

Е.И. Волкова, Д.Ю. Рябов, П.Р. Шеллер

Институт производства чугуна и стали,
ТУ «Горная академия Фрайберга»

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРОДУВКИ ГАЗОМ ПРИ ВНЕПЕЧНОЙ ОБРАБОТКЕ СТАЛИ

Проведены лабораторные исследования геометрических и скоростных характеристик двухфазового потока, а также геометрии продувочного пятна при использовании пробки с ненаправленной пористостью. Измерения скоростей проведены с помощью метода PIV.

Продувка жидкой стали в ковше внепечной обработки представляет собой сложный комплекс гидродинамических, диффузионных, химических и тепловых явлений, которые определяющим образом влияют на качество стали. Продувку инертным газом используют для гомогенизации химического состава и температуры, для удаления неметаллических включений и газов, интенсификации реакций между шлаком и сталью и для легирования. Оптимальным является такой процесс продувки, при котором реакционные поверхности «газ – сталь», «шлак – сталь» наибольшие, а поверхность продувочного пятна наименьшая. С увеличением поверхности продувочного пятна увеличивается набор кислорода сталью и создаются дополнительные тепловые потери.

Изучение гидродинамики продувки жидкой стали газом с помощью физического или математического моделирования не ново. Так, процессы перемешивания и продувочное пятно при продувке с использованием водных моделей с различными маслами были изучены в работах [1–10]. При этом размеры продувочного пятна измерялись как функции геометрии газового сопла, количества сопел, скорости продувки, соотношения диаметра и высоты ковша, а также толщины шлакового слоя. Время перемешивания измерялось с помощью электродондов, а геометрические характеристики струи – с помощью оптического оборудования. Для определения содержания газа в двухфазовом потоке, а также для определения размера и частоты газовых пузырьков как функций координат в водных моделях использовались специальные электропробы [11–14]. Подобные электропробы применялись на горячих моделях [15–16], где в качестве жидкой фазы использовали сплав Вуда и железо. При этом опыты проводились при температурах 105 и 1600 °С. Для определения скорости газовых пузырьков и воды использовалось лазер-

ное оборудование по принципу LDV (laser doppler velocimeter) [11, 13], LDA (laser doppler anemometry) [14] и пропеллерный измеритель потока [12].

Аналитическое описание динамики двухфазовой струи выполнено в работах [17–18], анализ различных экспериментальных данных различных исследований представлен в [19]. Численное моделирование процесса продувки с использованием метода Лагранжа и Эйлера, стохастического алгоритма, модели Random Walk, CFD и кода Phoenix представлено в работах [2, 20–22].

Промышленные исследования гидродинамики двухфазового потока проводились в 30-тонном ковше VOD-процесса (вакуум-кислородное обезуглероживание) [23]. При этом высота слоя жидкой стали была 190–220 см, а соотношение диаметра и высоты составило 1,1–1,2. Аргон подавался в днище ковша через пористую пробку диаметром от 6 до 10 см, в зависимости от износа. С целью измерения геометрии продувочного пятна в ковш с жидкой сталью без шлака на 15–30 с опускался стальной лист толщиной 5 мм. Профиль листа после оплавления измерялся. Скорость движения отдельных пузырьков в двухфазовой струе была определена в «спокойном» ковше путем быстрого (время менее 1 с) открывания преднастроенной газовой задвижки. Скорость продувки составляла 35–230 нЛ/мин. Исходя из диаметра, высоты продувочного пятна (профиль оплавленного листа) и скорости движения пузырьков, с помощью методики, описанной в работе [23], были рассчитаны скорость двухфазового потока, диаметр пузырьков и угол раскрытия струи.

Описанные исследования были проведены на водных моделях с подачей газа через сопло, встроенное в днище. На сегодняшний день газ подводится через встроенную пористую пробку. Результаты работ, выполненных различными авторами, отличаются по характеру поведения скоростей жидкой и газовой фазы по высоте ковша. Лабораторные исследования не сравнивались с промышленными. Целью данной работы являлось изучение гидродинамики образования двухфазового потока (размер пузырьков, угол раскрытия струи, скорость двухфазового потока, размер продувочного пятна, содержание газа в струе) как функции расхода газа в лабораторных условиях на водной модели со встроенной пористой пробкой и сравнение результатов с различными лабораторными, аналитическими и промышленными исследованиями.

