

ПРИМЕНЕНИЕ ОБОЛОЧКОВЫХ ФУРМ НА ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ КОНВЕРТЕРАХ ПИРСА–СМИТА НАДЕЖДИНСКОГО МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ЗАВОДА

© 2021 г. Д.В. Румянцев, Л.В. Крупнов, Р.В. Старых, Р.А. Марчук, В.Б. Фомичев

ООО «Институт «Гипроникель», г. Санкт-Петербург, Россия

Заполярный филиал ПАО «ГМК «Норильский никель», г. Норильск, Россия

Норильский государственный индустриальный институт, г. Норильск, Россия

Статья поступила в редакцию 08.05.20 г., доработана 01.08.20 г., подписана в печать 05.08.20 г.

Аннотация: Изменение конфигурации производства в Заполярном филиале (ЗФ) ГМК «Норильский никель» после 2015 г. ставит новые задачи перед традиционными пирометаллургическими процессами – плавкой и конвертированием. Проектной схемой Надеждинского металлургического завода им. Б.И. Колесникова (НМЗ) было «перекрестное» конвертирование, когда один конвертер сначала обрабатывал медный штейн с получением черновой меди, а потом, минуя стадию вывалки сухого свернутого шлака, переходил на переработку никелевых штейнов с получением медно-никелевого фэйнштейна. Такая схема работы позволяла оптимизировать тепловой баланс конвертера, снизить образование тугоплавких оборотов и существенно продлить кампанию конвертера. Закрытие Никелевого завода ЗФ повлекло ликвидацию медного производства на НМЗ с переводом конвертеров на классическую схему никелевого конвертирования. Это обусловило необходимость решения вопросов продления кампании конвертеров при сохранении возможности переработки значительного количества никелевого шлака второго периода конвертирования, поступающего с Медного завода ЗФ в твердом виде. С этой целью проведен ряд лабораторных исследований по разработке технологии и конструкторской документации для систем подачи обогащенного кислородом дутья (до 45 %) в горизонтальные конвертеры с применением оболочковых фурм. Кроме того, проанализированы литературные данные по данной тематике, а также работа металлургических предприятий в этом направлении. Выполнены технологические расчеты. В работе совместно участвовали специалисты ЗФ и лаборатории пирометаллургии института «Гипроникель». Установлено, что использование оболочковых фурм с уменьшенным диаметром фурмы для подачи кислородно-воздушной смеси (КВС) приводит к снижению объема подаваемого в конвертер дутья и объема отходящих газов. При сокращении объема отходящих газов уменьшаются тепловая нагрузка на горловину конвертера, на газоходный тракт и общий пылевынос из конвертера. С применением обогащенного кислородом дутья следует ожидать более высокой скорости разогрева расплава. Для компенсации избыточного тепла необходимо своевременно загружать холодные обороты и флюс. В случае аварийных ситуаций (отсутствие холодных оборотов) следует снижать содержание кислорода в дутье вплоть до перехода на чисто воздушное дутье. Комплекс таких мер позволит поддерживать температуру отходящих газов конвертера с оболочковыми фурмами на существующем уровне. Таким образом, при постоянном контроле и оперативном управлении температура и объем отходящих газов на входе в систему охлаждения и газоочистки не будут превышать существующих предельных значений. Внедрение оболочковых фурм с уменьшенным диаметром фурмы для подачи КВС не требует модернизации существующей системы охлаждения и очистки газов. Более того, переход на данные фурмы позволит снизить газовую нагрузку на газоходный тракт и тепловую нагрузку на водоохлаждаемый напыльник, уменьшить пылевынос и безвозвратные потери пыли после системы газоочистки.

Ключевые слова: пирометаллургическое производство, конвертер горизонтальный Пирса–Смита (КГ-80), фурма в защитной оболочке, кислородно-воздушная смесь, процесс конвертирования медно-никелевого штейна, обеднительная электропечь, печь взвешенной плавки.

Румянцев Д.В. – гл. специалист ООО «Институт «Гипроникель» (195220, г. Санкт-Петербург, Гражданский пр., 11).
E-mail: RumyantsevDV@nornik.ru.

Крупнов Л.В. – канд. техн. наук, зам. начальника научно-технического управления,
гл. металлург ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель» (663300, Красноярский кр., г. Норильск, пл. Гвардейская, 2).
E-mail: krupnovlv@nornik.ru.

Старых Р.В. – канд. техн. наук, вед. науч. сотрудник ООО «Институт «Гипроникель». E-mail: Kafedra-cm@yandex.ru.

Марчук Р.А. – гл. специалист Центра инженерного сопровождения производства ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель».
E-mail: MarchukRA@nornik.ru.

Фомичев В.Б. – канд. техн. наук, доцент кафедры металлургии цветных металлов Норильского государственного индустриального института (663310, Красноярский кр., г. Норильск, ул. 50 лет Октября, 7). E-mail: nii@noruz.ru.

Для цитирования: Румянцев Д.В., Крупнов Л.В., Старых Р.В., Марчук Р.А., Фомичев В.Б. Применение оболочковых фурм на горизонтальных конвертерах Пирса–Смита Надеждинского металлургического завода. *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2021. Т. 27. No. 1. С. 16–27. DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2021-1-16-27.

