

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ПРИМЕНЕНИЯ ВИХРЕВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ НАНЕСЕНИЯ ОГНЕУПОРНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ФУТЕРОВКУ КОНВЕРТЕРОВ. СООБЩЕНИЕ 2. ХАРАКТЕРИСТИКИ И ПАРАМЕТРЫ ДВИЖЕНИЯ КАПЕЛЬ ШЛАКА*

Калиногорский А.Н.¹, аспирант кафедры металлургии черных металлов

Протопопов Е.В.¹, д.т.н., профессор, ректор (protopopov@sibsiu.ru)

*Чернятевич А.Г.², д.т.н., профессор, заведующий отделом физико-технических
проблем металлургии стали*

Фейлер С.В.¹, к.т.н., доцент, заведующий кафедрой металлургии черных металлов

*Багрянцев В.И.¹, к.т.н., заведующий экспериментальной лабораторией
автоматизированных энергогенерирующих технологий*

¹ Сибирский государственный индустриальный университет
(654007, Россия, г. Новокузнецк, Кемеровская обл., ул. Кирова, 42)

² Институт черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины
(49050, Украина, г. Днепрпетровск, пл. академика Стародубова, 1)

Аннотация. Выполнено исследование особенностей применения вихревых газовых струй для повышения эффективности нанесения огнеупорных покрытий на футеровку конвертеров. С использованием численного моделирования рассмотрена аэродинамическая картина в рабочем пространстве агрегата и особенности движения капель конвертерного шлака при подаче нейтрального газа через специальную фурму с элементами вихревого аппарата. Уточнены закономерности движения капель шлака различного размера к футеровке конвертера, определена зависимость между параметрами движения капель шлака и характеристиками вихревой струи. Установлено, что траектория движения капель шлака независимо от их размера определяется в основном степенью закрутки вихревой струи. Показана принципиальная возможность повышения технологической гибкости процесса нанесения шлакового гарнисажа на футеровку конвертеров при использовании вихревых газовых струй.

Ключевые слова: конвертер, вихревая струя, аэродинамика, шлак, раздувка, размер капель, траектория, огнеупорное покрытие.

DOI: 10.17073/0368-0797-2015-12-896-900

Дополнительная информация по аэродинамике газожидкостных потоков и гидродинамике жидкого шлака в агрегате позволяет более эффективно реализовывать новые технологические разработки по нанесению огнеупорных покрытий на футеровку конвертеров [1 – 6].

В работе [6] по диспергированию жидкого шлака направленными газовыми струями показано, что минимальный размер капли жидкого шлака составляет 300 мкм и лишь в отдельных случаях может уменьшиться до 100 мкм. После отделения капли от основного объема шлака она разгоняется потоком газа; в дальнейшем ее движение определяется главным образом размером, а также параметрами подаваемого нейтрального газа.

Мелкие капли шлака быстро достигают скорости потока транспортирующего газа, двигаются вместе с ним и частично восходящими потоками выносятся из конвертера в газоотводящий тракт [7 – 11]. Более крупные капли также разгоняются потоком газа и в дальнейшем двигаются как по инерции, так и под влиянием аэродинамики по-

тока. При получении импульса наиболее крупные капли двигаются по инерции, достигая футеровки конвертера, при этом испытывая только сопротивление среды. Так как для условий раздувки шлака в кислородном конвертере характерно турбулентное течение газов, то математическое описание параметров обтекания капель шлака газом выполняли в соответствии с законом Ньютона [9].

Рассмотрим движение капли шлака по траектории из зоны диспергирования к футеровке для условий рабочего пространства конвертера. Поток транспортирующего газа, несущий капли шлака, двигается преимущественно вверх по спирали. Тогда траектория движения капель описывается системой уравнений [12]:

$$\begin{aligned} \frac{dW_\phi}{dt} &= \frac{W_r W_\phi}{r} - \frac{(W_\phi - V_\phi) V_S}{L}; \\ \frac{dW_r}{dt} &= \frac{W_\phi^2}{r} - \frac{(W_r - V_r) V_S}{L}; \\ \frac{dW_z}{dt} &= - \frac{(W_z - V_z) V_S}{L}, \end{aligned}$$

* Работа выполнена в СибГИУ по государственному заданию Минобрнауки России (проект 2556).

