

С. И. Семькин, Т. С. Голуб, С. А. Дудченко, В. В. Вакульчук

**ИССЛЕДОВАНИЕ НА ФИЗИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ С ВЕРХНЕЙ
ПРОДУВКОЙ ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО НАПОРА И ПАРАМЕТРОВ
СТРУИ ПРИ ЕЕ ИСТЕЧЕНИИ ИЗ КОЛЬЦЕВОГО КООКСИАЛЬНОГО
ЩЕЛЕВОГО СОПЛА В ЖИДКУЮ ВАННУ**

Институт черной металлургии им. З. И. Некрасова НАН Украины

Целью работы является исследование на физической модели газодинамического напора струи и параметров ее внедрения в жидкую ванну конвертера при истечении из кольцевой щелевой фурмы. Исследования проведены на «холодном» стенде с использованием воды в качестве имитирующей металл жидкости в масштабе 1:30 к 160-т конвертеру с учетом критериев геометрического и физического подобия. Проведена оценка усредненных значений глубины проникновения газового потока струи при различных дутьевых параметрах. Отмечено, что при верхней продувке через коаксиальное щелевое сопло при увеличении давления продувочного газа динамический напор и глубина внедрения струи увеличиваются. Увеличение динамического напора и глубины внедрения газовой струи приводит к увеличению степени воздействия на ванну и повышению степени усвоения кислорода расплавом. Показано, что при прочих равных условиях работа коаксиального щелевого отличается большим импульсом воздействия на жидкость, чем при продувке через одно центрально расположенное сопло эквивалентного щели диаметра, особенно при давлениях выше 0,15-0,3 Мпа. Показаны возможности повышения эффективности верхней продувки конвертерной ванны за счет применения щелевого коаксиального сопла.

Ключевые слова: конвертер, верхняя продувка, коаксиальное щелевое сопло, струя газа, эффективность

Постановка проблемы. В практике кислородно-конвертерного процесса основным управляющим инструментом является верхняя кислородная фурма. Диапазон воздействия ее на расплав, в большей мере определяется конструкцией наконечника, который должен создавать наибольший эффект по перемешиванию ванны и рафинированию металла [1-4]. В связи с этим по-прежнему актуальными являются работы по исследованию и разработке новых конструкций наконечников фурм и соответствующих дутьевых режимов, повышающих интенсивность и качество конвертерной продувки. Повышение эффективности продувки возможно при более полном использовании потенциальной энергии давления дутья, интенсификации перемешивания ванны и расширении возможностей управления плавкой и снижении рассеивания энергии истекающей струи. Это возможно достичь путем создания уплотнения среды на срезе сопла, что будет способствовать снижению рассеивания потока и повысит полноту передачи импульса струи окружающей среде.

В аэрокосмической технике для этих целей используют щелевое коаксиальное кольцевое сопло [5-7].

Целью данной работы было исследование газодинамического напора струи и параметров ее внедрения в жидкую ванну при истечении из кольцевой щелевой фурмы.

Методика эксперимента. В работе были проведены исследования фурмы с коаксиальным щелевым наконечником на «холодном» стенде емкостью 10 л (с использованием воды в качестве имитирующей металл жидкости), моделирующем верхнюю конвертерную продувку в масштабе 1:30 к 160-т конвертеру с учетом критериев геометрического и физического подобия, основным из которых был модифицированный критерий Фруда, обеспечивающий газо-гидро-динамическое подобие процессов, происходящих в модели и в конвертере [8-12]. Основным элементом модели была фурма со сменным сопловым наконечником. Конструктивные базовые параметры используемого коаксиального щелевого наконечника:

Внутренний диаметр сопла, м	Внешний диаметр сопла, м	Площадь щелевого сопла, м ²
0,005	0,006	11 * 10 ⁻⁶

В первом приближении щелевую фурму с указанными параметрами сопла можно рассматривать как много сопловый наконечник суммарной площадью сечения 11 мм² (выбрано согласно подобия суммарной площади сечений сопел на промышленном агрегате с 5-ти сопловым наконечником с диаметром сопел 32 мм), в котором по периметру щели плотно расположены сопла диаметром равным толщине щели. Следовательно, максимальное количество условных сопел в наконечнике фурмы для проведения экспериментов составляет 33 при щелевом промежутке 0,5 мм. Согласно газодинамическому подобию при истечении кислорода через много сопловой наконечник, не допускающий взаимное слияние параллельных струй, выбор расположения фурмы над ванной определяется калибрами одного из сопел. В то же время, для коаксиального щелевого сопла, вероятно, в большей мере подходит подобие, вычисленное через приведенный эквивалентный диаметр, учитывающий все сопла (определенный путем сложения сечений всех сопел), для данного сопла равный 3,3 мм.

