

**Н.М.Можаренко, В.В.Канаев, А.А.Параносенков, Г.В.Панчоха,
Г.И.Орел, В.С.Листопадов, К.А.Дмитренко**

Институт черной металлургии НАН Украины, ОАО «Криворожсталь»

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ РАСХОДА ДУТЯ ПО ВОЗДУШНЫМ ФУРМАМ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ

Приведена разработанная в ИЧМ новая методика определения расхода дутья по фурмам, основанная на закономерностях теплообмена между дутьем и охлаждающей водой в головке сопла. Технологические испытания автоматизированной системы контроля распределения дутья по фурмам дали положительный результат.

Анализ состояния проблемы.

Вопросу определения качественного и количественного распределения дутья по воздушным фурмам доменной печи постоянно придавалось большое значение. В первой половине прошлого века постоянно начались выполняться изыскания по количественному определению расхода дутья по фурмам [1]. Регулирование распределения горячего дутья в СССР было впервые осуществлено на Кузнецком металлургическом комбинате (КМК) в 1962 г. [2], что позволило уменьшить разницу расходов дутья по отдельным фурмам в 2–3 раза. При этом сход шихты улучшился, более стабильным стали газораспределение и тепловое состояние доменных печей. Разность температур по периферии уменьшилась от 125 до 60–80 °С. Повышение равномерности распределения дутья по фурмам позволило увеличить производительность доменных печей на 1,82% и сократить относительный расход кокса на 1,09%. Наибольший эффект был достигнут на тех печах, где регулирование расходов стали осуществлять сразу после капитального ремонта и где кладка не имела еще одностороннего разгара. Подобные системы были реализованы на ряде печей Макеевского и Ждановского им. Ильича металлургических заводов, также показавшие высокую технологическую эффективность [3, 1]. Однако, из-за низкой стойкости исполнительных механизмов и датчиков, системы контроля и регулирования расхода дутья по фурмам оказались недолговечными, что вынудило отказаться от управления распределением дутья по фурмам. Дальнейшее развитие получили системы контроля расхода дутья по фурмам, связанные с упрощением технического исполнения датчиков системы, находящихся в потоке дутья, или с использованием «косвенных» (основанным на закономерностях теплообмена между дутьем и охлаждающей водой элементов фурменного прибора) методов контроля.

Учитывая технологическую важность и первоначальные обнадеживающие результаты использования систем контроля распределения дутья

по воздушным фурмам доменных печей КМК, Макеевского и Ждановского им. Ильича металлургических заводов дальнейшее научное, приборное и технологическое развитие они получили в ДонНИИчермете [1] и Институте черной металлургии. На базе разработок ИЧМ были созданы и внедрены более совершенные системы на комбинатах «Криворожсталь», Западносибирском (ЗСМК, Россия) и Тржнецком (Чехия) [4]. В основу был положен метод измерения расхода дутья по переменному перепаду давления на элементах существующего воздушного тракта. Проведенное опытное управление (в ручном режиме) путем согласования расхода природного газа и дутья по фурмам дало экономию кокса 2,2 кг/т чугуна, а среднесуточная производительность повысилась при этом на 0,3 %. Установленные системы показали хорошую эксплуатационную устойчивость и надежность измерений. Однако из-за низкой защищенности датчиков контроля и коммуникационных сетей система, установленная на ЗСМК, была полностью выведена из строя и в дальнейшем не восстанавливалась. В то же время подобная система, установленная на Тржнецком комбинате, надежно работает в настоящее время, способствуя повышению экономичности работы доменных печей цеха.

Изложение основных материалов исследования.

В дальнейшем в ИЧМ был разработан принципиально новый метод измерения расхода дутья по фурмам, основанный на использовании охлаждаемой головки сопла в качестве калориметра [5]. Несколько иное развитие этот метод получил в работах НПП «Промоборудование» [6], в котором в качестве калориметра была использована воздушная фурма. Однако достоверность определения расхода дутья по теплосъему с фурмы является спорным вопросом, т.к. тепловые нагрузки на фурмы представляют собой интегральный сигнал ряда процессов, происходящих в околофурменной зоне, количественное определение которых в настоящее время представляет значительную трудность, что не позволяет выделить уровень теплосъема от потока дутья.

Экспериментальное опробование метода контроля расхода дутья по фурмам ИЧМ, основанного на использовании в качестве калориметра головки сопла, наиболее представительно было осуществлено на ДП№4 комбината «Азовсталь», показав хорошую результативность. Экономия кокса составила 5,8 кг/т чугуна, производительность повысилась на 6,3 %.

