

СНИЖЕНИЕ ВЫБРОСОВ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА ИЗ ДУГОВОЙ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЙ ПЕЧИ НА ОСНОВЕ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СИСТЕМЫ ГАЗОУДАЛЕНИЯ

Н.С. Тимошенко, А.Н. Семко, С.Н. Тимошенко
Донецкий национальный университет, г.Донецк, Украина

Аннотация

В работе исследуются особенности формирования и физико-химические параметры пылегазовой среды в рабочем пространстве электродуговых сталеплавильных печей. Для снижения интенсивности выноса пыли, CO_2 и других технологических газов из печи предложена конструкция вытяжного газохода с равномерным отбором газа. С использованием пакета прикладных программ CosmosFloWorks в среде SolidWorks выполнено численное моделирование усовершенствованной системы газоудаления современной 120-т дуговой печи, показывающее снижение выбросов углекислого газа из печи на 2,5 кг/т стали.

Введение

Донецкая область является крупнейшим промышленным центром Украины, и в то же время, поставляет около трети загрязняющих веществ страны. В структуре вредных выбросов преобладает оксид углерода, на долю которого приходится почти 28,8% всех выбросов, сернистый ангидрид (диоксид серы) – 21,3%, пыль – 15% и лёгкие органические соединения – 13%. В данной работе рассматривается загрязнение атмосферы металлургическим комплексом, который особенно активно представлен в Донецком регионе. И хотя по выбросам углекислого газа металлургия не занимает первое место, все же свой вклад в загрязнение атмосферы парниковыми газами она вносит.

В работе рассматривается производство металла в дуговых сталеплавильных печах (ДСП), которые на данный момент выплавляют около 40% всей производимой в мире стали, уступая только конвертерному процессу. В Украине доля ДСП в общем сталеплавильном производстве не так велика, но она с каждым годом растёт. Современная технология плавки в ДСП сопровождается выделением из печи до 100...270 м³/час (при нормальных условиях) технологических газов на тонну стали [1]. Состав газов изменяется по ходу плавки и представлен, в основном, азотом, кислородом, оксидом и диоксидом углерода, парами воды.

В работе [2] исследовали интенсивность образования, химический состав и температуру технологических газов на выходе из 130-т (ДСП). 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. Температура газов изменяется от 900-1400°С в период плавления до 1600-1700°С в жидкий период, когда ванну продувают кислородом. Химический состав газовой смеси существенно меняется по ходу плавки. Основными компонентами являются азот, оксид углерода, диоксид углерода, кислород, водяной пар. В период плавления преобладают N_2 (более 50%), CO_2 (до 30%), и водяной пар (до 20%), а в жидкий период плавки - N_2 , CO (до 40%), CO_2 (до 30%). Кислород в количестве до 4-7% присутствует во все периоды плавки. Содержание пыли в отходящих газах ДСП, по данным [1] находится в пределах 20-60 г/м³ газа или 5-22 кг/т стали. Химический состав пыли представлен оксидами железа, кальция кремния и алюминия (80-90%), другими соединениями, в частности оксидами цветных металлов, а также частицами углерода.

Постановка задачи

Традиционные схемы газоудаления [1] 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 виде взвешенных частичек пыли) и быстрой изнашиваемости фильтров.

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. Выбор оптимального режима отсоса газов представляет собой актуальную задачу, решение которой позволит повысить энергоэффективность работы ДСП и сократить интенсивность выноса пылегазовой среды из рабочего пространства, уменьшить угар электродов, и таким образом, косвенно, обеспечить уменьшение образования и выбросов CO_2 .

Анализ проблемы

Данные по выбросам диоксида углерода при выплавке стали в ДСП существенно разнятся. Так, согласно [1], они составляют около 580 кг/т стали при традиционной для данных агрегатов технологии плавки на шихте из 100% металлолома, а при использовании жидкого чугуна и металлолома в равном соотношении – возрастают до 1700 кг/т. По данным [3] выбросы CO_2 при традиционной технологии плавки в ДСП не превышают 100кг/т стали.

В связи с существенным расхождением данных о выбросах CO_2 дадим оценку этого параметра исходя из основных положений современной интенсивной технологии. CO_2 в ДСП образуется, главным образом, в результате следующих процессов.

