

На правах рукописи

Федотова Екатерина Сергеевна

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫБРОСОВ ПЛАВИЛЬНОЙ ПЫЛИ
ОТ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ АГРЕГАТОВ НА ОСНОВЕ
МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЕЕ ОБРАЗОВАНИЯ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

05.16.07 – «Металлургия техногенных и вторичных ресурсов»

Санкт-Петербург – 2018 г.

Диссертационная работа выполнена на кафедре «Технологии и исследования материалов» Института металлургии, машиностроения и транспорта Санкт-Петербургского Политехнического университета Петра Великого.

Научный руководитель

доктор технических наук,
профессор кафедры
«Технология и исследование материалов»
СПбПУ

Буторина Ирина Викторовна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Выбросы в атмосферный воздух большого количества высокодисперсной плавильной пыли являются одной из главных проблем районов, где расположены металлургические предприятия. Данная пыль образуется при любых операциях с расплавленным металлом и представляет собой опасный отход из-за предельно малого размера частиц и химического состава, основу которого составляют оксиды тяжелых металлов. Потеря металла в виде пыли с ее уносом из агрегата снижает выход годного до 5 %.

Высокая дисперсность плавильной пыли, а также высокое содержание в ней цинка, недопустимого в доменной шихте, создают проблемы с её улавливанием и утилизацией. Практически нерешаемой проблемой является извлечение пыли из шламов при использовании мокрых газоочистных установок. Поэтому плавильная пыль, состоящая преимущественно из оксидов железа и являющаяся ценным вторичным сырьем, практически не перерабатывается и накапливается в хранилищах и шламонакопителях.

Проблема образования токсичной плавильной пыли приобретает в последнее время ещё большую актуальность, в связи с переходом Российской Федерации в 2019 г. на новую систему экологического регулирования, основанную на принципах наилучших доступных технологий (НДТ), а также необходимостью проведения трудоемких и дорогостоящих инструментальных замеров для исследования выбросов пыли.

Степень разработанности темы. В настоящее время существует несколько мнений о механизме образования плавильной пыли, в связи с чем отсутствует единый подход к расчету её выбросов. Выбор пылеулавливающей системы основан на знании основных характеристик выбросов, определяемых сложными инструментальными замерами или с помощью эмпирических уравнений, выведенных для отдельных рассматриваемых случаев и не учитывающих влияния на пылеобразование множества факторов.

Согласно испарительной теории плавильная пыль является результатом испарения веществ в первичной реакционной зоне и последующей конденсации паров в вышерасположенных более холодных участках рабочего пространства печи. По теории диспергационного механизма, главенствующую роль в процессе образования мелкодисперсной пыли играет разрыв пузырей газообразного монооксида углерода при интенсивном кипении сталеплавильной ванны.

При большом количестве экспериментальных данных отсутствует цельная математическая модель процесса, а также методика расчета выбросов плавильной пыли от металлургических печей, необходимая для проведения прикладных экологических расчетов. Недостаточно сведений о характеристиках пыли, которые позволяли бы определить возможности ее использования.

В настоящей работе подробно рассмотрен испарительный механизм образования плавильной пыли, как наиболее пригодный для создания расчетной модели. На механизм образования пыли в процессе разрыва пузырей монооксида углерода была сделана поправка, т.к. создание математического описания столь сложного процесса в настоящий момент весьма затруднено.

Цель работы: создание математического аппарата для анализа, учёта и минимизации выбросов плавильной пыли от сталеплавильных агрегатов.

Задачи исследования:

1. Анализ литературных данных о выбросах плавильной пыли.
2. Разработка математического описания процесса образования сталеплавильной пыли в конвертерных и электродуговых печах.
3. Численное исследование модели; анализ факторов, влияющих на массу и характеристики плавильной пыли.
4. Поиск способов сокращения выбросов и утилизации пыли.
5. Разработка инженерной методики расчета выбросов плавильной пыли из кислородных конвертеров и дуговых сталеплавильных печей.

6. Экспериментальное исследование промышленных выбросов пыли конвертерного и электродугового производства.

Научная новизна диссертационной работы:

1. На основании известных закономерностей процесса дистилляции расплава разработана математическая модель процесса пылеобразования в плавильных печах, дополненная уравнениями для расчета размера и температуры активной зоны испарения в кислородном конвертере и электродуговой печи.

2. На основе разработанной математической модели предложен метод расчета мощности выброса, химического и дисперсного состава плавильной пыли из сталеплавильных агрегатов, а также их изменение в зависимости от времени плавки.

3. Установлено, что решающими факторами в процессе образования плавильной пыли является химический состав расплава, и в первую очередь – содержание в нем примесей, имеющих высокий тепловой эффект окисления, окислительный потенциал контактирующего с ним газа и скорость подвода к поверхности расплава энергии извне.

Практическая значимость результатов работы:

1. Предложенная математическая модель позволяет прогнозировать потери расплава в пыль и разработать рекомендации для сокращения выбросов плавильной пыли в зависимости от состава сплава и типа плавильной печи.

2. Возможность расчета состава выбросов плавильной пыли из сталеплавильных печей позволит корректно подобрать систему очистки выбросов от пыли, а также способ утилизации уловленной пыли.

3. Разработанная инженерная методика расчета выбросов плавильной пыли в атмосферный воздух позволит отказаться от трудоёмких и дорогостоящих экспериментальных способов инвентаризации выбросов.

Основные положения, выносимые на защиту:

- разработана математическая модель процесса пылеобразования;
- создана инженерная методика расчета выбросов плавильной пыли;

- предложены способы сокращения выбросов плавильной пыли.

Достоверность научных результатов. Достоверность положений, выводов и рекомендаций диссертации обеспечиваются корректностью постановки задач исследования и комплексным подходом к их решению; проведенными экспериментальными исследованиями и критическим сравнением полученных данных с результатами других авторов; использованием современного программного обеспечения и аналитического оборудования. Достоверность предложенной инженерной методики подтверждается совпадением расчетных значений с результатами инструментальных замеров на промышленных объектах.

Апробация результатов работы. Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях и семинарах: Выставка «Металл-Экспо–2017», Ежегодная конференция «Новые тенденции рационального использования вторичных ресурсов и проблемы экологии», 13-16 ноября, Москва; XIX Ежегодный Международный Воздушный конгресс «Атмосфера – 2017», 16-17 марта, Санкт-Петербург; Выставка «Металл-Экспо–2016», Ежегодная конференция «Новые тенденции рационального использования вторичных ресурсов и проблемы экологии», 8-9 ноября, Москва; XVI Ежегодный Международный Воздушный конгресс «Атмосфера – 2013», июнь 6-7, Санкт-Петербург; Международная научно-техническая конференция Современные металлические материалы и технологии (СММТ-13), 2013, Санкт-Петербург; Заседание научно-технического совета ОАО «НИИ Атмосфера», 16 ноября, 2012, Санкт-Петербург; Выставка «Металл-Экспо–2012», Ежегодная конференция «Новые тенденции рационального использования вторичных ресурсов и проблемы экологии», 13-16 ноября, Москва.

Публикации. Основные положения диссертации опубликованы в 13 работах, включая 5 статей в журналах, рекомендованных ВАК России.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, выводов, библиографического списка и приложений. Работа

изложена на 217 страницах, содержит 11 таблиц, 72 рисунка. Библиографический список включает 106 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дана общая характеристика диссертационной работы, обоснована актуальность выбранной темы, сформулированы основная цель и задачи исследования.

В первой главе приведен литературный обзор имеющейся информации о характеристиках металлургической пыли, образующейся в сталеплавильных печах различных типов, рассмотрены основные научные теории о механизме образования плавильной пыли. В главе представлены результаты экспериментальных исследований качественного и количественного состава сталеплавильной пыли, данные о характере пылевыноса, дисперсном составе пылевых частиц в различные периоды плавки, а также зависимости некоторых характеристик плавильной пыли от основных параметров плавки. Также приведен обзор существующих способов утилизации сталеплавильной пыли.

