

Анализ опубликованных данных о среднеквадратичных отклонениях фактических содержаний углерода  $\delta_c$  и температуры  $\delta_t$  в зависимости от содержания углерода в выплавляемой стали приведен в табл. 1 для зарубежных (3) и отечественных (0) ККЦ.

С увеличением содержания углерода в выплавляемой стали увеличивается среднеквадратичное отклонение как по углероду, так и по температуре в связи с более высокой скоростью выгорания углерода в соответствии с зависимостью (6).

Результаты анализа событий, которые имели место за 50 лет существования зондового метода (США, фирма Bethlehem Steel Corp, ККЦ в Lacawanna (285 т) и Sparrows Point (200 т), 1963) представлены в табл. 2, как средние квадратичные отклонения по углероду  $\delta_c$  и температуре  $\delta_t$ .

После минимизации в 1970-х гг. отмечается увеличение среднего квадратичного отклонения по углероду в 1980-х гг. в связи с ростом доли углеродистых сталей в зарубежной практике, однако величина  $\delta_c$  остается на приемлемом уровне. Величина  $\delta_t$  стабильно уменьшается, что свидетельствует о совершенствовании технологии зондового замера. Свои успехи, в частности, рекламирует фирма Danieli & Co. (Германия) [6]. Однако стоимость подобных услуг сдерживает предприятия Украины от их использования.

Интересно, что 50 лет тому назад фирмой Nippon Kokan была разработана математическая модель и система автоматического управления кислородно-конвертерным процессом, которая на 50-т конвертере фирмы Japan Steel Tube Corp. показала результаты [7], практически не отличающиеся от достигнутых в [6].

В 1980-х гг. внепечная обработка стали (ковшовая металлургия) стала самостоятельным участком сталеплавильного производства с продолжительностью

технологических процессов до 2 ч, в течение которых температура стали может изменяться на величину до 200 °С, а компенсация теплотерь осуществляется на установке ковш-печь (L-F). Имеется возможность снизить и повысить содержание любого из элементов в стали. В этих обстоятельствах значимость зондового замера и его точности сохраняется только в ККЦ, не использующих соответствующих оборудования и технологий. Возможно, этим объясняется тот факт, что в последнее двадцатилетие практически нет исследований по зондовому замеру (табл. 2).

### Выводы

Проанализирована динамика развития методов контроля конвертерной ванны.

### Библиографический список

1. Охотский В.Б. Модели металлургических систем. – Днепропетровск: Системные технологии, 2006. – 287 с.
2. Rote F.E., Flinn R.A. // Met. Trans. - 1972. - June. - P. 1373-1384.
3. Narita S., Kaiko S., Furusaki T., Masuo H. // Trans. ISI. - Jap. 1977. - V. 17. - № 9. - P. 534-540.
4. Козин Г.Н., Матухно Г.Г., Китаев А.Т. и др. // Сталь. - 1968. - № 5. - С. 411-413.
5. Токовой С.К., Поволоцкий Д.Я., Абезгауз М.З. и др. // В кн. Сталеплавильное производство. – Кемерово: КПИ, 1975. - С. 59-63.
6. Апельдорн Г.-Я., Хуббелинг П.Д., Гостьес Н. // Сталь. - 2005. - № 10. - С. 58-61.
7. Кацура К., Накамура Ш. // В кн. Производство стали с применением кислорода. – М.: Металлургия, 1965. - С. 385-391.

Поступила 20.08.2012

УДК 669.184

Кулик А.Д. /к.т.н./, Кашцев М.А. /к.т.н./, Похвалитый А.А., Сотниченко С.С.

Днепродзержинский государственный технический университет

Наука

## Совершенствование выпуска стали из конвертера

*Разработана модель выпускного канала 250-т конвертера, изложены первые результаты холдного моделирования взаимодействия в ее полости газовых струй со струей жидкости. Ил.3. Табл. 3. Библиогр.: 1 назв.*

**Ключевые слова:** выпускной канал, длительность выпуска, летка-диспергатор, газожидкостный поток, организация струи, брызгоунос

*The model of the outlet of a 250 tons converter was developed and the first results of cold modeling the interaction of gas flows with the liquid flow in its cavity were presented.*

**Keywords:** outlet, tapping time, dispersing taphole, gas-liquid flow, flow organization, drop entrainment

### Постановка проблемы

Выпускной канал любого СП агрегата является очень важным его узлом, от состояния и геометрических параметров которого во многом зависят ре-