Весовой расход дутья через фурму, согласно этому методу, определяется по формуле [5]:

$$G = \left(\frac{Q \cdot d_c}{0,0206 \cdot F_c \cdot \varepsilon_l \cdot \Delta t \cdot \lambda_d} \right)^{1,25} \cdot F_c^1 \cdot \mu_d / d_c, \text{ кг/ч}, \quad (1)$$

где Q – тепловой поток на головку сопла фурменного прибора, ккал/ч;

d_c – диаметр головки сопла, м;

F_c – площадь поперечного сечения головки сопла, м;

ϵ_1 – поправочный коэффициент на гидродинамический режим движения потока дутья;

Δt – разность температур дутья и входящей воды системы охлаждения, °С;

λ – теплопроводность дутья, ккал/(м·ч·°С);

μ – динамическая вязкость дутья, кг/(м·ч).

Объемный расход дутья при нормальных условиях равен:

$$V_i = \frac{G}{\gamma_0 \cdot 60}, \text{ нм}^3/\text{мин}, \quad (2)$$

где γ_0 – удельный вес дутья при нормальных условиях, кг/нм³.

Позднее этот метод прошел апробацию на доменных печах комбинатов Алчевском, Череповецком, Криворожском, заводов Енакиевском и «Тулачермет», показав положительный результат. Накопленный опыт позволил создать в составе АСУ ТП ДП №9 ОАО «Криворожсталь» подсистему автоматизированного контроля «Распределение дутья по фурмам» на базе современных приборов измерения расходов и перепадов температуры охлаждающей воды на соплах.

Преимуществом этого метода, перед разработанным ранее [4], является более низкий уровень капитальных затрат технического исполнения системы контроля, более высокая эксплуатационная надежность датчиков системы измерения. К недостаткам относятся инерционность системы, и возможность применения лишь при наличии на доменной печи водяного охлаждения сопел фурменных приборов.

В установленной системе контроля распределения дутья в автоматическом режиме по разработанной методике определяются расходы дутья по фурмам доменной печи, а затем реализуется задача определения характеристик очага горения и зоны малоподвижных материалов.

Входной информацией для системы являются:

- расход, температура, давление, влажность и содержание кислорода в горячем дутье по каждой фурме печи;
- перепад температуры воды при охлаждении сопел по фурмам;
- расход воды на охлаждение сопел по фурмам;
- расход природного газа по фурмам;
- диаметр и высов воздушных фурм;
- геометрические характеристики металлоприемника.

В результате расчетов определяются следующие параметры фурменной зоны:

- секундный выход горнового газа по фурмам;
- состав горнового газа по фурмам;
- плотность горнового газа по фурмам;
- теоретическая температура горения по фурмам;
- отношение природный газ – дутье по каждой фурме;

- длина, высота, ширина, объем и площадь фурменных очагов;
- диаметр основания, высота, радиус и объем зоны малоподвижных материалов;
- горна:
- отношение площади фурменных очагов к площади горна;
- отношение площади фурменных очагов к площади зоны малоподвижных материалов;
- отношение объемов фурменных очагов к объему горна;
- отношение объема зоны малоподвижных материалов к объему горна.

Рассчитываются рекомендуемые расходы природного газа по фурмам для равномерного температурно–теплового уровня по сечению фурменной зоны.

Представление функциональных возможностей подсистемы реализуется на пяти видеокадрах (рис. 1–5).

Видеокадры подсистемы «Распределение дутья по фурмам»:

1. Расходы дутья и природного газа по воздушным фурмам. На этом видеокadre для удобства оперативного контроля отображены расходы дутья и природного газа по каждой фурме доменной печи.

2. Контроль расхода, перепада температуры воды и тепловых нагрузок на охлаждаемые сопла фурменных приборов. Второй видеокadre упрощает визуальное определение некорректных значений датчиков для их своевременной проверки и замены.

3. Площадь сечения фурменной зоны. Видеокadre отображает активную зону фурменных очагов и их параметры, параметры зоны малоподвижного материала и характеристики горна.

4. Параметры фурменных очагов и зоны малоподвижного материала. На видеокadre отображены средние параметры фурменных очагов, расходы дутья и природного газа по фурмам, характеристики зоны малоподвижных материалов и горна, а также отдельные фурменные очаги.