На основе анализа накопленного экспериментального материала и обобщения имеющихся данных установлено, что:

1. Плавильная пыль образуется при операциях с жидким расплавом и представляет собой многокомпонентный мелкодисперсный материал, состоящий из частиц сферической формы размером менее 1 мкм, объединенных в агломераты.

2. Содержание оксидов железа в плавильной пыли может достигать 90 %, также в ней присутствуют оксиды других металлов, сульфиды, хлориды, фториды и др.

3. Запыленность отходящих от сталеплавильных печей газов колеблется в широких пределах, максимальные значения наблюдаются в период продувки расплава кислородом и достигают более 1250 г/м³. Общий унос пыли составляет порядка 2-5 % от массы чугуна. Удельное образование пыли в среднем составляет 10-40 кг на 1 т стали.

Во второй главе приведены основные положения теории испарительного образования плавильной пыли и обоснован выбор данного механизма для исследования.

В пользу испарительного механизма образования пылевых частиц свидетельствуют:

- размер частиц менее 1 мкм;
- преимущественно сферическая их форма;
- отличие химического состава пылевых частиц и расплава;
- влияние на степень запыленности отходящих газов температуры реакционной зоны (активной зоны испарения), содержания и скорости выгорания углерода, содержания примесей (в особенности кремния, не образующего газовой фазы над расплавом), параметров дутья.

Принимается, что диспергационный механизм образования пыли также имеет место, и, поскольку он напрямую влияет на площадь активной зоны испарения, на него делается соответствующая поправка.

На основании известных уравнений теории испарения и конденсации жидкостей предложено математическое описание процесса образования пыли, дающее возможность оценить размер, химический состав и массовый выброс пыли. В модель вошли уравнения для расчетов: скорости испарения компонентов расплава с поверхности жидкой ванны, размеров и температур зон выгорания примесей. Полученные результаты хорошо коррелируются с имеющимися экспериментальными данными.

Принимая допущение об испарительном механизме образования плавильной пыли, мощность ее выброса с поверхности расплава M_e , г/с, определялась по формуле

$$M_e = w_d F, \text{ г/с} \quad (1)$$

где F – площадь расплава, м²; w_d – скорость дистилляции, г/(м²·с), учитывающая одновременно процессы испарения и конденсации паров над поверхностью расплава.

Для определения скорости дистилляции металла используется уравнение, полученное на основании кинетической теории газов

$$w_d = 0,5(a_u(p_u - p_{ocm}) - a_k p_k) \cdot 10^3, \quad (2)$$

где p_u , p_k – давление паров металла при температуре испарения и при температуре конденсации соответственно, Па; $p_{ост}$ – остаточное давление паров над расплавом, Па; a_u , a_k – величины, рассчитываемые по уравнениям:

$$a_u = \sqrt{\frac{M}{2\pi RT_u}}, \quad a_k = \sqrt{\frac{M}{2\pi RT_k}} \quad (3)$$

где M – молекулярная масса металла, г/моль; R – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К); T_u – температура поверхности испарения, К; T_k – температура в зоне конденсации паров, К.

Расчетные зависимости (1)-(3) были использованы в настоящей работе для расчета образования плавильной пыли – продукта испарения металла. Для определения температуры и площади поверхности испарения, которые зависят от исходной температуры и химического состава расплава, окислительного потенциала газовой фазы над ним, вида агрегата, где осуществляется процесс, характера операции, было применено математическое моделирование процесса на основе известных расчетных зависимостей.

Для расчета площади поверхности испарения металла в конвертере и ее температуры сделано допущение, что основная часть паров расплава образуется в условно выделенной области наивысших температур, соприкасающейся с газовым пространством печи, называемой реакционной зоной или активной зоной испарения. В кислородном конвертере — это часть расплава, непосредственно контактирующая с кислородной струей, где идут основные реакции рафинирования расплава. Расчет **площади реакционной зоны** конвертера — сложная задача, которой занимались многие ученые. Для определения ее в данной математической модели были выбраны математические зависимости, предложенные В. И. Явойским, полученные им аппроксимацией экспериментальных данных о форме и размере реакционной зоны в конвертере, с использованием критериальных уравнений, согласно которым глубина проникновения кислородной струи в расплав h и диаметр реакционной зоны d , м, в конвертере

$$h = 0,782 \sqrt{\frac{\rho_0}{\rho}} \frac{\omega_0 d_0}{\sqrt{H}} \quad (4)$$

$$d = 2,11 \cdot \sqrt[6]{\frac{\rho_0}{\rho}} \sqrt[3]{\omega_0 d_0} \sqrt{H} \quad (5)$$

где ρ_0 , ω_0 – плотность и скорость кислорода на выходе из сопла, кг/м³ и м/с соответственно; H – расстояние сопла от поверхности ванны, м; ρ – плотность расплава, кг/м³.

В первом приближении можно считать, что поверхность реакционной зоны в конвертере $F_{p.з.}^{KK}$, м², имеет форму полусферы, тогда

$$F_{p.з.}^{KK} = \pi d h \quad (6)$$

Подставив (4) и (5) в (6), получим функцию вида

$$F_{p.з.}^{KK} = K (w_0 d_0)^{\frac{4}{3}} \quad (7)$$

где K – коэффициент, включающий в себя все постоянные величины.

Аппроксимация рассчитанных по этому уравнению данных дала возможность получить формулу для расчета площади реакционной зоны в конвертере

$$F_{p.з.}^{KK} = 0,048 \cdot M_{O_2} + 0,1556 \quad (8)$$

Отметим, что расход кислорода, подаваемого в конвертер

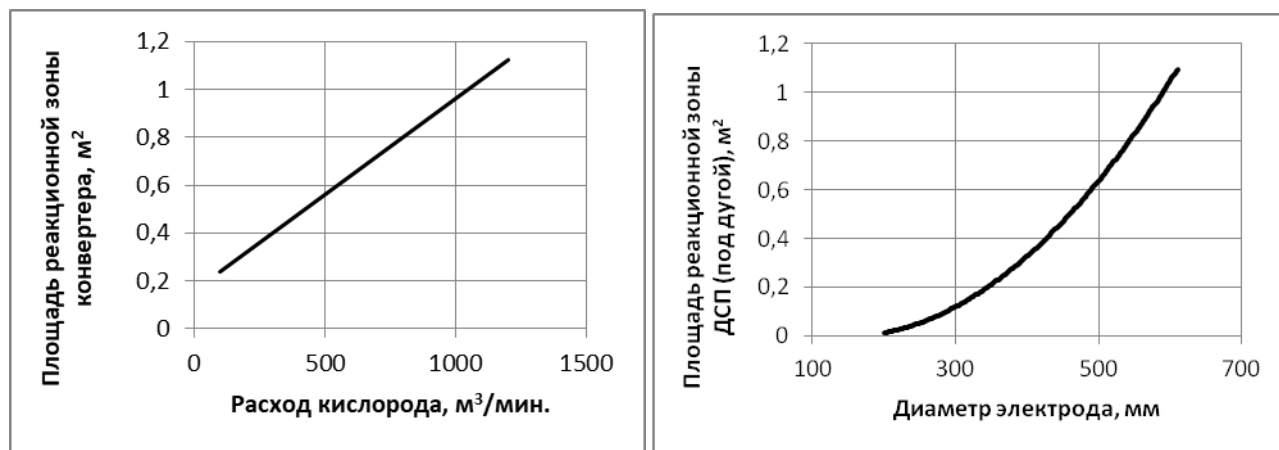
$$M_{O_2} = w_0 \frac{\pi d^2}{4}, \quad (9)$$

т. е. в первом приближении площадь реакционной зоны конвертера будет пропорциональна расходу подаваемого в конвертер кислорода. График зависимости рассчитанной площади реакционной зоны от расхода кислорода на продувку ванны представлен на рис. 1 а.