зультаты производства стали. Его функции в последние десятилетия расширены в связи с проблемой отсечки печных шлаков. Вместе с тем, для конвертерной технологии обостряется необходимость увеличе-

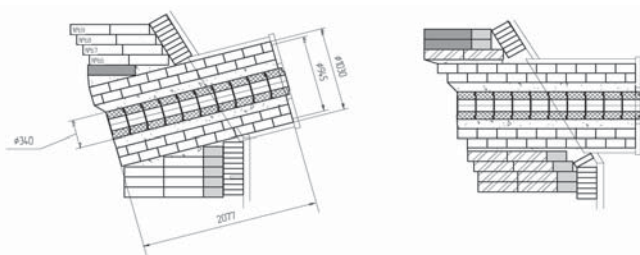


Рис. 1. Разновидности исполнения леток

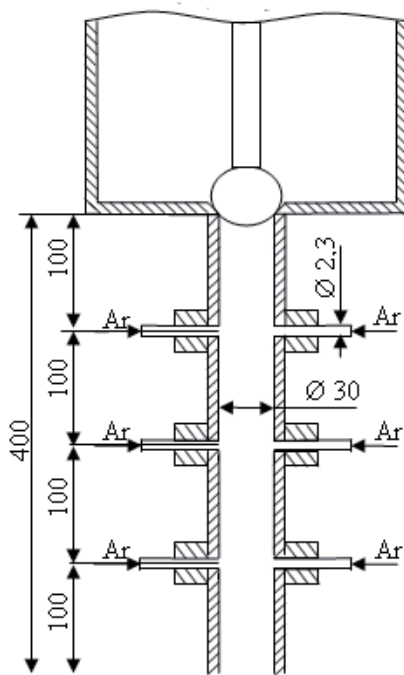


Рис. 2. Упрощенная схема устройства модели летки, закрепленной на емкости с жидкостью

ния рафинировочного потенциала – назвали проблемы снижения окисленности (на выпуске  $\Delta[O] \geq 800-1200$  ppm), десульфурации и дегазации металла.

Анализ процессов, протекающих в выпускном канале показывает, что имеет место недооценка его рафинировочного потенциала. На рис. 1 представлены схемы различного исполнения леточных узлов для 250-т конвертера с размерами канала  $L = 2000$  мм и  $d = 150$  мм.

**Цель работы** – изучить особенности преобразования жидкого металла в полости выпускного канала в газометаллический поток и динамику сформировавшегося потока вне летки.

**Моделирование**

Использован метод анализа размерностей [1]. В качестве зависимой переменной приняли продолжительность истечения металла из конвертера ( $\tau_{\text{вып.}}$ ) в зависимости от факторов

$$\tau_{\text{вып.}} = c \cdot d_0^n \cdot d_i^a \cdot h_{\text{me}}^c \cdot g^p \cdot W_{\text{r}}^t \cdot W_{\text{me}}^b \cdot \sigma_{\text{Me}}^k \cdot \rho_{\text{r}}^s \cdot \rho_{\text{me}}^d, \quad (1)$$

где  $c$  – безразмерный коэффициент пропорциональности;  $d_i$  – диаметр летки, м;  $d_0$  – диаметр газового сопла, м;  $h_{\text{me}}$  – высота столба металла, м;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $W_{\text{r}}$  – скорость истечения газа из сопла, м/с;  $W_{\text{me}}$  – скорость движения металла в летке, м/с;  $\sigma_{\text{Me}}$  – поверхностное натяжение жидкости, Н/м;  $\rho_{\text{r}}$ ,  $\rho_{\text{me}}$  – плотность газа и металла со-

ответственно, кг/м<sup>3</sup>;  $n$ ,  $a$ ,  $c$ ,  $p$ ,  $t$ ,  $b$ ,  $k$ ,  $s$ ,  $d$  – неизвестные показатели степени.

