

К. Г. Низяев /д. т. н./, А. Н. Стоянов /к. т. н./,
Л. С. Молчанов /к. т. н./, А. С. Лантух

Национальная металлургическая академия
Украины, г. Днепро, Украина
e-mail: metsteel.dmeti@mail.ru

Подобие процессов при моделировании верхней кислородной продувки в конвертере

К. G. Niziaev /Dr. Sci. (Tech.)/,
O. M. Stoyanov /Cand. Sci. (Tech.)/,
L. S. Molchanov /Cand. Sci. (Tech.)/,
O. S. Lantukh

National Metallurgical academy of Ukraine, Dnipro,
Ukraine
e-mail: metsteel.dmeti@mail.ru

Similarity of processes in the modeling of the upper oxygen blowing in the converter

Цель. Обосновать методику определения параметров продувки, обеспечивающих подобие при моделировании гидродинамических процессов в жидкой ванне конвертера верхнего кислородного дутья.

Методика. Расчет параметров сверхзвуковой кислородной струи при неизотермическом и изотермическом истечении. Сопоставление числа Ньютона на натурном и модельном образцах. Сравнение расчетных и экспериментальных данных.

Результаты. Показано, что для соблюдения подобия при моделировании гидродинамических процессов в жидкой ванне конвертера верхнего кислородного дутья необходимо, наряду с соблюдением геометрического подобия агрегатов и продувочных устройств, обеспечить равенство числа Ньютона на натурном и модельном образцах. При этом должно выполняться условие идентичности динамического воздействия дутья в месте контакта газовой струи с жидкой ванной. Указанные условия выполняются путем варьирования массового расхода газа через сопло и положения фурмы относительно уровня спокойной ванны.

Научная новизна. Разработана методика определения параметров продувки, обеспечивающих подобие при моделировании гидродинамических процессов в жидкой ванне конвертера верхнего кислородного дутья.

Практическая значимость. Разработанная методика является основой для проведения экспериментальных исследований гидродинамических процессов в конвертерах верхнего кислородного дутья. (Ил. 4. Табл. 1. Библиогр.: 6 назв.)

Ключевые слова: конвертер, кислород, продувка, моделирование, фурма, гидродинамика, газовая струя.

Гидродинамика конвертерной ванны является основным фактором, определяющим кинетику протекания химических реакций. Поэтому вопросам изучения закономерностей взаимодействия кислородных струй с жидкой ванной уделялось большое внимание со дня возникновения конвертерного процесса.

Ввиду сложности проведения исследований в натурных условиях, в связи с наличием высоких температур и агрессивных жидких расплавов, пользуются методами «холодного» моделирования.

Для обеспечения подобия модельных и реальных условий продувки основателями отечественной школы конвертирования была обоснована необходимость соблюдения идентичности соотношения динамической силы дутья и веса

ванны, которое характеризуется числом Ньютона [1; 2]:

$$Ne = \sum i / (m_{\theta} g), \quad (1)$$

где $\sum i = i_{O_2} + i_{CO} = m_{O_2} w_{O_2} + m_{CO} w_{CO}$ – суммарный импульс кислородной струи и всплывающего монооксида углерода, Н; m_{O_2} , m_{CO} – массовый расход кислорода и массовая скорость всплывания монооксида углерода соответственно, кг/с; w_{O_2} , w_{CO} – скорость истечения кислорода из сопла и всплывания монооксида углерода соответственно, м/с; m_{θ} – масса жидкой ванны, кг; g – ускорение силы тяжести, м/с².

Для определения i_{O_2} можно воспользоваться известными соотношениями расчета параметров сверхзвуковой струи [3]:

$$i_{O_2} = m_{O_2} w_{O_2}, \quad \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}^2}; \quad (2)$$

$$w_{O_2} = \sqrt{2 \frac{k}{k-1} P_1 v \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]}, \text{ м/с;} \quad (3)$$

$$m_{O_2} = f \sqrt{\frac{2k}{k-1} \cdot \frac{P_1}{v} \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]}, \text{ кг/с,} \quad (4)$$

где f – площадь критического сечения сопла Лаваля, м²; k – показатель адиабаты (для двухатомных газов 1,4); P_1, P_2 – давление перед и за соплом соответственно, Па; v – удельный объем м³/кг.