1. Окисление углерода, входящего в состав шихтовых материалов, кислородом, подаваемым через специальные продувочные фурмы. Технологическими инструкциями регламентируется окисление в среднем 0,75% углерода для интенсивного «прокипания» жидкой ванны выделяющимся газообразным продуктом и ускорения тем самым физико-химических процессов в ней. В условиях высоких температур (1600-1650⁰С) и наличия твердого углерода, его окисление протекает по реакции $\text{C}+0,5\text{O}_2=\text{CO}$, которая является комбинацией реакций $\text{C}+\text{O}_2=\text{CO}_2$ и $\text{CO}_2+\text{C}=2\text{CO}$. За пределами ДСП (и частично в печи) производят дожигание CO по реакции $\text{CO}+0,5\text{O}_2=\text{CO}_2$ с целью недопущения его попадания в атмосферу (ПДК CO ограничен в рабочей зоне величиной 25 мг/м³), а также для получения дополнительного химического тепла, которое можно использовать для подогрева шихты или выработки энергоносителя – водяного пара. В конечном счете, приведенные выше реакции сводятся к одной:



согласно стехиометрии которой, на тонну стали образуется 27,5 кг CO_2 .

2. Окисление углеродсодержащего материала, инжектируемого в жидкий период плавки в сталеплавильную ванну в виде порошка в среднем количестве 12 кг/т для выработки дополнительного к электроэнергии экзотермического тепла, а также для вспенивания шлака выделяющейся газовой фазой с целью экранирования электрических дуг и более эффективного использования их энергии на нагрев ванны. Этот процесс также описывается суммарной реакцией (1) и дает 44 кг CO_2 на тонну стали.
3. Использование газокислородных горелок на начальном этапе плавления как альтернативного источника энергии для интенсификации плавки. В среднем удельный расход природного газа составляет 7 м³/т стали, что по стехиометрии реакции полного сгорания газа (в нем не менее 95% метана) $\text{CH}_4+2\text{O}_2=\text{CO}_2+2\text{H}_2\text{O}$ дает 13,75 кг CO_2 на тонну стали.
4. Окисление (угар) графитированных электродов печи, который составляет в среднем 2,5 кг/т стали, также описывается суммарной реакцией (1) и дает 9,2 кг CO_2 на тонну стали.

Данный процесс обусловлен, в основном, подсосами атмосферного воздуха через рабочее окно печи.

Общая оценка выхода CO_2 в ДСП, как сумма перечисленных составляющих, оценка которых выполнена в результате анализа технологии, равна 95 кг/т стали.

Одним из путей снижения выбросов диоксида углерода, не связанным с изменением технологии плавки, является уменьшение подсосов воздуха в печь. Следствием этого, в частности, будет снижение угара графитированных электродов – одного из источников выбросов диоксида углерода.

В работе [4] рассматривается возможность снижения выноса пыли и оксидов углерода (CO и CO_2) из электродуговой сталеплавильной печи 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.

Данная работа направлена на оценку возможности применения разработанной математической модели на реальной ДСП. Предложено новое конструктивное решение по газоудалению (рис. 1а) в котором, в отличие от традиционной схемы (рис. 1б), используют кольцевой вытяжной газоход 1 с переменной по полупериметру (ввиду симметрии газовых потоков) шириной щелей, установленный в верхней камере 2 свода 3. Параметры щелей 4 рассчитывают на основе математической модели из условия равномерного притока технологических газов по периметру газохода: площадь щелей увеличивается с ростом их углового положения ($0 \dots 180^\circ$) относительно продольной оси газоотводящего патрубка 5.

Предлагаемое решение направлено на уменьшение потерь энергии с технологическими пылегазовыми выбросами, которые составляют не менее 15% вводимой в ДСП энергии. Одним из факторов решения данной задачи является уменьшение подсосов атмосферного воздуха в печь через ее рабочее окно.

Результаты исследований

Проверка технической эффективности предложенного решения системы газоудаления ДСП проведена с помощью пакета прикладных программ CosmosFloWorks в среде SolidWorks. Расчет выполняли численно на основе уравнений Навье-Стокса (2) и неразрывности (3) с использованием $k - \varepsilon$ модели турбулентности.

$$\frac{\partial \vec{w}}{\partial \tau} + (\nabla \vec{w}) \cdot \vec{w} = -\frac{1}{\rho} \cdot \nabla p + \eta \cdot \nabla^2 \vec{w} + F, \quad (2)$$

$$\text{div} \vec{w} = 0, \quad (3)$$

где ρ - плотность, w - скорость, p - давление, τ - время, F - объемная плотность сил, η - динамическая вязкость.