Оценка газодинамических характеристик струи проводилась при продувке 5 л воды азотом из баллона при давлении газа от 0,025 до 0,2 МПа при двух положениях фурмы: 20 и 40 мм над уровнем жидкости. Емкость с жидкостью располагали на весах для регистрации динамики изменения веса модели и оценки газодинамического напора струи при различных дутьевых параметрах.

Изложение результатов исследования. На рис.1 представлены фотографии взаимодействия кислородной струи, исходящей из коаксиального щелевого сопла, с водой при различных давлениях истекающего газа при положении фурмы 20 и 40 мм, на основании которых была проведена оценка усредненных значений глубины проникновения газового потока, формируемого щелевым отверстием при различных дутьевых параметрах, результаты которых обобщены в табл. 1.









Положение фурмы 20 мм	Положение фурмы 40 мм	Давление газа, МПа
		0,025
		0,050
		0,075
		0,10

Рисунок 1 – Фотографии взаимодействия продувочной струи, истекающей из щелевого коаксиального сопла фурмы, при продувке на водяной модели

Как известно [13-17], глубина проникновения струи в жидкий металл считается наиболее характерным показателем, позволяющим оценить

степень воздействия струи на ванну. При недостаточной глубине ухудшается степень поглощения кислорода металлом и, как следствие, скорость обезуглероживания будет ниже возможной, возрастет окисленность шлака и т.д.

Визуальный анализ верхней продувки жидкости через коаксиальное щелевое сопло позволил выявить, что зона взаимодействия истекающей струи имела округлый вид. При анализе вертикальной зоны внедрения струи отмечено, что, в отличие от известного варианта продувки через одно цилиндрическое сопло, при котором зона взаимодействия струи конусоподобная со значительным расширением диаметра потока в месте внедрения струи по сравнению с внешним диаметром сопла [14, 17-20], зона внедрения потока от коаксиального щелевого сопла имела форму близкую к цилиндрической с диаметром, несколько превосходящим внешний диаметр щелевого сопла (особенно заметно при продувке с небольшим давлением продувочного газа при отсутствии значительных возмущений).

Таблица 1 – Обобщенные результаты газодинамической оценки работы коаксиального щелевого сопла

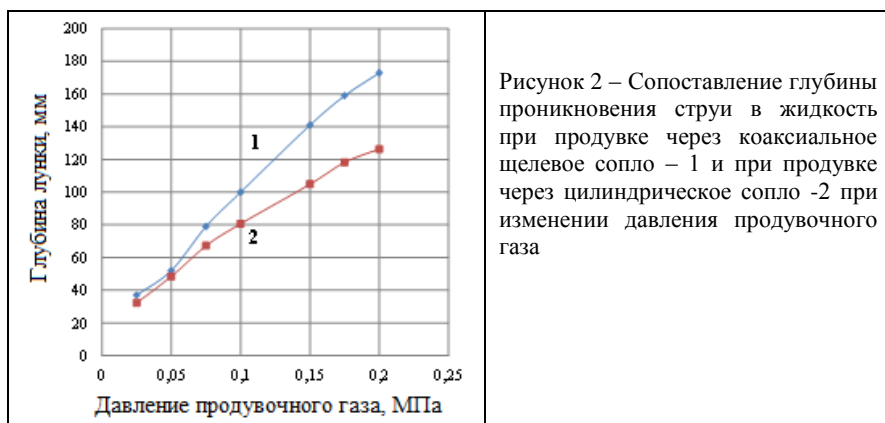
Давление газа, МПа	Динамический напор струи (выражен весом, г) при положении фурмы, м*10 ⁻³		Глубина лунки, м*10 ⁻³ при положении фурмы, м*10 ⁻³	
	20	40	20	40
0,025	12	13	40	37
0,050	29	28	76	52
0,075	43	40	93	79
0,100	61	62	133	100
0,125	78	84	153	125
0,150	98	100	180	141
0,175	113	120	199	159
0,200	130	135	220	173

При проведении исследований отмечено, что при верхней продувке через коаксиальное щелевое сопло при увеличении давления продувочного газа динамический напор, выраженный весом модели, и глубина внедрения струи (глубина лунки) увеличиваются.