В электродуговой сталеплавильной печи (ДСП) значительная часть мощности дуги выделяется на площади электродного пятна — углубления в месте соприкосновения дуги с ванной, в связи с этим можно принять, что данная область, называемая горячей зоной ванны, является реакционной зоной ДСП

(рис. 1 б). Наиболее вероятная форма рассматриваемой зоны — шаровой сегмент, в основании которого лежит круг радиусом r_k , м

$$r_k = r_э + l_д \cdot \sin \theta \quad (10)$$



а) кислородный конвертер

б) дуговая сталеплавильная печь

Рисунок 1 – Площадь реакционной зоны (активной зоны испарения)

где $r_э$ – радиус электрода, м; $l_д$ – длина дуги, м; $\theta = 45^\circ - 65^\circ$ – угол наклона столба дуги к оси электрода.

Высота заглубления дуги h_m , м

$$h_m = 3 \cdot 10^{-3} I_д \quad (11)$$

где $I_д$ – сила тока дуги, А.

Тогда площадь реакционной зоны ДСП $F_{p.з.}^{ДСП}$, м²

$$F_{p.з.}^{ДСП} = 2\pi r_k h_m \quad (12)$$

С учетом уравнений (10) и (11) запишем (12) в виде

$$F_{p.з.}^{ДСП} = 6 \cdot 10^{-3} \pi I_д (r_э + l_д \cdot \sin \theta) \quad (13)$$

В период расплавления шихты реакционная зона ДСП включает в себя также электродный "колодец", высота которого уменьшается по мере расплавления лома. Его площадь $F_{p.з.}^{cm}$, м², условно соответствует площади боковой поверхности цилиндра

$$F_{p.з.}^{cm} = 2\pi x r_{эл.ст.} h_{ш} \quad (15)$$

где $r_{эл.ст.}$ – радиус электродного колодца, который в большинстве случаев на 30-40 % больше радиуса электрода; x – эмпирический коэффициент, учитывающий скорость расплавления шихты; $h_{ш}$ – высота слоя шихты, м.

Также в ДСП в период продувки расплава кислородом образуется зона активного испарения, аналогичная реакционной зоне кислородного конвертера.

Провести измерение **температуры реакционной зоны** технически затруднено, поэтому доступный способ определить данную величину – составить тепловой баланс на границе поверхности расплав – газ. Тепловой баланс для активной зоны испарения имеет вид

$$Q_в + Q_{х.р.} = Q_{р.з.} + Q_{Ме} + Q_г \quad (15)$$

где $Q_в$ – количество теплоты, вносимое в печь внешним источником (сжиганием топлива, электрической дугой); $Q_{х.р.}$ – выделяемое при окислении компонентов расплава; $Q_{р.з.}$ – пошедшее на нагрев реакционной зоны; $Q_{Ме}$ – переданное в расплав; $Q_г$ – переданное газу.

Слагаемые теплового баланса можно рассчитать по формулам:

$$Q_{х.р.} = \Delta\tau \sum_{i=1}^n Q_i w_i; \quad (16)$$

$$4Q_{р.з.} = F_{р.з.} h_{р.з.} \rho_M c_M \Delta T; \quad (17)$$

$$Q_{Ме} = \alpha (T - T_{р.з.}) F_{р.з.} \Delta\tau; \quad (18)$$

$$Q_г = 10^{-2} c_{пр} (T_{р.з.}^4 - T_{г.}^4) F_{р.з.} \Delta\tau, \quad (19)$$

где Q_i – тепловой эффект реакции окисления компонента i ; w_i – скорость окисления компонента i ; $h_{р.з.}$ – высота реакционной зоны; ρ_M – плотность металла; c_M – теплоемкость металла; ΔT – изменение температуры реакционной зоны; α – коэффициент теплоотдачи в сталеплавильной ванне; $T_{р.з.}$ – температура реакционной зоны; $T_{г.}$ – температура газа над расплавом; $c_{пр}$ – приведенный коэффициент излучения; $\Delta\tau$ – временной интервал.

У конвертерных печей, работающих без подвода тепла, составляющая внешнего подвода тепла отсутствует, а для электродуговых печей она рассчитывается по формуле

$$Q_{\theta} = c_{np} \left(\frac{T_{\text{дуги}}^4}{100} - \frac{T_{p3}^4}{100} \right) F_{p3} \Delta \tau \quad (20)$$

где $T_{\text{дуги}}$ – температура дуги, которую можно найти по формуле [9]

$$T_{\text{дуги}} = 100 \cdot \sqrt[4]{\frac{0,9 I_{\theta} U_{\theta}}{C_s \cdot d_{\theta} \cdot \pi \cdot l_{\theta}}} \quad (21)$$

где U_{θ} – напряжение на дуге, В; I_{θ} – сила тока, А; C_s – яркость дуги, кд/м².

Если подставить все составляющие теплового баланса в уравнение (15), то получим уравнение четвертой степени относительно температуры реакционной зоны. Для решения этого уравнения использовалась программа РТС "MathCAD", для этого уравнение было представлено в виде

$$AT^4 + BT - C = 0 \quad (22)$$

где $A = c_{np} \tau \cdot 10^{-8}$ (23)

$$B = \rho_{Me} h_{p.з.} c_p + \alpha \tau \quad (24)$$

Для кислородного конвертера

$$C = \rho_{Me} h_{p.з.} c_p T_{Me}^0 + \alpha T_{Me} \tau - \tau \sum w_i Q_i \quad (25)$$

Для дуговой сталеплавильной печи

$$C = c_{np} \cdot \left(\frac{T_{\text{дуги}}}{100} \right)^4 F_{p.з.} \cdot \Delta \tau + \sum (w_i Q_{x.p.i}) \cdot m_{p.з.} \cdot \Delta \tau + c_p \cdot T_{p.з.}^0 \cdot m_{p.з.} + \alpha \cdot T_{Me} \cdot F_{p.з.} \cdot \Delta \tau \quad (26)$$

Для расчета количества тепла, выделившегося в результате химических реакций, необходимо знать скорость окисления примесей. В работе была проведена математическая обработка экспериментальных данных об изменении концентрации примесей в кислородном конвертере и ДСП, получены зависимости между концентрацией вещества в рассматриваемый момент с начальным содержанием компонента в шихте и продолжительностью плавки. С использованием этих зависимостей была определена скорость окисления каждой примеси, формула расчета которой:

$$v_i = k_x \frac{\beta \cdot C_m}{k_x + \beta} \quad (27)$$

где k_x – константа скорости химической реакции; β – коэффициент массопереноса; C_m – концентрация примеси в расплаве. Результаты расчетов скорости выгорания примесей приведены на рис. 2.

С помощью приведенных выше уравнений была рассчитана температура реакционной зоны в 100-т конвертере и ДСП-100.

