

УДК 669.187.2

ПУТИ СНИЖЕНИЯ И ЛОКАЛИЗАЦИИ ПЫЛЕГАЗОВЫХ ВЫБРОСОВ
ДУГОВЫХ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ

А.Н.Семко, Н.С.Тимошенко

Введение. В дуговых сталеплавильных печах (ДСП) выплавляется около 40% мирового производства стали. Этот способ выплавки является вторым после конвертерного. Преимущества ДСП как сталеплавильного агрегата перед конвертером заключаются в большей гибкости относительно шихты (лом, металлизированное сырье, чугун), и в более широком сортаменте производимой продукции. Используют преимущественно печи переменного тока, однако в последнее десятилетие проявляется повышенный интерес и к печам постоянного тока, которые более экономичны и экологически чище.

В «большой металлургии» ДСП является агрегатом, выплавляющим полупродукт с использованием наряду с электрической энергией альтернативных ее источников в виде средств интенсификации плавки: газокислородных горелок (ГКГ), фурм для продувки ванны кислородом, инжекторов углеродсодержащего порошка в ванну. Полупродукт в установке ковш-печь и, при необходимости, в установке вакуумной обработки доводится до заданной марки стали, заготовка из которой, полученная на машине непрерывного литья, является товарной продукцией.

В «малой металлургии» ДСП по классической технологии с окислительным и восстановительным периодами выплавляет заданную марку стали, которая используется для изготовления конечной продукции машиностроительного предприятия.

Выплавка металла в ДСП сопровождается образованием значительных объемов пылегазовой среды, методам локализации и эвакуации которой посвящена данная работа.

Образование технологических газов и пыли в ДСП. Технологические газы формируются в рабочем пространстве ДСП следующими источниками [1].

1) Средствами интенсификации плавки. В режиме ГКГ на 1 МВт тепловой мощности, согласно стехиометрии реакции горения природного газа (основа-метан): $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 = \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$, при калорийности газа 36 МДж/м³ выделяется 300 м³/час продуктов горения. В режиме продувки ванны кислородом расход его определяется стехиометрией реакции $\text{C} + 0,5\text{O}_2 = \text{CO}$, регламентированной технологической инструкцией количеством окисленного углерода шихты (7-8 кг/т стали), количеством инжектируемого в ванну порошка углерода (8-20 кг/т стали) и продолжительностью продувки. Выход оксида углерода (СО) составляет 2 объемных расхода кислорода.

2) Подсосы атмосферного воздуха в печь в основном, через приоткрытое рабочее окно за счет разрежения в рабочем пространстве печи (100-200 Па), создаваемом дымососом системы газоочистки. Доля подсосов в общем газовыделении из печи обычно составляет не менее 50-70% [1,2].

3) Дожигание оксида углерода, выделяющегося из ванны в жидкий период плавки при продувке ее кислородом после «накачки» углеродсодержащим порошком, которое производится как с целью повышения экологической безопасности ввиду его токсичности, так и для получения дополнительной энергии реакции $\text{CO} + 0,5\text{O}_2 = \text{CO}_2$ в количестве 12,6 МДж/м³ СО.

4) Определенное влияние на выход газа из печи оказывает окисление электродов атмосферой в рабочем пространстве печи (расход электродов 1,5-8 кг/т стали) с образованием преимущественно СО, продувка ванны аргоном через пористые пробки в подине, наличие органики в загруженной в печь металлошихте и испарение элементов металлошихты и шлака в зоне горения электрической дуги.

По ходу плавки многие из перечисленных источников технологических газов действуют не синхронно. ГКГ используют в период плавления, а продувка ванны кислородом начинается при расплавлении около 50% массы металлошихты и продолжается до начала выпуска плавки (т.н. жидкий период), при этом ГКГ не используются или работают в режиме дожигания СО. Подсосы воздуха в рабочее пространство также носят неравномерный характер и определяются продолжительностью открытия рабочего окна и величиной разрежения в печи. Окно периодически открывают для ввода манипулятора, который производит «подрезку» металлошихты кислородом в период плавления, продувку ванны кислородом в жидкий период плавки, взятие пробы металла и замер температуры. Разрежение в печи максимально в период плавления и понижается в жидкий период, когда для снижения температуры газового потока при продувке ванны кислородом в газоотводящий тракт подсасывают холодный атмосферный воздух.

