

И.А. ТРУСОВА, д-р техн. наук,
С.В. КОРНЕЕВ, канд. техн. наук,
Н.Г. МАЛЬКЕВИЧ, канд. техн. наук (БНТУ)

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРИ ВЫПЛАВКЕ СТАЛИ В ВЫСОКОМОЩНЫХ ЭЛЕКТРОДУГОВЫХ ПЕЧАХ. СООБЩЕНИЕ 1. АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОЧИСТКИ ГАЗОВ

Электросталеплавильное производство получило достаточно широкое распространение на металлургических мини-заводах, на предприятиях машиностроительного производства, на специализированных электрометаллургических комбинатах, также в ряде случаев дуговые сталеплавильные печи (ДСП) применяют на предприятиях с полным металлургическим циклом. Несмотря на широкий диапазон емкости печей, для всех ДСП характерно изменение газопылевых выбросов (объема выбросов, дисперсного и химического состава пыли, ее плотности и др.) в зависимости от технологического режима (периодов работы печи), способа отвода отходящих газов, состава используемой металлошихты и других параметров [1]. Например, по данным указанной работы количество газов на 1 т стали составляет 135–335 м³/ч. Содержание пыли в «первичных» (неразбавленных воздухом) газах находится на уровне 5–10 г/м³ при плавлении и 20–50 г/м³ в окислительный период. В состав газовых выбросов входят СО, СО₂, N₂, NO, NO₂, NH₃, CN, кислород и его летучие соединения с компонентами сплава и примесями фосфора, серы, и др. В итоге количество выделяемой пыли изменяется в достаточно широких пределах – от 6 до 25 кг/т стали.

Следует отметить, что плавильная пыль является наиболее опасным токсичным веществом вследствие предельно малого размера частиц (менее 1 мкм) и химического состава, в основе которого оксиды многих тяжелых металлов. В системах газоочистки улавливается 70–90 % общей массы выбросов плавильной пыли, которая может подвергаться рециклингу в окомкованном виде или использоваться в качестве ценного вторичного сырья, что позволит окупить установку любого самого высокоэффективного пылеулавливающего устройства [2].

Основными способами очистки отходящих от ДСП газов являются:

- сухая очистка (с использованием рукавных фильтров и электрофильтров);
- мокрая очистка (с использованием скрубберов Вентури).

Каждый из способов имеет свою область применения, недостатки и преимущества.

В соответствии с работой [1] «мокрая очистка газов ДСП целесообразна при наличии замкнутой системы оборотного водоснабжения. Кроме того, установка мокрой очистки становится вынужденной при отсутствии свободных площадей для рукавных фильтров». Очевидно, что в этом случае также требуются дополнительные затраты на сооружение цикла очистки воды и обезвоживания шлама для дальнейшего использования; использование земельного фонда предприятия под сооружение шламонакопителей и др.

При оценке затрат электроэнергии при производстве жидкой стали в электросталеплавильном производстве в большинстве случаев используется показатель расхода электроэнергии непосредственно в процессе выплавки в ДСП. Вместе с тем, транспортировка отходящих газов и использование оборудования для их удаления в окружающую среду являются одними из самых энергоемких после установок по производству стали. По данным работы [3] для удаления из печи уходящих газов мощность приводов и двигателей составляет около 0,5–5 МВт. В качестве примера в работе приведен сравнительный расчет энергозатрат на производство жидкой стали в печи и очистку отходящих газов применительно к 100-тонной ДСП. При использовании основных вентиляторов (на примере рукавных фильтров) мощностью 3,5 МВт энергозатраты на систему уходящих газов составляют 26,9 кВт·ч/т стали или около 7 % от расхода электроэнергии при выплавке стали. Учитывая, что реальный расход электроэнергии на систему газоочистки может колебаться от 20 до 60 кВт·ч/т, энергозатраты на очистку газов могут составлять до 20 % в зависимости от ведения технологического процесса, используемой металлошихты, начальной температуры лома и других факторов. Аналогичные данные по расходу электроэнергии на очистку уходящих газов приведены в работе [4]. Показано, что при комбинированной схеме отвода и улавливания газов с зонтами рас-

ход электроэнергии составляет 75 кВт·ч/т или 15 % от расхода на технологические нужды. В этой же работе предлагается учитывать удельные суммарные затраты энергии и количества образовавшихся отходов, отнесенные к единице массы (обычно к 1 т) выплавленной стали или полученного проката, т.е. энергоэкологический показатель. С этой точки зрения для оценки эффективности разных способов очистки предложен следующий показатель

$$Z = 0,2aW/(kA),$$

где a – коэффициент амортизационных и побочных энергозатрат; W – затраты энергии в системе очистки; Вт·ч/м²; k – коэффициент очистки; A – показатель агрессивности вредного вещества (за основу взято СО).