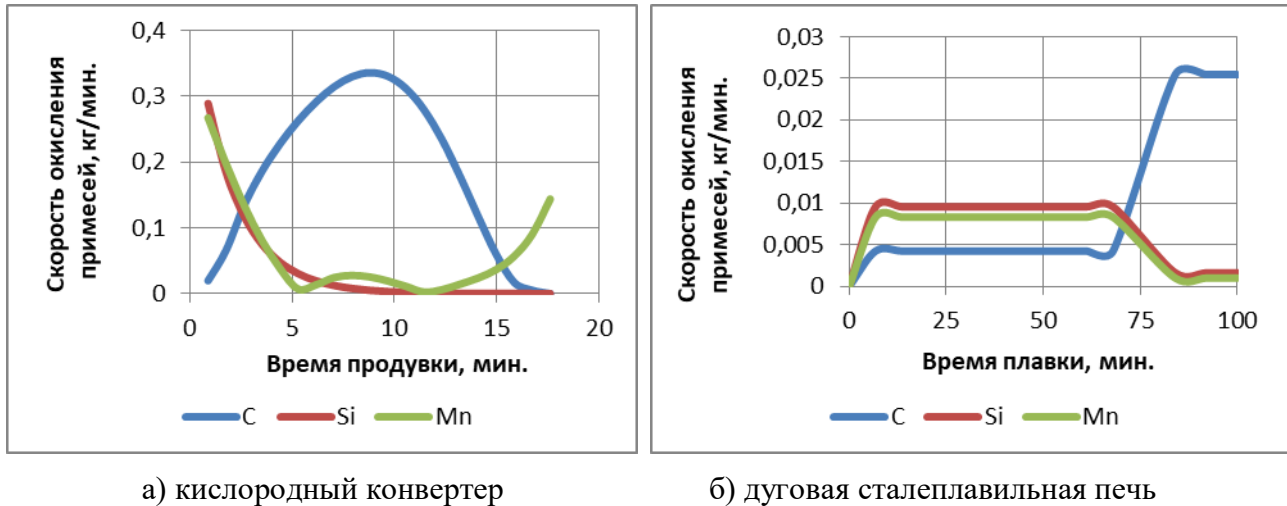


Рис. 2. Скорость окисления примесей.

Входящие в них величины принимались равными: $c_{пр} = 1,4$ и $1,1 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^{-4})$, $\alpha = 12280$ и $6500 \text{ Вт}/\text{м}^2$, начальная концентрация С 1,7 – 3,5 %, Si 0,45 – 0,8 %, начальная температура расплава 1400°C . Результаты расчета температуры реакционной зоны в сталеплавильных агрегатах приведены на рис. 3.

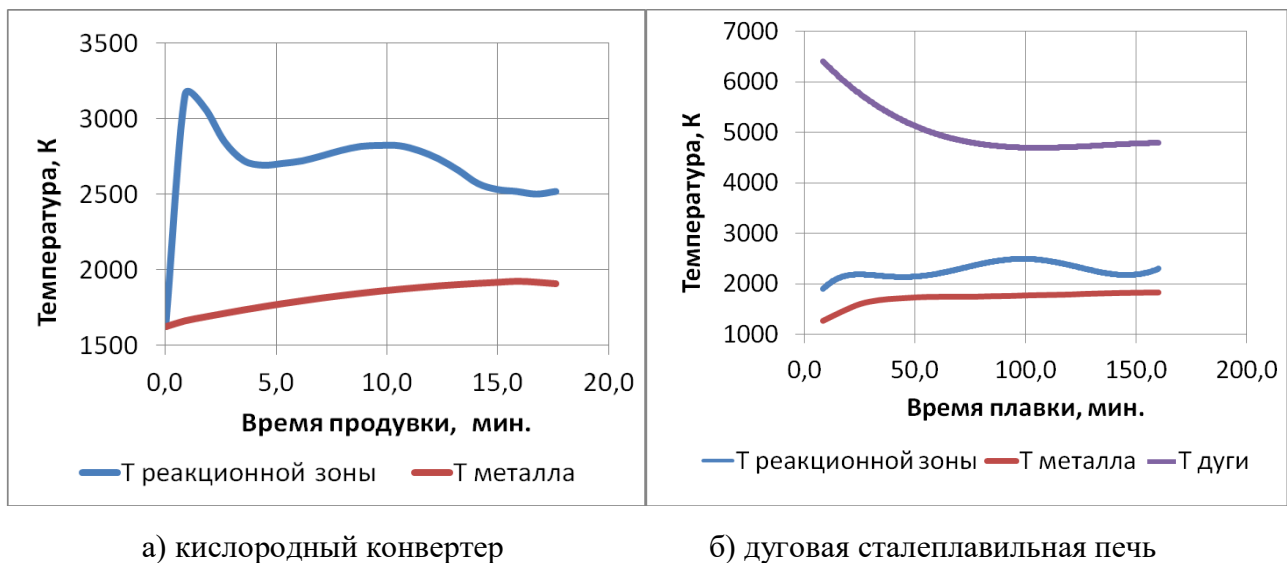


Рисунок 3 – Расчетная температура реакционной зоны

Согласно расчетным данным, средняя температура активной зоны испарения в конвертере в период продувки расплава кислородом колеблется в пределах 2300-2600 °С. В момент наиболее интенсивного выгорания углерода и кремния в начальный период плавки она превышает 2900 °С.

График изменения температуры реакционной зоны кислородного конвертера в зависимости от длительности продувки по характеру аналогичен графику тепловыделения в ходе плавки. Это свидетельствует о том, что в кислородном конвертере тепловыделение при окислении примесей – ключевой фактор, определяющий температуру реакционной зоны и ее изменение.

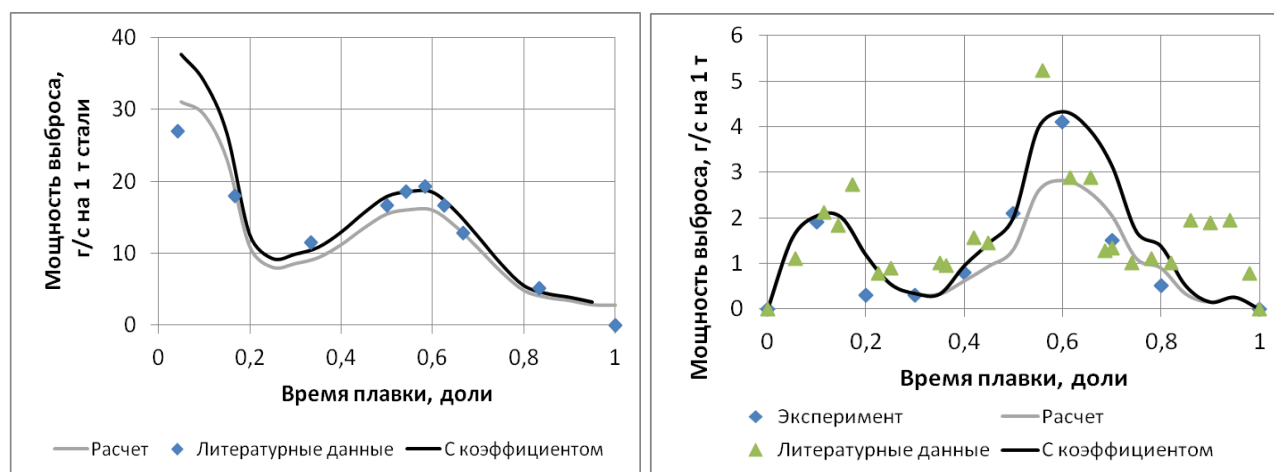
Известно, что в электродуговой печи наиболее интенсивное пылевыведение наблюдается в период продувки, когда весь лом уже расплавлен и выгорают примеси с высоким тепловым эффектом окисления. Это обусловлено тем, что пылевые частицы в данный период плавки образуются в зоне под дугой, в реакционной зоне, образующейся под воздействием кислородной струи, а также в результате разрыва пузырей СО (диспергационного механизма). По результатам расчета установлено, что в этот период плавки температура реакционной зоны в зоне воздействия дуг составляет 2000-2250 °С, а в зоне испарения, созданной кислородной струей, достигает 2300 °С.

На рис. 4 представлены графики изменения удельного выброса пыли при плавке из конвертерной (рис. 4, а) и электродуговой печей (рис. 4, б), рассчитанные по предложенной выше методике. Здесь же приведены экспериментальные данные о выбросах пыли, полученные инструментальными замерами.