Экспериментальная часть. Во время лабораторных исследований использовалась водная модель 30-тонного ковша (масштаб 1:4,5) и лазерная система New Wave Solo 200XT. Лабораторные исследования проводились в водной модели диаметром 445 мм и высотой 500 мм, выполненной из плексигласа и помещенной в дополнительный резервуар во избежание оптических искажений. Вместо жидкой стали использовалась вода, вместо шлака – масло, вместо продувочного газа – аргон. Расход газа регулировался с помощью ротаметров. При этом уровень воды был 440 мм, а масла – 6 мм. Исследова-

ния проводились как с маслом, так и без. Для подвода газа в центр днища модели была встроена пористая пробка диаметром 30 мм, аналогичная промышленным образцам с ненаправленной пористостью, изготовленная специально для исследований.

Для определения скорости двухфазового потока, диаметра пузырьков и угла раскрытия струи использовались лазерная установка New Wave Solo 200 XT (лазер класса 4, длина волны 532 нм) предназначенная для методов PIV (particle image velocimetry) и PLIF (planar laser-induced fluorescence), а также CCD-камеры (charge-coupled device), согласованные с пульсацией лазера, что позволяет сохранять изображение во время импульса. Частота пульсации устанавливалась с помощью триггера в программе Flowmanager в пределах от 1 до 16 Гц. В воду добавлялись частицы алюминия или Rhodamine 6G (флюоресцирующее под лазерным излучением вещество). Dantec Flowmanager был использован для обработки полученных изображений и для преобразования векторных скоростных полей потока в числовую форму. Для измерения геометрических характеристик двухфазового потока (угол раскрытия струи, диаметр пятна, диаметр пузырька, высота подъема струи над уровнем жидкости), а также для определения содержания газа в струе использовался модуль Image C программы Analysis.

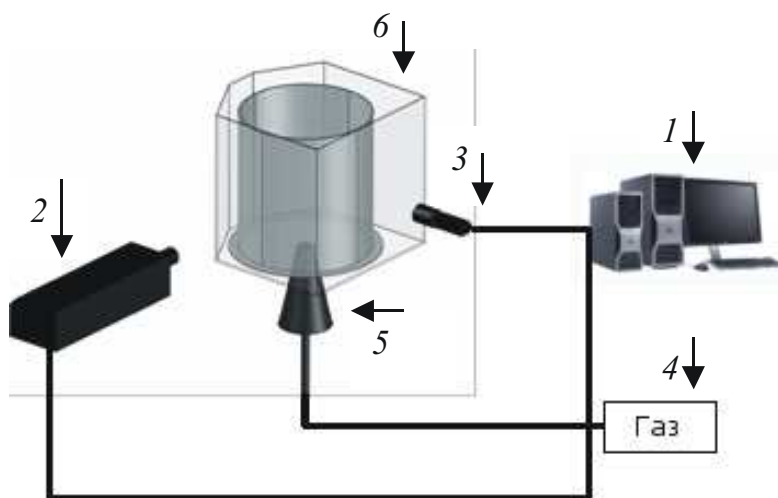


Рис. 1. Схема установки:

- 1 – рабочая станция Dell Precision; 2 – лазер Solo 200XT; 3 – CCD-камера;
- 4 – система подачи газа с измерением расхода; 5 – пористая пробка из огнеупорного материала, 6 – плексигласовая модель

Выбор расхода газа. Для сравнения лабораторных результатов с промышленными необходимо правильно выбрать расход газа. Различные исследова-

дователи использовали в своих работах разные критерии подобия. В качестве критерия подобия использовался:

– в работах [4–5] – критерий Фруда

$$\text{Fr} = \frac{v}{\sqrt{gd}}; \quad (1)$$

– в работах [12–13, 16] – модифицированный критерий Фруда

$$\text{Fr} = \frac{Q^2 \rho_g}{gd^5 \rho_l}; \quad (2)$$

– в работах [6], [8] и [24] – следующие функции:

$$Q_{\text{ladle}} = \lambda^{2,75} V Q_{\text{model}}, \quad (3)$$

$$Q_{\text{ladle}} = \lambda^{2,5} Q_{\text{model}}, \quad (4)$$

$$Q_{\text{ladle}} = \lambda^{1,5} Q_{\text{model}}, \quad (5)$$

где v – скорость газа, м/с;

d – диаметр сопла или пористой пробки, м;

g – ускорение свободного падения, м/с²;

Q – расход газа, м³/с;

ρ_g – плотность газа, кг/м³;

$\rho_g \rho_l$ – плотность жидкости, кг/м³;

$\rho_g \lambda$ – критерий геометрического подобия.

