

УДК 669.162.2:536.7.001.5

Б.В.Корнилов¹, Н.Н.Лычагин², А.А.Сохацкий¹, А.Л.Чайка¹,
А.Г.Шевелев²

ИССЛЕДОВАНИЕ ГАЗОДИНАМИЧЕСКОЙ РАБОТЫ КОЛОШНИКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

1 – Институт черной металлургии им. З.И. Некрасова

2 – Днепропетровский национальный университет им. О. Гончара

Целью работы является исследование газодинамических процессов в свободной от шихтовых материалов области колошника. Установлены закономерности изменения потерь давления газа и особенности структуры его течения в рассматриваемой области. Показано, что наибольшее влияние на изменение перепада давлений в колошнике оказывает расход колошникового газа. Увеличение температуры колошникового газа снижает потери давления, а увеличение давления газа – увеличивает.

доменная печь, колошниковый газ, газодинамика, вязкая несжимаемая жидкость, уравнение Навье – Стокса, потери давления

Состояние вопроса. Сложность и многообразие процессов, сопровождающих доменную плавку, выдвигает целый ряд задач, связанных с обеспечением экономичной и продолжительной эксплуатации доменных печей и обслуживающих их агрегатов [1]. Одной из таких задач является исследование газодинамического режима в свободной от шихтовых материалов области колошника доменной печи. В результате расчетов определены параметры, характеризующие структуру течения колошникового газа и величина потерь давления для различных режимов и геометрии колошника.

Постановка задачи. Схематический вид расчетной области колошника представлен на рис. 1. Газ через сечение S_1 поступает из области занятой шихтовыми материалами в колошник. Величина и профиль скорости колошникового газа в данном сечении определяется объемным расходом газа V_1 и порозностью слоя шихтовых материалов.

Выход газа осуществляется через газоотводы, которые в данной задаче, моделируются кольцевым отверстием S , площадь которого соответствует суммарной площади сечений газоотводов. На выходе задается избыточное давление газа p_0 . Через кольцевое отверстие S_2 подается газ для охлаждения загрузочного устройства. Задается объемный расход V_2 и давление p_2 охлаждающего газа. Исследовалось влияние давления на колошнике, температуры и расхода газа, площади выходящего сечения на потери давления.

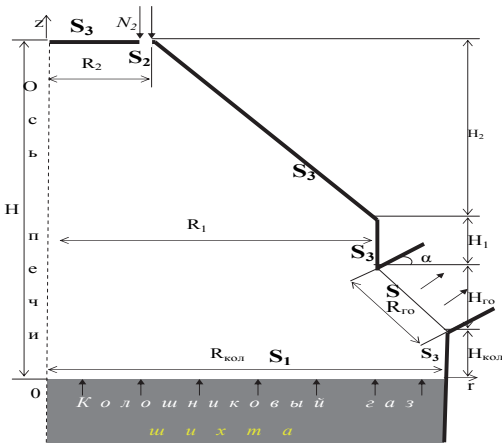


Рис.1. Схематический вид расчетной области колошника

Математически данная осесимметричная задача описывается уравнением неразрывности (1) и уравнениями Навье – Стокса (2)–(3) в цилиндрической системе координат:

$$\frac{\partial(rv)}{\partial r} + \frac{\partial(ru)}{\partial z} = 0, \quad (1)$$

$$v \frac{\partial v}{\partial r} + u \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + v \left(\frac{\partial^2 v}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial r} - \frac{v}{r^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right), \quad (2)$$

$$v \frac{\partial u}{\partial r} + u \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + v \left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right), \quad (3)$$

где ρ – плотность колошникового газа, кг/м^3 ; ν – коэффициент кинематической вязкости газа, $\text{м}^2/\text{с}$; v, u – осесимметричные компоненты скорости соответственно на оси r и z ; p – давление газа.

$$\nu = U(r), u = 0 \text{ на } S_1; \quad (4)$$

$$\nu = V, u = 0, p = p_1 \text{ на } S_2; \quad (5)$$

$$\frac{du}{ds} = 0, \frac{dv}{ds} = 0, p = p_0 \text{ на } S. \quad (6)$$

На стенках выполняется условие прилипания:

$$u = v = 0 \text{ на } S_3, \quad (7)$$

где S, S_1, S_2, S_3 – границы, указанные на рис.1.