Установлено, что расчетные данные дают несколько заниженные результаты, поэтому введена поправка, учитывающая влияние пузырькового механизма на процесс образования пыли. Для кислородного конвертера величина поправки составляет 10 %. В ДСП масса плавильной пыли в период продувки металла увеличивается на 50 %, т.о. общее соотношение массы пыли,

образующейся по испарительному и диспергационному механизму, составляет 68 % и 32 % соответственно.

Расчетные данные после введения поправки хорошо согласуются с экспериментальными, что свидетельствует об адекватности полученного математического описания мощности выбросов из сталеплавильных печей.



а) кислородный конвертер

б) дуговая сталеплавильная печь

Рисунок 4 – Динамика образования плавильной пыли

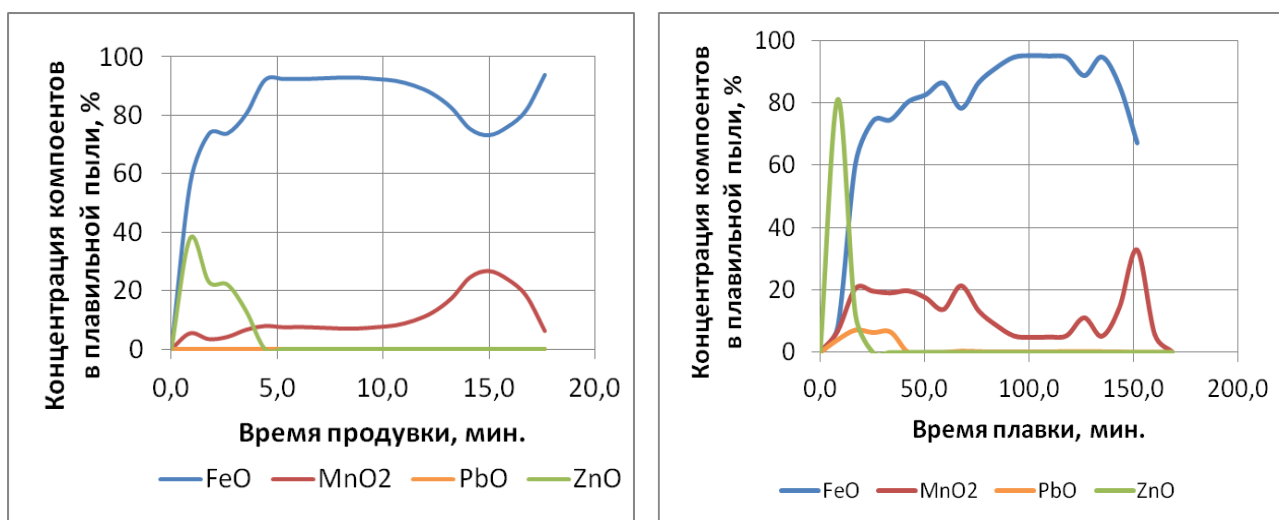
Как видно из рис. 4 (а, б), выброс пыли изменяется по ходу плавки. В начальный момент времени большое образование пыли в конвертере объясняется высокой температурой активной зоны испарения из-за выгорания кремния и марганца, в середине плавки наблюдается повышенный выброс пыли из-за высокой скорости выгорания углерода. Этим Резкий рост выбросов пыли из электроплавильной печи на 90-й минуте плавки, когда после полного расплавления лома начинает интенсивно выгорать углерод, объясняется появлением дополнительной реакционной зоны, созданной кислородной струей, и влиянием пузырькового механизма.

Удельный выброс пыли согласно расчету для конвертера составляет 14,8 кг/т стали, для ДСП – 15,9 кг/т стали, что соответствует средним удельным показателям.

Для определения **химического состава плавильной пыли** (рис. 5) необходимо предварительно определить массу всех основных испарившихся компонентов расплава.

Для расчета **размера капли конденсата паров металла**, образующейся над расплавом, было использовано уравнение Максвелла, согласно которому прирост массы капли в результате конденсации подчиняется уравнению:

$$\frac{dm}{dt} = 4\pi r D (C - C_0) , \quad (28)$$



а) кислородный конвертер

б) дуговая сталеплавильная печь

Рисунок 5 – Изменение химического состава плавильной пыли

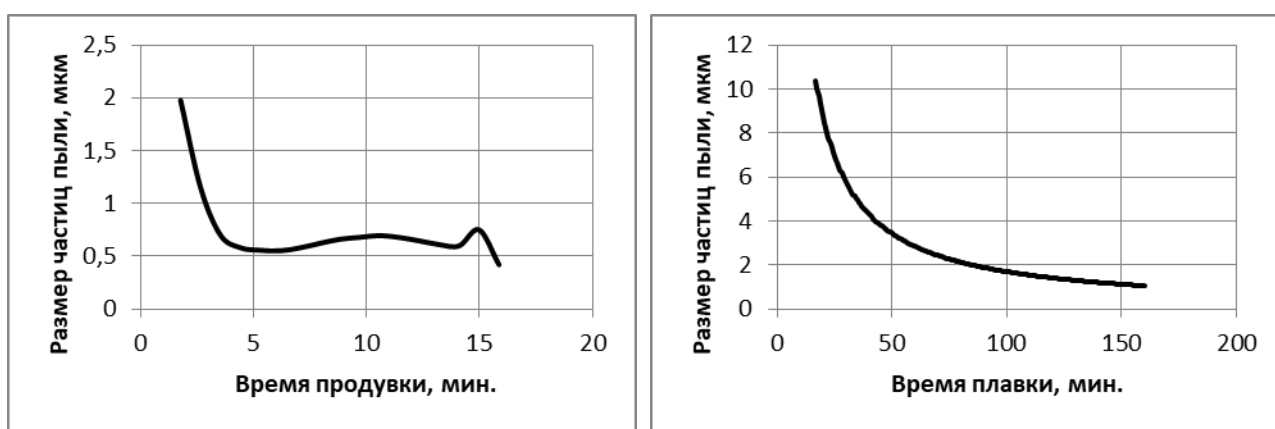
где dm/dt – скорость прироста капли, кг/с; r – ее радиус, м; D – коэффициент диффузии, м²/с; C – концентрация пара в газовой фазе над расплавом, кг/м³; C_0 – концентрация насыщенного пара, кг/м³.

Данное уравнение было решено относительно радиуса капли конденсата путем интегрирования от нуля (пренебрегая размером центра конденсации) до r и от 0 до τ , с использованием уравнения Эйнштейна-Стокса, позволяющего определить коэффициент диффузии паров металла в газовой среде, формулы Сазерленда, учитывающей зависимость вязкости газов от температуры, а также с учетом степени пересыщения, которая определяется по уравнению Кельвина.

Согласно предложенному математическому описанию, к числу факторов, определяющих размеры плавильной пыли относятся: температура поверхности

расплава и ее площадь, температура газа над расплавом, количество центров конденсации и время пребывания частиц в зоне конденсации.

На рис. 6 представлены результаты расчета размера частиц плавильной пыли в зависимости от времени плавки в кислородном конвертере и дуговой сталеплавильной печи. Из данных графиков видно, что чем больше концентрация пыли в газах, т.е. чем выше температура реакционной зоны, и чем выше температура газов, тем крупнее плавильная пыль. Чем меньше концентрация плавильной пыли и ниже температура отходящих газов, тем мельче частицы.