Если принять, что процесс продувки жидкой стали газом в ковше зависит от следующих параметров:

– плотность жидкости ρ_l , кг/м³;

– плотность газа ρ_g , кг/м³;

– динамическая вязкость жидкости η_l , кг/(с·м);

– диаметр пористой пробки d , м;

– скорость газа v_g на выходе из пробки, м/с;

– ускорение свободного падения g , м/с²;

– поверхностное натяжение σ , кг/с²;

и использовать матричный метод Крамера, то получается, что процесс продувки может быть модифицированным критерием Мортонна:

$$\text{Mo}^* = \frac{(\rho_l - \rho_g)^3 g^2 d \eta_l^4}{\sigma^3 \rho_g^4 v_g^2} = \frac{\text{Mo}}{\text{Fr}^2}. \quad (6)$$

Свойства воды, стали и аргона для расчета расходов газа приведены в табл. 1. Размер пористой пробки и расходы газов 30-тонного ковша был взят из работы [23]. Рассчитанные расходы газа представлены в табл. 2.

Таблица 1

Свойства воды, стали и аргона

Материал	Плотность, кг/м ³	Динамическая вязкость, Па·с	Поверхностное натяжение, кг/с ²
Сталь	7000	0,004998	1
Вода	998,2	0,001001	0,073
Аргон	1,662	22,7·10 ⁻⁶	–

Таблица 2

Рассчитанный по формулам (1)–(6) расход газа

Промышленный 30-тонный ковш, нл/мин	Гидравлическая модель, л/ч при 3 атм					
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
35	123	18	19	28	127	15
60	211	32	33	48	217	25
120	421	64	66	97	435	50
180	632	97	100	145	653	75
240	843	129	132	193	871	100

Как видно из табл. 2, рассчитанные по различным формулам расходы газа отличаются друг от друга. К сожалению, способы пересчета расходов не были проанализированы или продискутированы в литературе. Области применения различных формул и их ограничения неизвестны. В данной работе расход газа на гидравлической модели выставлялся с уравнением (6).

Результаты. Наблюдаемое продувочное пятно и высота подъема жидкой стали показаны на рис. 2 и рис. 3. С повышением расхода аргона увеличивается как диаметр продувочного пятна, так и высота поднятия жидкой стали. Подъем стали имеет максимальную высоту в центре пятна. Диаметр увеличивается пропорционально расходу газа, а высота подъема зависит от количества газа и кинетической энергии потока. Высота подъема воды, как и диаметр пятна, могут меняться в небольших пределах. Причиной этого является пульсация входящего газа. В табл. 3 представлены значения угла раскрытия струи и диаметра продувочного пятна. Экспериментально полученные лабораторные данные по углу раскрытия двухфазной струи полностью совпадают с промышленными результатами, полученными в ходе исследований в 30-тонном ковше [23]. Соотношение диаметров продувочных пятен лабораторных и промышленных исследований равно приблизительно 4,5, что

соответствует геометрическому подобию гидравлической модели. Диаметр продувочного пятна увеличивается с повышением расхода газа и уменьшается с утолщением шлакового слоя (рис. 4).