В работе [2] исследовали интенсивность образования, химический состав и температуру технологических газов на выходе из 130-т ДСП при интенсивной технологии. Результаты представлены на рис.1. Объемный расход технологических газов в среднем за цикл плавки (70 мин.) находится в пределах 12-20 тыс. м³/час (при нормальных условиях), достигая пиковых значений около 35 тыс. м³/час (рис. 1а). Тем-

пература газов изменяется от 900-1400°C в период плавления до 1600-1700°C в жидкий период, когда ванну продувают кислородом (рис. 1б). Химический состав газовой смеси существенно меняется по ходу плавки (рис. 1в). Основными ее компонентами являются N₂, CO, CO₂, O₂, водяной пар. В период плавления преобладают N₂ (более 50%), CO₂ (до 30%), и водяной пар (до 20%), а в жидкий период плавки – N₂, CO (до 40%), CO₂ (до 30%). Кислород в количестве до 4-7% присутствует во все периоды плавки.

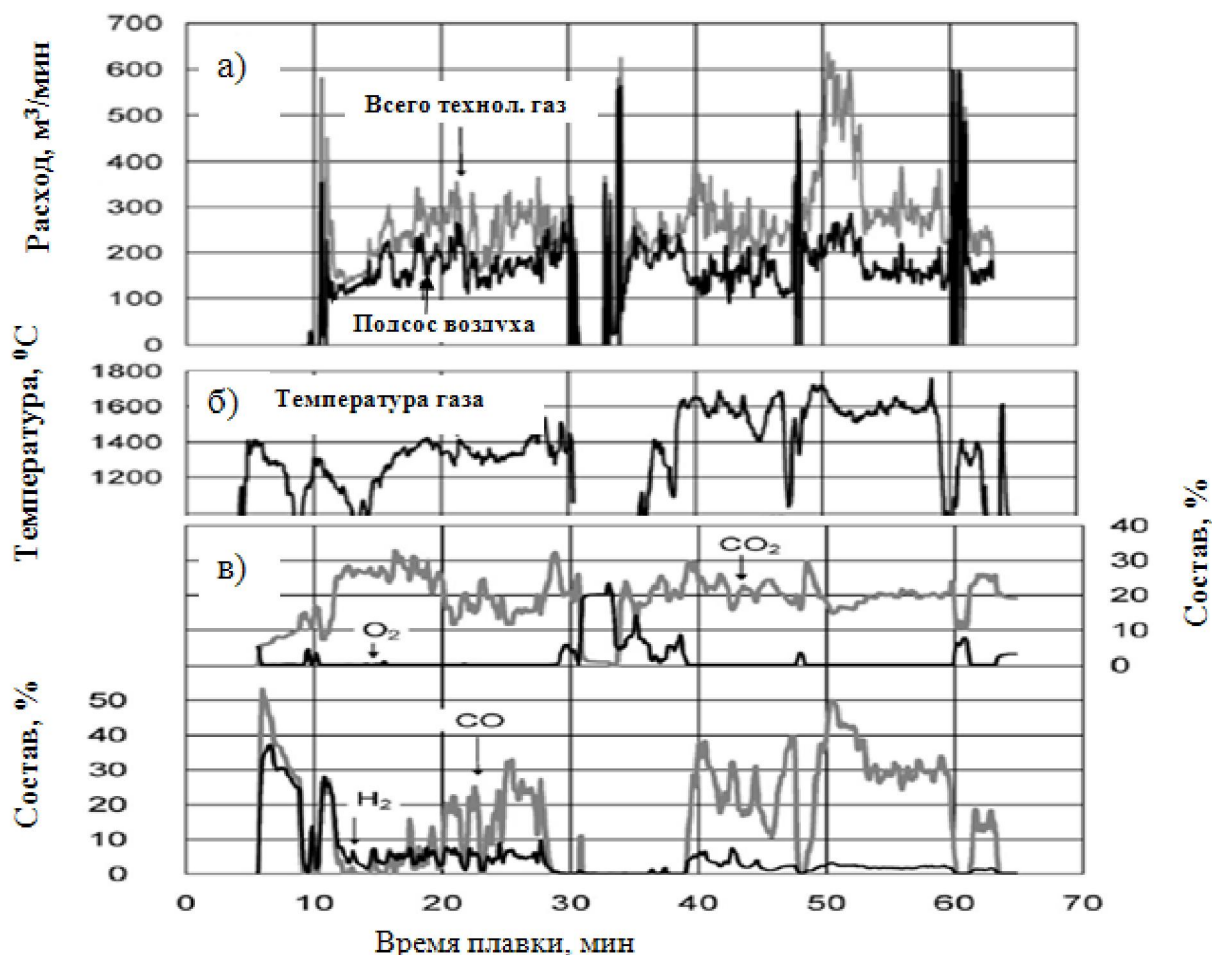


Рис. 1. Параметры технологических газов на выходе из печи

Потери энергии с отходящими газами (физическое тепло и химическая энергия) в среднем за плавку находятся в пределах 15-20 МВт, а в короткие периоды достигают 30 МВт и более при вводимой электрической мощности 60-85МВт.

Кроме того, в состав технологических газов ДСП входят в незначительном (до 0,5-1%) количестве оксиды азота NO_x и серы SO_x, возгоны Zn, Pb, других металлов и оксидов, фториды, продукты разложения органики, внесенной металлошихтой [4].