Ранее было показано, что величина дополнительного импульса от образовавшегося и движущегося в ванне монооксида углерода (i_{CO}) не превышает 10-30 % от i_{O_2} [4].

Однако соблюдение условия $Ne = idem$ при определении параметров продувки жидкой ванны при моделировании вызывает определенные трудности. В табл. 1 приведены значения числа Ньютона при различном расходе газа на одно сопло, которые характерны при продувке кислородом в конвертерах различной емкости.

На рис. 1 приведена зависимость расчетного критического диаметра кислородного сопла модельной установки, обеспечивающего сверхзвуковую скорость истечения кислорода при условии $Ne = idem$ и разумном геометрическом подобии модели и действующего конвертера 1:10 – 1:50.

Полученные результаты показывают, что в этом случае размеры сопла должны быть крайне малыми, что делает практически невозможным их изготовление.

Одной из важнейших характеристик кислородной струи является ее давление на ванну, которое определяет и глубину проникновения струи, и соотношение скоростей окисления углерода и железа [5]. Таким образом, для соблюдения подобия необходимо обеспечить идентичность динамического воздействия дутья в месте контакта газовой струи с жидкой ванной.

Изменение скорости по оси струи можно определить по формуле [5]:

$$\frac{w_{ось}}{w_{вых}} = 1 - \exp \left[- \frac{1}{0,218 \bar{\rho}^{0,5} \cdot \bar{y} - 1,486} \right],$$

при $P_{нач} \leq 6 \cdot 10^5 \text{ Па;}$ (5)

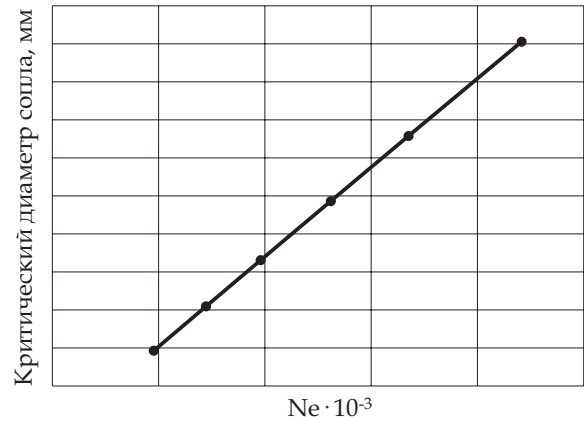


Рис. 1. Зависимость расчетного критического диаметра кислородного сопла модельной установки от числа Ne

$$\frac{w_{ось}}{w_{вых}} = 1 - \exp \left[- \frac{1}{0,1908 \bar{\rho}^{0,5} \cdot \bar{y} - 1,5172} \right],$$

при $P_{нач} \geq 7 \cdot 10^5 \text{ Па;}$ (6)

где $\bar{\rho} = \frac{\rho_{окр}}{\rho_{вых}}$ – параметр неизотермичности; \bar{y} – расстояние от среза сопла, калибры.

Рассчитанное по формуле (6) значение скорости струи на расстоянии 30–40 калибров от среза сопла, характерном для условий продувки металла в конвертере, составляет 250–380 м/с.

Проверку выполнения условий подобия проводили на модели 60-т конвертера ПАО «ЕВРАЗ ДМЗ», выполненной в масштабе 1:10. На рис. 2 представлена зависимость скорости истечения кислорода, рассчитанной по формуле (3), в выходном сечении сопла Лаваля с критическим

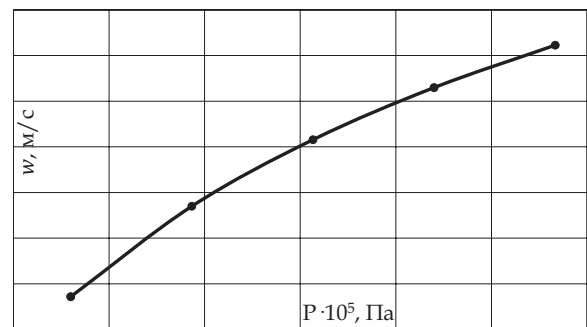


Рис. 2. Зависимости скорости истечения кислорода в выходном сечении сопла Лаваля от давления на входе в сопло