В задаче использовалось влияние температуры колошникового газа. Это влияние осуществлялось через зависимость плотности от температуры и давления колошникового газа через формулу (8).

$$\rho = \frac{\mu p}{RT}, \quad (8)$$

где p – полное давление газа, T – температура, μ – его молярная масса, R – универсальная газовая постоянная. Численное моделирование задачи (1)–(7) выполнялось по явной схеме методом конечных объемов.

Основные результаты исследования. Исследование газодинамического режима работы проводилось применительно к условиям работы и геометрическим размерам ДП №9 объемом 5000 м^3 и ДП №6 объемом

2000 м³ ОАО «АМКР» (табл.1). Полученные результаты были сопоставлены с результатами, полученными по инженерному методу Бернулли для определения гидравлических потерь[2].

Таблица 1. Геометрия печи

Геометрический размер	Обозначение параметров на рис.1	ДП №9	ДП №6
Высота колошника, м	$H_{\text{кол}}$	1	1
Высота газоотвода, м	$H_{\text{ГО}}$	1,25	1,18
Высота цилиндрической части купола, м	H_1	1,05	0,8
Высота конической части купола, м	H_2	3,5	2,2
Высота расчетной области, м	H	6,8	5,18
Диаметр колошника, м	$D_{\text{кол}}$	10,8	7,5
Радиус газоотвода, м	$R_{\text{ГО}}$	1,24	0,71
Радиус верхней части купола, м	R_1	1,435	2,75
Количество газоотводов	R_2	8	4
Угол наклона газоотводов	α	50	52

Задавалось равномерное распределение скоростей газового потока выходящего из шихты. При неравномерном распределении порозности шихтовых материалов на колошнике предполагается использование профиля скорости газового потока, которое рассчитывается по теплогазодинамической модели движения газового потока в сухой зоне шахты, разработанной д. ф.–м. н. В.К.Хрущом [5–6].

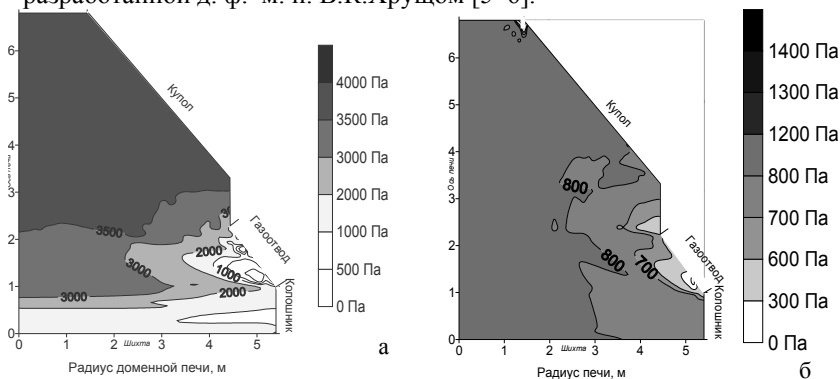


Рис.2. Поле давления ($p-p_0$) при расходе колошникового газа 12 тыс. м³/мин. и температуре 150⁰С а – без учета газа на охлаждение БЗУ; б – при расходе газа, идущего на охлаждение БЗУ – 10 тыс. м³/час

Результаты расчета скоростей газового потока, поля давлений в колошнике на ДП №9 выполненные с учетом и без учета расхода газа, идущего на охлаждение бесконусного загрузочного устройства (БЗУ) приведены на рис. 2–4. Результаты расчета показали, что расход газа, идущего на охлаждение БЗУ, приводит к увеличению вертикальной и горизонтальной составляющей скорости и уменьшению давления под куполом. Это связано с тем, что без охлаждающего газа под куполом возникает застойная зона, которая влечет за собой повышение давления. Охлаждающий загрузочное устройство газ входит в подкупольное пространство колошника со скоростью порядка 100–250 м/с, что вносит существенное изменения в поля скоростей (рис.3–4) и снижает давление под куполом печи (рис.2). Т.е., существенное уменьшение застойной зоны и расход охлаждающего газа показывает, что холодный газ смещает линию раздела потоков ($u=0$) (рис.3) более чем на 2 метра, предотвращая проникновение горячего колошниковога газа к элементам загрузочного устройства.