Содержание пыли в отходящих газах ДСП, по данным [3], находится в пределах 15-25 кг/т стали, по данным [1] 15-60 г/м³ газа. Пересчет данных [1] с учетом характеристик плавки [2] дает 5-22 кг/т стали. Гранулометрический состав пыли представляет широкий диапазон: в основном от 1 до 20 мкм, встречаются и частицы до 500 мкм [3,4]. Химический состав пыли представлен оксидами железа, кальция кремния и алюминия (80-90%), другими соединениями, в частности оксидами цветных металлов, а также частицами углерода [3].

Среди механизмов образования пыли основную роль играют испарение в зоне дуг и горение металла и шлака в кратере, образованном сверхзвуковой кислородной струей при продувке ванны [3]. Схематично образование пыли в процессе плавки представлено на рис. 2.

На первой стадии процесса (а) пузыри CO, всплывая из глубины ванны, приподнимают пленку жидкого металла. На второй стадии (б) пленка разрывается на несколько мелких пленочных капель, число которых прямо пропорционально размеру пузыря. На третьей стадии (в) полость после выхода пузыря схлопывается с образованием достаточно крупных струйных капель, число которых обратно пропорционально размеру пузыря.

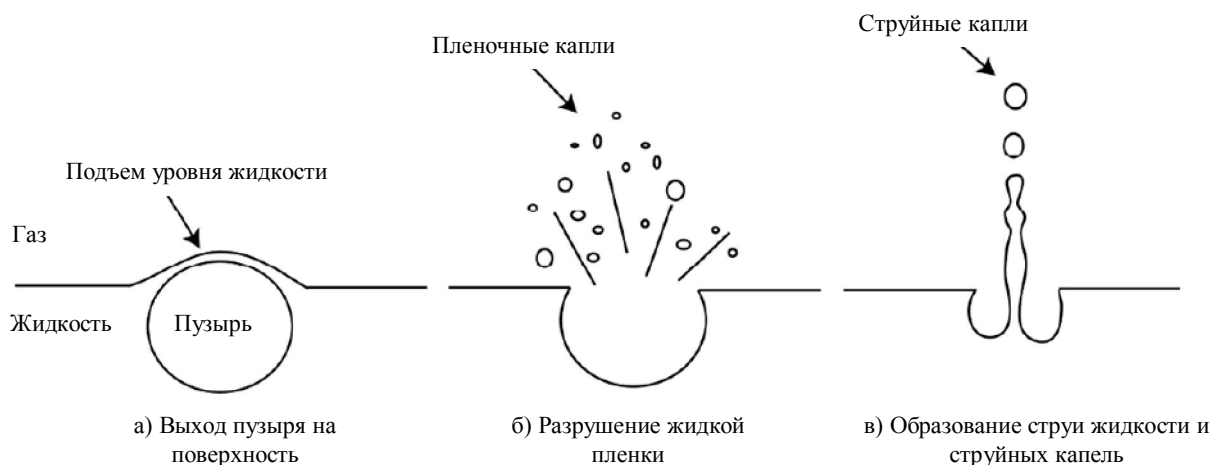


Рис.2. Схема пылеобразования при продувке ванны газом

Струйные капли, ввиду их значительного размера (1000-2000 мкм), из печи практически не уносятся, тогда, как пленочные капли захватываются потоком технологических газов, т.е. пленочные капли есть основной источник пылеобразования при интенсивной технологии в ДСП.