Таблица 1

Значение числа Ньютона при различном расходе газа

$Q, \frac{\text{м}^3}{\text{мин}}$	60	100	150	200	250	300
$i_{O_2}, \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}^2}$	500,72	718,84	1096,92	1432,71	1779,84	2468,06
Ne	0,0007542	0,0007435	0,0007362	0,0007296	0,0007245	0,0007196

диаметром 3 мм, от давления на входе в сопло. Сверхзвуковые скорости истечения в этом случае достигаются при $P_1 \geq 1,8 \cdot 10^5$ Па.

На рис. 3 представлено изменение осевой скорости струи на расстоянии от среза сопла при истечении в полость «холодной» модели.

Таким образом, регулируя давление кислорода и положение фурмы, возможно в каждом конкретном случае подобрать параметры продувки, которые обеспечивают идентичность динамического воздействия дутья в месте контакта газовой струи с жидкой ванной на модели и натурном конвертере. Так, условие $Ne = idem$ для условий работы 60-т конвертера ПАО «ЕВРАЗ ДМЗ» соблюдается при следующих «модельных» значениях: $d_{кр} = 3$ мм; $P_1 = 1,8 \cdot 10^5 - 2,5 \cdot 10^5$ Па, $h_{\phi} = 30-40$ калибров.

Однако условия распространения кислородной струи в полости модели и промышленного конвертера сильно отличаются. Атмосфера в конвертере характеризуется высокой температурой и низкой плотностью, что обуславливает сохранение высокого динамического напора струи на участке большем, чем при изотермическом истечении, и, следовательно, увеличение ее дальности. Однако наличие пыли, брызг шлака и металла, движущегося навстречу струе потока оксида углерода, приводит к торможению струи, развитию процессов горения в самой струе. В связи с этим рассчитать реальную скорость струи по ее длине можно только приблизительно.

В качестве дополнительного критерия, обеспечивающего подобие газо-гидродинамических условий при проведении моделирования, было выбрано соотношение глубин жидкой ванны и реакционной зоны $-\frac{h_{\theta}}{h_{p.з.}}$.

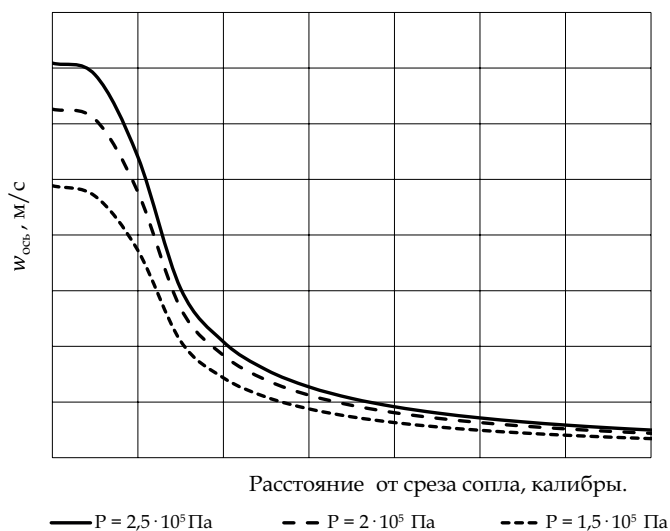


Рис. 3. Зависимость изменения осевой скорости струи от расстояния за срезом сопла

Согласно В. Б. Охотскому глубину реакционной зоны в конвертере можно определить из уравнения в неявном виде [6]:

$$L(L + h_{\phi})^2 = 2 \cos^2 \alpha \bar{l}_h^2 K d_{\theta_{\text{вых}}}^3 \pi, \quad (7)$$

