

УДК 669.162.215:669.162.262.001.5

А.Л.Чайка ¹⁾, В.В.Лебедь ¹⁾, Б.В.Корнилов ¹⁾, Н.В.Логвинов ²⁾,
А.А.Сохацкий ¹⁾

ИССЛЕДОВАНИЕ ГАЗОДИНАМИЧЕСКОЙ РАБОТЫ СВОБОДНОЙ ОТ ШИХТЫ ЗОНЫ КОЛОШНИКА ДОМЕННОЙ ПЕЧИ И ИХ ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИЛОЖЕНИЕ

*Институт черной металлургии им.З.И.Некрасова НАН Украины ¹⁾
Новолипецкий металлургический комбинат ²⁾*

Приведены результаты исследований газодинамического режима работы свободной от шихтовых материалов области колошника. Выполнено прогнозирование и установление влияния выхода колошникового газа на изменение параметров газового потока, вынос колошниковой пыли и технико-экономические показатели доменной плавки. Установлено влияние параметров газового потока на технологические и технико-экономические параметры доменной плавки, получен обобщающий показатель работы свободной от шихты зоны колошника.

Ключевые слова: доменная печь, колошник, газодинамика, вынос пыли, показатели доменной плавки

Постановка проблемы. Газодинамическая работа свободной от шихты зоны колошника, как и тепловая работа системы охлаждения, отражает динамику изменения теплообменных процессов в рабочем пространстве печи [1–3]. Практический интерес представляет использование этой информации для своевременного определения расстройств в тепловой работе печи и оценки рациональности выбранного технологического режима ведения доменной плавки.

Одним из направлений решения поставленной задачи является установление взаимосвязей конструкции колошника, параметров потока колошникового газа с газодинамическим режимом работы доменной печи, выносом колошниковой пыли, технико-экономическими показателями доменной плавки. Увеличение выноса колошниковой пыли и потерь давления в свободной от шихты зоны колошника может стать причиной уменьшения ресурса работы газоочистки и ухудшения показателей тепловой работы печи.

Анализ последних исследований и публикаций. С целью анализа влияния газодинамической работы свободной от шихты зоны колошника на вынос колошниковой пыли разработана и опробована модель, основанная на физических законах сохранения массы и количества движения колошникового газа, которые реализованы численным моделированием по методу Рунге-Кутты [4,5]. Исходными параметрами для расчета является выход и температура колошникового газа, давление на колошнике, плотность и фракционный состав выходящей пыли. Результатом расчета является количество пыли, выносимой газовым

потоком через газоотводы, потери давления и параметры газа в свободной от шихты области колошника.

Цель и научная новизна статьи. Целью статьи является разработка методики, которая позволяет прогнозировать рациональное сочетание давления под колошником доменной печи, температуры и выхода колошникового газа. Научной новизной исследования является выявление взаимосвязей параметров потока колошникового газа с газодинамическим режимом работы доменной печи и выносом колошниковой пыли.

Изложение основных результатов исследований. Газодинамическая модель настраивалась по данным работы ДП № 9 объемом 5000 м³ ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог» («АМКР») и ДП № 7 объемом 4291 м³ ОАО «Новолипецкий металлургический комбинат» («НЛМК»).

На первом этапе исследования выноса колошниковой пыли определялись траектории (линии тока) движения газового потока в направлении от поверхности шихтовых материалов к газоотводам [6]. Для этого использовались фактические данные о распределении температур и давлений на поверхности шихты или прогнозные варианты расчета параметров газового потока в сухой зоне доменной печи (рис.1) [1,2].