5. Рекомендуемые расходы природного газа по воздушным фурмам. На пятом видеокadre представлены результаты расчета и отображение рекомендуемого расхода природного газа по воздушным фурмам, при которых обеспечивается минимальное отклонение теоретической температуры горения в фурменных очагах от заданной.

Использование подсистемы позволило выявить несогласованность расхода дутья и природного газа по фурмам, что обуславливало значительное различие температурного уровня в фурменном поясе. Так, максимальный расход дутья на фурме 1.07.04 в 17:00 составлял – 250 м³/мин, минимальный – 112 м³/мин. Теоретическая температура горения изменялась соответственно – 2180⁰С и 1840⁰С. Отношение расходов природного газа и дутья составляло: максимальное – 0,122, минимальное – 0,053.

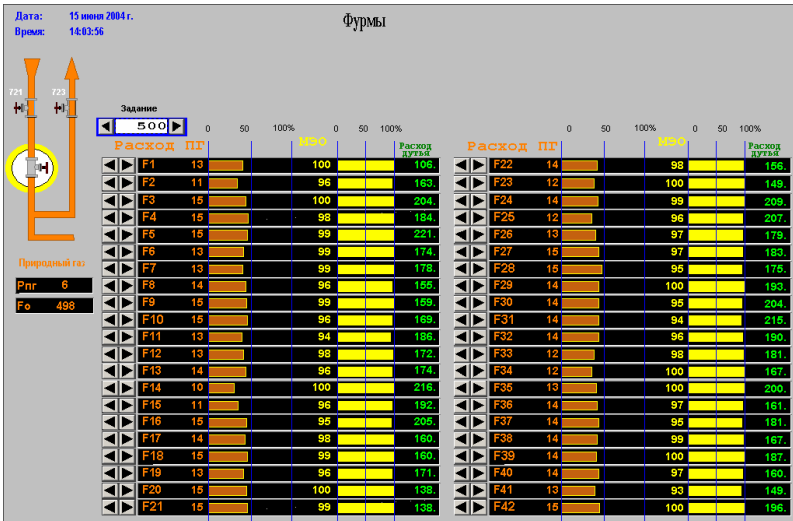


Рис.1. Расходы дутья и природного газа по воздушным фурмам, $\text{нм}^3/\text{мин}$

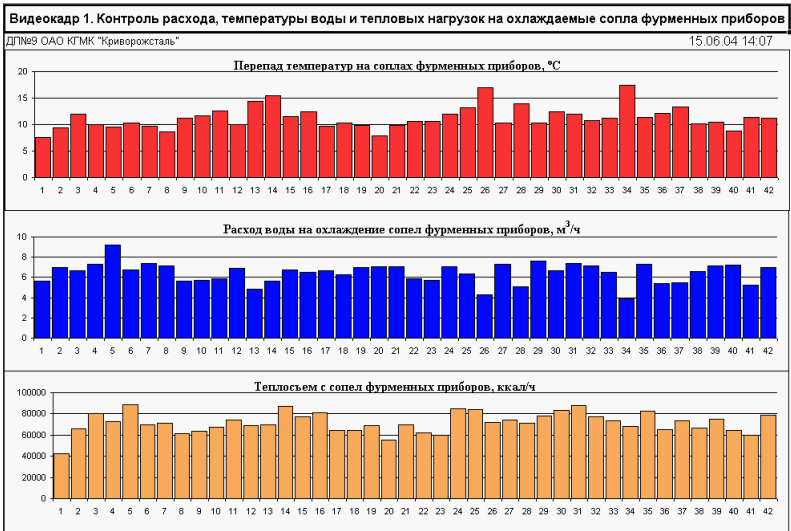


Рис. 2. Контроль расхода, перепада температуры воды и тепловых нагрузок на охлаждаемые сопла фурменных приборов

ДП № 9 ОАО КТМК
"Криворожсталь"
23.08.04 17.44

Система автоматического контроля "Распределение дутья по воздушным фурмам"