Экспериментально показано, что пленочные капли начинают интенсивно образовываться при диаметре пузырей, барботирующей ванны, 5-7 мм и выше и количество пыли резко возрастает с увеличением размера пузырей. Однако не дается рекомендаций, как регулировать размеры пузырей СО в сталеплавильной ванне реальной печи.

Сопоставление данных по потерям металла с пылью в конвертере, где они составляют не более 15 кг/т [4], и в ДСП, где их величина приближается к 20 кг/т и более, несмотря на примерно вдвое меньший удельный расход кислорода при продувке ванны, свидетельствует о наличии в ДСП фактора, способствующего повышенному выносу пыли. В работе [5] это объясняется спецификой эвакуации технологических газов в ДСП, а именно, в 5-8 раз меньшей, в сравнении с конвертером площадью сечения газоотводящего патрубка относительно площади ванны. Поэтому, при данной часовой производительности (современная ДСП не уступает конвертеру той же вместимости), у сравниваемых агрегатов будут сопоставимые интенсивности образования технологических газов, а скорость потока в газоотводящем патрубке ДСП будет в несколько раз выше, чем в горловине конвертера. Обладая более высокой кинетической энергией, газовый поток в ДСП сможет обеспечить вынос более массивных частиц пыли, чем в сопоставимых условиях в конвертере.

Эвакуация технологических пылегазовых выбросов из ДСП. Система эвакуации и очистки газов в ДСП высокой мощности включает два контура и действует благодаря разрежению, создаваемому дымососом (рис.3) [1].

Высокотемпературный контур обеспечивает эвакуацию пылегазовой смеси (ПГС) из рабочего пространства печи через отверстие в своде (1) и включает: газоотводящий патрубок (3), камеру дожигания с накатной муфтой (4), камеру пылесажения (5) и соединительный газоход (7). Между газоотводящим патрубком и камерой дожигания находится регулируемый зазор для подсоса атмосферного воздуха с целью дожигания СО и, главным образом, снижения температуры ПГС.

Низкотемпературный контур обеспечивает эвакуацию неорганизованных выбросов (НВ) из печи при загрузках металлошихты, выпуске плавки, а также в процессе плавки через электродные зазоры, и включает расположенный под крышей цеха зонт (2) и циклон (9) с соединительными газоходами. Объемный расход ПГС через зонт, расположенный на высоте 10-15 м над печью, значительно превышает выход ПГС через высокотемпературный контур, главным образом за счет подсосов воздуха (более 90% всего объема). Однако температура газа в этом контуре обычно не выше 70⁰С. Тяговые возможности зонта регулируются системой поворотных заслонок, открывая их на максимум во время завалки и выпуска, и на минимум в периоды плавления и, особенно, нагрева.

Считается, что около 20% пыли удаляется через низкотемпературный контур, а более 80% образуется при плавлении и нагреве и удаляется через высокотемпературный контур.

ПГС обоих контуров смешивается, дополнительно охлаждается в конвективном охладителе (6) и поступает в блок рукавных фильтров системы газоочистки (11), под действием разрежения, создаваемого дымососом (8). Для устойчивой работы рукавных фильтров регламентируется максимальная температура ПГС (как правило, не более 100-120⁰С) перед блоком, что обеспечивается при необходимости дополнительным подсосом атмосферного воздуха через регулируемые клапаны (10).

На печах малой вместимости (до 25 т) и мощности, характерных для «малой металлургии» система эвакуации ПГС обычно имеет один контур и производится через зазоры электродных отверстий в порталную камеру, охватывающую над сводом зону распада электродов, где производится охлаждение газовой смеси и дожигание СО за счет значительных подсосов воздуха.

