УДК 669.187.2

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫТЯЖНОГО ВОЗДУХОВОДА ДЛЯ ДУГОВЫХ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ

Тимошенко Н.С, Семко А.Н.

Донецкий национальный университет, Донецк, Украина

АННОТАЦИЯ

В работе исследуется вытяжной воздуховод с равномерным отсосом газа по длине воздуховода и возможность применения такого типа вытяжного устройства для газоудаления в электродуговых сталеплавильных печах. На основе уравнений гидродинамики и теории вентиляции была разработана упрощенная математическая модель для расчета скорости всасывания и движения воздуха в рассматриваемой конструкции воздуховода. Предложенная конструкция вытяжного воздуховода была рассчитана в более точной газодинамической постановке при помощи пакета прикладных программ COMSOL для плоского течения. Сравнительный анализ показал соответствие данных, полученных двумя способами расчета, что говорит об адекватности упрощенной модели и возможности ее применения для расчета параметров конструкции воздуховода, позволяющего уменьшить скорость выноса газа.

ВВЕДЕНИЕ

В металлургии при выплавке стали в печах разных конструкциий выделяется много печных газов, которые надо отводить из печи и утилизировать. Вместе с печными газами из печи удаляется и металл в виде мельчайших затвердевших капелек. Количество удаляемого металла сильно зависит от режима работы системы газоудаления. Как показали исследования, количество удаляемого металла в печных газах заметно возрастает при увеличении скорости удалаения газов. Традиционные схемы газоудаления устроены таким образом, что вблизи вытяжного патрубка скорость удаляемых газов большая, а на противоположной стороне очень маленькая. Такой неравномерный отсос печных газов приводит к достаточно большой потере металла при плавке. В данной работе рассматривается вытяжной воздуховод с равномерным отсосом печных газов по длине воздуховода в дуговой сталеплавильной печи (ДСП). Особое внимание уделяется конструкции воздуховода и режиму его работы.

Рассмотрим классическую систему газоудаления отходящих газов из ДСП. Она представлена двумя контурами – высокотемпературным и низкотемпературным. Низкотемпературный контур (рис.1) служит для всасывания газа и пыли, попадающих в цех через электродные зазоры в своде печи. Его в данной работе подробно рассматривать не будем. Обратимся к высокотемпературному контуру. Его используют для удаления пылегазовой смеси непосредственно из рабочего пространства печи через отверстие в своде. Высокотемпературный контур включает: газоотводящий патрубок с приведенным диаметром d, камеру дожигания с накатной муфтой, камеру пылеосаждения и соединительный газоход.

Выход газа из печи (в газоотводящем патрубке) при интенсивной технологии плавки составляет 200-300 м^3 на 1 тонну стали. Средний уровень температур колеблется в пределах 1000-1200°С, максимальная температура достигает 1600-1700°С. Максимальная запыленность газа во время плавки составляет 35 г/м^3. Скорость газового потока на входе в патрубок составляет 20-25 м/с. [1].

Основной элемент высокотемпературного контура – газоотводящий патрубок - представляет собой трубу прямоугольного сечения, один конец которой вмонтирован в свод печи, а на другом создается необходимое разрежение. Благодаря этому разрежению, под действием давления в рабочем пространстве печи, пылегазовая смесь отсасывается из печи.

От конструкции газоотводящего патрубка и режима его работы зависит, какое количество пыли будет вынесено из печи с газовым потоком, а, следовательно, насколько быстро выйдут из строя си-

стемы дальнейшей газоочистки (тканевые фильтры) и какими окажутся потери металла.

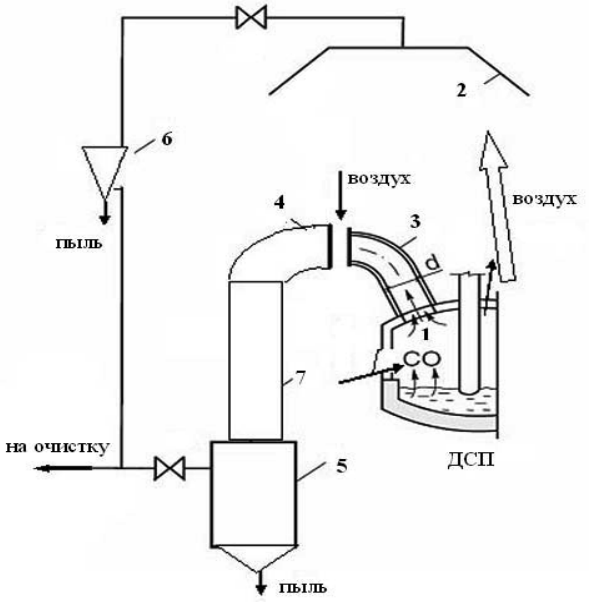

Рис.1 Система газоудаления ДСП: 1 – поток газа, образующегося в печи, 2 – вытяжной зонт низкотемпературного контура, 3 – газоотводящий патрубок, 4 – накатная муфта, 5 – камера пылеосаждения, 6 – циклон, 7 – соединительный газоход.