Полученные результаты работы щелевой фурмы были сопоставлены с результатами продувки через одно сопловый наконечник, имеющий близкие размеры эквивалентного (приведенного) диаметра сопла, при одинаковом уровне расположения наконечников относительно продуваемой жидкости (рис.2). Анализ приведенных диаграмм показал, что при прочих равных условиях работа коаксиального щелевого сопла, вероятно, в связи с особым характером истечения струи газа на начальном

участке, отличается большим импульсом воздействия на жидкость, чем при продувке через одно центрально расположенное сопло эквивалентного щели диаметра, особенно при давлениях выше 0,15-0,3 МПа.

Об этом свидетельствует большая (примерно в 1,24-1,37 раз) глубина проникновения струи в жидкость, что можно пояснить заметным вовлечением в газовую струю окружающей атмосферы при продувке через опытную фурму. Вероятно, это связано с известным [13] фактом более медленного затухания скорости истечения газа по длине струи при использовании много сопловых наконечников по сравнению с одно сопловыми и, следовательно, струю, истекающую из кольцевого щелевого сопла можно считать много сопловой со взаимно смешанными струями.



Выводы. Таким образом, исследование работы коаксиального щелевого сопла на физической модели выявило, что его применение позволит повысить степень воздействия струи на ванну и при использовании в условиях горячей продувки повысить степень поглощения кислорода расплавом благодаря большей глубине проникновения струи и высоким показателям динамического напора струи, истекающей из данного сопла.

Библиографический список

1. *Чернятевич А.Г.* Разработка дутьевого и шлакового режимов конвертерной плавки при верхней кислородной продувке. Сообщение 1 / А.Г. Чернятевич // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2015. – №4. – С. 24–31.
2. *Бойченко Б.М.* Конвертерное производство стали / Б.М. Бойченко, В.Б.Охотский, П. С. Харлашин - РИА «Днепр-ВАЛ». - 2006. - 455 с.

*«Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии»,
Сборник научных трудов ИЧМ. – 2018. - Вып.32*

3. *Improving the Design of the Oxygen Lance and the Blowing Regime for BOF Steelmaking in the BOF Shop at the Azovstal Metallurgical Combine/* A. V. Sushchenko, E. O. Tskitishvili, R. S. Sidorchuk, N. N. Ligus, M. P. Orlichenko// *Metallurgist*.- 2014, Volume 57, Issue 9–10, P. 804–817.
4. *Naito K. Behavior of top-blowing lance jet in BOF/* K. Naito, A. Kaizawa, I. Kitagawa, N. Sasaki// *Nippon Steel Technical report no.* 104, august 2013, P 33-40.
5. *Тяговые характеристики кольцевых и плоских щелевых сопел с внутренней полостью/* В.В. Марков, В.Г. Громов, Н.Е. Афонина, Г.Д. Смехов, А.Н. Хмелевский // *Механика жидкости и газа. Вестник Нижегородского университета им. И. Лобачевского*.- 2011.- №3.- С. 971–973.
6. *Двухконтурное щелевое сопло ракетного двигателя /* В.В. Семенов, И.Э. Иванов, И.А. Крюков// *Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника*. – 2016. - №46. – С.56-72.
7. *Cold-gas experiments to study the flow separation characteristics of a dual-bell nozzle during its transition modes /*S. B. Verma, R. Stark, C. Nuereberger-Genin, O. Haidn // *Shock Waves*, 2010, vol.20, iss. 3, P.191-203.
8. *Physical and mathematical models of gas-liquid dynamics in BOF converters/*M. Diaz-Cruz, R.D. Morales, O. Olivares, A. Elias // *Steelmaking conference proceeding*.-2002. –P. 737-748.
9. *Яковлев Ю.И. Физическое и математическое моделирование сталеплавильных процессов/* Ю.И. Яковлев// *Вопросы теории и практики сталеплавильного производства: науч. Труды/ММИ*.-М.: *Металлургия*.-1991.-С. 32-44.
10. *Characteristics of jet from top-blown lance in converter /*K. I. Naito , Y. Ogawa , T. Inomoto , S. Kitamura , M. Yano // *ISIJ*.-2000.-vol.40. –P.23-30.
11. *Охотский В.Б. Модели металлургических систем /*В.Б. Охотский// *Днепропетровск: Системные технологии*, 2006. — 287 с.
12. *Mazumdar D. Modeling of steelmaking processes/* D. Mazumdar, J.W. Evans/ *Voca Raton, London, New York: CRS Press, Taylor and Francis Group*, 2010. – 463 p.
13. *Явойский В.И. Теория продувки сталеплавильной ванны /*В.И. Явойский, Г.А. Дорофеев, И.Л. Повх /*Москва: Металлургия*, 1974.-496 с.
14. *Jet penetration and bath circulation in the basic oxygen furnace /* R.A. Flinn, R.D. Pehlke, D.R. Glass, P.O. Hays // *Transactions Metallurg. Soc. AIME*. 1967. - V. 239. -№ 11.-P. 1776-1791.
15. *Ганзер Л.А., Протопопов Е.В., Чернятевич А.Г. Особенности верхней продувки конвертерной ванны струями с разным динамическим напором //* *Изв. вузов. Черная металлургия*. - 2004. - №2. - С. 13-16.
16. *Лухтура Ф.И. О глубине внедрения струи окислителя в расплав кислородного конвертера /* Ф.И. Лухтура, А.В. Линник// *Вістник Приазовського державного технічного університету. Технічні науки*.-ДВНЗ «ПДТУ».- Мариуполь.-2015.-вип. 3.-С. 122-135.
17. *Maia V.T. Effect of blow parameters in the jet penetration by physical model of BOF converter /* V.T. Maia, R.P. Tavares// *Journal of Materials research and Technology*.-2014.- vol. 3. iss.3.-P. 244-256.