В соответствии с приведенной формулой показатель для труб Вентури составляет 0,132, для электрофильтров – 0,017, для рукавных фильтров – 0,015 г/м².

Из приведенных данных очевидны энергетические преимущества сухого метода очистки газов.

Выбор конкретного сухого способа пылеулавливания: механического (в рукавных фильтрах) или электрического (в электрофильтрах) для электросталеплавильного производства обоснован в работе [5]. Отмечено, что для условий очистки газов после ДСП возникает превышение критических показателей удельного электросопротивления пыли, что в итоге приводит к снижению эффективности использования электрофильтров.

Современная структура газоочистки с тканевыми фильтрами для ДСП включает совмещенные схемы при удалении из печи через самостоятельный тракт технологических газов и через вытяжное устройство над печью неорганизованных выбросов. При этом, как правило, газы от агрегатов «печь-ковш» включаются в состав газоочистки системы дуговой печи. Важнейшим вопросом является предварительная подготовка, или в конкретном случае снижение температуры перед тканевыми фильтрами до уровня 110–130 °С. Для этой цели используются конвективные теплообменники, охлаждаемая поверхность начального участка технологического тракта, воздушное охлаждение и др. Охлаждение начального участка газового тракта является достаточно эффективным. В качестве примера

в работе [5] приведены данные исследований известной компании «Данарк». Результаты свидетельствуют о том, что удлинение водоохлаждаемой части газохода до 70 м позволяет для высокомоощных дуговых сталеплавильных печей добиваться активного охлаждения технологических газов при объемном расходе 150 000 м³/ч до температур 540–550 °С. В дальнейшем эффективность водоохлаждения существенно снижается и в этом случае необходимо применение других способов охлаждения. В качестве альтернативного способа снижения температуры газов является испарительное охлаждение с помощью впрыска воды. Например, использование многоярусной системы кондиционирования [6] обеспечивает охлаждение 150 000–200 000 м³/ч газов на 400–900 градусов при достаточно ограниченной протяженности водоохлаждаемой части газохода (10–12 м). Кроме того, испарительное охлаждение способствует нейтрализации диоксинов. Однако при использовании кондиционирования необходимо учитывать изменение производительности дуговых печей.

Особого внимания заслуживают вопросы удаления неорганизованных выбросов. Большинство разработок совмещенных газоочистных систем периода 1970–1980-х годов в СНГ характеризуются низкой эффективностью (на уровне 30–70 %) аспирационных систем, некачественным конструктивным исполнением и др. Следует отметить, что указанная проблема существует и для зарубежных систем газоочистки.

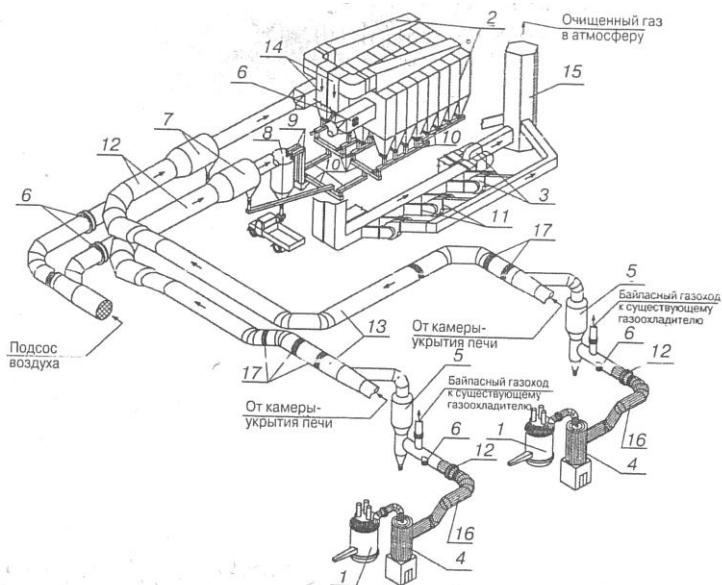
Автор работы [5] на основании выполненного анализа делает однозначные выводы для очистки дымовых газов ДСП большой емкости:

- для дуговых печей, работающих на металлоломе, оптимальным вариантом газоочистки является механический способ с использованием тканевых фильтров;
- испарительное охлаждение является высокоэффективным и гибким способом управления температурным режимом пылегазового потока;
- вопросы газоочистки неорганизованных выбросов требуют дальнейшего развития и проработки;
- для улавливания неорганизованных выбросов целесообразно использовать крышные зонты.

В качестве примеров обоснованности приведенных выводов рассмотрим результаты промышленного внедрения систем газоочистки для ведущих металлургических предприятий стран СНГ, на которых функционирует электросталеплавильное производство.

На ОАО «Оскольский электрометаллургический завод» эксплуатируются четыре дуговых печи ДСП-150. В связи с тем, что системы газоочистки этих печей морально и физически устарели (установлены в 1980-х гг.), что вызывало превышение концентрации пыли над предельно-допустимыми, были осуществлены работы по ее модернизации [7, 8]. До выполнения реконструкции основное газоудаление осуществлялось через четвертое отверстие в печи, неорганизованные выбросы – от пылезащитного кожуха. Принципиальным в модернизации являлось использование спреерного испарительного охлаждения газов за счет впрыска воды при отводе газов через четвертое отверстие печи; смешивание технологических и неорганизованных выбросов в циклоне перед поступлением в рукавные фильтры и улавливание крупных раскаленных частиц пыли для защиты рукавных фильтров от прогара; использование фильтров ФРИП (фильтров с импульсной очисткой); автоматизированная система регулирования давления перед сводом печи и другие мероприятия. Модернизированные системы газоочистки представлены на рисунке 1.

Следует также отметить, что рукавные фильтры фирмы «QUADEngineering» (Канада) выполнены в виде модулей, т.е. включают 16 полностью автономных секций, регенерация фильтров осуществляется осушенным сжатым воздухом. Введенная в 2013 г. первая очередь газоочистки (для ДСП № 3 и ДСП № 4) позволила повысить показатели выбросов в окружающую атмосферу (остаточная запыленность газов составила 7–8 мг/м³, современные требования по запыленности находятся на уровне 10–20 мг/м³). В 2016 г. была введена аналогичная вторая очередь (модуль) для ДСП-1,2 ОАО «Оскольский электрометаллургический завод».



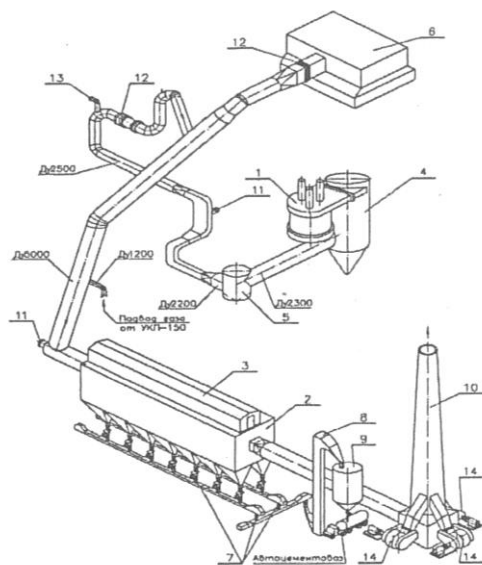
1 – электропечь; 2 – рукавный фильтр; 3 – дымосос; 4 – водоохлаждаемая пылесадительная камера; 5 – спреерная камера с водораспылительным охлаждением технологических газов; 6 – подсосный клапан; 7 – циклон; 8 – сборный бункер пыли; 9 – ковшовый подъемник; 10 – конвейеры; 11 – отключающий клапан; 12 – регулирующий клапан; 13 – газоходы грязного газа; 14 – газоходы чистого газа; 15 – дымовая труба; 16 – водоохлаждаемый газоклад; 17 – компенсаторы

