

И. Г. Яковлева /д. т. н./, А. А. Петрик

Запорожская государственная инженерная академия, г. Запорожье, Украина
e-mail: yakovleva@zgia.zp.ua; iternel17@mail.ru

Исследование влияния параметров продувки металла кислородом в конвертере на процесс пылеобразования испарительного происхождения

I. G. Jakovleva /Dr. Sci. (Tech.)/, A. A. Petrik

Zaporizhzhya State Engineering Academy,
Zaporozhye, Ukraine
e-mail: yakovleva@zgia.zp.ua; iternel17@mail.ru

The influence of the oxygen mode in the steel melting process on the process of the dust emission vaporization origin

Цель. Определение зависимости массы пыли в отходящих газах от параметров продувки конвертерной ванны кислородом.

Методика. Достижение поставленной цели решалось путем:

- рассмотрения механизма образования пыли при продувке ванны сталеплавильного агрегата кислородом;
- установления расчетных зависимостей и ключевых параметров для определения интенсивности пылевыделения.

Результаты. На основании данных изучения взаимодействия встречных массопотоков кислорода в газовой фазе и паров конденсированных фаз на поверхности горения металла, покрытого оксидной пленкой в сталеплавильных агрегатах, проведены исследования и проанализированы вопросы процесса пылеобразования при продувке расплава струей кислорода в сталеплавильной ванне с позиции физикогидродинамических и теплофизических особенностей состояния реакционной зоны. На основе моделирования получена зависимость интенсивности испарения железа от температуры в реакционной зоне.

Научная новизна. Получена эмпирическая зависимость интенсивности пылевыделения от теплофизических параметров реакционной зоны.

Практическая значимость. Результаты исследований позволят вплотную подойти к оптимизации теплового режима и интенсивности продувки ванны кислородом для достижения минимальных выбросов пыли в окружающую среду. (Ил. 3. Табл. 1. Библиогр.: 10 назв.)

Ключевые слова: конвертер, парциальное давление, температура, реакционная зона, энергия, интенсивность продувки, кислород, испарение, коэффициент массопереноса.

Постановка проблемы. Для создания эффективных режимов выплавки стали сталеплавильного агрегата необходимо учесть экологические аспекты его работы, в частности количество пыли, образовавшееся при продувке расплава кислородом.

При исследовании процесса пылеобразования необходимо рассматривать раздельное определение количества пыли механического (брызги) и испарительного (бурый дым) происхождения.

Процесс пылеобразования изучали на примере 160-т конвертера.

В данной работе выполнено исследование механизма пылеобразования испарительного (бурый дым) происхождения.

Формулировка цели. Целью исследования является определение зависимости массы пыли от параметров продувки конвертерной ванны кислородом.

Для достижения этой цели решались следующие задачи:

- рассмотреть механизм образования пыли при продувке ванны сталеплавильного агрегата кислородом;
- установить расчетные зависимости и ключевые параметры для определения количества пылевыделения.

Изложение основного материала. В настоящее время на основе современных взглядов на механизм реакций при продувке ванны кислородом [1; 4] представляется возможным деталь-

но объяснить влияние содержания углерода в металле на интенсивность испарения железа при продувке.

Вопросу горения металла в окислительном газе посвящен ряд работ. Горение металла в окислительном газе сопровождается выделением дыма. Существуют различные теории дымообразования. Согласно [1] наиболее вероятной причиной является испарение веществ в реакционной зоне при взаимодействии встречных массопотоков кислорода i_o в газовой фазе Γ и паров конденсированных фаз на поверхности горения металла M , покрытого окисной пленкой O (рис. 1а). В результате испарения окислов железа и металла создается пылевыведение удельной интенсивности i_{FeO} и i_{Fe} соответственно. Пары железа должны окисляться во встречном потоке кислорода.