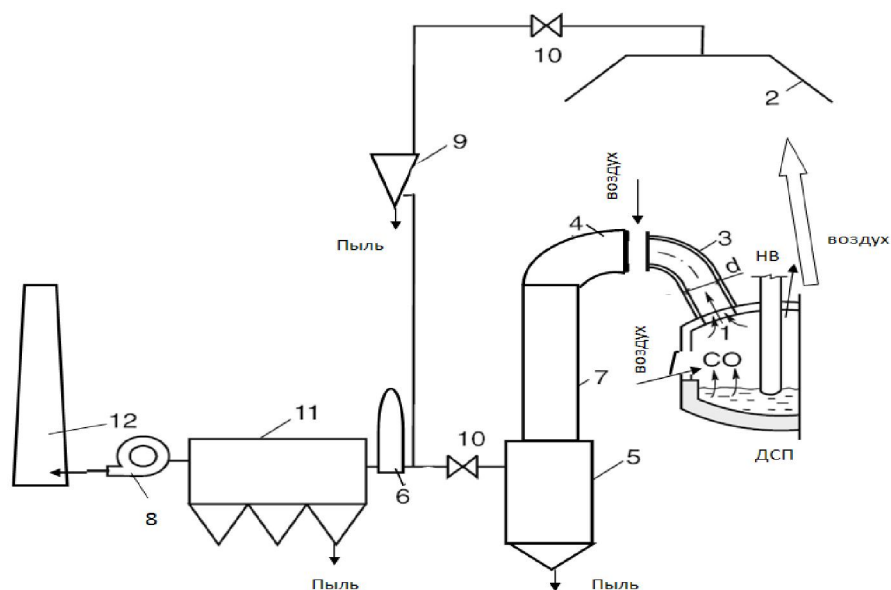


Рис. 3. Система газоудаления и газоочистки ДСП

Нормированное содержание пыли в газе, выбрасываемом в трубу (12), т.е. на выходе из блока рукавных фильтров, составляет не более 20 мг/м^3 , согласно СНиП.

Пути сокращения пылегазовых выбросов ДСП. При рассмотрении экологической составляющей современной технологии электроплавки в «большой металлургии», наиболее важным представляется уменьшение выноса пыли в ДСП, т.е. расходного коэффициента металлошихты. Эффект от его снижения на 5 кг/т , при годовом объеме производства стали в 150-т печи 1,2 млн. т и цене металлолома 300 долл/т может составить 1,8 млн. долларов США в год. При этом понизится нагрузка на блок рукавных тканевых фильтров газоочистки, что позволит увеличить ресурс их работы.

В «малой металлургии» совершенствование системы газоудаления позволит решить проблему неорганизованных выбросов и повышенного расхода графитированных электродов. В сравнительно маломощных печах данного класса средства интенсификации плавки практически отсутствуют, и проблема потерь металлошихты с пылью не настолько острая, как в печах высокой мощности. На первое место выходит задача снижения неорганизованных выбросов технологических газов в атмосферу цеха. Она усугубляется тем, что печи, как правило, не имеют отверстия в своде для газоудаления, а выход газов происходит через электродные зазоры в охватывающую электроды камеру. Как в низкотемпературном контуре газоудаления печей высокой мощности, здесь велики подсосы воздуха и дымосос не справляется с эвакуацией пылегазового потока.

Одной из проблем, которые могут быть решены при модернизации системы газоудаления на малых печах является высокий (до $5\text{-}8 \text{ кг/т}$ и более) удельный расход дорогостоящих графитированных электродов из-за окисления их боковой поверхности отсасываемыми через электродные зазоры газами.

Для печей малой вместимости выполнена предварительная проработка системы комбинированного газоудаления посредством порталной камеры и газоотводящего патрубка с инъекцией неорганизованных выбросов через электродные зазоры (рис.4).

В футеровке 2 свода 1 выполнено отверстие, защищенное охлаждаемым контуром 3. Над ним с определенным зазором установлен охлаждаемый газоотводящий патрубок 4, входящий в порталную камеру 5. Пылегазовый поток из печи Q обеспечивается разрежением дымососа и включает следующие составляющие: основную Q_1 , эвакуируемую через отверстие в своде; неорганизованные выбросы Q_2 ; и подсосы атмосферного воздуха в порталную камеру Q_3 . Данная система после оптимизации ее конструктивных параметров позволит существенно уменьшить неорганизованные выбросы и может быть использована совместно с комбинированным (сочетание огнеупорных и охлаждаемых элементов) сводом, разработанным для ДСП малой вместимости [7].