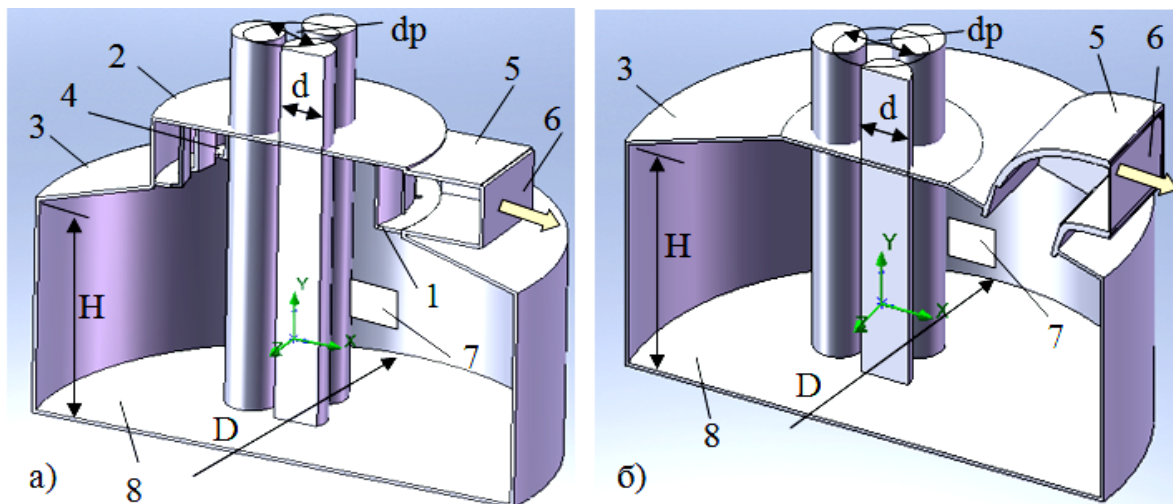


Рис. 1 - Система газоудаления с верхней камерой и вытяжным газоходом (а) и традиционная система газоудаления ДСП (б). Обозначения приведены в тексте. Стрелкой показано направление отсоса газов

Граничными условиями задачи являются (см. рис. 1): разрежение 100 Па на грани 6 газоотводящего патрубка; нормальные (по давлению и температуре) условия в рабочем окне 7 печи; объемный расход газа из ванны 8 (выход CO при продувке ванны жидкой стали кислородом с инъекцией углеродсодержащего порошка) $2,2 \text{ м}^3/\text{с}$ при температуре 1850 К; «реальная» стенка - на остальных границах флюидного тела. Размеры печи соответствуют промышленной 100..120т ДСП и приняты одинаковыми для вариантов а) и б): диаметр ванны $D = 5500 \text{ мм}$; высота рабочего пространства $H = 0,6D$; диаметр электрода $d = 600 \text{ мм}$, диаметр распада электродов $dp = 1250 \text{ мм}$; размеры рабочего окна $700 \times 600 \text{ мм}$; сечение газоотводящего патрубка $1500 \times 750 \text{ мм}$.

Задачей расчета было получение поля скоростей газовой среды в печи для вариантов системы газоудаления а) и б) в сопоставимых условиях и его анализ, в частности оценка притока воздуха в рабочее окно.

На рис. 2 приведены траектории движения газового потока в рабочем пространстве ДСП.