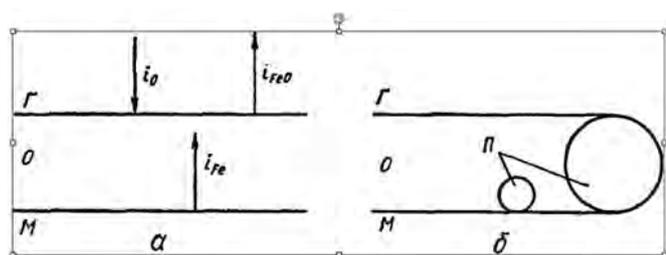


Рис. 1. Схема массопотоков при испарении с поверхности горящего металла

Процесс значительно усложняется по сравнению с приведенной схемой массопотоков при наличии в горящем металле элементов, дающих газообразные продукты окисления. В первую очередь это относится к углероду. При тотальном горении металла на границе раздела «металл – оксидная пленка» ($M - O$) сгорающий углерод образует пузырьки газа Π , согласно экспериментальным данным [2–5] имеющие различные величины и форму, которые, всплывая и нарастая в объеме, выходят через оксидную пленку O в газовую фазу Γ (рис. 1б). Величина этих объемов весьма мала, что создает значительную поверхность их контакта в первую очередь с окисной фазой. Таким образом, фактически удельное пылевыведение происходит не с поверхности металлической (M) и окисной (O) фаз, а со значительно большей поверхности их раздела с газовыми объемами продуктов горения углерода, т. е. с объема пузырьки оксидов. Последнее и определяет удельную интенсивность пылевыведения i_{FeO} и i_{Fe} .

В рассматриваемых условиях более легкокипящей фазой являются, по-видимому, оксиды железа. Следовательно, их парциальное давление на поверхности горения (испарения) близко к насыщению, в то время как парциальное да-

вление испаряющегося железа в пять – десять раз меньше. Удельная интенсивность испарения i_i , $кг/м^3$ испаряющейся газовой фазы определяется выражением:

$$i_i = \frac{\beta_i}{RT} p_i, \quad (1)$$

где β_i – коэффициент массопереноса от поверхности испарения в газовую фазу; R – универсальная газовая постоянная; p_i – равновесное парциальное давление испаряющейся фазы при температуре зоны продувки, Па; T – температура, К.

Интенсивность потерь массы испаряющейся фазы в единицу времени:

$$m_i = i_i \cdot F_i, \quad (2)$$

где F_i – площадь поверхности испарения i -й фазы, $м^2$.

Так как $p_{FeO} > p_{Fe}$ а $F_{FeO} > F_{Fe}$ (согласно схеме, приведенной на рис. 1б), то и пылеунос происходит в основном в результате испарения оксидов железа. Перенос продуктов испарения от поверхности горения в более «холодные» участки газовой фазы (O_2 , CO) сопровождается в дальнейшем (при $t < t_{крит}$) конденсацией паров. В результате конденсации образуются частицы пыли размером менее 10^{-6} м.

Такой малый размер частиц пыли в уходящих газах является признаком того, что они образовались в результате испарения.

Однако на основе данных [3; 4; 7; 8] о присоединенной массе капель металла к струе кислорода и о весьма малых размерах этих капель, можно предполагать, что суммарная поверхность контакта струи кислорода с каплями металла весьма большая. Известная в практике сталеплавильного производства интенсивность испарения железа (около 1 кг/с) реализуется при весьма малых перепадах концентраций ΔC_{Fe} . Парциальное давление паров железа в газовой фазе зоны продувки p_{Fe} пропорциональное по закону Дальтона массе паров железа, близко к равновесной упругости паров железа, которая, в свою очередь, является функцией температуры зоны продувки $T_{з.п}$ [4].

Высокие температуры, развивающиеся в первичной зоне при взаимодействии окислительного дутья с каплями металла, вызывают значительное испарение железа и содержащихся в нем элементов, оксидов железа и других оксидов.

При продувке расплава технически чистым кислородом температура в первичной зоне взаимодействия составляет 2373–2773 К.

Согласно [4] испарение чистого железа описывается уравнением фазового преобразования:

$$[\text{Fe}] \rightarrow \{\text{Fe}\}, \lg(p_{\text{Fe}}) = -\frac{18280}{T_{\text{зп}}} + 5,86. \quad (3)$$

Оксиды железа испаряются в соответствии с уравнением:

$$(\text{FeO}) \rightarrow \{\text{FeO}\}, \lg(p_{\text{FeO}}) = -\frac{21000}{T_{\text{зп}}} + 7,54. \quad (4)$$

При сгорании капля металла в первичной зоне взаимодействия вместе с другими элементами сгорает и углерод, в результате чего образуется определенный объем газообразных продуктов горения, который уходит от границы раздела «горящая капля – окислительный газ, насыщенный парами элементов». Чем выше концентрация углерода в конвертерной ванне, а следовательно, в каплях металла, тем больше объем продуктов горения и масса уносимой ими пыли.