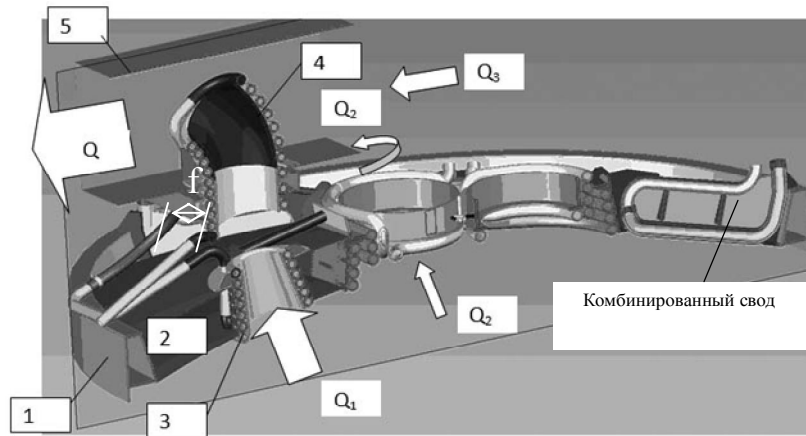


Рис. 4. Схема комбинированного газоудаления в ДСП малой вместимости

Дальнейшее развитие экологической концепции свода было сделано в направлении подавления неорганизованных пылегазовых выбросов в электродные отверстия печи вследствие эффекта тяги, возникающей в колодцах под электродами при плавлении шихты. Это было достигнуто оптимизацией газоудаления из области распада электродов за счет развития цилиндрической камеры в центральной части свода и соединения камеры с газоотводящим патрубком [6].

Расчет системы распределенного газоотсоса. В работе [5] предложена и реализована концепция свода ДСП с системой распределенного газоотсоса (рис.5). В ней водоохлаждаемые спиральные панели свода, закрытые сверху листом экрана, формируют тороидальную камеру (1), в которой поддерживается разрежение, передаваемое через газоотводящий патрубок (2) от дымососа. Камера охватывает практически весь периметр свода и через трубы спиральных панелей может всасывать технологические газы ДСП, являясь системой распределенного газоотсоса в отличие от традиционной локальной системы, сосредоточенной в сечении газоотводящего патрубка. Это позволяет существенно снизить скорость газового потока в печи и создает условия для уменьшения выноса пыли.

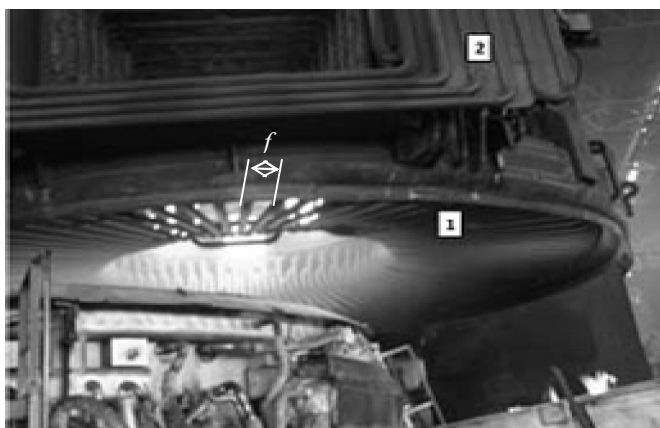


Рис.5. Свод с системой распределенного газоотсоса

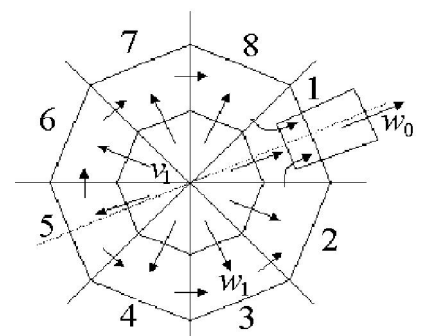


Рис. 6. Модель крышки ковша

На рис. 6 приведена схема распределенного газоотсоса крышки ковша ДСП, состоящая из нескольких секций, которые расположены симметрично вытяжного воздуховода. Выделим две соседние секции с номерами i и $i+1$ и запишем баланс массы для этих секций

$$Q_{i+1} = Q_i + \delta Q_i, \quad \delta Q_i = \sigma_i v_i, \quad (1)$$

где Q_i – расход через поперечное сечение, δQ_i – приток газа в секции через щель, σ_i – площадь щели, v_i – скорость приходящего газа.