Исследования влияния параметров колошниковога газа на потери газодинамического напора в свободной от шихты области колошника ДП №9 и ДП №6 ПАО «АМКР» проводились без учета расхода газа на охлаждение загрузочного устройства, приведены на рис.5–8. В ходе исследования варьировались следующие параметры: расход и температура колошниковога газа, давление на колошнике и площадь выходящего сечения.

Результаты расчета показали, что при прочих равных условиях наибольшее влияние на изменение перепада давлений в колошнике оказывает расход колошниковога газа. При расходе газа в 20 тыс. м³/мин. для ДП №9 и 10 тыс. м³/мин. для ДП №6 при температуре 50⁰С потери давления достигают значения 5 кПа (рис.5).

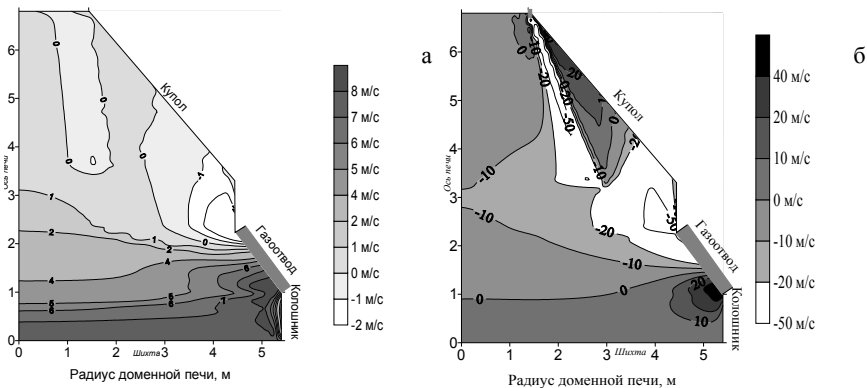


Рис.3. Поле скоростей (вертикальная составляющая) газового потока при расходе колошниковога газа 12 тыс. м³/мин. и температуре 150⁰С а – без учета газа на охлаждение БЗУ; б – расходе газа, идущего на охлаждение БЗУ – 10 тыс. м³/час

При повышении температуры колошниковога газа потери давления уменьшаются. Например, при температуре 300⁰С перепад давления будет порядка 3 кПа (рис.5).

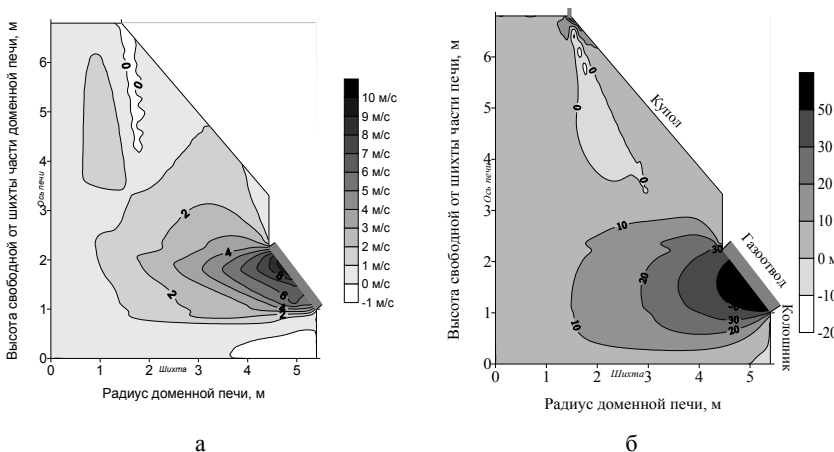
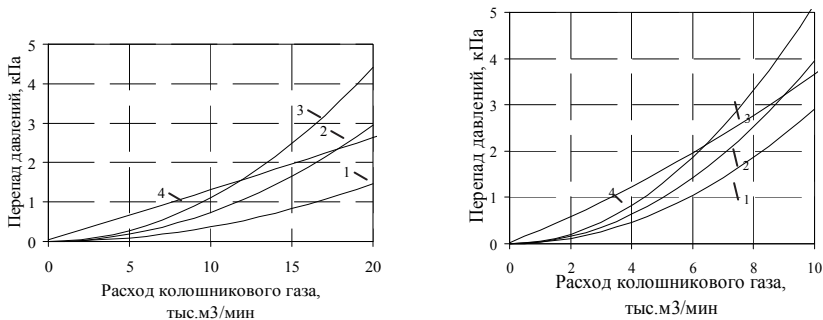