Using shell-type tuyeres at Pierce–Smith horizontal converters of the Nadezhda Metallurgical Plant

D.V. Rumyantsev, L.V. Krupnov, R.V. Starykh, R.A. Marchuk, V.B. Fomichev

Gipronickel Institute LLC, St. Petersburg, Russia

PJSC «MMC «Norilsk Nickel» Polar Branch, Norilsk, Russia

Norilsk State Industrial Institute, Norilsk, Russia

Received 08.05.2020, revised 01.08.2020, accepted for publication 05.08.2020

Abstract: Since 2015 the processing capacity reconfiguration at the Polar Branch of MMC Norilsk Nickel (hereinafter PB) sets new goals for conventional pyrometallurgical processes of smelting and converting. The design flowsheet of Kolesnikov Nadezhda Metallurgical Abstract: Plant (hereinafter NMP) provided for «cross-converting» when copper matte was first processed in one converter to produce blister copper followed by nickel matte processing to yield copper-nickel converter matte bypassing the discharge of dry coagulated slag. This flowsheet allowed for converter heat balance optimization, decreasing the formation of refractory reverts and significant extension of the converter campaign. PB Nickel Plant shutdown resulted in copper processing elimination at NMP and switching the converters to the conventional nickel converting flowsheet. In turn, it gave rise to the need for solutions to extend converter campaign while maintaining the possibility to process large amounts of nickel slag from the second converting stage at the PB Copper Plant. For this purpose the series of lab experiments were carried out to develop the technology and design documentation for the system to supply oxygen-enriched air (up to 45 %) to horizontal converters using shell-type tuyeres. In addition, literature data were analyzed on this topic along with the experience of smelters in this area. Process design calculations were done. The efforts were taken in cooperation with the PB engineering personnel and Laboratory of Pyrometallurgy of LLC «Gipronickel Institute». The use of reduced diameter shell-type tuyeres to inject the oxygen-air mixture was found to decrease the converter blowing and off-gas volumes. The decline in off-gas quantity leads to reduced heat load on the converter mouth and flue duct system, as well as to lowered converter dust entrainment. The use of oxygen-enriched blowing implies the higher smelt heating rate. Excess heat compensation requires timely charging of cold reverts and flux. In emergencies (if cold reverts are not available) the oxygen content of the blowing has to be reduced until switching over to air blowing. The series of the above efforts will offer a possibility to use the shell-type tuyeres keeping the converter off-gas temperature at the current level. Thus continuous monitoring and efficient control will ensure the off-gas temperature and volume at the inlets of gas cooling and cleaning systems not exceeding the limiting values. The introduction of the reduced diameter shell-type tuyeres for air-oxygen mixture injection does not require any upgrade of the existing gas cooling and cleaning systems. Moreover, switching to these tuyeres will reduce gas load on the flue duct system and heat load on the water-cooled dust cap, lower dust entrainment and non-recoverable dust losses after the gas cleaning system.

Keywords: pyrometallurgical process, KG-80 horizontal converter, Pierce–Smith converter, shell-type tuyere, oxygen-air mixture, copper-nickel matte converting process, slag-cleaning furnace, flash-smelting furnace.

Rumyantsev D.V. — senior specialist, Gipronickel Institute LLC (195220, Russia, St. Petersburg, Grazhdanskii av., 11). E-mail: RumyantsevDV@nornik.ru.

Krupnov L.V. — Cand. Sci. (Eng.), deputy head of the Science and Technology Department, chief metallurgist of the PJSC «MMC «Norilsk Nickel» Polar Branch (663300, Russia, Krasnoyarsk region, Norilsk, Gvardeiskaya sq., 2). E-mail: krupnovlv@nornik.ru.

Starykh R.V. — Cand. Sci. (Eng.), leading researcher of the Gipronickel Institute LLC. E-mail: Kafedra-cm@yandex.ru.

Marchuk R.A. — senior specialist, Production Engineering Support Center, PJSC «MMC «Norilsk Nickel» Polar Branch. E-mail: MarchukRA@nornik.ru.

Fomichev V.B. — Cand. Sci. (Eng.), assistant prof., Department of non-ferrous metallurgy, Norilsk State Industrial Institute (663310, Russia, Krasnoyarsk region, Norilsk, 50 Let Oktyabrya str., 7). E-mail: nii@noruz.ru.

For citation: Rumyantsev D.V., Krupnov L.V., Starykh R.V., Marchuk R.A., Fomichev V.B. Using shell-type tuyeres at Pierce–Smith horizontal converters of the Nadezhda Metallurgical Plant. *Izvestiya Vuzov. Tsvetnaya Metallurgiya (Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy)*. 2021. Vol. 27. No. 1. P. 16–27 (In Russ.). DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2021-1-16-27.

Предпосылки

Конвертирование никелевых штейнов с получением файнштейна — достаточно давно и широко применяемый процесс [1–3]. Он используется для переработки штейнов, получаемых как из окисленных никелевых, так и из сульфидных руд. Хотя с середины прошлого века непрерывно ведутся поисковые работы по реализации процесса непрерывного конвертирования в стационарном

агрегате [4–6] и уже существуют освоенные проекты, горизонтальный конвертер типа Пирса–Смита за счет своей простоты и экономической эффективности остается основным агрегатом в производстве никеля. Работы по изучению и совершенствованию процесса конвертирования в горизонтальном конвертере продолжаются и в настоящее время [7–10].

