Inland», «Bethlehem» и др., США – 14

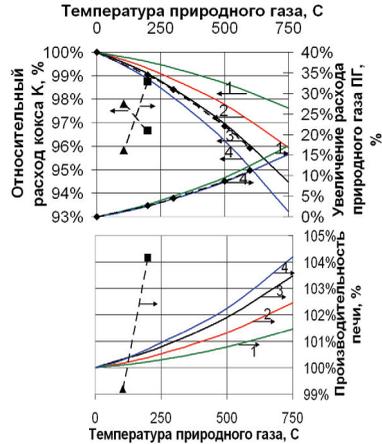


Рис.2. Влияние подогрева и количества природного газа на производительность и расход кокса при постоянной температуре в фурменной зоне. Кривые: 1 – $\text{O}_2 = 21\%$, расходе ПГ=5330–6410 $\text{м}^3/\text{ч}$; 2 – $\text{O}_2 = 23,9\%$, ПГ=10000–12020 $\text{м}^3/\text{ч}$; 3 – $\text{O}_2 = 27\%$, ПГ=15000–18000 $\text{м}^3/\text{ч}$; 4 – $\text{O}_2 = 30,1\%$, ПГ=20000–24000 $\text{м}^3/\text{ч}$. Опыт работы «Северсталь» – ▲; ЛМЗ Свободный Сокол – ■; по расчетам В.Н. Андроннова – ◆

Изложение основных результатов исследования. Замеры тепловых потерь фурменных приборов показали, что в области фурм, включая холодильники фурменной зоны, теряется до 50% тепла от общих потерь теплоты рабочего пространства печи (рис.3, табл.1, 2). Эти потери теплоты излучением и с охлаждающей водой от элементов фурменных приборов могут быть утилизированы и направлены на подогрев природного газа. Уменьшение наружных тепловых потерь на 1 МВт по данным зарубежных исследователей [8] увеличивает производительность печи на 1,5% и сокращает расход кокса на 0,6%, что хорошо согласуется с нашими результатами исследований. Возвращение теряемой теплоты в доменную печь с нагретым природным газом позволит сократить расход кокса на 1 –

7 кг/т чугуна [3, 6]. Наибольшим тепловым потенциалом для подогрева природного газа обладают фурмы, сопло и фланцы (табл.1, 2, рис.4). Величина тепловых потерь фурмы, сопла, колена, кадушки и амбразуры определяется интенсивностью дутьевого режима и работы доменной печи (табл.1, рис.2) [3, 6].

Таблица 1. Потери теплоты на охлаждение одного фурменного прибора, кВт по данным ИЧМ НАН Украины

Показатели	Полезный объем доменных печей, м ³							
	180–450	675	978 – 1719	ДП – 5 КМК*)	2000, 2700	3000	3200	5000
Фурменный прибор:	126	166	210	192	267	237	277	256
• фурма	84	134	154	166	221	210/258* ²⁾	233	224
• амбразура	13	16	24	15	18	10	15	11
• кадушка (арка)	12	12	16	11	13	8	13	12
Холодильник фурменной зоны	17	16	17	н/д–пар	19	9	16	10
Число фурм	8 – 12	12	12–20	20	20 – 24	28	32	36–42

*) – измерения на Кузнецком комбинате выполнены в июле 2003 г.;

*²⁾ – числитель с вдуванием природного газа, знаменатель с подачей мазута на фурмы

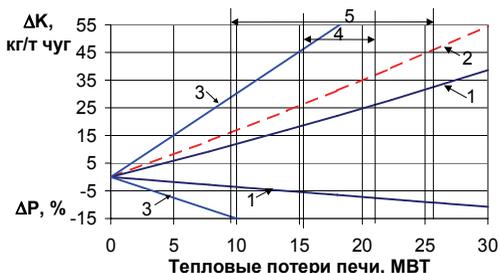


Рис.3. Влияние тепловых потерь на изменение расхода кокса и производительность печи при содержании кислорода в дутье 26,1% для доменной печи №6 ОАО «АрселорМиттал Кривой Рог». Кривая: 1 – по балансовой модели при $\xi_{CO} = \text{const}$; 2 – расход кокса на покрытие тепловых потерь по упрощенной формуле И.Д. Семикина [7]; 3 – по данным зарубежных исследователей (Н. Saxon) [8]; 4 – по данным замеров тепловых потерь на доменной печи №6 АМКР в 2007 г.; 5 – практика работы доменных печей объемом 2000 м³ по ранее выполненным замерам [3, 6]