где α – угол между осью струи и вертикалью, град, или в явном виде:

$$\bar{L} = -\frac{2\bar{h}_{\phi}}{3} + \left\langle \left[\left(\frac{\bar{h}_{\phi}}{3} \right)^3 + \frac{f}{2} \right] + \left\{ \left[\left(\frac{\bar{h}_{\phi}}{3} \right)^3 + \frac{f}{2} \right]^2 - \left(\frac{\bar{h}_{\phi}}{3} \right)^6 \right\}^{\frac{1}{2}} \right\rangle^{\frac{1}{3}} + \left\langle \left[\left(\frac{\bar{h}_{\phi}}{3} \right)^3 + \frac{f}{2} \right] - \left\{ \left[\left(\frac{\bar{h}_{\phi}}{3} \right)^3 + \frac{f}{2} \right]^2 - \left(\frac{\bar{h}_{\phi}}{3} \right)^6 \right\}^{\frac{1}{2}} \right\rangle^{\frac{1}{3}} \quad (8)$$

где $f = 2 \cos^2 \alpha \bar{l}_h^2 K / \pi$, $\bar{L} = L / d_{\theta_{\text{вых}}}$, $\bar{l}_h = l_h d_{\theta_{\text{вых}}}$, l_h – длина начального участка кислородной струи, м; $d_{\theta_{\text{вых}}}$ – диаметр выходного сечения сопла Лаваля, м; h_{ϕ} – высота положения фурмы над жидкой

ванной, м; $K = \frac{\rho_{\theta_{\text{вых}}} \cdot w_{O_2}^2}{\rho_{\text{ж}} \cdot g \cdot d_{\theta_{\text{вых}}}}$, – критерий Казанцева;

$\rho_{\theta_{\text{вых}}}$ – плотность кислорода на выходе из сопла, кг/м³; $\rho_{\text{ж}}$ – плотность жидкой металлической ванны, кг/м³;

Расчеты показали, что отношение $\frac{h_{\theta}}{h_{p.з.}}$ на промышленных конвертерах различных емкостей составляет 1,1 ч 1,5.

На рис. 4 представлена зависимость $\frac{h_{\theta}}{h_{p.з.}}$ на модели от давления дутья, полученная в результате физического моделирования.

Приведенные результаты показывают, что ранее определенные параметры продувки на модели и в этом случае в целом обеспечивают заданные условия равенства критерия $\frac{h_{\theta}}{h_{p.з.}}$.

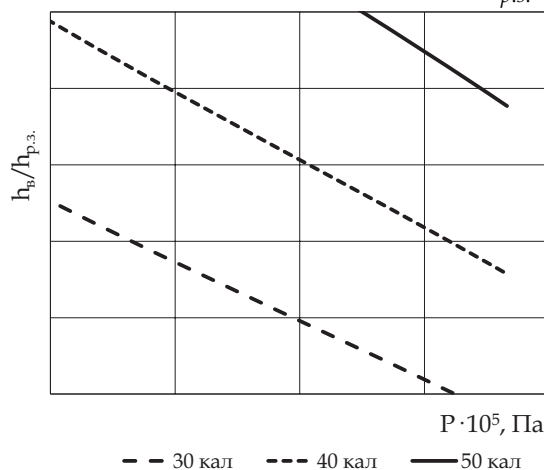


Рис. 4. Зависимость $\frac{h_{\theta}}{h_{p.з.}}$ от давления дутья

Выводы

1. Разработана методика определения параметров продувки, обеспечивающих подобие при моделировании гидродинамических процессов в жидкой ванне конвертера верхнего кислородного дутья.

2. Показано, что для соблюдения подобия при моделировании гидродинамических процессов в жидкой ванне конвертера верхнего кислородного дутья необходимо, наряду с соблюдением геометрического подобия агрегатов и продувочных устройств, обеспечить равенство числа Ньютона на натурном и модельном образцах. При этом должно выполняться условие идентичности динамического воздействия дутья в месте контакта газовой струи с жидкой ванной.

3. Показано в качестве примера, что для условий работы 60-т конвертера подобие гидродинамических процессов соблюдается при «модельных» параметрах продувки $d_{кр} = 2-3$ мм; $P_1 = 1,8 \cdot 10^5 - 2,5 \cdot 10^5$ Па, $h_{\phi} = 30-40$ калибров.