Вместе с тем при всей простоте и хорошей изученности процесса он обладает родовым недостатком — непродолжительной кампанией конвертера, связанной с быстрым износом футеровки в его фурменной зоне. Износ обусловлен высокими температурами и химическим взаимодействием продуктов конвертирования с огнеупорной футеровкой конвертера. Характерный период кампании никелевого конвертера на воздушном дутье составляет от 12 до 20 сут. Современные тенденции, обусловленные наращиванием единичной мощности плавильных агрегатов (в случае Надежинского металлургического завода им. Б.И. Колесникова (НМЗ) это печи взвешенной плавки (ПВП)), требуют дальнейшей интенсификации процесса конвертирования, дабы не увеличивать общий парк конвертеров. Единственным направлением возможной интенсификации является применение обогащенного кислородом дутья (кислородно-воздушной смеси — КВС), что делает проблему разгара футеровки еще более острой [11].

В металлургии никеля первые испытания фурм в защитной оболочке (ФЗО) были осуществлены в Канаде на заводе «Falconbridge» еще в 1999 г. В ходе испытаний содержание кислорода в дутье при переработке медно-никелевых штейнов было доведено до 30 % [12–14].

Таким образом, поиск возможных решений использования ФЗО при никелевом конвертировании продолжается и в настоящее время [12, 15–17].

Состояние вопроса

Основным исходным сырьем никелевого конвертирования НМЗ являются расплавленные штейны ПВП и ОЭП. В качестве оборотных материалов в конвертеры никелевого производства загружаются: дробленые бедные обороты из цеха подготовки сырья и шихты, обороты с пола, никелевый шлак МЗ и вскрышные породы Кайерканского угольного разреза (SiO_2 -содержащий флюс). Загрузку расплавленного штейна в конвертер осуществляют путем заливки через горловину. Холодные оборотные материалы и SiO_2 -содержащий флюс загружаются через горловину на поверхность расплава или через бункера в конвертер под дутьем.

Основной целью никелевого конвертирования штейнов ПВП и штейнов обеднительных печей (ОЭП) на НМЗ является получение фاینштейна, коллектирующего никель, медь, кобальт и драгоценные металлы штейнов.

Конвертирование штейнов ведется продувкой расплавленного штейна сжатым технологическим воздухом (с возможностью обогащения кислородом до 27 %), офлюсованием и удалением образующихся при этом оксидов железа в виде шлака, который является оборотным материалом и направляется в расплавленном виде в электропечи обеднения.

Основными продуктами никелевого конвертирования являются: фاینштейн, никелевый шлак и SO_2 -содержащие конвертерные газы, уносящие из конвертера значительное количество тепла и пыли. Конвертерная пыль, будучи оборотным продуктом, улавливается в газоходной системе и подается на переработку в ПВП.

Процесс конвертирования медно-никелевых штейнов ведется в две стадии, или два периода: первый — набор штейна и производство богатой массы в количестве полноценной плавки (70–90 т по фاینштейну), второй — «варка» фاینштейна [1, 2].

Обоснование предлагаемого технического решения

Недостатком горизонтальных конвертеров Пирса—Смита является невозможность высокой степени обогащения дутья кислородом без разработки фурм для подачи дутья специальной конструкции, предотвращающей повышенный износ (прогар) фурм и разрушение фурменного пояса (огнеупорного кирпича) при использовании обогащенного кислородом дутья. Наибольшая степень обогащения дутья кислородом без применения фурм специальной конструкции составляет 25–27 % [18, 19].

Практика периодического обогащения дутья кислородом успешно использовалась на конвертерах НМЗ в 2012–2016 гг. Система подачи кислорода в дутье рассчитана на 4500–5000 н.м³/ч, что может позволить увеличить обогащение дутья кислородом до 27 % и существенно сократить время плавки, а следовательно, повысить производительность конвертера. Однако, как показывает мировая практика конвертирования, улучшение обогащения дутья кислородом, без дополнительного охлаждения фурменного пояса, приводит к сокращению межремонтной кампании конвертера [18].

Перспективным направлением развития конвертерного передела является оборудование конвертеров фурмами с защитными оболочками [20, 21]. Установка ФЗО обеспечит повышение производи-

тельности передела при продлении кампании конвертеров. Практика конвертирования никелевых и медных штейнов показывает, что применение фурм с защитной оболочкой без снижения кампании конвертера позволяет увеличить обогащение дутья кислородом до 40 %, получить высокосернистые газы, пригодные для утилизации с получением серной кислоты и/или элементарной серы, перерабатывать сырье низкого качества, сократить периоды набора штейна и варки «файнштейна», повысить производительность конвертерного передела [18, 19].

Следует учитывать, что процессы, происходящие в ванне конвертера, носят сложный многофазный характер. Использование оболочковых фурм с обогащенным по кислороду дутьем изменяет газодинамический режим работы ванны конвертера, и, соответственно, необходим расчет влияния данных фурм на режим работы конвертера [15, 22].

Для нормальной работы фурм в режиме самоочищения были рассчитаны такие значения начального давления дутья (P_0), которые, с учетом гидростатического давления на срезе сопла (P_H) и внешнего давления ($P_{вн}$), обеспечивают близкие к критическим значения скорости истечения газа. Эти условия способствуют самоочищению фурм от настыли в процессе продувки.