Количество образовавшейся в зоне продувки окиси углерода пропорционально атомной доле углерода в расплаве [1]:

$$v_{\text{CO}} = 2 \cdot N_{\text{с}} \cdot \eta_{\text{с}} \cdot v_{\text{д}} \cdot \frac{O_2}{100}, \quad (5)$$

где $v_{\text{д}}$ – расход вдуваемого в ванну окислительного газа, м³/с; O_2 – содержание кислорода, %; $\eta_{\text{с}}$ – коэффициент использования кислорода дутья в зоне продувки; $N_{\text{с}}$ – атомная доля углерода в расплаве.

Можно предположить, что при значительной удельной поверхности процесс испарения бли-

зок к равновесию. Тогда интенсивность испарения i -го компонента в единицу времени:

$$v_i = k \cdot m_{O_2} \cdot p_i \cdot [C] \quad (6)$$

где k – постоянная, учитывающая стехиометрические соотношения при сгорании и испарении металла; m_{O_2} – интенсивность расходования кислорода на сжигание металла в реакционной зоне, м³/ч; p_i – парциальное давление испаряющегося i -го компонента, Па; $[C]$ – концентрация углерода в горящем металле, %.

Величина p_i тем больше, чем выше температура в реакционной зоне.

$$\text{Т. е. } v_{\text{Fe}} = k \cdot m_{O_2} \cdot p_{\text{Fe}} \cdot [C]. \quad (7)$$

Проанализировав вышеизложенное, можно сказать, что:

$$v_{\text{Fe}} = f(p_{\text{Fe}}; [C]) = f(T_{\text{зоны пр}}; [C]). \quad (8)$$

Исходя из рис. 2 видно, что в начальный период продувки – период «бурого дыма» – происходит наиболее интенсивное прямое окисление железа в области факела дутья. При этом происходит интенсивный унос пыли из агрегата в виде «бурого дыма» – оксидов железа.

Полученные зависимости (рис. 2) показывают следующее:

– чем выше содержание углерода в сталеплавильной ванне и, соответственно, в первичной реакционной зоне, тем интенсивнее унос пыли из ванны с продуктами испарения;