При равномерном отсосе приток газа в каждую секцию одинаковый

$$\delta Q_i = \delta Q = \frac{Q_0}{N}, \quad (2)$$

где Q_0 – общий расход газа, N – число секций. Расход газа через сечение связан со скоростью w в этом сечении.

$$Q_i = w_i F = i \delta Q \quad (3)$$

где F – площадь поперечного сечения вентиляционного канала крышки.

Запишем уравнение Бернулли для рассмотренных сечений

$$p_i + \frac{\rho w_i^2}{2} = p_{i+1} + \frac{\rho w_{i+1}^2}{2} + \delta p_i, \quad (4)$$

где p – статическое давление, ρ – плотность газа, δp – потери давления на трение. Как делается в теории вентиляции, потери на трение учтем по формуле

$$\delta p_i = \frac{\lambda \rho w_i^2}{4} \frac{S_\delta}{2F} \quad (5)$$

где λ – коэффициент сопротивления, S_δ – площадь боковой поверхности сечения. Статическое давление p связано со скоростью отсасываемого газа соотношением

$$p_i = p_a \frac{\rho v_i^2}{2\mu^2} \quad (6)$$

где p_a – давление в ковше, равное атмосферному, μ – коэффициент скорости.

После подстановки и преобразований получим рекуррентное соотношение для определения площади отверстий каждой секции

$$\sigma_{i+1} = \frac{\sigma_i}{\sqrt{1 + \frac{\mu^2}{F^2} \left((i+1)^2 - i^2 + \frac{\lambda S}{4F} i^2 \right) \sigma_i^2}} \quad (7)$$

Порядок проведения расчета следующий. Задаемся геометрическими размерами сечения, коэффициентами скорости и сопротивления, общим расходом Q_0 . Выбираем площадь отверстий в пятой секции, которая является начальной для расчета, и по формуле (7) рассчитываем площади отверстий остальных секций.

На рис. 7 приведено поперечное среднее сечение секции вентиляционной крышки. Геометрические размеры сечения следующие: $R_1 = 235$, $R_2 = 220$, $R_3 = 142$, $R_4 = 142$, $h = 185$ мм.

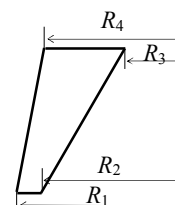


Рис. 7. Поперечное сечение секции крышки ковша

Исходные данные для расчета крышки ковша

$N = 8$	число секций
$Q_0 = 0,014$ м ³ /с	расход воздуха
$F = 78,6$ см ²	площадь поперечного сечения секции по середине
$S = 825$ см ²	площадь боковой поверхности секции
$\mu = 0,85$	коэффициент скорости
$\lambda = 0,025$	коэффициент сопротивления
$\rho = 1,2$ кг/м ³	плотность воздуха
$\sigma_1 = 16$ см ²	площадь отверстий для первой секции.

На рис. 8 приведена зависимость скорости v и w , а на рис. 9 относительной площади отверстий $\sigma' = \sigma/S_\delta$ и от номера секции.

Исследовалась работа вентиляционной крышки на разных режимах. Изменялся расход Q_0 и начальная площадь отверстий в пятой секции. При изменении расхода Q_0 площадь отверстий в секциях не изменялась, а изменялась только скорость потока и разрежение. В табл. 1 приведены значения максимальной скорости в v и w и разрежения Δp в выходном патрубке для разных расходов.

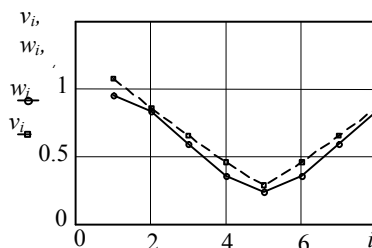


Рис. 8. Распределение скоростей v и w по секциям

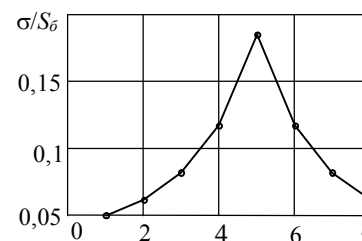


Рис. 9. Распределение относительной площади отверстий по секциям

Таблица 1. Максимальные скорости и разрежение для разных расходов

Q ₀ , м ³ /ч	20	30	40	50	60	80	100	120
Δр, Па	0,9	2	3,51	5,5	7,9	14	22	31,9
v _{max} , м/с	0,43	0,65	0,86	1,08	1,29	1,72	2,16	2,59
w _{max} , м/с	0,38	0,57	0,765	0,956	1,15	1,53	1,91	2,29

В табл. 2 представлены значения относительных площадей в первых пяти секциях для разных значений площади начальной секции.