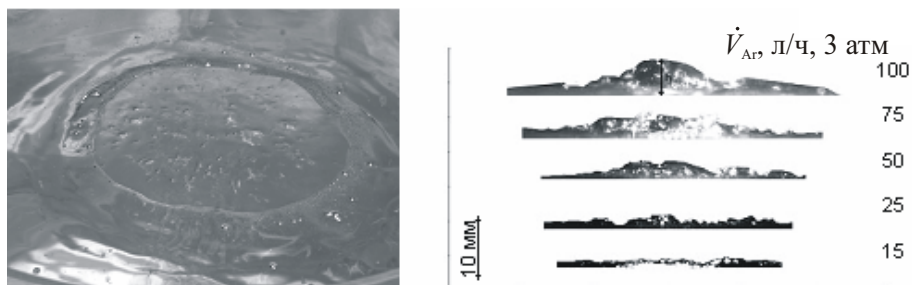


Рис. 2. Продувочное пятно и высота поднятия жидкой стали в гидравлической модели

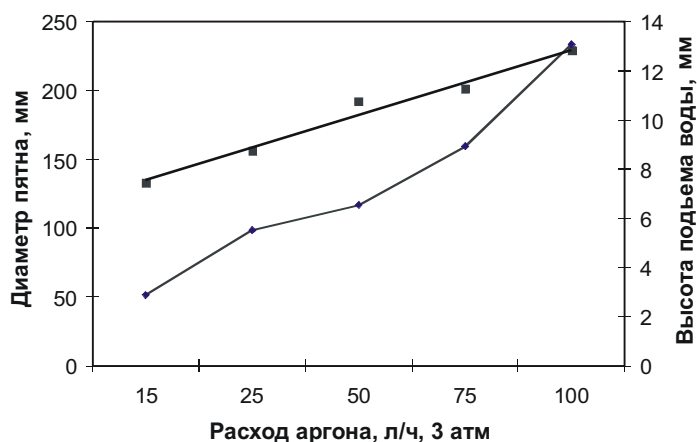


Рис. 3. Диаметр пятна и высота подъема воды в гидравлической модели при работе без масла

Таблица 3

Угол раскрытия двухфазной струи и диаметр продувочного пятна

Критерий Моргона	Расход аргона		Угол раскрытия струи, град		Диаметр продувочного пятна при работе без шлака/ масла, мм		
	30-тонный ковш, лл/мин	модель, л/ч, 3 атм	30-тонный ковш	модель	30-тонный ковш	модель	соотношение
11 582	35	15	3,06	3,56	603,52	143	4,22
3941	60	25	4,38	4,79	658,27	153	4,30
985	120	50	6,93	5,77	789,67	169	4,67
438	180	75	9,07	8,01	921,07	200	4,61
246	240	100	10,98	9,46	1052,47	231	4,56

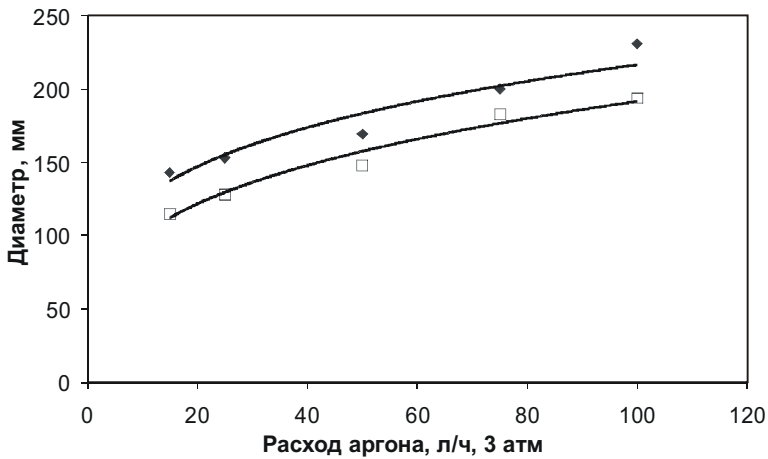


Рис. 4. Диаметр продувочного пятна в гидравлической модели: слой масла:

◆ — 0 мм; □ — 6 мм

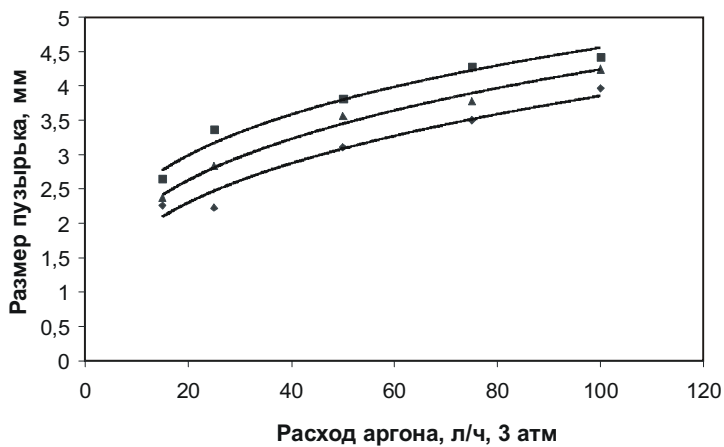


Рис. 5: Измеренный диаметр пузырьков в гидравлической модели:

■ — верх; ▲ — середина; ◆ — низ

Размер газовых пузырьков изменяется по высоте гидравлической модели и увеличивается с повышением расхода газа (рис. 5). Двухфазный поток ускоряется по высоте ковша, а также его скорость растет с увеличением расхода газа (рис. 6).