Расчет давления подачи газа необходим для определения дальнобойности струи с целью предотвращения прогорания дальней стенки конвертера. При струйном режиме истечения существует горизонтальный участок струи, где не происходит ее разрушение. Данный участок очень важен для нормальной работы конвертера, так как позволяет сместить зону протекания экзотермических реакций от стенки в глубь ванны.

Рассмотрим дальнобойность струи при докритическом режиме истечения газа, когда скорость газа меньше скорости звука (дозвуковой режим). В этом случае давление на срезе сопла составляет $P_H = \rho_{ж} g H_{ж} + P_{атм}$, где $\rho_{ж}$ — плотность жидкости (расплава), кг/м³; $H_{ж}$ — высота жидкости (расплава) над фурмой, м.

Скорость истечения (V) в докритическом (дозвуковом) режиме определяется соотношением давления подачи (P_0) и гидростатического давления на срезе сопла (P_H):

$$V = 1,2 U^{0,7} \sqrt[4]{\frac{2k}{k-1} \frac{P_0}{\rho_r}} \left(1 - \frac{P_H}{P_0} \right)^{\frac{2(k-1)}{d_{вн}}},$$

где k — показатель адиабаты для газа; ρ_r — плотность газа, кг/м³; U — скорость газа на входе в сопло (фурму) без учета противодействия, рассчитываемая как отношение объема газа (н.м³/с) к площади фурмы (м²), м/с; $d_{вн}$ — внутренний диаметр сопла (фурмы), м; P_0 — начальное давление дутья, Па; P_H — давление на срезе сопла, Па.

Функциональная зависимость дальнобойности боковой струи от основных технологических параметров может быть выражена через критерияльную зависимость от числа Архимеда. Большинство расчетных значений дальнобойности струи (L_{max}) лежит в достаточно узкой области, которая может быть аппроксимирована следующим выражением:

$$L_{max} = 1,853(Ar)^{0,4},$$

где $Ar = V^2 \rho_r / (g d_a \rho_{ж})$ — критерий Архимеда; g — ускорение свободного падения (9,81 м/с²); ρ_r — плотность газа, кг/м³; $\rho_{ж}$ — плотность жидкости, кг/м³; d_a — выходной диаметр сопла, м; V — скорость истечения газа, м/с.

Таким образом был определен верхний предел давления газов для обеспечения, с одной стороны, смещения зоны разрушения струи в глубь конвертера, а с другой — минимизации контакта струи с противоположной стенкой конвертера.

Исходя из полученных данных по давлению газов и необходимого расхода кислорода для обеспечения нужной производительности были рассчитаны диаметры каналов для подачи защитного газа и кислородсодержащего дутья.

С учетом безопасности, существующих подключений и ресурсов на площадке НМЗ, в качестве агента оптимального защитной оболочки выбран азот.

На рис. 1 приведена схема оболочковой фурмы типа «труба в трубе», адаптированной к возможной установке на существующие конвертеры НМЗ.

Для минимизации конструкционных изменений фурмокколлектора и фурменной кладки наружный диаметр оболочковой фурмы (60,3 мм) останется неизменным, что позволит использовать существующий фурменный кирпич марки ХПТ-50 и не потребует изменения проекта футеровки конвертера.

Количество и расположение фурм также не изменятся. Канал для подачи КВС монтируется внутри существующей фурмы, для чего в фурменную

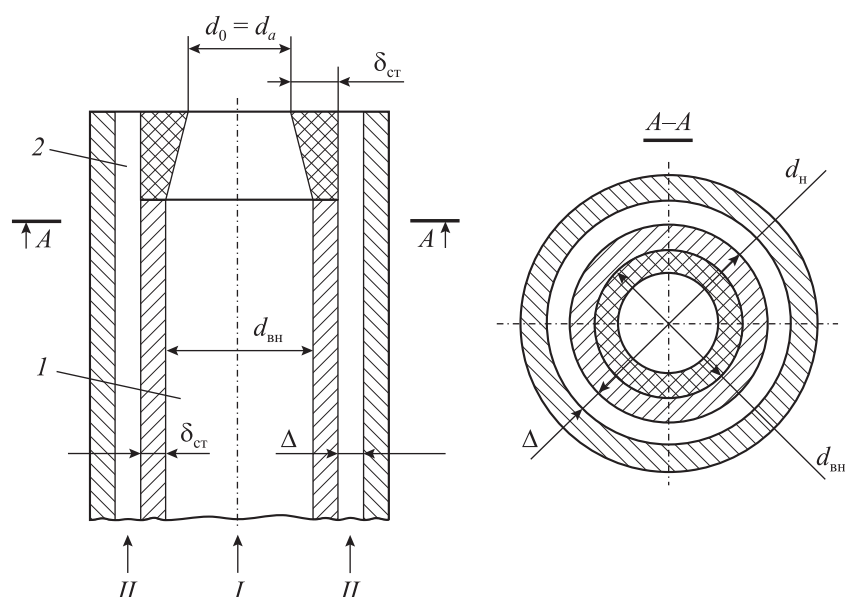


Рис. 1. Схема оболочковой фурмы (фурмы «труба в трубе»)

1 – внутренний канал для подачи газов дутья *I* (в том числе и обогащенного кислородом дутья)
2 – кольцевой канал *II* для подачи защитного агента (азота)

Fig. 1. Shell-type tuyere diagram (double-tube tuyere)

1 – inner channel for supplying blowing gases *I* (including oxygen-enriched blowing)
2 – annular channel *II* for supplying protective agent (nitrogen)

трубку вставляется отдельная трубка меньшего диаметра. Внутренний диаметр фурменной трубки для подачи азота составляет 51,3 мм, а толщина ее стенки — 4,5 мм.