где W_φ, W_r, W_z и V_φ, V_r, V_z – тангенциальная, радиальная и вертикальная составляющие скорости капли шлака и газового потока соответственно; V_s – относительная скорость обтекания капли шлака потоком газа; L – характерное расстояние, на котором капля шлака разгоняется потоком транспортирующего газа.

Таким образом, основными параметрами, определяющими движение капли, будет скорость, которую капля приобрела при вылете из зоны диспергирования, а также характерное расстояние L .

В такой постановке значение L определяется соотношением [13]

$$L = \frac{4 \rho_{\text{ш}} d}{3\rho C_f},$$

где $\rho_{\text{ш}}$ – плотность шлака; ρ – плотность азота при температуре раздувки шлака; d – диаметр капли шлака; C_f – коэффициент сопротивления.

При турбулентном течении газа ($Re \geq 500$) коэффициент сопротивления будет равен 0,44.

Уравнение движения капли шлака в простейшей форме в безразмерном виде можно записать следующим образом [12]:

$$dW/dt = -W^2,$$

где W – скорость капли шлака в безразмерном виде.

При начальном условии $t = 0, W = 1$ решение можно записать в следующем виде [12]:

$$W = (t + 1)^{-1},$$

где t – время в безразмерном виде.

Расчетные значения радиальной составляющей скорости капли после ее отрыва от основного объема шла-

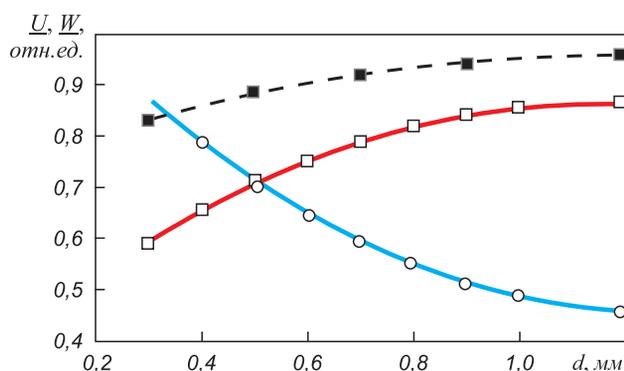


Рис. 1. Зависимость скорости капли от ее диаметра:

1 – радиальная безразмерная скорость капли после отрыва от основного объема шлака; 2 и 3 – безразмерная скорость капли у футеровки конвертера при нормальных условиях и при температуре 600 °С

Fig. 1. Dependence of drop velocity on its diameter:

1 – radial dimensionless speed of the drop after its tearing off from the main volume of the slag; 2 and 3 – dimensionless speed of the drop near the converter lining at the normal conditions and the temperature of 600 °С

ка и полной безразмерной скорости капли вблизи футеровки конвертера представлены на рис. 1. Радиальную скорость капли шлака (U) рассчитывали относительно радиальной скорости вихревой струи, а безразмерную скорость (W) – относительно максимальной скорости капель шлака при их разгоне.

Струя подаваемого на раздувку шлака азота, истекая из сопла фурмы, имеет относительно низкую температуру, однако быстро подвергается нагреву, распространяясь в высокотемпературных условиях рабочего пространства конвертера. Как видно (рис. 1), безразмерная скорость движения капель различного размера на выходе из зоны диспергирования (разбрызгивания) при взаимодействии с газовой струей и вблизи футеровки конвертера отличаются незначительно. В такой постановке задачи базовые расчеты выполнены для нормальных условий (т.е. для холодного газа в конвертере), а основные расчеты выполнены для условий при разогреве транспортирующего газа до 600 °С. Даже для частиц диам. 0,3 мм относительная скорость на стенке равна 0,83. Для частицы диам. 1,0 – 1,2 мм погрешность составляет 4 – 6 %. Можно ожидать, что скорость капли при ее движении в высокотемпературной среде в объеме конвертера изменится незначительно.