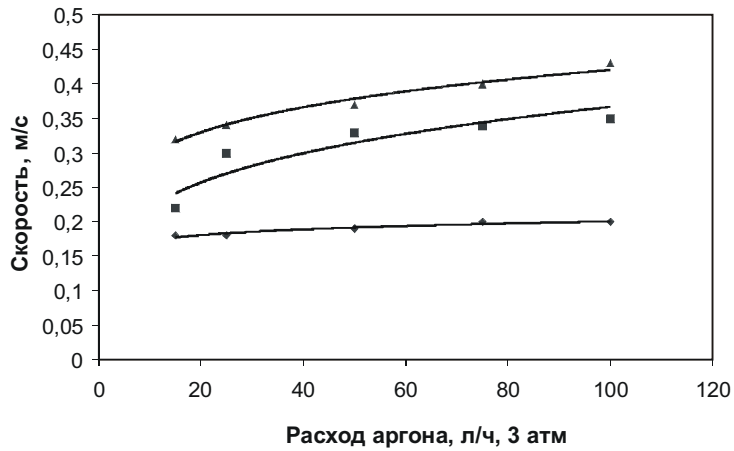


Рис. 6. Измеренная скорость двухфазового потока в гидравлической модели:

▲ — верх; ■ — середина; ◆ — низ

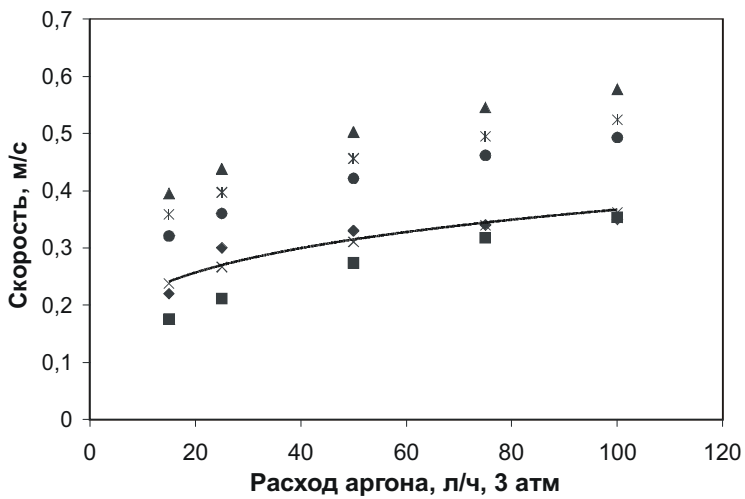


Рис. 7. Сравнение измеренной скорости двухфазового потока с литературными данными: ◆ — представленная работа; ■ — Irons [17]; ▲ — Iguchi [13]; × — Iguchi [11]; * — Pluschkell [18]; ● — Scheller [23]

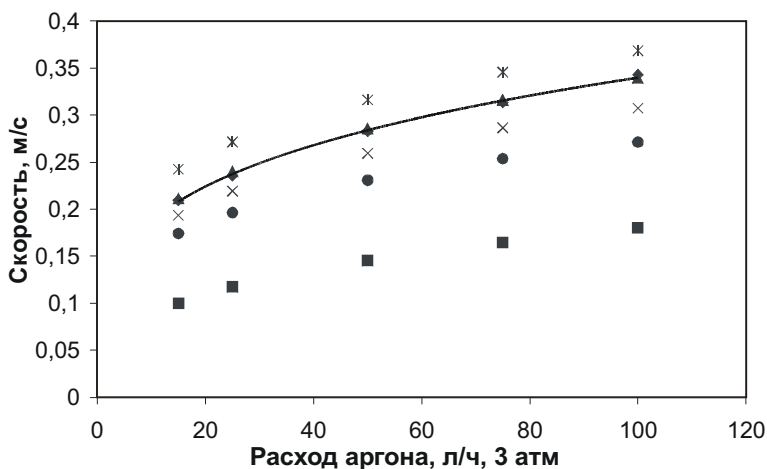


Рис. 8. Измеренная скорость воды и ее сравнение с литературными данными: ♦ – представленная работа; ▲ – Pluschkell [18]; * – Iguchi [11]; ■ – Irons [17]; × – Schwerdfeger [12]; ● – Scheller [23]