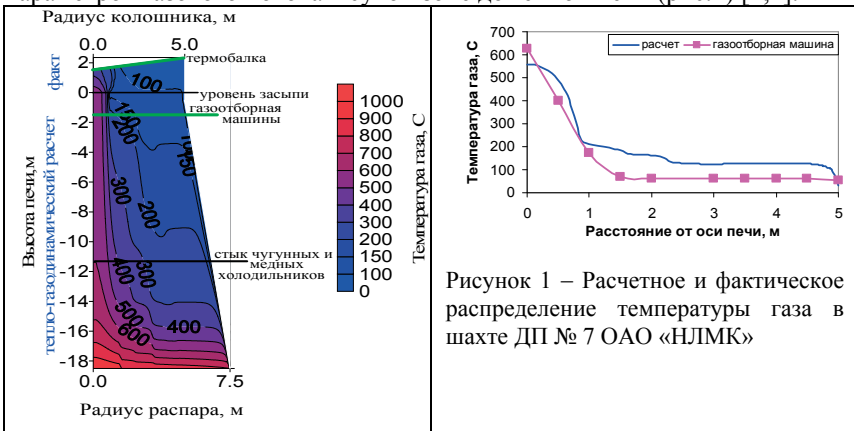


Рисунок 1 – Расчетное и фактическое распределение температуры газа в шахте ДП № 7 ОАО «НЛМК»

На втором этапе рассчитывалось движение пылинки в потоке колошникового газа [7]. Уравнение, описывающее движение частицы пыли в векторном виде, представлено ниже:

$$\begin{cases} \frac{dV_x}{dt} = -F_{\text{сопр } x} \\ \frac{dV_y}{dt} = -G - F_{\text{сопр } y} \end{cases} \quad (1)$$

где V_x и V_y – проекции скорости частицы пыли в газовом потоке на оси x и y соответственно, м/с;

G – сила тяжести, действующая на частицу, Н;

$F_{сопрx}$ и $F_{сопрy}$ – проекции силы сопротивления газовому потоку на оси x и y , Н. Сила сопротивления газовому потоку зависит как от газодинамических параметров обтекающего пылинку газа, так и от физических параметров частицы пыли:

$$F_{сопр} = C_x \rho V^2 \quad (2)$$

где ρ – плотность пыли, кг/м^3 ;

V – разность скорости газового потока и частицы пыли, м/с ;

C_x – коэффициент сопротивления твердой частицы газовому потоку.

Определяется в зависимости от числа Рейнольдса [7,8].

Сжимаемость газа учитывалась уравнением состояния:

$$\rho = p/(RT) \quad (3)$$

где ρ – плотность колошникового газа, кг/м^3 ;

p – давление колошникового газа, Па;

T – температура колошникового газа, $^{\circ}\text{K}$

R – газовая постоянная, зависящая от состава колошникового газа.

Адекватность результатов расчета проверялась их сопоставлением с фактическими данными выноса колошниковой пыли (рис.2). Отклонение расчетного выноса пыли от фактических данных для работы ДП №7 ОАО НЛМК не превышало 20%.

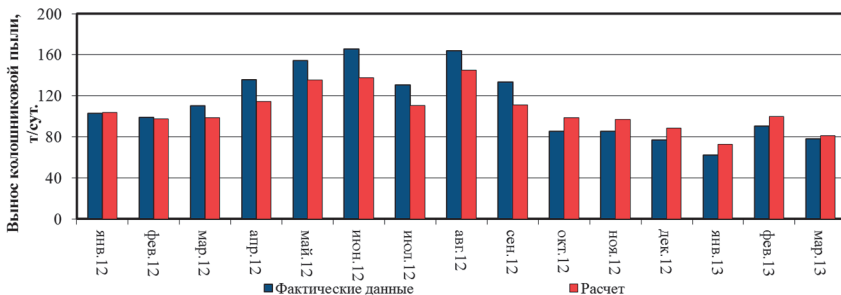


Рисунок 2 – Сравнение выноса колошниковой пыли по фактическим (слева) и расчетным (справа) данным работы ДП № 7 ОАО НЛМК

Установлено, что при увеличении давления под колошником уменьшается вынос колошниковой пыли и потери давления на колошнике (рис.3). При увеличении давления с 0,1 МПа до 0,25 МПа и сохранении температуры уходящего газа на постоянном уровне вынос колошниковой пыли уменьшается на ~17% до 100 т/сут., а потери давления уменьшаются на ~27% до 4 кПа (рис.3).