Рис.4. Поле скоростей (горизонтальная составляющая) газового потока при расходе колошниковога газа 12 тыс. м³/мин. и температуре 150⁰С а – без учета газа на охлаждение БЗУ; б – при расходе газа, идущего на охлаждение БЗУ – 10 тыс. м³/час



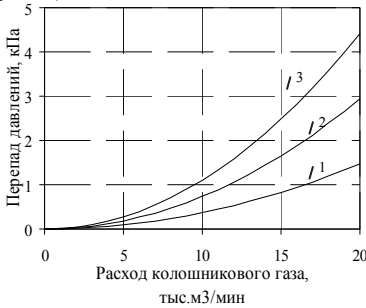
ДП №9

ДП №6

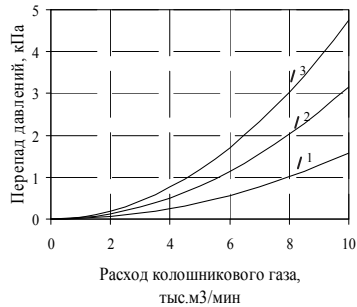
Рис.5. Потери давления на колошнике в зависимости от расхода при различных значениях температуры газа и фиксированном давлении на колошнике 1,5ати. Кривые: 1 – 50⁰С, 2 – 150⁰С, 3 – 300⁰С, 4 – инженерный проверочный расчет (метод Бернулли) для температуры колошниковога газа 150⁰С

При увеличении давления на колошнике на 2 ати потери давления увеличиваются до 30 кПа (рис.6). Увеличение температуры колошниковога на 250⁰С газа приводит к уменьшению перепада давлений до 1 кПа

(рис.7). Уменьшение площади выходного сечения приводит к увеличению потерь давления. Например, при уменьшении сечения на 50% потери возрастают больше, чем на 100 % по сравнению с начальным сечением (рис.8).

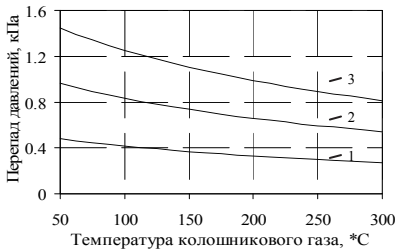


ДП №9

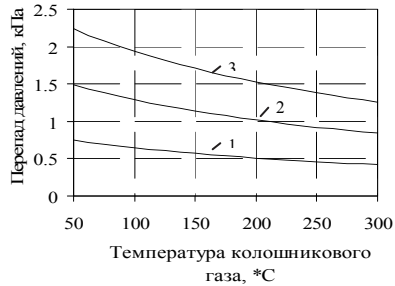


ДП №6

Рис.6. Потери давления на колошнике в зависимости от расхода при различных значениях давления на колошнике при фиксированной температуре 150⁰С. Кривые: 1 – 0 кПа, 2 – 100 кПа, 3 – 200 кПа



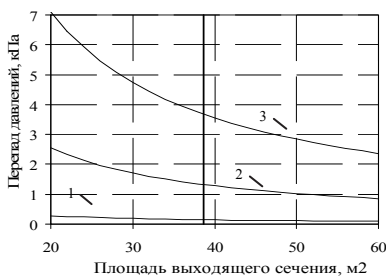
ДП №9



ДП №6

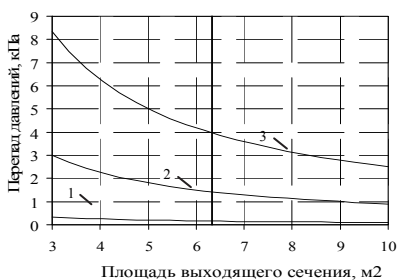
Рис.7. Потери давления на колошнике в зависимости от температуры при различных значениях давления на колошнике при фиксированном расходе колошникового газа 10 тыс. м³/мин.. Кривые: 1 – 0 кПа, 2 – 100 кПа, 3 – 200 кПа