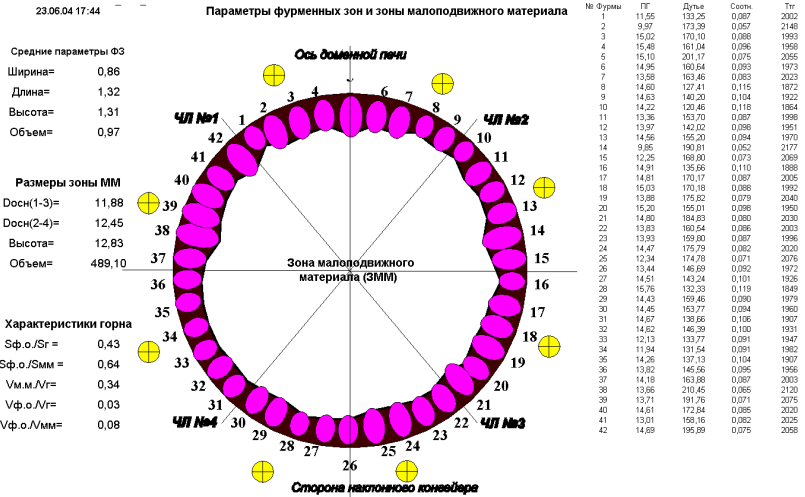


Рис. 3. Площадь сечения фурменных зон

Рис. 4. Параметры фурменных зон и зоны малоподвижного материала

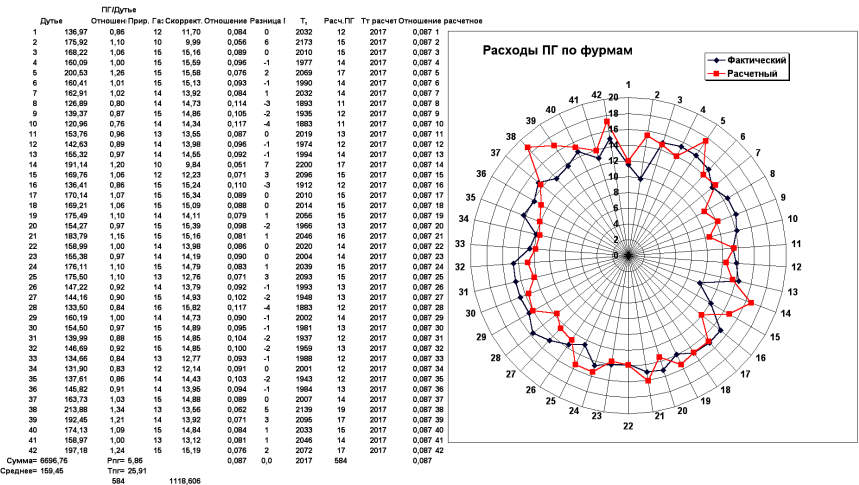


Рис. 5. Рекомендуемые расходы природного газа по воздушным фурмам для обеспечения равномерного температурного поля по окружности печи 02.09.04 12:10

Предварительные технологические испытания подсистемы начались с 31.08.04 г. постепенным выравниванием теоретической температуры горения по сечению доменной печи путем регулирования расходов природного газа по воздушным фурмам. Перераспределение природного газа выполнялось постепенно, чтобы не вызвать резкого изменения газодинамического режима «низа» печи.

Результаты исследования.

Для анализа результатов предварительной эксплуатации за базовый период брались показатели работы доменной печи №9 за август 2004 г., в котором расходы природного газа по фурмам соблюдались равномерными, следуя требованиям технологической инструкции. В качестве опытных периодов, где соблюдалось требование технологически согласованного распределения дутья и природного газа, брались последующие 2 месяца – сентябрь и октябрь.

Анализ работы доменной печи при согласованном распределении дутья и природного газа по фурмам показал, что за период 01–30.09.04 колеблемость расходов дутья по фурмам уменьшилась в 1,45 раза. Например, среднеквадратичное отклонение сигм расходов дутья с 01.08.04 по 31.08.04 составило – 5,42. В периоде же 01–30.09.04 оно составляло 3,73. Достигнутое снижение колеблемости расхода дутья по фурмам произошло благодаря изменению теплового и газодинамического режима фурменной зоны. Так, для выравнивания теплового поля в фурменном поясе увеличивали расход природного газа на тех фурмах, где расход дутья был высоким. При этом объем и давление газов в фурменном очаге увеличивались, что повышало в нем газодинамическую напряженность и создавало дополнительное противодавление истечению дутьевого потока. В то же время на тех фурмах, где расходы дутья были пониженными и, следовательно, расход природного газа уменьшали, снижалась газонапряженность в фурменном очаге и увеличивался расход дутья.

В результате испытаний было отмечено, что выравнивание теплового поля фурменного пояса повышает ровность хода доменной печи, увеличивает степень использования тепловой и восстановительной энергии газов, способствует более ровному по сечению печи протеканию процессов.