На разгон капли шлака высокоскоростным потоком транспортирующего газа значительное влияние оказывает размер этой капли. На рис. 1 показана радиальная скорость капель различного диаметра относительно радиальной скорости потока транспортирующего газа. Крупные частицы шлака приобретают меньшую скорость, поэтому они будут подниматься на меньшую высоту при нанесении на футеровку по сравнению с мелкими каплями вследствие своей большей инерции при взаимодействии с потоком газа.

Результаты расчета траектории движения капель шлака диам. 0,3 – 1,2 мм на участке разгона потоком нейтрального газа представлены на рис. 2 (по оси ординат – относительная безразмерная высота (z), на которую поднимется образовавшаяся капля при

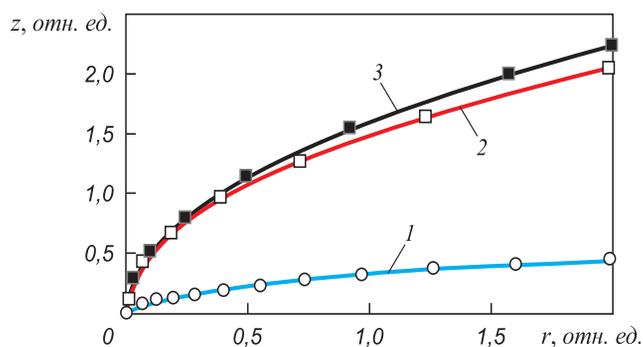


Рис. 2. Траектории движения капли шлака диаметра 1,2 мм (■), 0,3 мм (□) и 0,3 – 1,2 мм (○) на участке ее разгона

Fig. 2. Trajectories of the slag drops with diameter of 1.2 mm (■), 0.3 mm (□) and 0.3 - 1.2 mm (○) in a area of their acceleration

разбрызгивании шлака, по оси абсцисс – относительное безразмерное расстояние (r), на которое удаляется капля шлака от зоны диспергирования). Данные приведены для вихревых струй газа с умеренной ($\sigma = 1$) и с сильной ($\sigma = 0,2$) закруткой (где σ – отношение незакрученной и закрученной составляющих скорости потока). Этот диапазон охватывает практически все возможные варианты раздувки шлака с использованием вихревой фурмы. Как видно (рис. 2), степень закрутки струи оказывает определяющее влияние на траекторию движения капель шлака. Формирование струи с сильной закруткой позволяет эффективно ошлаковывать нижние горизонты футеровки конвертера, использование слабо закрученных струй позволяет направлять брызговынос капель шлака на верхние горизонты огнеупорной кладки агрегата. Результаты расчета для капель различного размера имеют близкие значения, что обусловлено безразмерной постановкой задачи.

С целью оценки влияния структуры потока транспортирующего газа на поведение капель шлака проводили расчет величины относительного безразмерного числа Рейнольдса для условий обтекания капель различного диаметра потоком газа (рис. 3). Число Рейнольдса определяли из разницы полных относительных скоростей капли и потока газа [14]

$$V_s = [(V_\phi - W_\phi)^2 + (V_r - W_r)^2 + (V_z - W_z)^2]^{1/2}.$$

Таким образом, безразмерное число Рейнольдса имеет вид

$$\frac{Re}{Re_0} = \left\{ \frac{1}{r^2} + \left[\frac{P^2 \tau^3}{3} - \left(1 - \frac{1}{r^2} \right)^{1/2} \right]^2 + (\sigma - z^{(1)})^2 \right\}^{1/2},$$

где P – давление среды.

Так как $(\sigma - z^{(1)})^2 = \sigma^2 \exp(-2P\tau)$, то окончательно [15] получим

$$\frac{Re}{Re_0} = \left\{ \frac{1}{r^2} + \left[\frac{P^2 \tau^3}{3} - \left(1 - \frac{1}{r^2} \right)^{1/2} \right]^2 + \sigma^2 \exp(-2P\tau) \right\}^{1/2}.$$

Анализ зависимости уменьшения относительного числа Рейнольдса (Re/Re_0) с увеличением относительного безразмерного расстояния (r), на которое удаляется капля шлака при разбрызгивании, позволяет определить, что при движении капли ее скорость постепенно выравнивается со скоростью потока транспортирующего газа. С уменьшением диаметра капль также происходит закономерное уменьшение значения Re/Re_0 , таким образом скорость движения мелких капль незначительно отличается от скорости движения окружающего ее газа. Капли небольшого диаметра фактически витают в потоке транспортирующего газа, в то же время крупные капли шлака не испытывают такого сильного влияния со стороны потока закрученного газа и продолжают двигаться по инерции к футеровке конвертера.