Разработанная математическая модель движения газового потока в колошнике перспективна для анализа и разработки рекомендаций направленных на совершенствование конструкции колошника и согласованность газодинамической работы воздухоудвухных машин верха и низа печи, ее дросельных механизмов с учетом газодинамической работы свободной от шихты области печи.



ДП №9

Кривые: 1– 4 тыс.м³/мин.,
1– 12 тыс.м³/мин., 1– 20 тыс.м³/мин.



ДП №6

Кривые: 1– 2 тыс.м³/мин.,
1– 6 тыс.м³/мин., 1– 10 тыс.м³/мин.

Рис.8. Потери давления на колошнике в зависимости от площади выходного сечения при некоторых значениях расхода колошникового газа при фиксированной температуре газа 150⁰С и давлению на колошнике 1,5 ати.

Выводы.

1. Разработана двухмерная газодинамическая модель свободной от шихты области колошника, которая позволяет уточнить представление о газодинамической работе доменной печи.

2. Установлено закономерности изменения давления, скорости в колошнике в зависимости от его конструкции, расхода, скорости и температуры колошникового газа и газа идущего на охлаждение загрузочного устройства и давления на колошнике.

3. Выполнены исследования применительно к доменным печам объемом 2000 м³ и 5000 м³ ПАО «АМКР» установлено, что в зависимости от параметров колошникового газа и конструкции колошника потери давления могут составлять до 10% и выше давления на колошнике.

4. При прочих равных условиях наибольшее влияние на изменение перепада давлений в колошнике оказывает расход колошникового газа. Увеличение температуры колошникового газа снижает потери давления, а увеличение давления газа – увеличивает.

5. Полученные результаты могут быть использованы для совершенствования конструкции колошника, выбора газодинамического режима работы печи.

1. *Домна в энергетическом измерении.* А.В.Бородулин, А.Д.Горбунов, Г.И.Орел, В.И.Романенко и др. / Кривой Рог: Издательство СП «Мира» – 2004г., С.436.
2. *Давідсон В.Є.* Вступ до гідродинаміки: підручник. пер. з рос. – Вид-во ДНУ, 2004. – 216с.
3. *Роуч П.* Вычислительная гидродинамика / Роуч П. – М.: Мир, 1980, 616с.
4. *Патанкар С.* Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости/ Патанкар С. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 152с.

5. *Моделирование* теплообмена и газодинамики в шахте доменной печи / А.Ф. Авцинов, А.В. Бородулин, В.К. Хрущ [и др.] // *Сталь*. – 1996. – №8. – С.4–9.
6. *Математическое* моделирование и анализ процессов тепломассообмена и газодинамики в верхней зоне доменной печи с целью обеспечения надежной работы ограждения / А.А. Сохацкий, И.А. Лукьяненко, Г.Т. Цыганков, А.Л. Чайка, А.Г. Шевелев // *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии: Сб. науч. тр.* – К.: Наукова думка, 2007. – Вып. 15 – С.50–60.

*Статья рекомендована к печати
канд.техн.наук Н.М.Можаренко*

Б.В.Корнілов, М.М.Личагін, О.А.Сохацький, О.Л.Чайка, О.Г.Шевельов

Дослідження газодинамічної роботи колошника з використанням методів чисельного моделювання

Метою роботи є дослідження газодинамічних процесів у вільній від шихтових матеріалів області колошника. Встановлено закономірності зміни втрат тиску газу і особливостей структури його течії в області, яка розглядається. Показано, що найбільший вплив на зміну перепаду тисків в колошнику мають витрати колошникового газу. Збільшення температури колошникового газу знижує втрати тиску, а збільшення тиску газу - збільшує.