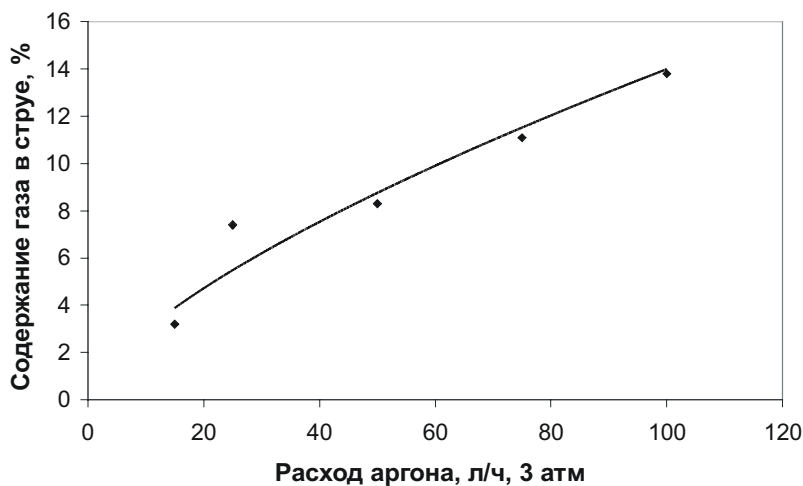


Рис. 9. Содержание газовой фазы в двухфазовом потоке

Измеренная скорость двухфазового потока в центре ковша была сравнена с литературными данными (рис. 7). Известные эмпирические зависимости скоростей из литературы представлены в табл. 4. Наибольшая схожесть была получена с данными Iguchi [11]. В своей работе Iguchi разделил весь двухфазовый поток на четыре зоны, в зависимости от содержания газовой фазы. При этом было установлено, что характер движения потока различен для каждой зоны. Область с содержанием газовой фазы равной или меньше 10 % Iguchi обозначил как «buoyancy», т.е. зону, в которой движение обусловлено силой Архимеда. В нашем случае в центре ковша содержание

газовой фазы в потоке составляет приблизительно 10 % (рис. 9). На рис. 8 показана измеренная скорость воды и ее сравнение с литературными данными. Наибольшая сходимость была получена с работами [11, 12, 18].

Таблица 4

Скорость двухфазового потока и воды

Источник	Скорость потока	Скорость воды
Iguchi [11]	$v = 1,24 \left(\frac{gQ}{z} \right)^{1/3} \left(\left(\frac{Q^2}{gz^5} \right)^{1/5} \right)^{-0,28}$ см/с	$v = 3,02 Q^{0,22} z^{0,055}$ м/с
Schwerdtfeger [12]	–	$v = 3,5 \left(\frac{\rho_g}{\rho_l} \right)^{0,02} Q^{0,244} z^{-0,08}$ м/с
Iguchi [13]	$v = 53 \left(\frac{Q^2}{g} \right)^{0,1}$ см/с	–
Irons [17]	$v = 7,3 Q^{0,37} z^{-0,43}$ м/с	$v = 2,57 Q^{0,31} z^{-0,28}$ м/с
Pluschkell [18]	$v = 3,81 Q^{0,2} z^{-0,003}$ м/с	$v = 3,4 Q^{0,25} z^{-0,12}$ м/с
Scheller [23]	$v = 38,784 Q^{0,226}$ л/мин, см/с	$v = 21,179 Q^{0,234}$ л/мин, см/с

Анализ литературы показал, что несмотря на большое количество исследований не существует единого критерия подобия для физического моделирования процесса продувки в ковше. Результаты исследований различных авторов отличаются друг от друга. В данной работе в качестве критерия подобия был выбран модифицированный критерий Мортонa. Сравнение результатов данной работы с литературными источниками показало, что несмотря на разницу в использованном оборудовании и методах измерения существует хорошая сходимость с работами [11, 12, 18]. Также получена сходимость лабораторных результатов с промышленными исследованиями [23]. Геометрия продувочного пятна, скорость движения воды и потока, содержание газовой фазы показывают сильную зависимость от количества вдуваемого аргона.

Список литературы

1. Study of slag/metal interface in ladle treatment / P. Dayal [et al.] // Ironmaking and Steelmaking. – 2006. – P. 454–464.
2. Control of gas bubbles and slag layer in a ladle furnace by electromagnetic stirring / U. Sand [et al.] // AISTech 2008, Iron and Steel Technology Conference, Pittsburgh, US, 5–8 May 2008.