Потери давления газового потока, которые сопровождают вынос колошниковой пыли, составляют 8–25% от потерь давления при переходе газового потока из колошникового пространства в газоотводы (рис.3). При увеличении выхода колошникового газа и температуры, уменьшении давления под колошником потери давления при переходе газового потока

из колошникового пространства в газоотводы увеличиваются (рис.3). Увеличение давления под колошником на ~30% с 0,19 МПа до 0,25 МПа, при прочих равных условиях, приводит к уменьшению потерь давления на ~17%, с 2,9 кПа до 2,4 кПа. При увеличении выхода колошникового газа на 10% с 605 тыс. $\text{м}^3/\text{час}$ до 665,5 тыс. $\text{м}^3/\text{час}$ потери давления на колошнике увеличиваются на 22%, с 2,8 кПа до 3,4 кПа.

Для уменьшения потерь давления на колошнике целесообразно с увеличением объема доменных печей увеличивать суммарную площадь газоотводов и учитывать это при проектировании новых печей. Например, отношение суммарной площади газоотводов к площади колошника на ДП № 7 меньше на 20%, чем на ДП № 6 ОАО «НЛМК» или ДП № 9 ПАО «АМКР», что приводит к увеличению потерь давления в свободной от шихты части колошника в 1,5 раза.

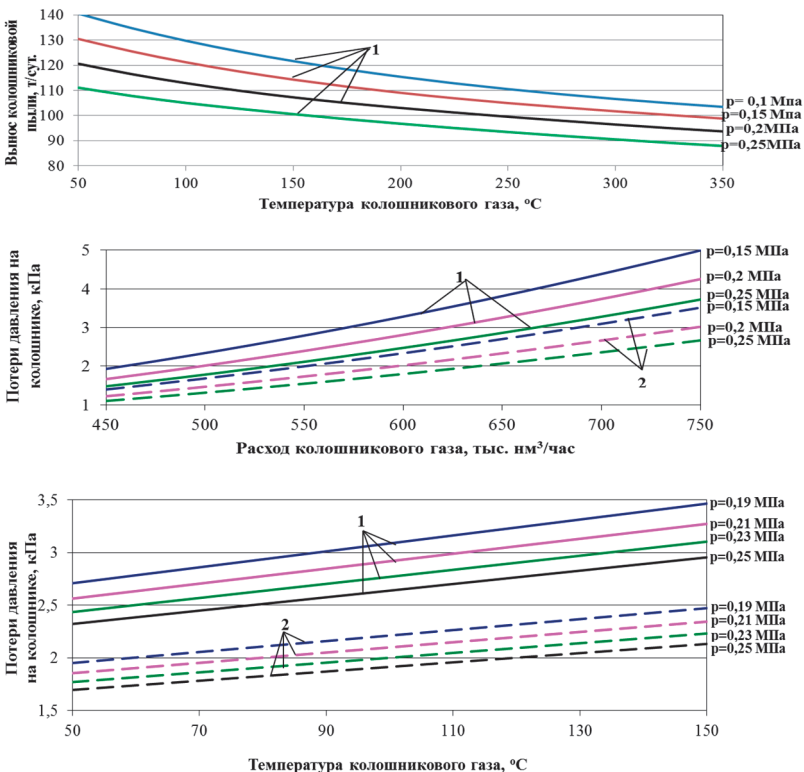


Рисунок 3 – Зависимость выноса колошниковой пыли и потерь давления на колошнике от температуры и выхода колошникового газа при фиксированных значениях давления на колошнике (p) для фактической площади газоотводов (1) и прогнозном увеличении суммарной площади газоотводов на ~20% (2)

Для планирования и оперативного управления доменной плавкой интерес представляет исследование влияния давления и температуры колошниковога газа, которые контролируются в автоматическом режиме, на выход колошниковога газа и его скорость.

Наиболее сильное влияние на выход колошниковога газа и его скорость оказывает отношение давления на колошнике к температуре колошниковога газа (рис.4). Оперативное изменение давления под колошником позволяет поддерживать на заданном уровне скорость движения колошниковога газа, а значит скорости и потери давления в столбе шихты, «ровность» хода доменной печи.