После соответствующих преобразований получили зависимость

$$\frac{\tau_{\text{вып.}} \cdot W_{\text{Me}}}{d_i} = c \left( \frac{W_{\text{Me}}^2}{d_i \cdot g} \right)^p \cdot \left( \frac{h_{\text{Me}}}{d_i} \right)^c \cdot \left( \frac{d_i \cdot \rho_{\text{Me}} \cdot W_{\text{Me}}^2}{\sigma_{\text{Me}}} \right)^k \cdot \left( \frac{W_{\text{r}}}{W_{\text{Me}}} \right)^t \cdot \left( \frac{\rho_{\text{r}}}{\rho_{\text{Me}}} \right)^s \cdot \left( \frac{d_0}{d_i} \right)^n, \quad (2)$$

где  $\varepsilon = \frac{\tau_{\text{вып.}} \cdot W_{\text{Me}}}{d_i}$  – безразмерное время истечения жидкости;  $K_W = \left( \frac{W_{\text{r}}}{W_{\text{Me}}} \right)$  – симплекс отношения скоростей истечения газа и металла;  $K_c = \frac{h_{\text{Me}}}{d_i}$  и  $K_d = \left( \frac{d_0}{d_i} \right)$  – симплексы геометрического подобия;  $K_{\rho} = \frac{\rho_{\text{r}}}{\rho_{\text{Me}}}$  – симплекс плотностей и  $Fr = \frac{W_{\text{Me}}^2}{d_i \cdot g}$  – число Фруда.

В качестве базового приняли число Вебера и нашли масштабный коэффициент

$$\frac{d'_{\text{M2}}}{d_i} = \sqrt{\frac{\rho_{\text{r}} \cdot \sigma_{\text{M}}'}{\sigma_{\text{Me}} \cdot \rho_{\text{M},\text{r}}'}} \approx 0,2, \quad (3)$$

где переменные со штрихом означают параметры модели,  $d'_M$  – диаметр выпускного канала модели.

Сталь моделировали водой, а аргон – воздухом.  $\rho_{\text{Me}1600} \approx 7000$  кг/м<sup>3</sup>;  $\sigma_{\text{Me}} \approx 1,865$  Н/м;  $\rho_{\text{воды}20}' = 1000$  кг/м<sup>3</sup>;  $\sigma_{\text{возд}}' = 0,073$  Н/м;  $\rho_{\text{r}}(\text{аргон}) = 1,78$  кг/м<sup>3</sup> и для воздуха  $\rho_{\text{M},\text{r}}' = 1,29$  кг/м<sup>3</sup>.

При диаметре летки конвертера 150 мм диаметр канала ее модели составил 30 мм. Модель изготовили из плексигласа с попарным расположением на 3-х уровнях сопел для подачи газа в полость летки в режиме противотока (рис. 2).

Массовый расход воздуха оценили, используя известный [1] М-критерий

$$M = \frac{M_{\text{Ar}}}{\rho_{\text{Ar}} \cdot g^{\frac{1}{2}} \cdot d_i^{\frac{5}{2}}} = \frac{M'_{\text{возд}}}{\rho'_{\text{возд}} \cdot g^{\frac{1}{2}} \cdot d'_{\text{M2}}^{\frac{5}{2}}} \quad \text{и выражения:}$$

$$\frac{d'_{\text{M2}}}{d_i} = \frac{1}{5} \quad \text{и} \quad M'_{\text{возд}} = \frac{M_{\text{Ar}} \cdot \rho'_{\text{возд}}}{\rho_{\text{Ar}} \cdot 5^{\left(\frac{5}{2}\right)}},$$

где  $M_{\text{Ar}}$  и  $M_{\text{возд.}}$  – соответственно расходы газов, вдуваемых в полость летки (аргон) и канал модели (воздух), кг/с.

Расход воздуха на модели изменяли от 0,039 м<sup>3</sup>/мин до 0,310 м<sup>3</sup>/мин и контролировали ротаметром марки РС-9.

В табл. 1 приведены параметры образца и модели.

**Результаты моделирования**

Проведено несколько серий испытаний. В первой серии определили продолжительность выпуска

Таблица 1. Параметры образца и модели

Наименование переменных	Образец	Модель
Высота столба жидкости Н, мм	1500	300
Диаметр летки d <sub>л</sub> , мм	150	30
Длина летки Н <sub>л</sub> , мм	2000	400
Диаметр отверстия для подачи газа в летку, мм	–	2,3
Число сопел	–	2-6
Угол наклона сопел к стенке летки, град.	–	90
Жидкость	Сталь	Вода
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	7000	1000
Поверхностное натяжение, Н/м	1,2	0,073
Средне массовый расход жидкости, т/мин	24	0,154
Газ для обработки жидкости	–	Воздух
Плотность газа, кг/м <sup>3</sup>	–	1,29
Расход газа, м <sup>3</sup> /мин	2,4-24	0,10 - 0,62