Таблица 2. Относительные площади отверстий секций

σ _{начальн}	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7
σ ₁	0,046	0,05	0,051	0,051	0,052	0,052	0,052
σ ₂	0,055	0,063	0,065	0,065	0,066	0,066	0,066
σ ₃	0,068	0,083	0,088	0,089	0,09	0,091	0,091
σ ₄	0,083	0,121	0,135	0,141	0,145	0,147	0,148
σ ₅	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7

Проведен сопоставительный анализ запыленности технологических газов на выходе из печи при использовании традиционного локального газоотсоса и системы распределенного газоотсоса. Средняя запыленность технологических газов при использовании свода с системой распределенного газоотсоса была в 1,5-2 раза ниже в сравнении с традиционной системой газоудаления [5].

Несмотря на достаточно обнадеживающие экологические показатели, свод со спиральными панелями по своим эксплуатационным параметрам не полностью отвечает требованиям применения в ДСП высокой мощности. На практике функция спиральных панелей, как ограждения листа экрана свода от падающего из печи теплового потока, и условие распределенного газоотсоса требовали относительно межтрубного интервала f (рис.4) взаимоисключающих решений.

Выводы. Рассмотрены особенности формирования, характеристики и методы эвакуации пылегазовой среды из рабочего пространства ДСП. Проведен расчет системы распределенного газоотсоса. Показано, что применение системы распределенного газоотсоса позволяет уменьшить в 1,5-2 раза выбросы пылегазовой смеси в дуговых сталеплавильных печах.

РЕЗЮМЕ

Розглянуто особливості формування, фізико-хімічні параметри і методи евакуації пило-газової середі з робочого простору дугових сталеплавильних печей (ДСП). Проведено розрахунок системи розподіленого газовидалення. Виконано попередню проробку системи комбінованого газовиділення для ДСП малої ємкості з метою зниження неорганізованих викидів.

SUMMARY

Generation of dust-gas emissions of electric arc furnaces (EAF), its chemical composition, physical parameters and methods of evacuation are considered. Reviews of state of the art in the area of the EAF powder-gas emissions reduction and localization from the viewpoint of economical and ecological considerations are made in the work. A calculation of distributed dust-gas emissions suction system is performed.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Toulouevski Y. Innovation in Electric Arc Furnaces / Y.Toulouevski, I.Zinurov. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010. – 258 p.
2. 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.
3. Dust formation in electric arc furnace: birth of the particles/ A-G.Guezennec, J-C. Huber, F.Patisson, P. Sessieq, J-P.Birat, D. Ablitzer. – Powder Technology, 2005, pp. 11-14.
4. Шульц Л.А. Элементы безотходной технологии в металлургии / Шульц Л.А. – М.: Металлургия, 1991. – 175 с.
5. Разработка и моделирование конструктивных решений водоохлаждаемых элементов высокоомощных ДСП / Павличевич М., Тищенко П.И., Тимошенко С.Н., Торшин А.М.; труды 4-го Конгресса сталеплавильщиков РФ. – 1997г. – С.182-183.
6. Тищенко П.И. Повышение эффективности первичного газоудаления при модернизации дуговых сталеплавильных печей / Тищенко П.И., Тимошенко С.Н., Дунь Н.Б.; бюллетень научно-технической и экономической информации «Черная металлургия», №2/2006.
7. Комбинированный свод дуговых сталеплавильных печей литейного цеха: материалы XIII Международной конф. / П.И.Тищенко, С.Н.Тимошенко, Н.Б.Дуны, Г.В.Палиенко, А.В.Дорошенко. – Челябинск: изд-во ЮУрГУ, 2007, Часть 2. – С. 161-163.

Поступила в редакцию 21.04.2010 г.