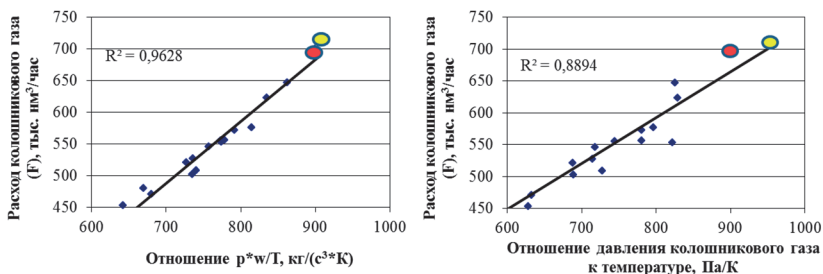


Рисунок 4 – Взаимосвязь выхода колошниковога газа с параметрами газового потока на колошнике по среднемесячным данным за 2012 -2014 гг.

● - январь 2014 г.; ● - сентябрь 2014 г.

Из результатов исследований следует, что технико-экономические и теплоэнергетические показатели работы ДП № 7 тесным образом связаны с особенностями газодинамического режима ее работы и, прежде всего, с расходом, давлением и температурой колошниковога газа (рис.5).

Обобщающим показателем работы свободной от шихты зоны колошника является скорость колошниковога газа. Управляя в оперативном режиме давлением под колошником и составом дутья, ориентируясь на скорость колошниковога газа и соотношения потерь давления по высоте печи можно добиться улучшения технико-экономических показателей доменной плавки за счет увеличения ровности хода доменной печи при ее форсировании (рис.5).

Форсирование работы ДП № 7 осуществлялось за счет увеличения расхода кислорода и общей тепловой мощности печи, уменьшение расхода кокса достигалось за счет увеличения усвоенной тепловой мощности печи (рис.5) [2]. Совершенствование дутьевого и газодинамического режимов плавки, загрузки и распределения шихтовых материалов на колошнике, улучшение качества кокса позволили с мая 2012 по май 2013 года увеличить фактическое производство чугуна на ~1700 т/сутки до 10700 т/сутки, среднемесячный расход кокса уменьшить на ~27 кг/т чугуна

до 409 кг/т чугуна, расход суммарного топлива уменьшен на ~ 16 кг/т чугуна до 488 кг/т чугуна.

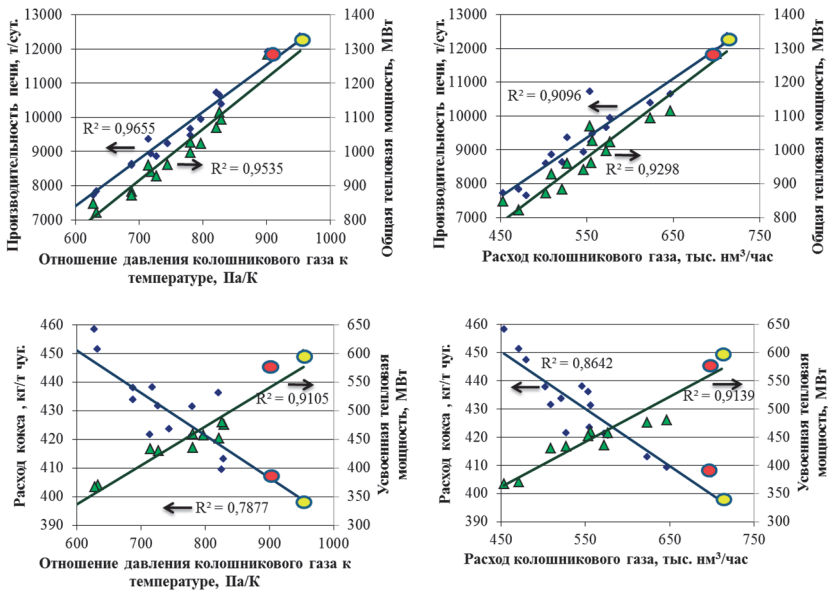


Рисунок 5 – Взаимосвязь параметров колошникового газа с производительностью, расходом кокса и теплоэнергетическими показателями доменной плавки.

● - январь 2014 г.; ● - сентябрь 2014 г.