Величина зазора между фурменной трубкой и наружной трубкой для подачи азота равна $\Delta = 1$ мм. Уменьшение зазора ($< 0,5$ мм) приведет к значительным сложностям с центрированием труб и точной выдержкой заданных значений, а увеличение ($> 1,5$ мм) — вызовет значительное турбулентное перемешивание двух газов и сведет к нулю эффект от фурмы с защитной оболочкой. Внутренний диаметр трубки для подачи КВС составит 40,3 мм. Подача дутья будет осуществляться по двум каналам: по внутреннему — КВС, содержащая до 50 % кислорода; по наружному — азот. Давление КВС — до 200 кПа, азота — до 300 кПа.

Уменьшение диаметра фурмы для подачи КВС (воздушного дутья) приведет к снижению часового объема подаваемого в конвертер дутья и к большему времени одной плавки. Однако за счет обогащения дутья кислородом (повышения часового расхода кислорода) продолжительность одной плавки практически не изменится.

Расчет расхода дутья (КВС) через оболочковые фурмы с уменьшенным диаметром подачи КВС

На существующих фурмах расход дутья составляет в среднем 50 тыс. н.м³/ч при внутреннем диаметре фурмы для подачи дутья 51,3 мм. Уменьшение последнего до 40,3 мм, т.е. снижение площади сечения фурмы на 61,7 %, приведет к пропорциональному уменьшению расхода дутья (КВС) до 30,85 тыс. н.м³/ч.

Наиболее важной характеристикой работы конвертера является пропускная способность фурм, или удельная дутьевая нагрузка, которая, по данным производственной практики, должна находиться в пределах 0,6—1,0 м³/(см²·мин) [5].

При работе НМЗ на существующих 48 фурмах с расходом дутья 50 тыс. н.м³/ч и внутренним диаметром фурмы 51,3 мм удельная дутьевая нагрузка составляет 0,84 м³/(см²·мин). В случае уменьшения внутреннего диаметра фурмы для подачи КВС до 40,3 мм получаем, что при расходе дутья (КВС) 30850 н.м³/ч удельная дутьевая нагрузка составит те же самые 0,84 м³/(см²·мин), т.е. не изменится.

С увеличением удельной дутьевой нагрузки до $0,9 \text{ м}^3/(\text{см}^2 \cdot \text{мин})$ (такая возможность существует) расход дутья (КВС) через центральный канал составит порядка $33050 \text{ н.м}^3/\text{ч}$.

Для последующих оценок примем удельную дутьевую нагрузку на новые фурмы с внутренним диаметром $40,3 \text{ мм}$ равной $0,844 \text{ м}^3/(\text{см}^2 \cdot \text{мин})$ и расход КВС в $31000 \text{ н.м}^3/\text{ч}$.

Как показано в [20], скорость истечения азота (экранирующего газа) должна быть в рабочем режиме порядка 250 м/с . Толщина зазора для подачи азота составляет 1 мм . Для обеспечения заданной рабочей скорости необходимо подать азота на одну фурму $142 \text{ н.м}^3/\text{ч}$, т.е. на все фурмы — $6816 \text{ н.м}^3/\text{ч}$.

Таким образом, суммарное количество подаваемого в конвертер дутья составит $37816 \text{ н.м}^3/\text{ч}$.

Следует отметить, что использование оболочковых фурм с высоким давлением подачи газа обеспечивает высокую степень свободного сечения (степень чистоты) фурм m (рис. 2):

$$m = d_0^2/d_{\text{вн}}^2,$$

где d_0 — диаметр выходного конца фурменной трубки, мм; $d_{\text{вн}}$ — внутренний диаметр фурменной трубки, мм.

Видно (см. рис. 2), что при давлении выше $1,9 \text{ кгс/см}^2$ степень свободного сечения (степень

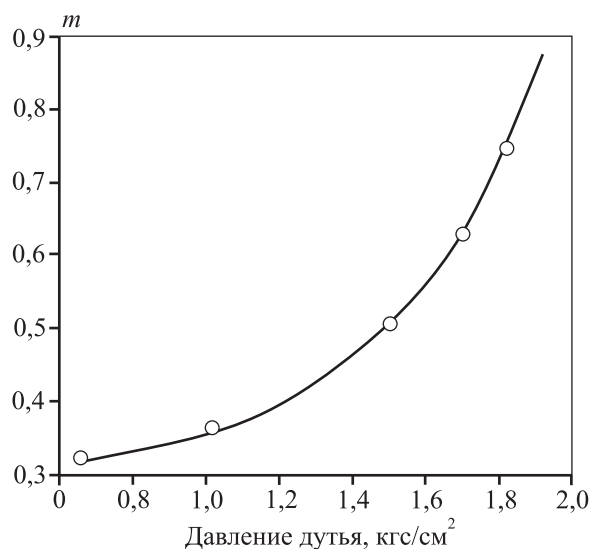


Рис. 2. Зависимость степени свободного сечения (степени чистоты) фурм от давления дутья

Fig. 2. Dependence of tuyere clear opening degree (purity degree) on blowing pressure

чистоты) фурмы составляет не менее $0,8$. При рабочем давлении азота $2,5 \text{ кгс/см}^2$ степень чистоты канала для подачи защитного газа будет близка к 1. Таким образом, приведенный на рис. 2 график свидетельствует об экспоненциальной зависимости степени свободного сечения фурмы от давления подаваемой на фурму КВС.