Рисунок 1 – Схема газоочистки дуговых печей ДСП-150 после реконструкции

В шахтных дуговых сталеплавильных печах осуществляют предварительный подогрев лома, что позволяет снизить удельный расход электроэнергии на выплавку 1 т жидкой стали. Вместе с тем, широкое распространение печей такого типа ограничивается экологическими проблемами, и в первую очередь повышенным выделением диоксинов и фуранов. На ОАО «Северсталь» в электросталеплавильном цехе в период 2007–2008 гг. для шахтной печи № 2 осуществлена комплексная модернизация системы очистки отходящих газов. Печь фирмы «FuchsSystemtechnik» (Германия) была введена в эксплуатацию в 2005 г., система газоочистки поставлена фирмой «QUADEngineering». Эксплуатация печи показала низкую

эффективность работы очистной системы с рукавными фильтрами (концентрация пыли при выходе из системы газоочистки составляла 250–300 мг/м³ и более), высокая часть рукавов ежемесячно (на уровне 200 шт.) выходила из строя [9]. Модернизация предполагала использование нового фильтровального материала, отладку системы спреерного охлаждения уходящих газов, совершенствование системы автоматического управления, изменение режима работы рукавных фильтров, увеличение сечения газохода технологических газов и ряд других мероприятий. В результате проведения модернизации остаточное пылесодержание уменьшилось практически в 10 раз и составило 35–40 мг/м³.

Схема реконструированной системы газоочистки приведена на рисунке 2 [9].



- 1 – шахтная печь; 2 – рукавный фильтр с обратной продувкой; 3 – продувочные и отключающие клапаны фильтра; 4 – камера дожигания; 5 – спреерная водораспылительная камера; 6 – крышный зонт; 7 – скребковые конвейеры удаления пыли; 8 – элеватор; 9 – бункер для пыли; 10 – дымовая труба; 11 – подсосный клапан; 12 – регулирующий клапан; 13 – предохранительный клапан; 14 – дымосос

Рисунок 2 – Схема реконструированной системы газоочистки [9]

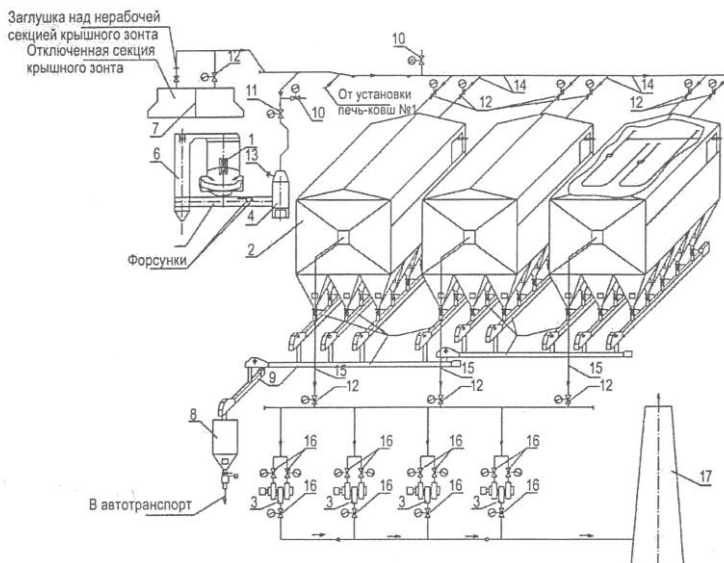
В период 2013–2015 гг. также для шахтной печи № 1 (емкостью 145 т) ОАО «Северсталь» электросталеплавильного цеха организацией УкрНТЦ «Энергосталь» проведена масштабная реконструкция системы газоочистки [7, 8, 10].

Опыт реконструкции газоочистки действующей шахтной печи № 1 фирмы «FuchsSystemtechnik» (Германия) в условиях ОАО «Северсталь» важен и с той точки зрения, что эта печь является первой подобной электросталеплавильной печью в странах СНГ и эксплуатируется с 2000 г. Ранее при газоочистке введенной в эксплуатацию шахтной печи № 1 использовались электрофильтры (три четырехпольных фильтра). Результаты мониторинга окружающей среды и рабочей зоны показали, что концентрация пыли при использовании электрофильтров превышала предельно-допустимые нормы и находилась на уровне 160–380 мг/м³. Кроме того, эксплуатация электрофильтров являлась достаточно трудоемкой. В связи с изложенным были выполнены работы по модернизации системы газоочистки. Следует отметить, что в конкретном случае накоплен достаточно важный опыт в области переоборудования существующих электрофильтров в рукавные, что позволяет снизить в целом стоимость модернизации.