Дальнейшее форсирование доменной печи за счет увеличения концентрации кислорода до 30,5%, дутья до 7300 нм³/мин. позволило в октябре 2014 года увеличить производство чугуна до 12300 т/сутки. Выход колошникового газа увеличился до 690 тыс.нм³/час. Для поддержания ровности хода печи, устойчивого газодинамического режима давление под колошником было увеличено до 2,4 ати, диаметр фурм до 160 мм.

Применительно к освоенной в 2012-2013 гг. технологии ведения доменной плавки на ДП № 7 разработана методика, которая позволяет прогнозировать рациональное сочетание давления под колошником, температуры и выхода колошникового газа (рис.6). На рис.6 точками отмечены базовый период работы печи в 2013 году после настройки прогнозного расчета и фактические (спрогнозированные) в 2014 году. Из рисунка видно, что прогноз и расчет рационального сочетания давления, температуры и выхода колошникового газа для форсировки ДП № 7 при обеспечении ровности ее хода совпадают.

При поддержании скорости колошникового газа в пределах 0,9 ÷ 1,1 м/с, увеличении тепловой мощности и выхода колошникового газа можно ожидать увеличения производства чугуна при сохранении ровности

хода печи за счет увеличения давления под колошником. При поддержании давления под колошником на том же уровне можно ожидать увеличения производства чугуна при сохранении ровности хода печи за счет увеличения тепловой мощности и выхода колошникового газа в случае уменьшения его температуры (рис.6).

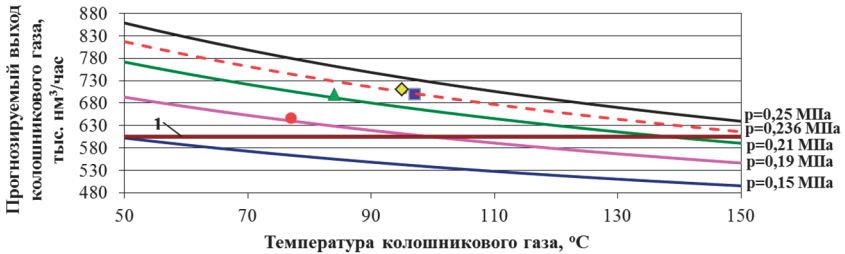


Рисунок 6 – Прогнозируемые варианты выхода колошникового газа, приведенного к нормальным условиям, в зависимости от давления под колошником (р) и его температуры при поддержании скорости колошникового газа в пределах $0,9 \div 1,1 \text{ м/с}$. – базовый период (март 2013 г.); – работа в январе 2014 г.; – работа в сентябре 2014 г.; – работа в октябре 2014 г.; 1 – проектный выход колошникового газа, приведенный к нормальным условиям

Рациональный диапазон скорости колошникового газа на ДП № 7 в исследуемый период работы печи составлял $w=0,9 \div 1,1 \text{ м/с}$. Ранее выполненными исследованиями ИЧМ НАНУ на ПАО «АМКР» было установлено, что для ДП № 9, полезным объемом 5000 м^3 , рациональный диапазон скорости колошникового газа составлял $0,75 \div 1,0 \text{ м/с}$ [3]. Для выхода на рациональный диапазон скоростей давление газа на колошнике ДП №9 уменьшили с $0,212$ до $0,174 \text{ МПа}$. Это позволило увеличить производство и уменьшить расход кокса за счет увеличения ровности хода печи [3].

Заключение

Технико-экономические показатели работы доменной печи тесным образом связаны с параметрами газодинамической работы колошника: расходом, давлением и температурой колошникового газа. Обобщающим показателем работы свободной от шихты зоны колошника является скорость колошникового газа, которую целесообразно контролировать в автоматизированном режиме. Наиболее существенное влияние на выход колошникового газа и его скорость оказывает отношение давления на колошнике к температуре колошниковых газов.

Разработана методика, которая позволяет прогнозировать рациональное сочетание давления под колошником, температуры и выхода колошникового газа. Методика основана на поддержании в рациональном диапазоне скорости колошникового газа и перепада давлений по высоте печи за счет управления

газовым потоком «сверху», изменением давления под колошником, и «снизу» – расходом дутья.