Reference

1. Chernyatevich A.G. Razrabotka dut'yevogo i shlakovogo rezhimov konverternoy plavki pri verkhney kislorodnoy produvke. Soobshcheniye 1 / A.G. Chernyatevich // Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'. – 2015. – №4. – S. 24–31.
2. Boychenko B.M. Konverternoye proizvodstvo stali / B.M. Boychenko, V.B.Okhotskiy, P. S. Kharlashin - RIA «Dnepr-VAL». - 2006. - 455 s.
3. Improving the Design of the Oxygen Lance and the Blowing Regime for BOF Steelmaking in the BOF Shop at the Azovstal Metallurgical Combine/ A. V. Sushchenko, E. O. Tskitishvili, R. S. Sidorchuk, N. N. Ligus, M. P. Orlichenko// Metallurgist.- 2014, Volume 57, Issue 9–10, P. 804–817.
4. Naito K. Behavior of top-blowing lance jet in BOF/ K. Naito, A. Kaizawa, I. Kitagawa, N. Sasaki/ Nippon Steel Technical report no. 104, august 2013, P 33-40.
5. Tyagovyye kharakteristiki kol'tsevykh i ploskikh shchelevykh sopel s vnutrenney polost'yu/ V.V. Markov, V.G. Gromov, N.Ye. Afonina, G.D. Smekhov, A.N. Khmelevskiy // Mekhanika zhidkosti i gaza. Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im . I. Lobachevskogo.- 2011.- №3.- S. 971–973.
6. Dvukhkonturnoye shchelevoe soplo raketnogo dvigatelya / V.V. Semenov, I.E. Ivanov, I.A. Kryukov// Vestnik PNIPU. Aerokosmicheskaya tekhnika. – 2016. - №46. – S.56-72.
7. *Cold-gas* experiments to study the flow separation characteristics of a dual-bell nozzle during its transition modes /S. B. Verma, R. Stark, C. Nuereberger-Genin, O. Haidn // Shock Waves, 2010, vol.20, iss. 3, P.191-203.
8. *Physical* and mathematical models of gas-liquid dynamics in BOF converters/M. Diaz-Cruz, R.D. Morales, O. Olivares, A. Elias // Steelmaking conference proceeding.-2002. –P. 737-748.
9. Яковлев Ю.И. Физическое и математическое моделирование сталеплавильных процессов/ Ю.И. Яковлев// Вопросы теории и практики сталеплавильного производства: науч. Труды/ ММИ.-М.: Metallurgiya.-1991.-С, 32-44.
10. *Characteristics* of jet from top-blown lance in converter /K. I. Naito , Y. Ogawa , T. Inomoto , S. Kitamura , M. Yano // ISIJ.-2000.-vol.40. –P.23-30
11. Okhotskiy V.B. Modeli metallurgicheskikh sistem /V.B. Okhotskiy/ Dnepropetrovsk: Sistemnyye tekhnologii, 2006. — 287 s.
12. *Mazumdar D.* Modeling of steelmaking processes/ D. Mazumdar, J.W. Evans/ Boca Raton, London, New York: CRS Press, Taylor and Francis Group, 2010. – 463 p.
13. Явойский В.И. Теория продувки сталеплавильной ванны /В.И. Явойский, Г.А. Дорофеев, И.Л. Повх /Москва: Metallurgiya, 1974. -496 с.
14. *Jet* penetration and bath circulation in the basic oxygen furnace / R.A. Flinn, R.D. Pehlke, D.R. Glass, P.O. Hays // Transactions Metallurg. Soc. AIME. 1967. - V. 239. -№ 11.-P. 1776-1791.
15. Ganzler L.A., Protopopov Ye.V., Chernyatevich A.G. Osobennosti verkhney produvki konverternoy vannы struyami s raznym dinamicheskim naporem // Izv. vuzov. Chernaya metallurgiya. - 2004. - №2. - S. 13-16 .
16. Lukhtura F.I. O glubine vnedreniya strui oksislitelya v rasplav kislorodnogo konvertera / F.I. Lukhtura, A.V. Linnik// Vistnik Priazovs'kogo derzhavnogo tekhnichnogo universitetu. Tekhnichni nauki.-DVNZ «PDTU».- Mariupol'.-2015.- vip. 3.-S. 122-135.