Учитывая, что при использовании фурм с защитной оболочкой нет прифурменного контакта КВС с расплавом (зона протекания реакций вынесена в глубь конвертера), вероятность настылеобразования на канале КВС чрезвычайно низка. Уменьшение общего объема подаваемого газа при одновременном увеличении обогащения дутья приводит к снижению и тепловой нагрузки на горловину конвертера, и пылевыноса из конвертера за счет сокращения объема отходящих газов.

При переходе на обогащенное кислородом дутье необходимо, для обеспечения нормальной работы конвертера (без выбрасывания расплава), оценить высоту подъема уровня ванны при ее продувке газом, т.е. «вспенивание».

Подъем уровня ванны при продувке слабоассимилируемых жидкостью газов достигает

$$H_{\text{ж}} = (0,5 \div 1,5) H_{\text{ж}0},$$

где $H_{\text{ж}0}$ — уровень спокойной (неработающей) ванны, м.

В этом случае газонасыщение обусловлено дутьевыми потоками (струями, кавернами, пузырями).

При наличии процессов вторичного газообразования источник газонасыщения — образующийся в процессах хемосорбции новый газ. При этом уровень подъема ванны ниже и не превышает $H_{\text{ж}} = (1,1 \div 1,3) H_{\text{ж}0}$.

Для оценки высоты пенного слоя ($H_{\text{п}}$) в конвертерной ванне предлагается использовать следующее выражение

$$H_{\text{п}}/H_{\text{ж}0} = 1,2 U^{0,7} \sqrt[4]{\rho_{\text{г}}/\sigma},$$

где σ — коэффициент поверхностного натяжения, н/м; $\rho_{\text{г}}$ — плотность газа, кг/м^3 .

Расчет по данной формуле показал, что при продувке обогащенным кислородом дутьем высота пенного слоя не превышает $0,3 \text{ м}$, а максимальная высота подъема уровня ванны составляет $2H_{\text{ж}0}$, что соответствует существующей практике работы конвертера.

Исходные данные для расчета материальных и тепловых балансов работы горизонтального конвертера с оболочковыми фурмами

Расчет производительности горизонтального конвертера реализован исходя из фиксированной массы заливаемых штейнов (ПВП и ОЭП).

Все расчеты проводились при одинаковых температурах и составах продуктов и исходных веществ, а также неизменных геометрических параметрах конвертера.

Количество полученного файнштейна и конвертерного шлака рассчитывается на основе заданного количества штейнов ПВП и ОЭП и зависит от величины перерабатываемых оборотов. С ростом обогащения дутья повышается как переработка дополнительных оборотов, так и выход файнштейна и конвертерного шлака. Также с увеличением количества перерабатываемых оборотов меняется содержание никеля и меди в получаемом файнштейне из-за разного соотношения Ni/Cu в оборотах и штейнах.

Состав получаемого файнштейна, мас. %: Fe — 2,4; S — 22,4. Доля остальных компонентов определяется составом и количеством исходных штейнов и оборотов.

Как показано в [11, 21], содержание цветных металлов в конвертерном шлаке при соблюдении температурного режима конвертирования практически не зависит от доли кислорода в дутье, поэтому состав конвертерного шлака принят одинаковым для всех режимов конвертирования. Продукты конвертерного передела имели следующие температуры, °C:

Штейн ПВП	1180
Штейн ОЭП.....	1160
Конвертерный шлак	1240
Файнштейн.....	1140
Отходящие газы конвертера.....	1160
Обороты	10

Расчеты были проведены для следующих содержаний кислорода в дутье, подаваемом по центральному каналу, об. %: 21 (воздух), 27, 35, 50.

Расходы газов на конвертер при изменении обогащения дутья кислородом приведены в табл. 1.

Избыток тепла при различных режимах конвертирования компенсировался подачей дополнительных оборотов, химический состав которых указан ниже, мас. %:

Ni.....	10,0	S.....	4,8
Cu.....	5,6	SiO ₂	1,0
Co.....	0,5	Прочие.....	21,1
Fe.....	43,0		

Следует отметить, что состав оборотов не постоянен и не может быть зафиксирован на практике. Для выполнения расчетов состав используемых оборотов выбран неизменным.

Для предложенной конструкции фурм были проведены расчеты количества перерабатываемых оборотов при различном обогащении дутья. При этом принято, что в среднем на 1 плавку в конвертере поступает 1 ковш штейна ОЭП (26 т) и ~3 ковша штейна ПВП. Избыток тепла компенсируется подачей холодных оборотов. В табл. 2 приведены результаты расчетов работы конвертера с оболочковыми фурмами при различном обогащении дутья.