Таблица 2. Тепловые потери и параметры дутьевого режима доменных печей № 8, 7 и 6 ОАО «АрселорМиттал Кривой Рог»

Номер печи	ДП 8		ДП 6	ДП 7
	25.09.08	11.09.08	11.09.08	25.09.08
Тепловые потери, МВт				
печь в целом	–	17,4	15,4	15,6
фурмы	2,7	3,0	3,2	4,0
фланцы колена и гляделка	0,5	0,8	0,83	0,81
сопла	≈0,5* / 1**		≈0,5*	≈0,5*
кадушки (арки)	0,15	–	–	0,28
амбразура	0,17	–	–	0,31
Количество открытых фурменных приборов	22	23	нет данных	22
Параметры дутьевого режима:				
– расход холодного дутья, м ³ /мин	3550	3850	3840	3640
– давление горячего дутья, ати	1,8	2,1	2,1	2
– температура дутья, °С	900	980	1080	1030
– расход природного газа, м ³ /час	11800	11900	12300	11000
– давление природного газа, ати	4,8	4,9	4,9	4,9
– содержание кислорода в дутье, %	25	25,4	25,4	23

* – средняя величина тепловых потерь излучением ** – средние тепловые потери сопла охлаждаемого водой по замерам, выполненным на ДП № 8 в 1972 г.

Максимальный экономический эффект достигается от вдувания в доменную печь нагретого природного газа до температуры его разложения 730°С [9]. Это позволяет без учета снижения недожога природного газа, снизить расход кокса на 0,8 ÷ 1,7% (2,4 – 6,8% при $T_{фз}=\text{const}$), увеличить производительность печи на 1,9 ÷ 5,2% (1,5 – 4,2% при $T_{фз}=\text{const}$) при изменении расхода газа от 5000 до 24000 м³/час. В случае снижения термической диссоциации природного газа на 7% экономия кокса возрастет на 1,9 – 6,0%.



Рис.4. Температурное поле фурменного прибора

До температуры 500 – 700⁰С, когда степень разложения метана практически отсутствует целесообразно использовать аппараты, применяющиеся в химической промышленности, малогабаритные воздушонагреватели фирмы «Калугин»; рекуперативные теплообменники, использующиеся в технологии процесса прямого восстановления железа (Midrex, HyL–ZR и др.) [10].

В практике применения холодного природного газа неоднократно отмечалось развитие термической диссоциации метана, что существенно снижает его эффективность. Одной из причин термической диссоциации метана является неэффективная организация сжигания газа в фурменной зоне, низкий температурный потенциал газа перед смешением с нагретым дутьем. Эффективность использования нагретого природного газа растет по мере увеличения количества вдуваемого в печь и снижения его термической диссоциации (рис.5).

Значительный экономический эффект от снижения недожога природного газа указывает на целесообразность оперативного контроля полноты его сжигания и выбора оптимального его расхода. С этой целью разработана система контроля термической диссоциации метана в фурменной зоне и определения потерь доменного дутья перед подачей его в печь с использованием и развитием теплоэнергетической модели доменной плавки (рис.6).

Проведенный анализ процессов сгорания топлива в ДЦ 1 ОАО «АрселорМиттал Кривой Рог» с использованием системы контроля полноты сжигания природного газ, показал, что нестабильность условий работы доменных печей приводит к нестабильности в процессах сжигания природного газа.

Для повышения надежности метода контроля полноты сжигания природного газа, необходимо повысить достоверность исходной информации, контроля степени использования монооксида углерода и водорода, внешних потерь теплоты рабочего пространства доменной печи, в том числе с использованием статистических методов.

Проработка технических решений по подогреву природного газа показала:

- нагрев природного газа до 80 – 150⁰С может быть осуществлен, за счет теряемой теплоты от фланцев и кадушки фурменного прибора;
- до 270⁰С от сопла фурменного прибора;
- свыше 270⁰С, теряемой теплоты от фурмы.