3. Study on fluiddynamic features of combined gas and electromagnetic stirring in ladle furnace / U. Sand [et al.] // Scanmet, 3rd International Conference on Process Development in Iron and Steelmaking, 8–11 Juny 2008 Lulea. – P. 459–468.
4. Optimization of argon-injection process parameters for ladle treatment of steel / A. Smirnov [et al.] // EOSC, 5th European Oxygen Steelmaking Conference, 5, Aachen, DE, 26–28 Juny 2006. – P. 272–279.
5. Influence of bottom stirring conditions on gas-liquid reaction rate // N. Maruoka [et al.] // Scanmet, 3rd International Conference on Process Development in Iron and Steelmaking, 8–11 Juny 2008 Lulea. – P. 449–458.
6. Sheng D-Y. Study on steel/slag interaction in a gas stirring ladle by numerical simulation and physical modelling experiment // Clean Steel, 7th International Conference on Clean Steel, Balatonfüred, HU, 04–06 Juny 2007. – P. 183–192.
7. Krishnakumar K., Irons G.A. A model study of slag eye formation during gas purging at the surface of a metal bath // ICS 2005, 3rd International Congress on the Science and Technology of Steelmaking, Vol. 1, Charlotte, US, 9–12 May 2005. – P. 833–844.
8. Variation on the geometric profile of a steelmaking ladle and its effect on the mixing / J.A.M. Pereira [et al.] // Steel Grips, 2006, 1. – P. 34–39.
9. Kim S.H., Fruehan R.J. Physical modeling of liquid/liquid mass transfer in gas stirred ladles // Metallurgical transactions B, 1987. – P. 381–390.
10. Krishnapisharody K., Irons, G.A. A study of spouts on bath surfaces from gas bubbling: Part 1. Experimental investigations. Metallurgical and Materials Transactions B, 2007. – P. 367–375.
11. Velocity and turbulence measurements in a cylindrical bath subject to centric bottom gas injection / M. Iguchi [et al.] // Metallurgical and Materials Transactions B, 1995. – P. 241–247.
12. Castello-Branco M., Schwerdtfeger K. Large-scale measurements of the physical characteristics of round vertical bubble plumes in liquid // Metallurgical and Materials Transactions B, 1994. – P. 359–371.
13. Bubble characteristics in the buoyancy region of a vertical bubbling jet / M. Iguchi [et al.] // ISIJ International, 1992. – P. 747–754.
14. Sheng Y.Y., Irons, G.A. Measurements of the internal structure of gas-liquid plumes // Metallurgical Transactions B, 1992. – P. 779–788.
15. Iguchi M., Tokunaga, H. Molten Wood's-metal flow in a cylindrical bath agitated by cold bottom-gas injection // Metallurgical and Materials Transactions B, 2002. – P. 695–702.
16. Measurement of bubble characteristics in a molten iron bath at 1600°C using an electroresistivity probe / M. Iguchi [et al.] // Metallurgical and Materials Transactions B, 1995. – P. 67–74.

17. Krishnapisharody K., Irons G.A. A study of spouts on bath surfaces from gas bubbling: Part II. Elucidation of plume dynamics // *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2007. – P. 377–388.
18. Ebneith G., Pluschkell, W. Dimensional analysis of the vertical heterogeneous buoyant plume // *Steel research*, 1985. – P. 513–518.
19. Sudhakar V., Mazumdar D. A unified representation of the two-phase characteristics in gas-stirred ladle systems // *Metallurgical and Materials Transactions B*, 1996. – P. 704–798.
20. Guo D., Irons G.A. Modeling of gas-liquid reactions in ladle metallurgy: Part II. Numerical simulation // *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2000. – P. 1457–1464.
21. Mazumdar D., Guthrie R.I.L. On mathematical models and numerical solutions of gas stirred ladle systems // *Appl. Math. Modelling*, 1993. – P. 255–262.
22. Alexiadis A., Gardin P., Domgin J.F. Spot turbulence, breakup, and coalescence of bubbles released from a porous plug injector into a gas-stirred ladle // *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2004. – P. 949–956.
23. Steinmetz E., Scheller P.R. Beitrag zu den Stroemungsverhaeltnissen in einer Spuelsteinpfanne // *Stahl und Eisen*, 1987. – № 9. – P. 57–65.
24. Mazumdar D. Dynamic similarity considerations in gas-stirred ladle systems // *Metallurgical Transactions B*, 1990. – P. 925–928.

Получено 18.03.2010