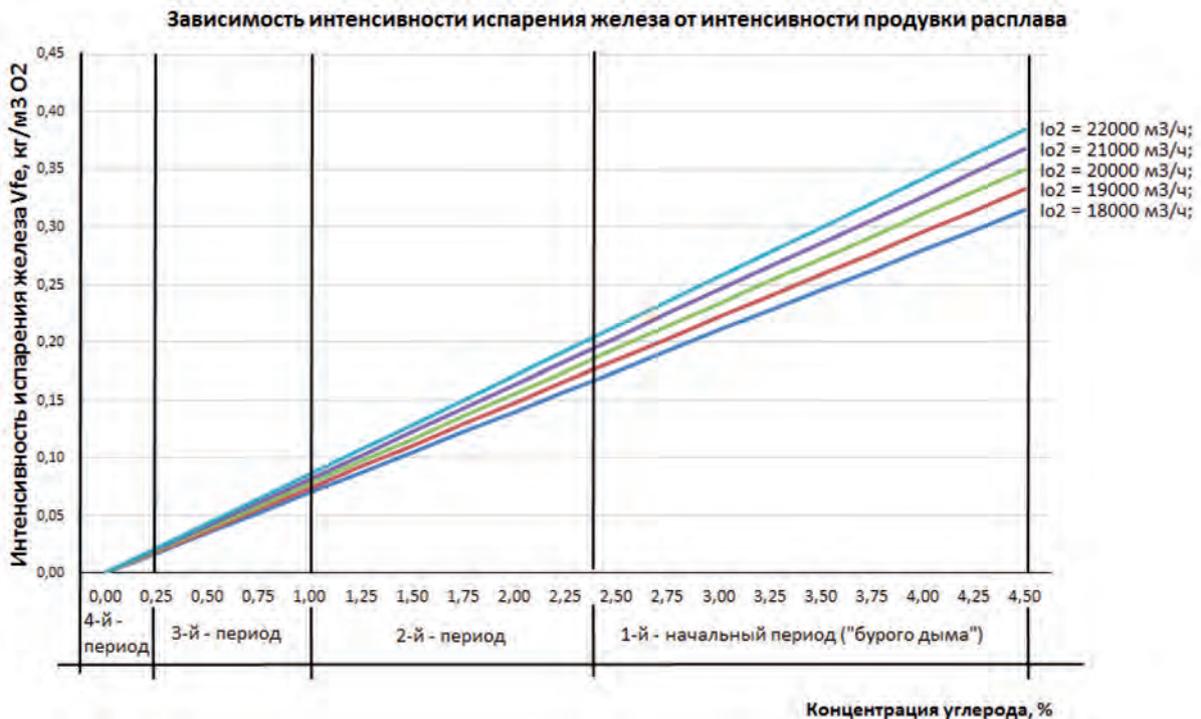


Рис. 2. Зависимость интенсивности испарения железа от интенсивности продувки расплава кислородом при различном содержании углерода в ванне (при $T_{\text{зоны пр}} = 2773 \text{ K} = \text{const}$)

- чем выше интенсивность продувки, тем интенсивнее унос пыли из ванны с продуктами испарения.

Результаты выполненных расчетов близки к опытным данным [1; 5; 10]. Данные рисунка отчетливо показывают, что с уменьшением содержания углерода в металле почти прямолинейно уменьшается интенсивность испарения железа, что хорошо согласуется с известными данными о пылевыведении при продувке сталеплавильной ванны кислородом.

На основании графических данных рис. 2 рассчитаем количество испарившегося железа при заданном кислородном режиме и известной интенсивности продувки, которое в диапазоне 0,1–4,5 % С составляет, кг/м³ O₂:

$$v_{Fe} = \Delta v_{Fe} = v_{Fe4,5} - v_{Fe0,1} \quad (9)$$

При удельном расходе кислорода в период продувки I_{прO₂}, м³/т количество испарившегося железа составит, кг/т:

$$v_{Fe} = \Delta v_{Fe} \cdot I_{прO_2, м^3/т} \quad (10)$$

Результаты расчета сведены в табл. 1.

Из анализа табл. 1 следует, что при увеличении интенсивности продувки на каждые

1000 м³/ч вынос пыли в продувочный период увеличивается на 1,26–1,47 кг/т.

Таким образом, необходимо подбирать оптимальную интенсивность продувки исходя из соотношения производительности агрегата (т. к. с увеличением интенсивности продувки снижается длительность продувочного периода и, соответственно, и длительность плавки, что приводит к увеличению производительности агрегата) и количества пылевыведения (потери железа). При этом необходимо стремиться к минимальным выбросам вредных веществ в окружающую среду.

При определении зависимости интенсивности испарения железа от температуры в реакционной зоне продувки (рис. 3) установлено, что с увеличением температуры реакционной зоны унос пыли из ванны с продуктами испарения увеличивается по экспоненциальной зависимости.

Анализ данных рис. 3 показывает, что при температуре в реакционной зоне до 2273 К пылевыведение испарением отсутствует. При температуре 2273 К происходит начало пылевыведения и при температуре 2773 К происходит резкий рост образования пыли.

Таблица 1

Результаты расчета количества испарившегося железа при заданном кислородном режиме и известной интенсивности продувки

Интенсивность продувки, м ³ /час	18000	19000	20000	21000	22000
Количество пыли, кг/м ³ O ₂	0,298	0,314	0,331	0,347	0,364
Вынос пыли в продувочный период, кг/т	11,05	12,31	13,64	15,04	16,51
Отклонение, кг/т	-	1,26	1,33	1,40	1,47