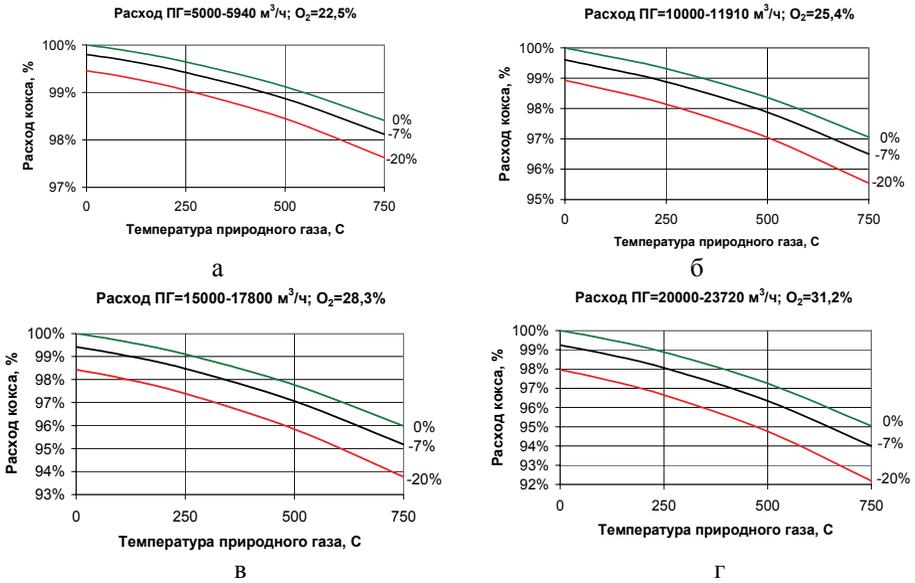


Рис. 5. Зависимость снижения расхода кокса при подогреве природного газа и при снижении его степени термической диссоциации (0; 7; 20%), при постоянной температуре фурменной зоны и различном расходе природного газа и содержании кислорода в дутье (а–г).

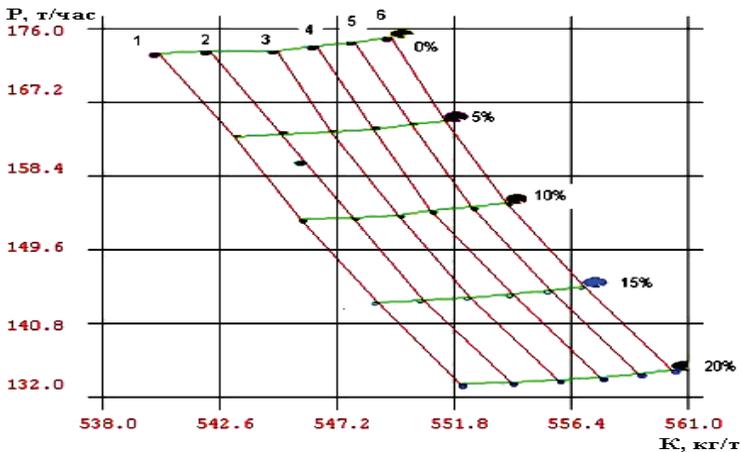


Рис. 6. Макет подсистемы контроля полноты сжигания природного газа в доменной печи. Точка реального режима работы доменной печи № 6 по данным за январь 2007г – ● с учетом степени недожога природного газа и потерь дутья при удельном расходе природного газа 62 м³/т чугуна, расходы твердого топлива (K) 546 кг/т (518 кг кокса и 28 кг антрацита), производительности печи (P). Цифры у вертикальных кривых: 1 – 0%, 2 – 5%, 3 – 10%, 4 – 15%, 5 – 20%, 6 – 25% степень термической диссоциации метана. Цифры у горизонтальных кривых: – 0%; 5%; 10%; 15%; 20% потери дутья

Заключение.