Выводы. Проанализированы особенности движения капель шлака, образующихся при разбрызгивании расплава вихревыми газовыми струями в кислородном конвертере. Определена зависимость между параметрами движения брызг шлака различного диаметра и характеристиками вихревой струи. Установлено, что на параметры движения мелких капль шлака большое влияние оказывает аэродинамика транспортирующего газа, а поведение крупных капль шлака только в начале движения зависит от скорости газового потока, в дальнейшем его влияние становится незначительным. При этом траектория движения капль шлака независимо от размера определяется степенью закрутки вихревой струи нейтрального газа. Таким образом, применение вихревых газовых струй может в значительной степени повысить эффективность процесса нанесения огнеупорного покрытия на футеровку кислородных конвертеров.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Соколов В.В., Протопопов Е.В., Шакиров К.М. Анализ оптимальных параметров дутьевого режима операции нанесения шлакового гарнисажа на футеровку конвертера // Изв. вуз. Черная металлургия. 2004. № 6. С. 18 – 21.
2. Kumar D.S., Prasad G., Vishwanath S.C., Ghorui P.K., Mazumdar D., Ranjan M., Lal P.N. Converter life enhancement through optimization of operating practices // Iron and Steelmaker. 2007. № 6. P. 521 – 528.
3. Шермет В.А., Кекух А.В., Троший С.В., Стовпченко А.П., Бродский А.С., Павлюченков О.И. Опыт эксплуатации и комплексная технология ухода за футеровкой конвертера // Новые огнеупоры. 2006. № 1. С. 4 – 7.
4. Stone R.P., Neith D., Koester S., Patterson D., Branion R. Further process improvements at Severstal Sparrows Point via new technology implementation // AIS Tech 2009 Proceedings. 2009. № 1. P. 737 – 747.
5. Бойченко Б.М., Охотский В.Б., Харлашин П.С. Конвертерное производство стали: теория, технология, качество стали,

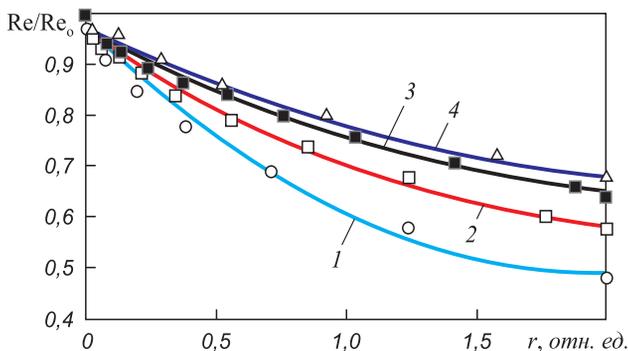


Рис. 3. Относительное число Рейнольдса на участке разгона капли шлака при различном диаметре капли, мм:
1 – 0,3; 2 – 0,6; 3 – 0,9; 4 – 1,2

Fig. 3. Relative Reynolds number upon the area of slag drop acceleration with different diameter drops at mm:
1 – 0.3; 2 – 0.6; 3 – 0.9; 4 – 1.2