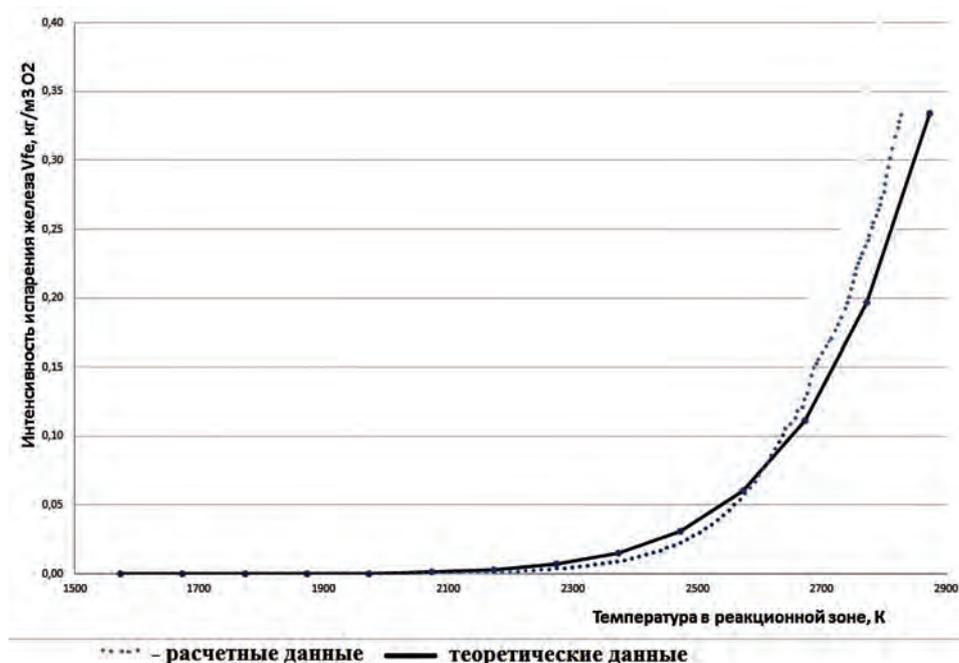


Рис. 3. Зависимость интенсивности испарения железа от температуры в реакционной зоне в начальный период продувки (при [C] = 4,25 ‰)

На основании расчетных данных получена эмпирическая зависимость интенсивности испарения железа от температуры в реакционной зоне, кг/м³ О₂:

$$v_{Fe} = EXP(0,0091 \cdot T_{pз}) \cdot 4 \cdot 10^{-12} \quad (11)$$

Сравнение полученных результатов с данными [5; 8] свидетельствуют о хорошей сходимости результатов исследования. При этом величина коэффициента корреляции составляет R = 0,975, что говорит о «высокой» сходимости расчетных и фактических данных.

На основании вышеприведенного можно сделать вывод, что испарение железа происходит не со всей ванны, а в реакционных зонах (местах погружения фурм в расплав).

Выводы

1. При проведении исследований установлено, что в начальный период продувки – период «бурого дыма» – происходит наиболее интенсивное прямое окисление железа в области факела дутья. При этом происходит интенсивный унос пыли из агрегата в виде «бурого дыма» – оксидов железа.

Полученные зависимости показывают следующее:

– чем выше содержание углерода в сталеплавильной ванне и, соответственно, в первичной реакционной зоне, тем интенсивнее унос пыли из ванны с продуктами испарения;

– чем выше интенсивность продувки, тем интенсивнее унос пыли из ванны с продуктами испарения.

2. Испарение железа происходит не со всей ванны, а в реакционных зонах (местах контакта кислородной струи с жидкой ванной).

3. Наибольший интерес представляет использование систем очистки, подавления пыли для 1–3 периодов обезуглероживания.

4. Полученные результаты позволяют вплотную приблизиться к решению вопроса оптимизации теплового режима и параметров продувки металла в конвертере для достижения минимальных выбросов пыли в окружающую среду. При этом необходимо подбирать рациональную интенсивность продувки исходя из соотношения производительности агрегата и количества пылевых выделений. При этом необходимо стремиться к минимальным выбросам вредных веществ в окружающую среду.

Библиографический список / References

1. Меджибожский М. Я. Влияние содержания углерода в металле на интенсивность пылевых выделений во время продувки сталеплавильной ванны кислородом / М. Я. Меджибожский //

Изв. ВУЗ Черная металлургия. – 1967. – № 11. – С. 46–50.

Medzhibozhskiy M. Y. *Vliyanie sodержaniya ugleroda v metalle na intensivnost pylevydeleniya vo vremya produvki staleplavilnoy ванны kislorodom*. Izv. VUZ Chernaya metallurgiya, 1967, no. 11, pp. 46–50.

2. Леонтьев Л. И. Техногенные отходы черной и цветной металлургии и проблемы окружающей среды / Л. И. Леонтьев, В. Г. Дюбанов // Экология и промышленность. – 2011. – № 4. – С. 32–35.

Leontev L. I., Dyubanov V. G. *Tekhnogennyye otkhody chernoy i tsvetnoy metallurgii i problemy okruzhayushchey sredy*. Ekologiya i promyshlennost. 2011, no. 4, pp. 32–35.

3. Баптизманский В. И. Теория кислородно-конвертерного процесса / В. И. Баптизманский. – М.: Металлургия, 1975. – 376 с.