В работах [2; 3] показано, что повышенный вынос пыли в ДСП обусловлен спецификой организации эвакуации пылегазовой смеси, а именно, относительно малой, в сравнении с конвертером, площадью сечения газоотводящего патрубка относительно площади ванны. При равных объемных расходах газа скорость потока в газоотводящем патрубке ДСП будет существенно выше, чем в горловине конвертера. Борьба за снижение содержания пыли в отходящих из электропечи газах ведется по двум направлениям:

• Применение усовершенствованных газоочистных устройств, улучшение системы фильтрации.

• Уменьшение количества пыли, выносящегося из печи во время плавки.

Второй способ на данный момент менее изучен и гораздо более сложен в реализации, однако, его качественное выполнение существенно снижает затраты, связанные с выполнением первого пункта.

На практике отработаны специальные приемы, позволяющие уменьшить пылеобразование и вынос пыли из рабочего пространства печи. Особый интерес представляет проблема поиска рационального режима отсоса печных газов. Это направление является наименее изученным.

Выбор оптимального режима отсоса газов представляет собой актуальную задачу. Недостаточная интенсивность газоудаления существенно увеличивает количество вторичных выбросов. В то же время, по мере усиления средств пылегазоотсоса увеличиваются скорости газовых потоков в объеме печи, что, в свою очередь, отрицательно влияет на угар металла и электродов.

Общие потери металла с выбросами, выплесками и выносом плавильной пыли в отдельных случаях превышают 2 % от массы жидкой стали [4; 5]. Кроме того, чрезмерно интенсивный отсос газа увеличивает общее количество газовой смеси, поступающей на фильтры, что ускоряет их износ. Таким образом, эффективный для улавливания всех выбросов интенсивный газоотсос оказывается очень невыгодным с экономической точки зрения.

В работе [6] рассматривается возможность снижения выноса пыли из ДСП с применением оптимального режима газоотсоса. Способ предполагает изменение конструкции свода печи с целью превращения его в вытяжной воздуховод, всасывающий технологические газы не всей поверхностью, а через щели различной площади. Соответствующий таким требованиям воздуховод имеет тороидальную форму и располагается под сводом печи.

Для выяснения возможностей реализации данного способа газоотсоса в данной работе теоретически и экспериментально исследуется упрощенная модель линейного вытяжного воздуховода прямоугольного постоянного сечения с поперечными щелями различной ширины, которые обеспечивают равномерный отсос газа по длине воздуховода.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Схема вытяжного воздуховода, который исследуется в данной работе, приведена на рис.2. Воздуховод является линейным, имеет постоянное поперечное сечение и несколько поперечных щелей разной ширины, расположенных на одной из боковых поверхностей воздуховода

на одинаковом расстоянии друг от друга. Участок воздуховода между серединами двух соседних щелей составляет отдельную секцию. Геометрические размеры воздуховода выбраны такими, чтобы можно было организовать в воздуховоде двумерное течение. Для этого длина воздуховода *c* значительно больше ширины ($c > a$), а ширина *a* значительно больше толщины воздуховода ($a > h$). Ширина щелей намного меньше толщины воздуховода. Левый торец воздуховода заглушен, а через правый торец производится отсос газа. Такая конструкция воздуховода позволяет пренебречь влиянием верхней и нижней боковых стенок воздуховода и организовать в воздуховоде плоское течение. Это позволяет провести компьютерное моделирование в двумерной постановке, что существенно упрощает расчеты.

Расчеты и эксперименты проводились для воздуховода со следующими размерами:

- c = 1 м - длина
- a = 25 см – ширина
- h = 5 см - толщина

Воздуховод сопрягается с системой откачки воздуха при помощи профилированного сопла Витошинского, у которого входное и выходное сечения плавно сопрягаются с воздуховодом и системой откачки.