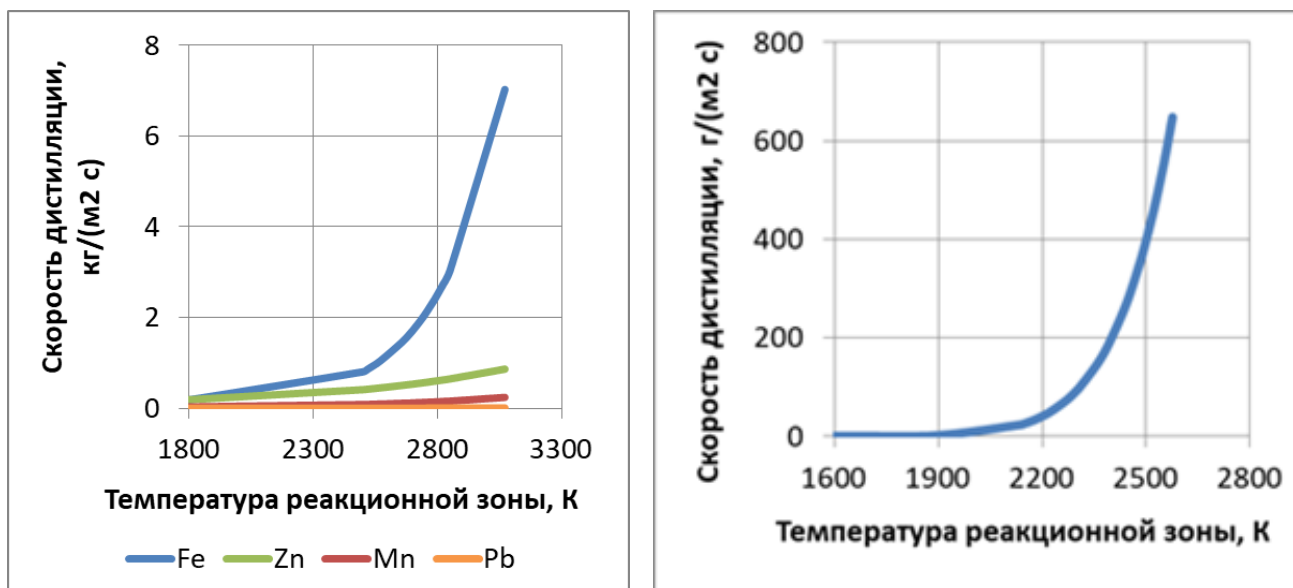


а) кислородный конвертер

б) дуговая сталеплавильная печь

Рисунок 6 – Размер частиц плавильной пыли

На основе анализа математической модели возможно определение способов снижения выбросов плавильной пыли. Численное исследование предложенной математической модели позволило подтвердить расчетным методом, что основным фактором, влияющим на массу образующейся плавильной пыли и скорость испарения компонентов расплава, является температура реакционной зоны (рис. 7), определяемая теплом окисления примесей или подводом энергии извне.



а) в кислородном конвертере

б) в ДСП, для железа

Рисунок 7 – Зависимость скорости испарения от температуры реакционной зоны

В кислородном конвертере наибольшее влияние на температуру реакционной зоны оказывает тепло окисления примесей, которое определяется содержанием в первую очередь углерода и кремния в шихтовых материалах.

Согласно проведенного расчета для кислородного конвертера (рис. 8, а), повышение содержания кремния в шихтовых материалах с 2 % до 3 % приведет к увеличению массы плавильной пыли, выделяющейся из конвертера, на 60 %.

В дуговой сталеплавильной печи величина температуры реакционной зоны определяется мощностью электрической дуги (температурой дуги): уменьшение мощности печи на 5 % приведет к сокращению выбросов плавильной пыли на 15 %, но влияние содержания примесей также имеет место (рис. 8, б).

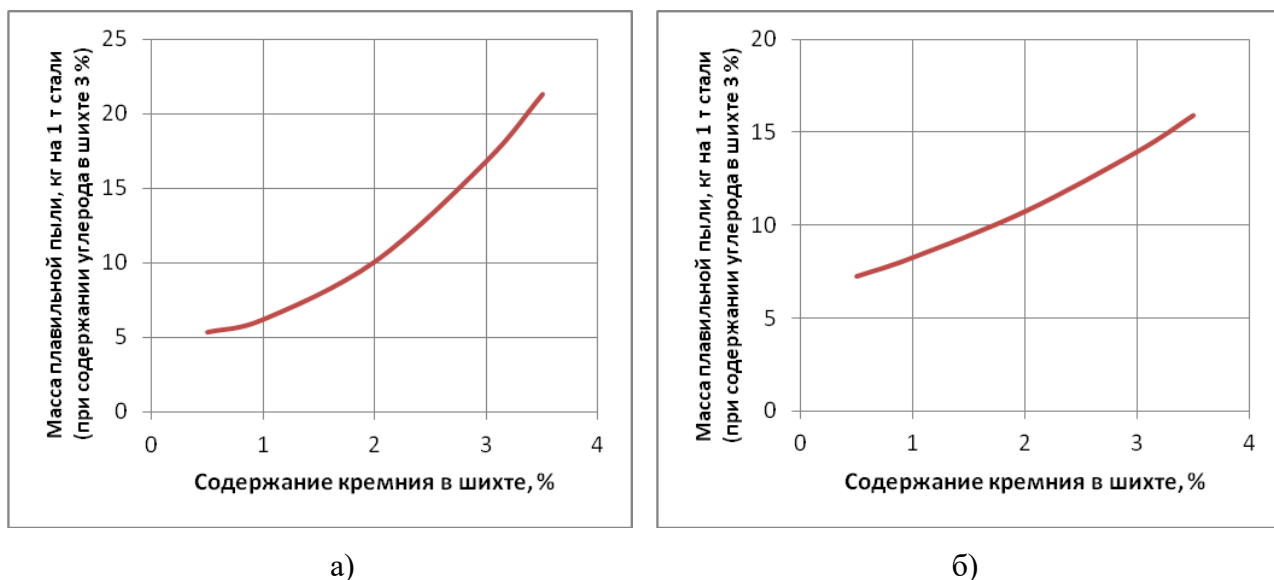


Рисунок 8 – Зависимость массы плавильной пыли от содержания кремния в шихтовых материалах кислородного конвертера (а) и ДСП (б)

В качестве наиболее эффективного способа уменьшения образования плавильной пыли можно рассматривать доменные технологии выплавки низкокремнистого чугуна и его придоменной десиликонизации. Свою эффективность доказали также такие способы снижения температуры реакционной зоны, как подача инертного газа или пара на поверхность расплава, а также улучшение перемешивания расплава.

В третьей главе на основе предложенной в данной работе математической модели образования пыли представлена методика расчета выбросов плавильной пыли от кислородных конвертеров и ДСП различной ёмкости. Для этого был проведен расчет скорости испарения компонентов из сталеплавильных агрегатов при разном составе шихты, и на основании этих расчетов построены номограммы зависимости этой величины от содержания в шихте углерода и кремния (рис. 9).