- конструкция агрегатов, рециркуляция материалов и экология. – Днепропетровск: РВА «Дніпро – ВАЛ», 2006. – 454 с.
6. Калиногорский А.Н., Протопопов Е.В., Чернятевич А.Г., Фейлер С.В., Багрянцев В.И. Исследование особенностей применения вихревых технологий для нанесения огнеупорных покрытий на футеровку конвертеров. Сообщение 1. Особенности дробления жидкого шлака при раздувке вихревой фурмой // Изв. вуз. Черная металлургия. 2015. № 10. С. 756 – 760.
 7. Степанова А.А., Захаров И.М., Чигасов Д.Н., Шатохин И.М. // Результаты опробования продувки металла в 370-т кислородном конвертере семисопловой фурмой с центральным соплом // Черная металлургия. Бюллетень НТИ. 2007. № 1. С. 20 – 22.
 8. Пентайков С.П. Современная конструкция фурменной головки и рациональные технологические режимы ее использования // Черная металлургия. Бюллетень НТИ. 2001. № 10. С. 30 – 33.
 9. Харлашин П.С., Ковура А.Б., Куземко Р.Д. Модель расчета термодинамических параметров струи в конвертере // Металлургическая и горнорудная промышленность. 2010. № 7. С. 97 – 100.
 10. Соколов В.В., Протопопов Е.В., Шакиров К.М. Аналитические исследования процессов нанесения шлакового гарнисажа на футеровку конвертеров. Теория подобия // Изв. вуз. Черная металлургия. 2004. № 6. С. 12 – 15.
 11. Тахаудинов Р.С., Буданов Б.А., Столяров А.М. Исследование процесса нанесения шлакового гарнисажа на футеровку конвертера // Изв. вуз. Черная металлургия. 2001. № 8. С. 26 – 28.
 12. Гольдштик М.А. Вихревые потоки. – Новосибирск: Наука, 1981. – 367 с.
 13. Гупта А., Лилли Д., Сайред Н. Закрученные потоки. – М.: Мир, 1987. – 588 с.
 14. Кутателадзе С.С., Волчков Э.П., Терехов В.И. Аэродинамика и тепломассообмен в ограниченных вихревых потоках. – Новосибирск: АН СССР, 1987. – 282 с.
 15. Кутателадзе С.С., Накоряков В.Е. Тепломассообмен и волны в газожидкостных системах. – Новосибирск: Наука. Сибирское отделение, 1987. – 301 с.

Поступила 28 октября 2015 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2015. Vol. 58. No. 12, pp. 896–900.

APPLICATION OF VORTEX TECHNOLOGIES OF REFRACTORY COATING FORMATION FOR CONVERTER LINING. REPORT 2. FEATURES AND MOVEMENT PARAMETERS OF SLAG DROPS

A.N. Kalinogorskii¹, *Postgraduate of the Chair of Ferrous Metallurgy*

E.V. Protopopov¹, *Dr. Sci. (Eng.), Professor, Rector*
(protopopov@sibsio.ru)

A.G. Chernyatevich², *Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Physical and Technical Problems in Steel Metallurgy*

S.V. Feiler¹, *Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor, Head of the Chair of Ferrous Metallurgy*

V.I. Bagryantsev¹, *Cand. Sci. (Eng.), Head of the Experimental Laboratory of Automated Energy Generating Technologies*

¹ **Siberian State Industrial University** (42, Kirova str., Novokuznetsk, Kemerovo Region, 654007, Russia)

² **Institute of Ferrous Metallurgy named after Nekrasov Z.I., Ukrainian National Academy** (1, Ak. Starodubova sq., Dnepropetrovsk, 49050, Ukraine)

Abstract. The paper is devoted to the research of application of vortex technologies of the gas jets to increase the efficiency of fire-resistant coatings on the converter lining. Using numerical simulation, the authors considered the aerodynamic pattern in the working space of the unit and the features of the converter slag drop motion when supplying neutral gas through a special lance with the elements of the vortex device. The laws of slag drop motions of different size to the converter lining have been refined, as well as the dependence among the parameters of slag drop movement and the characteristics of the vortex jet has been defined. It has been established that the trajectory of the slag drops, regardless of their size is mainly determined by the degree of twist of the vortex jet. The article also shows the principal possibility of increasing the technological flexibility of the slag skull application process on the lining converter when using vortex gas jets.

Keywords: converter, vortex jet, aerodynamics, slag, blowing, drop dimension, trajectory, refractory coat.