Baptizmanskiy V. I. *Teoriya kislorodno-konverternogo protsessa*. Moscow, Metallurgiya, 1975, 376 p.

4. Бойченко Б. М. Конвертерное производство стали теория, технология, качество стали, конструкции агрегатов, рециркуляция материалов и экология / Б. М. Бойченко, В. Б. Охотский, П. С. Харлашин. – Днепропетровск.: РВА «Дніпро-ВАЛ», 2006. – 454 с.

Boychenko B. M., Okhotskiy V. B., Kharlashin P. S. *Konverternoe proizvodstvo stali teoriya, tekhnologiya, kachestvo stali, konstruktsii agregatov, retsirkulyatsiya materialov i ekologiya*. Dnepropetrovsk, RVA "Dnipro-VAL", 2006, 454 p.

5. Белоусов В. В. Теоретические основы газоочистки / В. В. Белоусов. – М.: Металлургия, 1988. – 256 с.

Belousov V. V. *Teoreticheskie osnovy gazoочistki*. Moscow, Metallurgiya, 1988, 256 p.

6. Рышка Э. Защита воздушного бассейна от выбросов предприятий черной металлургии / Э. Рышка. – М.: Металлургия, 1979. – 240 с.

Ryshka E. *Zashchita vozdushnogo basseyna ot vybrosov predpriyatiy chernoy metallurgii*. Moscow, Metallurgiya, 1979, 240 p.

7. Юдашкин М. Я. Пылеулавливание и очистка газов в черной металлургии / М. Я. Юдашкин. – М.: Металлургия, 1984. – 320 с.

Yudashkin M. Y. *Pyleulavlivanie i ochistka gazov v chernoy metallurgii*. Moscow, Metallurgiya, 1984, 320 p.

8. Черноусов П. И. Рециклинг. Технологии переработки и утилизации техногенных образований и отходов в черной металлургии: монография / П. И. Черноусов. – М.: Изд. Дом МИСиС, 2011. – 428 с.

Chernousov P. I. *Retsikling. Tekhnologii pererabotki i utilizatsii tekhnogennykh obrazovaniy i otkhodov v*

chernoy metallurgii: monografiya. Moscow, Izd. Dom MISiS, 2011, 428 p.

9. Несис Е. И. Кипение жидкостей / Е. И. Несис // Успехи физических наук. – 1965. – № 4. – С. 615–754.

Nesis E. I. *Kipenie zhidkostey*. Uspekhi fizicheskikh nauk. 1965, no. 4, pp. 615-754.

10. Говорова Н. М. Влияние окислительного потенциала газовой фазы на образование бурого дыма в кислородном конвертере / Н. М. Говорова, Ю. Д. Глебов, А. Г. Киселев // Изв. вуз. Черная металлургия. – 1988. – № 5. – С. 112–118.

Govorova N. M., Glebov Yu. D., Kiselev A. G. *Vliyanie okislitel'nogo potentsiala gazovoy fazy na obrazovanie burogo dyma v kislorodnom konvertere*. Izv. vuz. Chernaya metallurgiya. 1988, no. 5, pp. 112-118.

Purpose. Determination of the mass of the dust on the parameters of oxygen mode of steel melting (oxygen blowing mode).

Methodology. Achieving this purpose was solved by:
– consideration of the mechanism of dust formation by oxygen blowing the bath;
– establish settlement dependencies and parameters to determine the amount of dust emission.

Findings. That study based on the interaction counter mass fluxes of oxygen in the gas phase and the condensed phase combustion, which appears on the metal surface coated with the oxide film in the steel-smelting aggregates. To analyze the dusting process under blowing of steel-smelting bath by oxygen from position of physics, hydrodynamic and thermophysical features of the state of reactionary zone. Based on modeling received the dependence of the intensity of evaporation of the iron from the temperature in the reaction zone.

Originality. To obtained the empirical dependence of the intensity of dust emission from thermophysical parameters of the reaction zone.

Practical value. The positive results of the studies will allow to approach for solve the problem of optimization of thermal and oxygen steel smelting mode to achieve minimum emissions of dust into the environment.

Key words: partial pressure, temperature, reaction zone, blowing intensity, heat and oxygen modes, evaporation, mass transfer coefficient.

Рекомендована к публикации
д. т. н. М. В. Губинским

Поступила 21.01.2017