Дополнительным, косвенным, подтверждением снижения неравномерности интенсивности протекания процессов, протекающих по сечению печи, является уменьшение колеблемости веса чугуна на выпусках по леткам. Так, среднеквадратичное отклонение веса выпусков чугуна по леткам в августе составляло 7607,33, в сентябре составило 368,82, а в октябре – 1106,02. Отсюда видно, что колеблемость веса чугуна по леткам в опытных периодах была ниже, чем в базовом. Кроме того, снизилась также колеблемость по леткам показателя серопоглощительной способности шлака, что подтверждает наши выводы о выравнивании не только интен-

сивности процессов по окружности печи, но и химического звена (таблица).

Таблица. Сравнение веса выпуска и серопоглощительной способности шлака базового (август) и опытного (сентябрь, октябрь) периодов 2004 г.

Месяц	№ летки	Вес, сумм.	Вес, ср.	Ls
Август	1	44449	573,00	64,37
	2	58194	524,27	66,93
	3	58940	561,33	77,50
	4	61205	577,41	70,06
	σ	7607,329	24,127	5,689
Сентябрь	1	54176	552,82	61,76
	2	54695	552,47	68,62
	3	54003	574,50	74,40
	4	53846	566,80	68,76
	σ	368,822	10,860	5,170
Октябрь	1	33164	518,18	61,01
	2	31333	522,22	64,18
	3	33701	561,68	67,62
	4	31846	513,65	67,17
	σ	1106,023	22,108	3,062

Выравнивание температурно-тепловых условий в фурменном поясе способствовало повышению ровности хода и, как следствие, увеличению форсировки печи. Общая тенденция увеличения расхода дутья четко прослеживается. Так при начале испытаний 31.08.04 в 18:10 расход холодного дутья был 6828 м³/мин, а в конце смены в 23:56 составил 7141 м³/мин. Через сутки 01.09.04 он был уже на уровне 7435 м³/мин (23:55).

Проведенные испытания показали, что подсистема «Распределение дутья по фурмам» обладает заметной инерцией. При внесении регулирующих возмущений существует переходной период исполнения задания, продолжительность которого зависит от установившегося температурно-теплого и газодинамического состояния фурменной зоны. Это необходимо учитывать при корректировке расходов дутья и природного газа по окружности печи. Взаимообусловленное перераспределения природного газа по фурмам согласно расхода дутья улучшило режим его сжигания в опытном периоде, что косвенно подтверждается повышением степени использования восстановительных газов в печи. В сентябре степень использования водорода в печи возросла на 1,08 % (32,55 % в сентябре против 31,47 % в августе), а степень использования монооксида углерода увеличилась на 0,69 %. В октябре степень использования водорода возросла на 4,61 % (36,08 %) по сравнению с базовым периодом (август 2004 г.) при снижении степени использования монооксида углерода на 0,25 %.

Выводы.

Таким образом, даже кратковременное предварительное технологическое испытание системы, установленной на ДП №9, подтвердило то, что

выравнивание соотношения дутье–природный газ по окружности печи повышает использование восстановительной энергии газа. Это дает основание полагать, что при более длительной отработке приемов управления можно получить более заметный эффект.

1. *Бугаев К.М.* Распределение газов в доменных печах. – М.: Metallurgia, 1978. – 175 с.
2. *Автоматическое* регулирование распределения дутья по фурмам доменной печи Кузнецкого металлургического комбината. / Б.Н. Жеребин, В.А.Хромов, П.П.Мишин и др. // *Сталь*. – 1964. – № 4. – С.292–296.
3. *Анализ* работы доменной печи при автоматическом регулировании дутья по воздушным фурмам. / Г.Е.Сенько, В.П.Онопrienко, А.П.Царицын и др. // *Сталь*. – 1965. – № 7. – С.590–593.
4. *Лукьянец С.Н.* Создание и внедрение промышленного способа контроля расхода дутья через фурмы для диагностики состояния оборудования и управления процессом доменной плавки. // Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук в форме научного доклада. Днепропетровск, 1991. – 23 с.
5. *Контроль* распределения дутья по воздушным фурмам доменной печи. / В.В.Канаев, И.И. Кобеза, М.Т. Бузовера, С.Т. Шулико // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 1995. – № 2. – С. 69–71.
6. *Современные* промышленные системы автоматизации доменных печей мира. / Н.Н.Изюмский, А.П.Васильев // *Теория и практика производства чугуна*. Сборник трудов международной научно–технической конференции. Кривой Рог, КГГМК «Криворожсталь», 2004. – 621 с.

Статья рекомендована к печати д.т.н. А.В.Бородулиным.