17. *Maia B.T.* Effect of blow parameters in the jet penetration by physical model of BOF converter / B.T. Maia, R.P. Tavares// Journal of Materials research and Technology.-2014.- vol. 3. iss.3.-P. 244-256 .

С. І. Семикін, Т. С. Голуб, С. А. Дудченко, В. В. Вакульчук

Дослідження на фізичній моделі з верхньою продувкою газодинамічного натиску й параметрів струменя при його витіканні з кільцевого коаксіального щілинного сопла в рідку ванну

Метою роботи є дослідження на фізичній моделі газодинамічного напору газового струменя і параметрів його проникнення в рідку ванну конвертера при витіканні з кільцевої щілинної фурми. Дослідження проведено на «холодному» стенді в масштабі 1:30 до 160-т конвертера (з урахуванням критеріїв геометричного і фізичного подібності) з використанням води, що імітує розплав металу. Проведено оцінку усереднених значень глибини проникнення газового потоку струменя при різних дутєвих параметрах. Відзначено, що при верхній продувці через коаксіальне щілинне сопло при збільшенні тиску продувочного газу динамічний напір глибина впровадження струменя збільшуються. Збільшення динамічного напору і глибини впровадження газового струменя призводить до збільшення ступеня впливу на ванну і підвищенню рівня засвоєння кисню розплавом. Показано, що за інших рівних умов робота коаксіального щілинного відрізняється більшим імпульсом впливу на рідину, ніж при продувці через одне центрально розташоване сопло еквівалентного щілини діаметра, особливо при тисках вище 0,15-0,3 Мпа. Показано можливості підвищення ефективності верхньої продувки конвертерної ванни за рахунок застосування щілинного коаксіального сопла.

Ключові слова: конвертер, верхнє продування, коаксіальне щілинне сопло, струмінь газу, ефективність

S. I. Semykin, T. S. Golub, S. A. Dudchenko, V. V. Vakulchuk

Research in a physical model with the top blowing of a gas-dynamic head and jet parameters at blowing of a liquid bath through an annular coaxial slit nozzle

The aim of the work is to study the physical model of the gas-dynamic head of a gas jet and the parameters of its penetration into the liquid bath of the converter when it flows out of the annular slotted tuyere. The studies were carried out on a «cold» stand on a scale of 1:30 to a 160-m converter (taking into account the criteria of geometrical and physical similarity) using water as a liquid simulating a molten metal,. The averaged values of the depth of penetration of the gas stream of the jet at various blowing parameters were estimated. It is noted that when the upper purge through a coaxial slit nozzle with an increase in the pressure of the purge gas, the dynamic pressure of the depth of penetration of the jet increases. The increase in dynamic pressure and the depth of the introduction of a gas jet leads to an increase in the degree of impact on the bath and an increase in the degree of oxygen absorption by the melt. It was shown that, all other things being equal, the operation of a coaxial slit differs by a large impulse of

exposure to a liquid than when blowing through an equivalent diameter slot through one centrally located nozzle, especially at pressures above 0.15-0.3 MPa. The possibilities of increasing the efficiency of the top blowing of the converter bath are shown through the use of a slotted coaxial nozzle.

Keywords: converter, top blow, coaxial slit nozzle, gas jet, efficiency

*Статья поступила в редакцию сборника 29.10.2018 года,
прошла внутреннее и внешнее рецензирование (Протокол заседания
редакционной коллегии сборника №1 от 26 декабря 2018 года)
Рецензенты: д.т.н., проф. Е.И.Сигарев; к.т.н, В.П.Питюк*