В технических и технологических условиях работы доменных цехов Украины и России перспективным является вдувание в горн доменной печи нагретого природного газа. Это позволит увеличить эквивалент замены кокса природным газом до 1,2 – 1,5 кг кокса/ м³ природного газа, по сравнению с максимально возможным 0,9 кг кокса/ м³ при вдувании в доменную печь холодного природного газа и постоянной температуре дутья. Эффект от подогрева природного газа возрастает с повышением концентрации кислорода в дутье и снижением его недожога.

Для выбора рационального расхода природного газа перспективна система контроля термической диссоциации метана в фурменной зоне и определения потерь доменного дутья перед подачей его в печь, которая построена по принципу решения «обратных задач теплопроводности». Применительно к расчету полноты сжигания природного газа, обратный теплоэнергетический метод расчета доменной плавки позволяет по выходным параметрам работы печи и некоторым входным параметрам шихты и дутья определять потери доменного дутья, степень разложения природного газа в фурменной зоне на углерод и водород.

В настоящее время совместно КБ «Южное», г. Днепропетровск ведется конструирование и испытание различных вариантов подогрева природного газа перед его подачей в доменную печь.

1. *О целесообразности* подачи подогретого природного газа в доменную печь // А.В.Бородулин, Г.Т.Цыганков, А.Я.Зусмановский, П.К.Лебедь // Вопросы химии и химической технологии. – Выпуск 31. – Харьков: «Вища школа», 1973. – С.191–196.
2. *Перспективы* применения газонагревателей коксового и природного газов / З.И.Некрасов, И.И.Кобеза, М.И.Путилов и др. // *Металлургическая и горнорудная промышленность* №5, – 1974, с.32 – 35.
3. *Домна* в энергетическом измерении. / А.В. Бородулин, А.Д. Горбунов, Г.И. Орел, В.И. Романенко и др. – Кривой Рог: Издательство СП «Мира», 2004 г. – С.436.
4. *Повышение* эффективности доменной плавки с вдуванием природного газа за счет его подогрева/ С.А.Фещенко, В.И.Плешков, Б.Н.Лизунов и др.// *Металлург.* – 2007. – №11. – С.44 – 48.
5. *Повышение* температурно–теплого потенциала природного газа и контроль процесса его сжигания в домне / Г.Т.Цыганков, И.А.Лукьяненко, А.Л.Чайка и др. // *Труды XV международной конференции «Теплотехника и энергетика в металлургии».* – Днепропетровск, 7–9 октября, 2008. – С. 258–260.
6. *Наружные* потери теплоты доменной печи объемом 5000 м³/ А.В.Бородулин, К.А.Дмитренко, В.С.Листопадов и др. // *Металлургическая и горнорудная промышленность.* – №1. – 2005. – С.3 – 8.
7. *Семикин И.Д., Аверин С.И., Радченко И.И.* Топливо и топливное хозяйство металлургических заводов. – М.: Металлургия, 1965.– 391с.

8. Henrik Saxen. Adaptive Model for On-line Simulation of Blast Furnace. Akademik Dissertation. 1988. Biskopsgatan 8, SF – 20500 Abo. Finland.
9. Путилов М.И., Кобеза И.И., Канаев В.В. Термическое разложение углеводородов коксового газа при высокотемпературном нагреве. // «Химическая технология». – 1976. – №2. – С.36 –38.
10. Лунген Х.-Б. , Кноп К., Стеффен Р. Современное состояние процессов прямого и жидкофазного восстановления железа. // Черные металлы. – Февраль 2007г. – С.13–26.

*Статья рекомендована к печати
докт техн.наук, проф. И.Г.Товаровским*

***А.В.Бородулин, А.Л.Чайка, А.А.Сохацкий, Г.П.Костенко, П.І.Оторвін,
С.В.Нинь,***

До питання підвищення ефективності використання паливних добавок в доменному виробництві

Розглянуто напрями підвищення ефективності використання природного газу за рахунок його нагріву і контролю ступеня термічної дисоціації метану. Приведено результати аналізу перспектив використання природного газу в доменному виробництві. Показано, що зворотний теплоенергетичний метод розрахунку доменної плавки дозволяє по вихідних параметрах роботи печі і деяких вхідних параметрах шихти і дуття визначати втрати доменного дуття, ступінь розкладання природного газу у фурменній зоні на вуглець і водень.