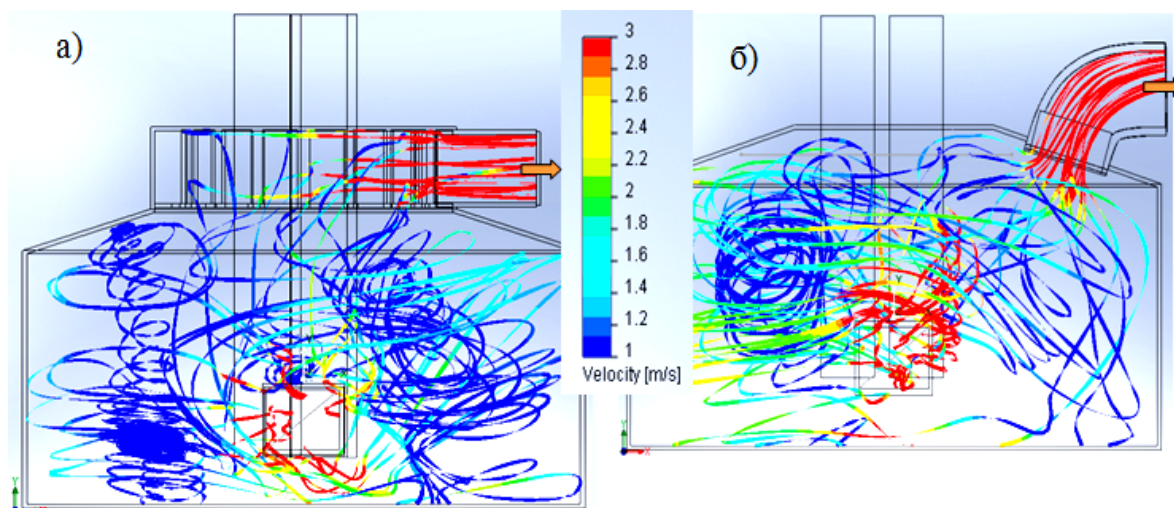


Рис.2 – Траектории движения газовых потоков в ДСП с предложенной системой газоудаления (а) и традиционной системой газоудаления (б).

Визуализация траекторий позволяет судить о менее интенсивном характере движения газов в печи, оборудованной предложенной системой газоудаления (вариант а)), в сравнении с традиционной (вариант б)). Это, по-видимому, связано с разделением одного мощного

вихря в печи при традиционной схеме на два менее мощных вихря и торможением потока в кольцевом вытяжном газоходе усовершенствованной системы.

Выполнена оценка притока воздуха в рабочее окно ДСП (оно открыто около половины цикла плавки в связи с работой манипулятора для продувки ванны кислородом, отбором проб и замерами температуры) для рассматриваемых систем газоудаления. На рис. 3 приведены расчетные кривые распределения скорости подсосываемого воздуха по диагонали рабочего окна печи, полученные в результате решения задачи в пакете CosmosFloWorks.

Как видно из приведенных данных, использование вытяжного газохода с расчетными параметрами позволяет снизить среднюю скорость притока воздуха в рабочее окно ДСП с 11,2 до 8,2 м/с, а, следовательно, и уменьшить на 27% подсосы воздуха в сравнении с традиционной системой газоудаления. При этом следует ожидать соответствующее снижение расхода графитированных электродов, что повлечет уменьшение выбросов из печи диоксида углерода на 2,5 кг/т стали.

Выводы

На основе уравнений гидродинамики разработана математическая модель, позволяющая по заданным геометрическим и технологическим параметрам выполнить расчет усовершенствованной системы газоудаления, обеспечивающей повышение энергоэффективности процесса выплавки стали.

Сопоставительный численный расчет течения газовой среды для случаев усовершенствованной и традиционной систем газоудаления применительно к современной 120-т ДСП, выполнен с помощью пакета прикладных программ CosmosFloWorks в среде SolidWorks. Расчеты показали возможность снижения на 27% подсосов воздуха в печь в сравнении с традиционной системой газоудаления, что дает основание рассчитывать на снижение выбросов диоксида углерода из печи на 2,5 кг/т стали.

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. 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. M J Thomson, E J Evenson, M J Kempe, and H D Goodfellow; «Control of greenhouse gas emissions from electric arc furnace steelmaking: evaluation methodology with case studies», Ironmaking and Steelmaking, 2000, Vol 27, No 4, p.273.
4. Моделирование вытяжного воздуховода для дуговых сталеплавильных печей // Современная наука: идеи, исследования, результаты, технологии. Сборник научных статей. – Киев: «НПБК Триакон», 2012. – №2(10). - С. 10-15. (ISSN 2076-6866)

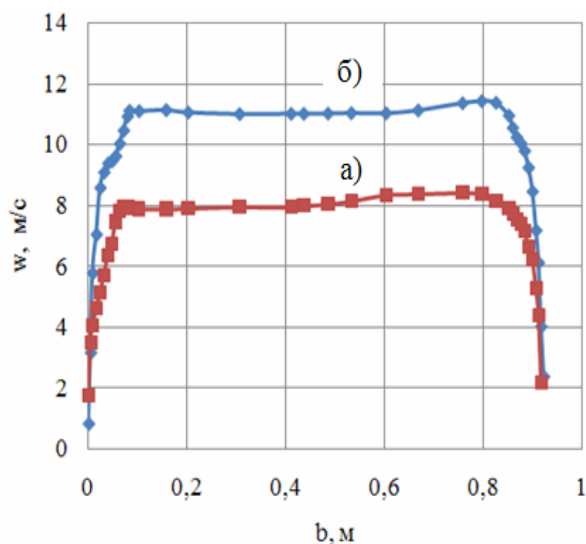


Рис.3 – Распределение скорости подсосываемого воздуха (w , м/с), по диагонали рабочего окна (b , м) для ДСП с предложенной системой газоудаления (а) и традиционной системой газоудаления (б).