DOI: 10.17073/0368-0797-2015-12-896-900

REFERENCES

1. Sokolov V.V., Protopopov E.V., Shakirov K.M. Analysis of optimal parameters of a blow mode when coating of slag scull on a converter lining. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2004, no. 6, pp. 18–21. (In Russ.).
2. Kumar D. S., Prasad G., Vishwanath S. C., Ghorui P. K., Mazumdar D., Ranjan M., Lal P. N. Converter life enhancement through optimization of operating practices. *Iron and Steelmaker*. 2007, no. 6, pp. 521–528.
3. Sheremet V.A., Kekukh A.V., Troshchii S.V., Stovpchenko A.P., Brodskii A.S., Pavlyuchenkov O.I. Operating experience and complex technology maintenance of a converter lining. *Novye ognepupory*. 2006, no. 1, pp. 4–7. (In Russ.).
4. Stone R.P., Neith D., Koester S., Patterson D., Branion R. Further process improvements at Severstal Sparrows Point via new technology implementation. *AIS Tech 2009 Proceedings*. 2009, no. 1, pp. 737–747.
5. Boichenko B.M., Okhotskii V.B., Kharlashin P.S. *Konvertornoe proizvodstvo stali: teoriya, tekhnologiya, kachestvo stali, konstruktivnaya agregatov, retsirkulyatsiya materialov i ekologiya* [Converter steel production: theory, technology, steel quality, unit construction, material recirculation and ecology]. Dnepropetrovsk: RVA “Dnipro – VAL”, 2006, 454 p. (In Russ.).
6. Kalinogorskii A.N., Protopopov E.V., Chernyatevich A.G., Feiler S.V., Bagryantsev V.I. Application of vortex technologies of refractory coating formation for converter lining. Report 1. Features of liquid slag crushing at blowing by vortex tuyere. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2015, no. 10, pp. 756–760. (In Russ.).
7. Stepanova A.A., Zakharov I.M., Chigasov D.N., Shatokhin I.M. Testing data of metal blowing in a 370-tonne oxygen converter with a seven-nozzle lance with a central nozzle. *Chernaya metallurgiya: Byul. NTI*. 2007, no. 1, pp. 20–22. (In Russ.).
8. Pentaikov S.P. Modern construction of a tuyere end and rational technological modes of its usage. *Chernaya metallurgiya: Byul. NTI*. 2001, no. 10, pp. 30–33. (In Russ.).
9. Kharlashin P.S., Kovura A.B., Kuzemko R.D. Calculation model of thermodynamic parameters of a jet in a converter. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'*. 2010, no. 7, pp. 97–100. (In Russ.).

10. Sokolov V.V., Protopopov E.V., Shakirov K.M. Analytical research of the processes of slag skull application on Converter lining. The theory of similarity. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2004, no. 6, pp. 12–15. (In Russ.).
11. Takhautdinov R.S., Budanov B.A., Stolyarov A.M. Research of the process of slag skull coating on a converter lining. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2001, no. 8, pp. 26–28. (In Russ.).
12. Gol'dshtik M.A. *Vikhreyye potoki* [Vortex flow]. Novosibirsk: Nauka, 1981, 367 p. (In Russ.).
13. Gupta A.K., Lilley D.G., Syred N. *Swirl flows*. Abacus Press, England, 1984, 475 p. (Russ.ed.: Gupta A., Lilley D., Syred N. *Zakruchennyye potoki*. Moscow: Mir, 1987, 588 p.).
14. Kutateladze S.S., Volchkov E.P., Terekhov V.I. *Aerodinamika i teploobmen v ogranichennykh vikhrevykh potokakh* [Aerodynamics and heat-mass exchange in limited vortex flows]. Novosibirsk: AN SSSR, 1987, 282 p. (In Russ.).
15. Kutateladze S.S., Nakoryakov V.E. *Teplomasobmen i volny v gazozhidkostnykh sistemakh* [Heat-mass exchange and waves in gas-liquid systems]. Novosibirsk: Nauka. Sibirskoe otdelenie, 1987, 301 p. (In Russ.).

Acknowledgements. The work was fulfilled in SibSIU by the state task of Russian Ministry of Education and Science (project 2556).

Received October 28, 2015