Библиографический список / References

1. К вопросу моделирования гидродинамики конвертерной ванны при донной продувке / В. И. Баптизманский, Ю. Н. Борисов, А. М. Лонский, В. И. Трубакин // Черная металлургия. – 1988. – № 8. – С. 24–27.

Baptizmanskiy V. I., Borisov Yu. N., Lonskiy A. M., Trubavin V. I. *K voprosu modelirovaniya gidrodinamiki konverternoy vanny pri donnoy produvke*. Chernaya metallurgiya. 1988, no. 8, pp. 24–27.

2. Явойский В. И. Теория продувки сталеплавильной ванны / В. И. Явойский, Г. А. Дорофеев, Н. Л. Повх. – М.: Металлургия, 1974. – 496 с.

Yavoyskiy V. I., Dorofeev G. A., Povkh N. L. *Teoriya produvki staleplavil'noy vanny*. Moscow, Metallurgiya, 1974, 496 p.

3. Щукин А. А. Теплотехника / А. А. Щукин, И. Н. Сушкин, Р. Г. Зах, Б. И. Бахмачевский, Г. П. Лызо. – М.: Металлургия, 1973. – 479 с.

Shchukin A. A., Sushkin I. N., Zakh R. G., Bakhmachevskiy B. I., Lyzo G. P. *Teplotekhnika*. Moscow, Metallurgiya, 1973, 479 p.

4. Баптизманский В. И. Физико-химические основы кислородно-конверторного процесса / В. И. Баптизманский, В. Б. Охотский. – Киев; Донецк: Вища школа, 1984. – 183 с.

Baptizmanskiy V. I., Okhotskiy V. B. *Fiziko-khimicheskie osnovy kislorodno-konvertornogo protsessa*. Kiev; Donetsk, Vishcha shkola, 1984, 183 p.

5. Старов Р. В. Технология производства стали в современных конвертерных цехах / Р. В. Старов, С. В. Колпаков, В. В. Смоктий. – М.: Машиностроение, 1991. – 464 с.

Starov R. V., Kolpakov S. V., Smoktiy V. V. *Tekhnologiya proizvodstva stali v sovremennykh konverternykh tsekhakh*. Moscow, Mashinostroenie, 1991, 464 p.

6. Охотский В. Б. Модели металлургических систем / В. Б. Охотский. – Днепропетровск: Системные технологии, 2006. – 287 с.

Okhotskiy V. B. *Modeli metallurgicheskikh sistem*. Dnepropetrovsk, Sistemnye tekhnologii, 2006, 287 p.

Purpose. To substantiate the methodology for determining the blowing parameters that provide similarity in the modeling of hydrodynamic processes in the liquid bath of the converter of the upper oxygen blowing.

Methodology. Calculation of the parameters of a supersonic oxygen jet for non isothermal and isothermal flow. Comparison of Newton's criterion on the full-scale and model samples. Comparison of calculated and experimental data.

Findings. It is shown that in order to observe similarity in the modeling of hydrodynamic processes in the liquid bath of the converter of the upper oxygen blowing, it is necessary, along with observing the geometric similarity of aggregates and blowing devices, to ensure the equality of the Newton criterion on the full-scale and model samples. In this case, the condition for the identity of the dynamic effect of blast at the point of contact of the gas jet with the liquid bath must be fulfilled. These conditions are met by equalizing the mass flow of gas through the nozzle and the position of the lance relative to the level of the calm bath.

Originality. A method for determining the blowing parameters that provide similarity in the modeling of hydrodynamic processes in the liquid bath of the converter of the upper oxygen blowing is developed.

Practical value. The developed technique is the basis for carrying out experimental studies of hydrodynamic processes in converters of the upper oxygen blowing.

Key words: converter, oxygen, blowing, modeling, lance, hydrodynamics, gas jet.

**Рекомендована к публикации
д. т. н. К. Г. Низяевым**

Поступила 24.05.2017