Схема реконструкции системы газоочистки приведена на рисунке 3.

Целесообразно отметить, что подобная реконструкция системы газоочистки электросталеплавильных печей шахтного типа по масштабности и новизне решений осуществлена впервые в мировой практике.

Таким образом, приведенные данные свидетельствуют о том, что основным, наиболее важным и ответственным элементом систем газоочистки, функционирующих на дуговых сталеплавильных печах, являются рукавные фильтры.



1 – шахтная печь № 1; 2 – электрофильтры; 3 – дымосос; 4 – пылеосадительная камера; 5 – водоохлаждаемый газоход со спреерным охлаждением газов за счет впрыска воды; 6 – камера дожигания; 7 – крышный зонт; 8 – сборный бункер пыли; 9 – конвейеры; 10 – подсосные клапаны; 11 – технологический клапан; 12 – отключающие клапаны; 13 – предохранительные клапаны; 14 – газоходы грязного газа; 15 – газоходы чистого газа; 16 – клапаны, поставляемые комплектно с дымососами; 17 – дымовая труба

Рисунок 3 – Схема модернизации системы газоочистки шахтной ДСП-1 ОАО «Северсталь» [7]

Список литературы

- 1. Вальдберг, А.Ю.** Технология пылеулавливания / А.Ю. Вальдберг, Л.М. Исянов, Э.Я. Тарат. – Л.: Машиностроение, 1985. – 192 с.
- 2. Федотова, Е.С.** Расчет выбросов плавильной пыли из сталеплавильных агрегатов / Е.С. Федотова, И.В. Буторина // *Сталь*. – 2017. – № 7. – С. 76–81.
- 3. Knoth Volker.** Решения и возможности при производстве стали / Volker Knoth / *Пылегазоочистка*. – 2014. – № 7. – С. 44–47.
- 4. Шульц, Л.А.** Комплексный подход – основа решения экологических проблем производства стали / Л.А. Шульц // *Экология и промышленность России*. – 2005. – С. 16–19.

5. Лозин, Г.А. Совершенствование структуры газоотводящей системы электросталеплавильного производства / Г.А. Лозин // Сталь. – 2008. – № 4. – С. 84–87.

6. Устройство для кондиционирования технологических газов сталеплавильного производства: пат. 2268949 РФ / Г.А. Лозин [и др.]; дата публ. 27.01.06 // Офиц. бюл. / Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. – 2006. – № 3.

7. Сталинский, Д.В. Новые разработки ГП «УкрНТЦ «Энергосталь» в области систем газоудаления и сухой очистки газов от пыли / Д.В. Сталинский, М.Н. Швец // Общие вопросы промышленной экологии. – 2013. – № 2. – С. 13–21.

8. Сталинский, Д.В. Новые разработки в области систем газоудаления и очистки газов от пыли ГП «УкрНТЦ «Энергосталь» / Д.В. Сталинский, М.Н. Швец // Сталь. – 2013. – № 12. – С. 76–81.

9. Сталинский, Д.В. Опыт УКРГНТЦ «ЭНЕРГОСТАЛЬ» по очистке технологических и аспирационных газов в металлургических производствах / Д.В. Сталинский, М.Н. Швец // Пылегазоочистка. – 2012. – № 3. – С. 10–14.

10. Результаты комплексной реконструкции объединенной газоочистки шахтной печи и установки ковш-печь ОАО «Северсталь» / Д.В. Сталинский [и др.] // Сталь. – 2016. – № 2. – С. 79–81.

УДК 621.511

**И.А. ТРУСОВА, д-р техн. наук,
С.В. КОРНЕЕВ, канд. техн. наук (БНТУ)**

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРИ ВЫПЛАВКЕ СТАЛИ В ВЫСОКОМОЩНЫХ ЭЛЕКТРОДУГОВЫХ ПЕЧАХ. СООБЩЕНИЕ 2. АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ РУКАВНЫХ ФИЛЬТРОВ

Наиболее распространенным методом очистки уходящих газов дуговых сталеплавильных печей является применение рукавных фильтров. В качестве примера длительной и высокоэффективной работы в [1] приведен тип рукавного фильтра с импульсной регенерацией площадью фильтрации 7000 м² (ФРИР-7000), который был