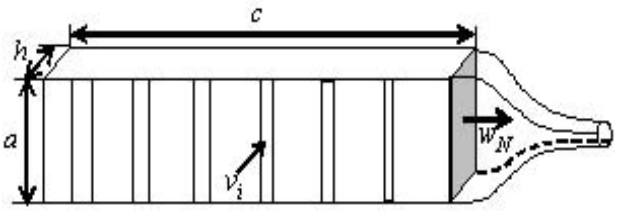

Рис.2 Схема воздуховода для компьютерного моделирования в двумерной постановке: a, h, c – ширина, толщина и длина воздуховода; v_i – скорость газа в отверстии; w_i – скорость газа на выходе из воздуховода.

УПРОЩЕННАЯ МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ВОЗДУХОВОДА

Упрощенная методика расчета вытяжного воздуховода строится в рамках одномерной теории вентиляции, основанной на интегральном законе сохранения массы и уравнении импульсов или Бернулли [7; 8]. В этой теории параметры газа осредняются по поперечному сечению потока, а вязкость учитывается при помощи коэффициента сопротивления, который определяется экспериментально для разных видов местного сопротивления.

Имеется линейный вытяжной воздуховод постоянного поперечного сечения, длина котрого L, ширина a и высота h. По боковой поверхности вдоль воздуховода расположено N отверстий на одинаковом расстоянии друг от друга (рис.2). Один торец воздуховода заглушен, а через другой откачивается газ, общий расход которого равен Q_k. Необходимо найти площадь отверстий σ_i, обеспечивающих равномерный приход газа по длине воздуховода.

При равномерном отсосе расход газа через одно отверстие равен

$$\delta Q = \frac{Q_k}{N} \qquad (1)$$

Расход газа через поперечное сечение за отверстием под номером i будет

$$Q_i = w_i F = i\delta Q\,, \qquad (2)$$

где w_i – средняя продольная скорость движения газа вдоль воздуховода по середине между щелями, $F = a \cdot h$ - площадь поперечного сечения воздуховода, i – номер секции (щели).

Количество газа, поступающего через отверстие, равно

$$\delta Q = v_i \sigma_i\,, \qquad (3)$$

где v_i – средняя скорость прихода газа в отверстии, которая зависит от разрежения в воздуховоде и связана со статическим давлением p_i в секции уравнением Бернулли

$$p_i = p_a - \frac{\rho v_i^2}{2\mu^2} \qquad (4)$$

где μ - коэффициент расхода, зависящий от формы отверстия и толщины стенок; ρ - плотность газа; p_a – давление снаружи воздуховода.

Запишем уравнение импульсов в проекции на ось воздуховода для двух сечений i и $i+1$, расположенных по середине между двумя соседними секциями

$$p_i + \rho w_i^2 = p_{i+1} + \rho w_{i+1}^2 + \delta p_{i+1/2} \ , \qquad (5)$$

где $\delta p_{i+1/2}$ - потери давления на трение, которое определим по формуле

$$\delta p_{i+1/2} = \frac{\lambda}{4}\frac{\rho w_i^2}{2F} S_1 = \frac{\lambda i^2 S_1}{8F^3}\delta\ Q^2 \qquad (6)$$

Здесь $S_1 = \dfrac{2(a+h)L}{N}$ - площадь боковой поверхности между выделенными сечениями; λ - коэффициент сопротивления (характеризует профиль скорости в трубе).

После подстановки выражений (2), (3), (4) и (6) в (5) и преобразований получим рекуррентное соотношение для определения площади отверстий:

$$\sigma_{i+1} = \frac{\sigma_i}{\sqrt{1 + \dfrac{2\mu^2\sigma_i^2}{F^2}\left(2i + 1 + \dfrac{\lambda i^2 S_1}{8F}\right)}} \ . \qquad (7)$$

Полученная формула для расчета площади отверстий проста в применении и позволяет быстро оценить размеры щелей для воздуховода с заданной геометрией и параметрами на выходе.

Зная площади щелей и расход воздуха в каждой щели (изначально задан одинаковый), можно найти среднюю скорость прихода воздуха для каждой щели и статическое давление в воздуховоде для щели.

По изложенной методике был рассчитан вытяжной воздуховод с четырьмя поперечными отверстиями, общим расходом Q_k = 0,25 м3/с и выходной скоростью w_k = 20 м/с. Расчеты дали следующие результаты.

• Площади щелей - σ_1, σ_2, σ_3 и σ_4 равны 0,0050 м^2, 0,0043 м^2, 0,0035 м^2 и 0,0029 м^2, соответственно.