Таблица 1. Расход газов на конвертер при различном обогащении КВС

Table 1. Gas flow rate to the converter at different degrees of oxygen-air mixture enrichment

Q_{N_2} , н.м ³ /ч	Q_{B_3} , н.м ³ /ч	Q_{O_2} , н.м ³ /ч	$C_{ц.к.}$, об. %	$C_{общ.}$, об. %
142 (6816)	646 (31000)	0 (0)	21	17,2
142 (6816)	594(28510)	52 (2490)	27	22,1
142 (6816)	524 (25150)	122 (5850)	35	28,7
142 (6816)	393 (18860)	253 (12140)	50	41,0
Примечание. Q_{N_2} , Q_{B_3} , Q_{O_2} — расходы соответственно азота, воздуха и кислорода на одну фурму (на весь конвертер); $C_{ц.к.}$, $C_{общ.}$ — содержание кислорода в дутье в центральном канале и общее содержание кислорода дутья соответственно.				

Таблица 2. Количество перерабатываемых оборотов в зависимости от обогащения дутья

Table 2. Number of converted reverts depending on blowing enrichment degree

C _{ц.к.} , об.%	Количество на 1 плавку, т				
	Штейн ПВП	Штейн ОЭП	Обороты бедные	Обороты с пола	Дополнительные обороты за счет избытка тепла
Обычные фурмы (базовый период)					
21	79,8	26,0	3,9	8,6	8,0
Оболочковые фурмы					
21	79,8	26,0	0,5	0,2	0,0
27	79,8	26,0	3,9	8,6	10,5
35	79,8	26,0	3,9	8,6	38,0
50	79,8	26,0	3,9	8,6	70,5

Как видно из данных табл. 2, возможный объем переработки оборотов с ростом обогащения дутья кислородом существенно повышается.

Основные параметры работы горизонтального конвертера с использованием оболочковых фурм

Обогащение дутья кислородом приводит к увеличению тепловых нагрузок на фурменный пояс. Поэтому необходимо оценить скорость нагрева газа-охладителя.

Для струйного режима истечения в предположении, что нет химического взаимодействия, разность температуры азота на входе в расплав и в конце горизонтального участка струи можно оценить по следующей формуле:

$$\Delta T_L = \Delta T_0 e^{-\frac{\alpha_{об}}{Gc_p}},$$

где $\Delta T_L = |T_{гЛ} - T_{ж}|$ — разность между температурой газа на конце прямолинейного участка внедрения струи в расплав и температурой жидкости, град; $\Delta T_0 = T_{г0} - T_{ж}$ — разность между начальной температурой газа на выходе из фурмы и температурой жидкости, град; $\alpha_{об}$ — объемный коэффициент теплоотдачи, ккал/с/град; c_p — удельная теплоемкость газа, ккал/(кг·град); G — массовый расход газа через фурму, кг/с.

Таким образом, оценив величину $\exp[-\alpha_{об}/(Gc_p)]$, можно получить температуру газа в конце линейного (горизонтального) участка внедрения струи в расплав. В расчетах скорость истечения принята равной 150 м/с (минимальная скорость) и 250 м/с (рабочая скорость). При таких условиях при $V =$

$= 150$ м/с получили $\exp[-\alpha_{об}/(Gc_p)] = 0,999912$, а при $V = 250$ м/с — $\exp[-\alpha_{об}/(Gc_p)] = 0,999928$.

Таким образом, при данных скоростях истечения $\Delta T_L = \Delta T_0$, т.е. нет разницы между температурами газа на входе в расплав и в конце линейного участка струи при отсутствии химического взаимодействия. Следует учитывать, что межфазная поверхность на прямолинейном участке струи чрезвычайно мала, а потому суммарная теплоотдача в этой зоне ничтожна. При этом даже при очень высоких коэффициентах теплоотдачи (порядка 100 ккал/(м²·ч)) полученное равенство остается справедливым.

Таким образом, можно сделать вывод, что на начальном участке струи, определяющемся минимальной дальностью, температура газа на входе в расплав равна температуре газа на конце линейного участка при отсутствии межфазного взаимодействия.

Учитывая, что в качестве газа-охладителя используется инертный газ азот и межфазное взаимодействие отсутствует, можно считать, что нагрева газа на начальном участке не происходит или он незначителен — это, в свою очередь, обуславливает снижение температуры фурменного пояса и продлевает срок его службы [15, 17].

Уменьшение диаметра фурмы для подачи КВС приводит к снижению объема подаваемого дутья в конвертер, что при прочих равных условиях увеличивает продолжительность конвертирования. Однако повышение обогащения дутья уменьшает продолжительность плавки, увеличивает переработку холодных оборотов, снижает количество отходящих газов. Таким образом, при обогащении дутья кислородом до 35–50 об.% количество пере-

рабатываемых оборотов может быть существенно повышено без изменения продолжительности операции конвертирования. При этом возрастает максимальный размер кусков оборотов, надежно усваиваемых расплавом за время плавки: за счет смещения горячей зоны в глубь конвертера усвоение твердых происходит интенсивнее за счет интенсификации процессов массо- и теплообмена в центральной зоне конвертера.

Увеличение обогащения дутья приводит к росту содержания SO_2 в отходящих газах. За счет того, что часть серы при увеличении доли переработки твердых (в окисленной и/или металлизированной форме) оборотов идет на сульфидирование металлов, возможно некоторое сокращение выбросов SO_2 .

Оценим количество необходимых конвертеров для текущей производительности НМЗ. При фонде рабочего времени 330 дней в году и общем годовом количестве получаемого штейна 371423 т/год среднее количество плавов в сутки составит 14.