Увеличение давления под колошником приводит к уменьшению выноса колошниковой пыли и уменьшению потерь давления в свободной от шихтовых материалов зоне колошника. Увеличение температуры колошникового газа приводит к уменьшению выноса колошниковой пыли и увеличению потерь давления. При уменьшении суммарной площади газоотводов на 20% потери давления в свободной от шихты части колошника уменьшаются в 1,5 раза.

При проектировании и реконструкции доменных печей целесообразно определять рациональный диаметр газоотводов с точки зрения уменьшения потерь давления в печи и выноса колошниковой пыли.

Оперативное изменение давления под колошником позволяет поддерживать на заданном уровне скорость колошникового газа, а значит скорости и потери давления в столбе шихты, «ровность» хода доменной печи. Управляя в оперативном режиме давлением под колошником и составом дутья, ориентируясь на скорость колошникового газа и соотношение потерь давления по высоте печи, можно добиться улучшения технико-экономических показателей доменной плавки.

1. *Исследования* тепло-газодинамической работы в «сухой» зоне доменной печи и применение их результатов / В.И.Большаков, А.А.Сохацкий, А.Л.Чайка, А.Г.Шевелев, А.И.Швачка // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2013. – № 2. – С.15-19
2. Домна в энергетическом измерении. / А.В.Бородулин, А.Д.Горбунов, Г.И.Орел, В.И.Романенко и др. – Кривой Рог: Издательство СП «Мира», 2004г. – 436 с..
3. *Работа* доменной печи с рациональным газодинамическим режимом в шахте / М.Т.Бузовера, А.Г.Ульянов, С.Т.Шулико, И.Е. Почекайло, В.В.Тарановский, И.Т.Хомич // *Черная металлургия*. – 1985. – №12. – С.47–48
4. *Абрамович Г.Н.* Прикладная газовая динамика. – М.: Наука, 1969. – 824 с.
5. *Роуч П.* Вычислительная гидродинамика. – М.: Мир, 1980. – 616 с.
6. *Исследование* газодинамической работы колошника / Корнилов Б.В., Н.И.Лычагин, А.Л.Чайка // *Теория и практика тепловых процессов в металлургии: Сб. докл. междунар. научно–практ. конф.* 18 – 21 сент. 2012 г. – Екатеринбург: УрФУ, 2012. – С.99-107
7. *Лойцянский Л.Г.* Механика жидкости и газа. – М.: Наука, 1970. – 904 с.
8. *Давідсон В.Є.* Вступ до гідродинаміки: підручник. – Пер. з рос. – Вид-во ДНУ, 2004. – 216 с.

*Статья поступила в редакцию сборника 19.01.2017
и прошла внутреннее и внешнее рецензирование*

О.Л. Чайка, В.В.Лебедь, Б.В.Корнілов, М.В.Логвінов, О.А.Сохацький
Дослідження газодинамічної роботи вільної від шихтових матеріалів зони колошника доменної печі та її практичне застосування

Наведено результати досліджень газодинамічного режиму роботи вільної від шихтових матеріалів області колошника. Виконано прогнозування та встановлення впливу виходу колошникового газу на зміни параметрів газового потоку, винос колошникового пилу і техніко-економічні показники доменної плавки. Встановлено вплив параметрів газового потоку на технологічні і техніко-економічні параметри доменної плавки, отримано узагальнюючий показник роботи вільної від шихти зони колошника.

Ключові слова: доменна піч, колошник, газодинаміка, винос пилу, втрати тиску, показники доменної плавки

A.L.Chaika, V.V.Lebed, B.V.Kornilov, N.V.Logvinov, A.A.Sokhatkii
Gas Dynamics within Charge-Free Top Area of the Blast Furnace and its Practical Application

The current article reports on the results obtained during the course of studies on the gas-dynamic mode of operation within the blast furnace top volume free from the charging materials. Here, we give the scientific prognostication and determine the impact of blast furnace off-gas output on the changes in the gas flow parameters, dust outtake, production and economic indices of the blast furnace smelt. The gas flow parameters are regarded and determined as the parameters influencing both the production and technical-and-economic indexes of the smelt. The research has resulted in achieving the summarized indicator of the process which occurs within the blast furnace top volume free from the raw materials of the charge.

Keywords: blast furnace, top, gas dynamics, removal of dust, blast furnace performance