• Ширина щелей - l_1, l_2, l_3 и l_4 составляют 20 мм, 17мм, 14мм и 12 мм, соответственно.

• Скорость потока на входе в каждую из щелей - v_1, v_2, v_3 и v_4 составляет 12,5м/с, 14,5 м/с, 17,9 м/с, 21,56 м/с.

Именно при таких параметрах всасывание воздуха моделируемым воздуховодом будет равномерным.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫТЯЖНОГО ВОЗДУХОВОДА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПАКЕТА COMSOL

Следующим этапом работы является оценка достоверности полученных результатов. Для этого воздуховод той же конструкции моделируется в пакете COMSOL, и решение проводится численно в соответствии с заданными параметрами, граничными и начальными условиями.

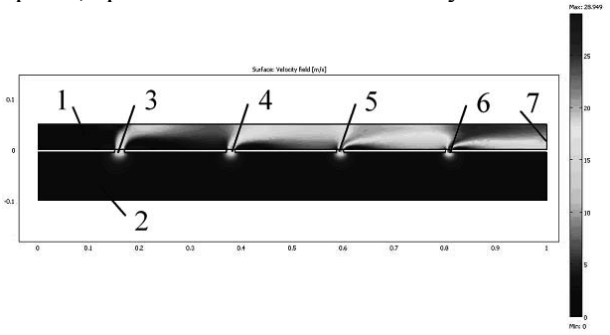

Рис.3 Поле скоростей в воздуховоде: 1 – воздуховод; 2 – область около воздуховода, откуда всасывается воздух; 3–6 – первое, второе, третье и четвертое отверстия; 7 – выходное отверстие.

Для уже известного расхода (Q_k=0,25 м^3/с) и размеров отверстий (σ_1=20 мм; σ_2=17 мм; σ_3 =14 мм и σ_4=12 мм) создается двумерная модель воздуховода. Необходимый расход, а значит, и скорость достигается разрежением на выходе.

Предварительный анализ показывает, что исследуемы поток является турбулентным. Расчет проводится с использованием уравнения Навье-Стокса (8) и уравнения неразрывности (9).

$$\rho(u\cdot\nabla)u = \nabla\cdot[-pI + (\eta+\eta_T)(\nabla u + (\nabla u)^T)] + F \qquad (8)$$

$$\nabla\cdot u = 0 \qquad (9)$$

В уравнении (8) ρ - плотность, u - поле скоростей, p - давление, T - температура, F - объемная сила η - динамическая вязкость, η_T - эффективная турбулентная вязкость, которая рассчитывается с использованием $k-\varepsilon$ -модели турбулентности.

На рис.3 приведено поле скоростей в моделируемом воздуховоде. Граничные условия подбирались в соответствии с $k-\varepsilon$ - моделью турбулентности. Для большей точности результатов проводится дополнительное измельчение сетки у стенок воздуховода.

Интегрирование по границе выходного отверстия дает для среднего значения скорости величину w_k =20 м/с. Разрежение подбиралась специально таким образом, чтобы на выходе получилась именно такая скорость.

Результаты расчета профиля скорости во входных отверстиях приведены на рис.4.

Проинтегрировав по границам отверстий, получаем, что средняя скорость в первом, втором, третьем и четвертом отверстиях составляют: v_1=14,05 м/с; v_2=15,2 м/с; v_3=17,3м/с и v_4 =19,1 м/с. Средняя скорость возрастает с приближением к выходному отверстию.

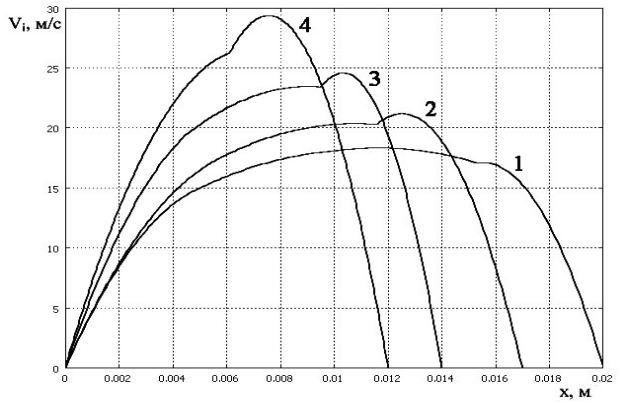

Рис.4 Профиль скорости в первом (1), втором (2), третьем (3) и четвертом (4) отверстиях.