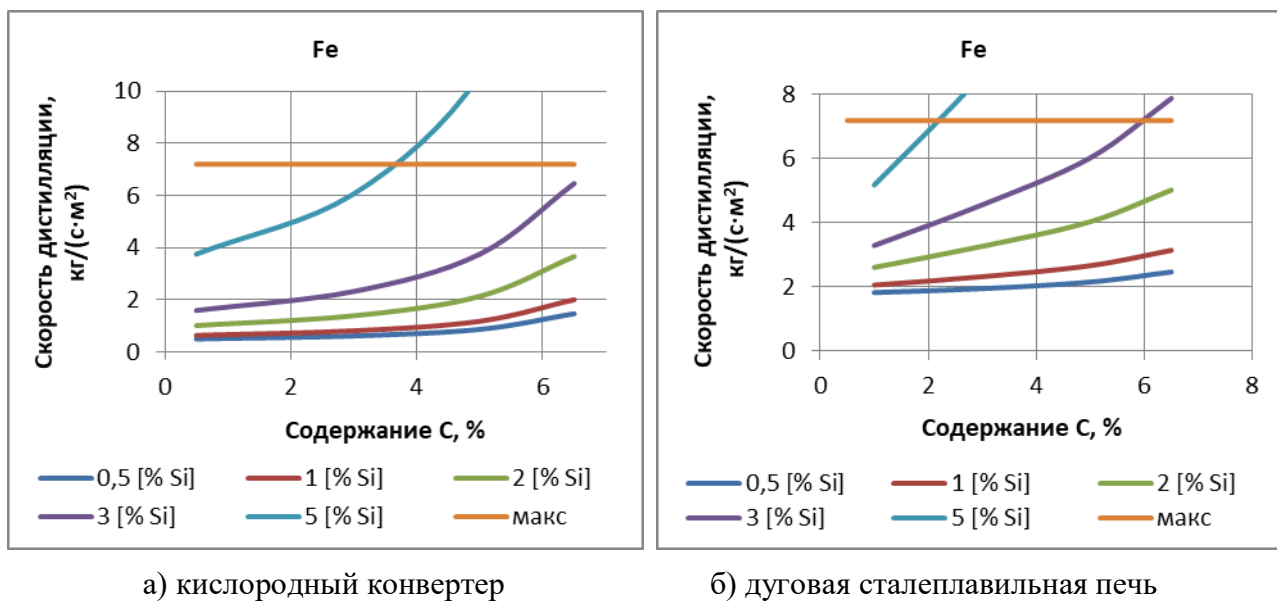


Рисунок 9 – Номограммы для определения скорости испарения железа

Предложенная методика позволяет рассчитать величину максимальных разовых $M_n^{м.р.}$, г/с, и валовых выбросов плавильной пыли $M_n^{вал.}$, т/год, для процессов выплавки различных марок стали.

Для апробации предложенной математической модели в **четвертой главе** диссертационной работы было проведено сопоставление полученных результатов с данными инструментальных измерений выбросов пыли, лабораторных исследований экспериментальных образцов, обобщенными данными из литературных источников и новейших публикаций.

Результаты инструментальных измерений получены в результате исследовательских работ совместно с научно-исследовательским институтом Охраны атмосферного воздуха АО «НИИ Атмосфера».

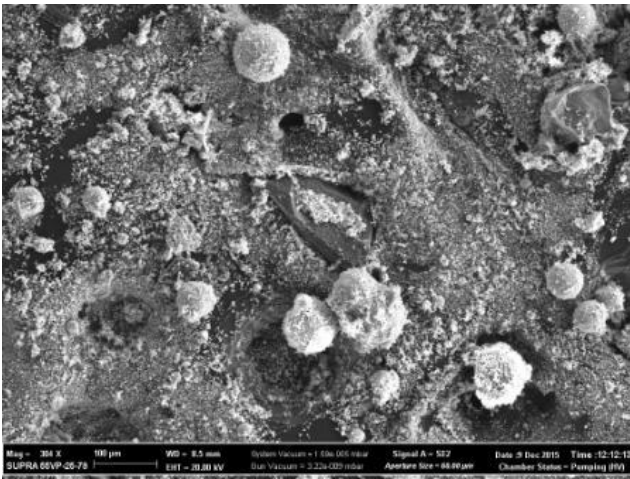
Для определения мощности выбросов (г/с) и валового показателя образования пыли (т/год) от сталеплавильных печей различной емкости аккредитованной лабораторией был произведен отбор проб пыли. Измерение параметров газопылевых потоков и отбор проб проводили в соответствии с требованиями ГОСТ 17.2.4.06, ГОСТ 17.2.4.07, ГОСТ Р 50820, ГОСТ Р 8.563, РД 52.04.59 и Методическими рекомендациями по отбору проб при определении концентраций взвешенных частиц (пыли) в выбросах

промышленных предприятия ПНДФ 12.1.2-99. Автором работы было проведено исследование формы и химического состава частиц пыли с помощью электронного сканирующего микроскопа Supra 55VP-25-78 фирмы Carl Zeiss. Результаты исследования приведены на рис. 10.

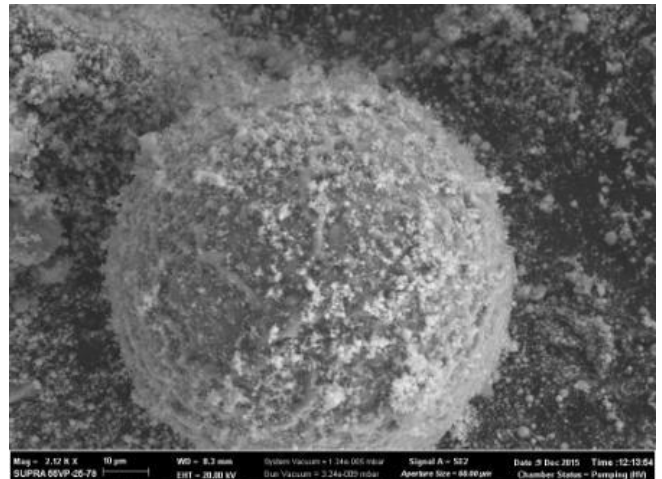
Определение гранулометрического состава пыли было произведено с помощью ситового анализа для отсева крупной фракции и оценки ее доли, а для частиц менее 200 мкм – с помощью лазерного анализатора размеров частиц «Микросайзер–201». Анализ полученных результатов демонстрирует преобладание в навеске плавильной пыли частиц размером менее 3 мкм, что совпадает с литературными данными.

График распределения частиц по размерам для навески пыли ДСП имеет двухмодальный характер. Первый максимум соответствует размеру частиц около 1 мкм, второй – 15 мкм. Соотношение масс данных двух частей навески составляет 70 % и 30 % соответственно, что может служить подтверждением влияния испарительного и пузырькового механизмов на процесс образования плавильной пыли.

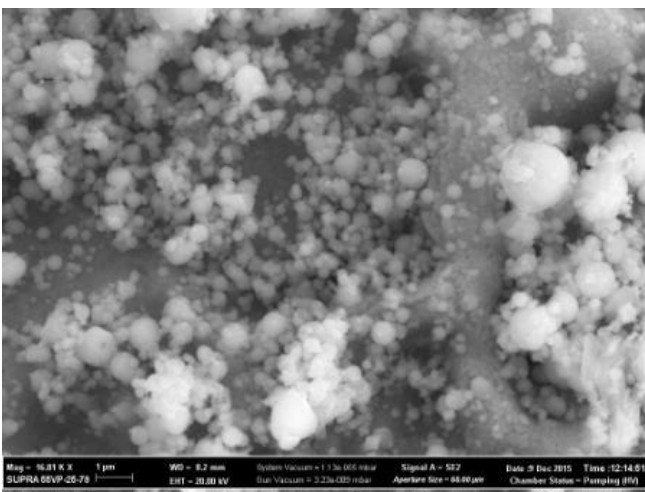
Для оценки возможности использования плавильной пыли было проведено экспериментальное исследование образца плавильной пыли, отобранной из газоочистки дуговой сталеплавильной печи. Опыт показал, что образец пыли не пригоден для использования без дополнительной обработки в качестве сырья для порошковой металлургии. Экономически выгодным путем рециклинга плавильной пыли является ее использование в качестве пигментов для красок и бетонов.