Таблица 2. Количественная оценка первой и второй серии опытов

Уровень жидкости в емкости, мм	Продолжительность истечения, с		τ <sub>2</sub> /τ <sub>1</sub>
	Обычная струя, τ <sub>1</sub>	С обработкой струи сжатым воздухом, τ <sub>2</sub>	
1000-900	9	14	1,56
900-800	9	15	1,67
800-700	10	16	1,60
700-600	10 (38)	17 (62)	1,70
600-500	11	18	1,64
500-400	12	20	1,67
400-300	12	23	1,92
300-200	13	26	2,00
200-100	14	29	2,07
100-0	16	34	2,13

воды массой 300 кг (начальная высота столба воды Н = 1000 мм) из емкости без воздействия на неё, во второй – с подачей сжатого воздуха через 6 отверстий диаметром 2,3 мм каждое, расположенные в три яруса, как показано на рис. 2. Результаты испытаний приведены в табл. 2.

Таким образом, при подаче сжатого газа в канал модели летки в количестве 0,6 м<sup>3</sup>/мин продолжительность выпуска удлиняется в 1,8 раза. При указанном расходе газа происходит разбрызгивание струи с уносом 0,15 % от массы жидкости, угол разбрызгивания достигал 10–15° на выходе из летки.

Установлено, что газовые струи под действием потока жидкости изгибаются, образуя воронку (рис. 3а), глубина которой зависит от расхода газа (рис. 3б).

При расходе газа 0,3-0,7 м<sup>3</sup>/мин противоположные газовые струи сливаются. В итоге весь поток в полости летки разделяется на три зоны: верхнюю – с течением только жидкости; зону взаимодействия жидкой и газовой фаз в районе сопел; нижнюю – зону газожидкостного потока.

В связи с явлением брызгообразования провели третью серию опытов, целью которых было опреде-

Таблица 3. Результаты третьей серии опытов – изучение брызгоуноса

Условия опыта		Продолжительность истечения, с	Брызгоунос, г / %
Место подачи газа	Расход газа, м <sup>3</sup> /мин		
Без подачи воздуха	0	46	20 / 0,01
Воздух через 6 отв.	0,60	70	440 / 0,15
Первый ярус (100 мм, 2 отв.)	0,42	75	28 / 0,02
			48 / 0,03
Второй ярус (200 мм, 2 отв.)	0,42	70	80 / 0,05
Третий ярус (300 мм, 2 отв.)	0,42	65	1100 / 0,73

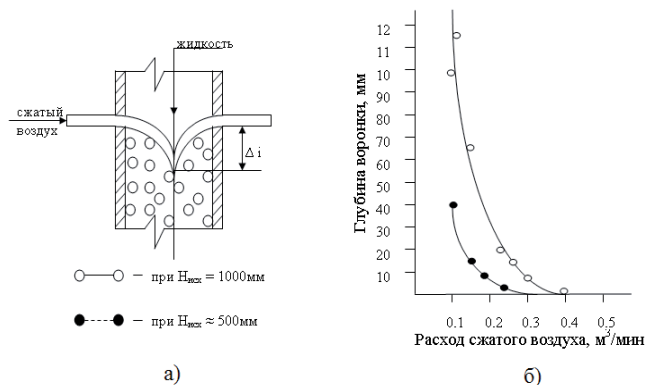


Рис. 3. Влияние расхода газа на глубину воронки

ление влияния режима обработки на величину брызгоуноса. Подачу сжатого воздуха выполняли через сопла, попарно расположенные на трех ярусах: 300, 200 и 100 мм от нижнего торца при уровне воды в емкости 600 мм. Результаты приведены в табл. 3.

Анализ данных табл. 3 позволил установить, что по мере удаления сопел от нижнего торца брызгоунос снижается.

Из вышесказанного следует, что лучшая организация потока обеспечивается при расположении сопел в верхней части летки.

**Выводы**

Проведено моделирование гидродинамических процессов при вдувании газа в канал выпускного отверстия конвертера. Установлена возможность преобразования струи металла в полости выпускного канала в газожидкостный поток с различной степенью организации его после выхода из летки. Определен режим, при котором брызгоунос имеет минимальное значение, а поток наиболее организован.

**Библиографический список**

1. Марков Б.Л., Кирсанов А.А. Физическое моделирование в металлургии. - М.: Металлургия, 1984. – 119 с.

Поступила 29.11.2012