Сопоставление этих значений скоростей со скоростями, полученными при расчете упрощенной методикой, показало, что сравниваемые величины отличаются не больше, чем на 10% (соответствующие графики приведены на рис.5).

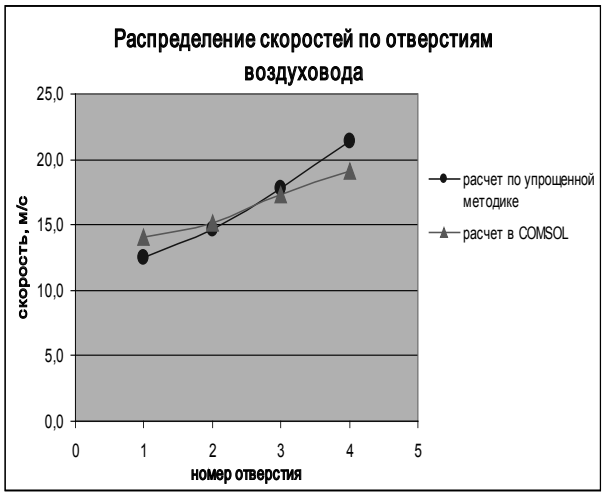

Рис.5 Сопоставление результатов расчета скоростей по упрощенной методике и в COMSOL.

Это говорит об адекватности упрощенной модели и возможности ее применения для расчетов параметров воздуховодов данной конструкции.

ВЫВОДЫ

Вытяжные воздуховоды играют важнейшую роль в процессе удаления печных газов при работе дуговых сталеплавильных печей. Следует с особой тщательностью подходить к выбору режима эвакуации газа и конструкции вытяжного устройства.

Для выяснения возможностей реализации распределенного газоотсоса создана модель линейного вытяжного воздуховода с прямоугольным сечением и с поперечными щелями различной площади. На основании уравнений расхода, уравнения импульса и Бернулли, разработана математическая модель, позволяющая по заданным начальным условиям определить параметры линейного воздуховода, обеспечивающего равномерный отбор газа.

Предложенная упрощенная модель расчета параметров воздуховода удовлетворяет требованиям распределенного газоотсоса. Решение задачи о течении в воздуховоде описываемой конструкции в более точной газодинамической постановке при помощи пакета прикладных программ COMSOL подтверждает адекватность предложенной модели и возможность ее практического применения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тулуевский Ю.Н. Инновации для дуговых сталеплавильных печей. Научные основы выбора: Монография / Ю.Н. Тулуевский, И.Ю. Зиннуров. – Новосибирск: изд-во НГТУ, 2010. - 347с.
2. Павличевич М. Разработка и моделирование конструктивных решений водоохлаждаемых элементов высокомощных ДСП / М. Павличевич, П.И. Тищенко, С.Н. Тимошенко, А.М. Торшин // Труды 4-го Конгресса сталеплавильщиков РФ. 1997г. С.182-183.
3. Тищенко П.И. Путь к решению проблем экологии сталеплавильного агрегата - использование системы распределенного газоотсоса / П.И. Тищенко, С.Н. Тимошенко, А.П. Тищенко // Пути решения экологических проблем горно-металлургической отрасли стран СНГ: Материалы научно-практической конференции под ред. И. Буториной, Л. Филхо. Мариуполь: Стратегия,2002 -180с.
4. Кудрин В.А. Теория и технология производства стали: Учебник для вузов. — М.: «Мир», ООО «Издательство АСТ», 2003.— 528с. (с. 266-275, 289-291, 494-496, 514)
5. Kuhn R. Continuous off-gas measurement and energy balance in electric arc steelmaking/ R.Kuhn, H.Geck, K.Schwerdtfeger. - ISIJ International, Vol.25 (2005), No.11, pp.1587-1596.
6. Тищенко П.И. Повышение эффективности первичного газоудаления при модернизации дуговых сталеплавильных печей / П.И. Тищенко, С.Н. Тимошенко, Н.Б. Дунь // Бюллетень научно-технической и экономической информации «Черная металлургия», №2/2006.
7. Повх И.Л. Техническая гидромеханика. 2-е изд., доп. - Л.: «Машиностроение», 1976. – 504 с.
8. Талиев В.Н. Аэродинамика вентиляции: Учеб. пособие для вузов. - М.: Стойиздат, 1979.-295с.

© Тимошенко Н.С, Семко А.Н.