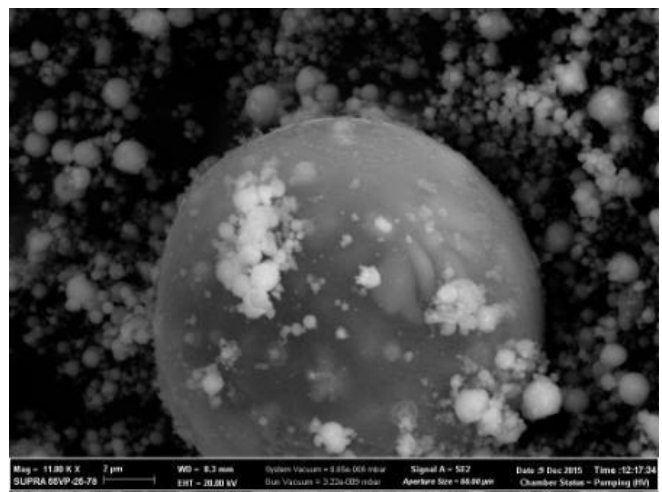
а). Общий вид исследуемого образца



б). Конгломерат мельчайших частиц



в). Мельчайшие частицы, образующие конгломерат



г). Капля металла

Рисунок 10 – Плавильная пыль от ДСП-100 при различном увеличении

Также был исследован процесс брикетирования плавильной пыли со связующими веществами и последующий переплав в металлургических печах — один из наиболее универсальных способов утилизации мелкодисперсных отходов, которые по своему агрегатному физическому состоянию непригодны для непосредственного использования в технологических процессах и аппаратах.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. На основе известных постулатов кинетической теории газов была составлена математическая модель процесса образования плавильной пыли, учитывающая влияние на процесс пылеобразования сразу двух механизмов: испарительного и диспергационного. Установлена определяющая роль испарения на процесс образования плавильной пыли, а влияние пузырькового механизма учтено соответствующим поправочным коэффициентом. Данная поправка была выведена путем составления расчетных и экспериментальных данных. Для ДСП соотношение массы плавильной пыли, образующейся в результате испарения и разрыва пузырей СО, составляет соответственно 68 % и 32 %. Данный факт также подтверждается экспериментальным исследованием дисперсного состава навески пыли, демонстрирующим аналогичное соотношение относительно мелких (менее 5 мкм) и более крупных (около 10 мкм).

2. Разработанная математическая модель позволяет определять массу образующейся пыли, ее химический и дисперсный состав и динамику данных параметров в зависимости от времени плавки.

3. В модель вошли известные уравнения скорости дистилляции расплава и размера реакционных зон плавки и разработанные автором расчетные уравнения для определения температуры активных зон испарения с учетом скорости выгорания примесей, а также уравнение Максвелла, определяющее рост капель конденсата

4. Адекватность предложенной математической модели подтверждена сравнением полученных расчетных данных с экспериментальными, полученными путем отбора проб пыли.

5. Численным исследованием математической модели образования плавильной пыли было установлено, что:

— мощность выброса плавильной пыли из сталеплавильных печей и ее химический состав изменяется по ходу плавки;

- основным фактором, влияющим на массу образующейся плавильной пыли, является температура реакционной зоны, определяемая теплом окисления примесей или подводом энергии извне;

- в кислородном конвертере наибольшее влияние на температуру реакционной зоны оказывает тепло окисления примесей, которое определяется содержанием углерода и кремния. В дуговой сталеплавильной печи величина температура реакционной зоны определяется мощностью электрической дуги (температурой дуги);

- повышенный выброс плавильной пыли из конвертеров, работающих на территории РФ, объясняется переплавом высококремнистого чугуна, а из электродуговых печей – эксплуатацией печей переменного тока;

- для снижения выбросов плавильной пыли следует проводить мероприятия по уменьшению температуры реакционной зоны: улучшение перемешивания расплава, использование шихтовых материалов с низким содержанием кремния и др.

6. Получение графика изменения химического состава в зависимости от времени плавки открывает возможности нахождения новых способов утилизации плавильной пыли. Наглядно показано, что легкоплавкие компоненты испаряются в начальный период плавки, т.е. при низких температурах реакционной зоны выделяется пыль, обогащенная цинком и свинцом.

7. Показано, что основным фактором, влияющим на размер частиц плавильной пыли, является температура поверхности расплава, определяющая концентрацию паров металла в газовой фазе. При росте этой температуры одновременно увеличивается выброс пыли и ее размер.

8. Результаты расчета размера частиц пыли подтверждают гипотезу о преобладании в рабочем пространстве сталеплавильного агрегата частиц пыли с медианным диаметром менее 1 мкм.

9. На основании расчетных данных составлена упрощенная методика определения мощности выбросов плавильной пыли из

сталеплавильных печей, исходя из химсостава шихты и вида плавильного агрегата.

10. Предлагаемая методика может быть адаптирована для расчета характеристик выбросов от любых плавильных печей в черной и цветной металлургии.

Основные результаты диссертации представлены в публикациях:

Статьи в научных изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Федотова Е.С., Буторина И.В. Расчет выбросов плавильной пыли из сталеплавильных агрегатов // Сталь. – 2017. – № 7. – С. 76–81.

2. Butorina I.V., Fedotova E.S. Role of evaporation in the formation of smelting dust // Steel in Translation. – 2016. – Vol. 46. – Issue 6. – P. 447-452.

Версия: Буторина И.В., Федотова Е.С. Роль испарительного механизма в образовании плавильной пыли // Сталь. – 2016. – № 6. – С. 90–94.

3. Буторина И.В., Федотова Е.С. Плавильная пыль – токсичное вещество и ценное строительное сырье // Сталь. – 2014. – № 12. – С. 97-99.

4. Емельянова¹ Е.С., Буторина И.В. Образование и способы снижения выбросов пыли при получении ферросплавов // Черные металлы. – 2012. – № 3–С. 21-25.

5. Butorina I.V., Emel'yanova E.S. Evaluating the feasibility of recycling steelmaking dust in cupolas // Metallurgist. – 2011. – Vol. 54. – Iss. 9. – P. 682-685.

Версия: Буторина И.В., Емельянова Е.С. Оценка возможности переработки сталеплавильной пыли в вагранках // Металлург. – 2010. – № 10. – С. 54-56.

Другие публикации:

1. Федотова Е.С., Буторина И.В. Расчет химического состава плавильной пыли из сталеплавильных агрегатов // Сб. Материалов Международной конференции «Новые тенденции рационального использования вторичных ресурсов и проблемы экологии». – М. – 2017.

2. Федотова Е.С., Буторина И.В. К методологии расчета выбросов плавильной металлургической пыли. Сборник трудов НИИ Атмосфера // СПб.: Изд-во Политехнического Университета, 2017 – С. 54-56.

3. Буторина И.В., Федотова Е.С. Методика расчета выбросов плавильной пыли от металлургических печей // Сб. Материалов

¹ Девичья фамилия Федотовой Е.С.

Международной конференции «Новые тенденции рационального использования вторичных ресурсов и проблемы экологии». – М. – 2016.

4. Буторина И.В., Федотова Е.С. Плави́льная пыль – нанопигмент для строительных материалов // Сб. трудов МНТК «Нанотехнологии функциональных материалов». – СПб. – 2014.

5. Буторина И.В., Федотова Е.С. Математическая модель образования дисперсной фазы в процессе испарения // Сб. материалов 10-й Международной научно-технической конференции «Современные металлические материалы и технологии» (СММТ 13). – М. – 2013.

6. Буренин Н.С., Федотова Е.С. К оценке выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух от сталеплавильного производства // Сборник трудов НИИ Атмосфера. – 2013. – С. 37-45.

7. Буторина И.В., Федотова Е.С. К вопросу о механизме образования плави́льной пыли // Сборник трудов Международной конференции молодых ученых «Новые тенденции рационального использования вторичных ресурсов и проблемы экологии». – М. – 2012.

8. Буторина И.В., Емельянова Е.С. Влияние доли лома на экологические показатели производства стали // Сборник трудов Международной конференции молодых ученых «Новые тенденции рационального использования вторичных ресурсов и проблемы экологии». – М. – 2012.