Продолжительность одной плавки характеризуется следующими факторами:

- временем нахождения под дутьем — при прочих равных условиях оно определяется степенью обогащения дутья кислородом (чем данный показатель выше, тем меньше это время);
- простоями для проведения операций по заливке новых порций штейна, сливу конвертерного шлака, загрузке холодных оборотов, сливу готового фاینштейна;
- необходимостью подготовки конвертера к новой плавке, включающей отчистку горловины, промывку шлака, заливку новых порций штейна и т.д.

В зависимости от степени обогащения дутья кислородом продолжительность одной плавки, с учетом коэффициента использования конвертера под дутьем, устанавливается из материального баланса плавки. К оцененному времени плавки добавляются 2 ч на подготовительные операции (разделку горловины, зарядку штейна, проверку оборудования и т.д.). Исходя из полученной продолжительности одной плавки определяются количество плавов на одном конвертере и общее число конвертеров в работе.

Из расчетов следует, что при использовании оболочковых фурм с меньшим диаметром для подачи КВС не происходит увеличения количества конвертеров в работе из-за снижения удельной

дутьевой нагрузки и, как следствие, затягивания процесса конвертирования. Однако оболочковые фурмы позволяют существенно нарастить объем перерабатываемых оборотов при том же количестве штейна и неизменной продолжительности плавки.

Рекомендации по оборудованию

Важным требованием возможной модернизации конвертеров является минимальный уровень корректив конструкции эксплуатируемых конвертеров.

На рис. 3 приведен внешний вид существующего фурмоколлектора и проектируемого коллектора для подачи азота. Последний предлагается расположить под существующим коллектором, а подачу азота в фурмы обеспечить гибкими шлангами, рассчитанными на давление до 300 кПа.

В существующем фурмоколлекторе переделывается соединительный стакан таким образом, чтобы в него входила фурма специальной конструкции. Наружный диаметр фурмы остается

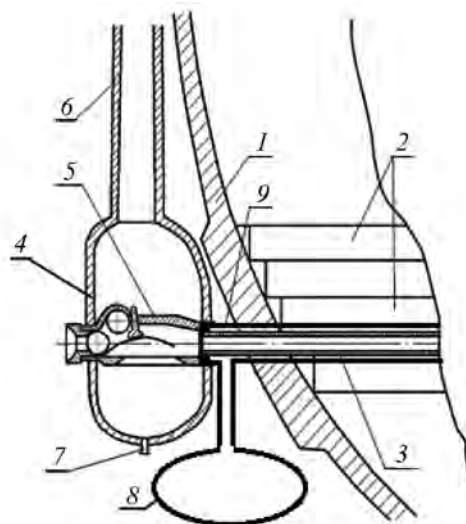


Рис. 3. Схема возможной установки оболочковой фурмы и фурмоколлектора для подачи азота
1 — кожух конвертера; 2 — футеровка; 3 — фурменная трубка; 4 — фурмоколлектор для подачи КВС; 5 — фурменная коробка с шариковым клапаном; 6 — соединительная металлическая труба; 7 — сливной патрубок с пробкой; 8 — фурмоколлектор для азота; 9 — соединительный стакан

Fig. 3. Possible installation diagram for the shell-type tuyere and tuyere header for nitrogen supply

1 — converter enclosure; 2 — lining; 3 — tuyere tube; 4 — tuyere header for oxygen-air mixture supply; 5 — tuyere box with ball valve; 6 — metal connecting tube; 7 — drain connector with plug; 8 — tuyere header for nitrogen; 9 — connecting nozzle

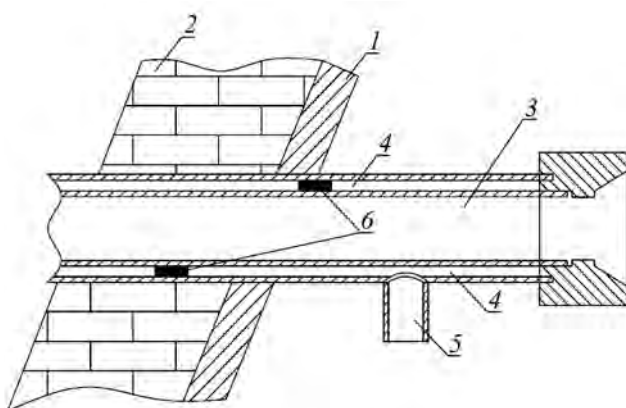


Рис. 4. Эскизная прорисовка узла «фурма в фурме»

1 – корпус конвертера; 2 – футеровка; 3 – канал подачи КВС; 4 – канал подачи азота; 5 – ввод азота от фурмоколлектора; 6 – наплавки для центровки фурм

Fig. 4. «Tuyere-in-tuyere» assembly sketch

1 – converter body; 2 – lining; 3 – oxygen-air mixture supply channel; 4 – nitrogen supply channel; 5 – nitrogen feed from tuyere header; 6 – weld beads for tuyere centering

неизменным, внутрь существующей фурменной трубки вставляется новая фурменная трубка с толщиной стенок 4,5 мм и внутренним диаметром канала для подачи КВС 40,3 мм. Места стыковки фурм и соединительной муфты провариваются, чтобы предотвратить смешивание азота с КВС. На наружной фурме монтируется отвод для подачи азота и монтажа с азотным фурмоколлектором.

Полученная конструкция закладывается в существующие посадочные места без расширения канала в огнеупорном кирпиче.

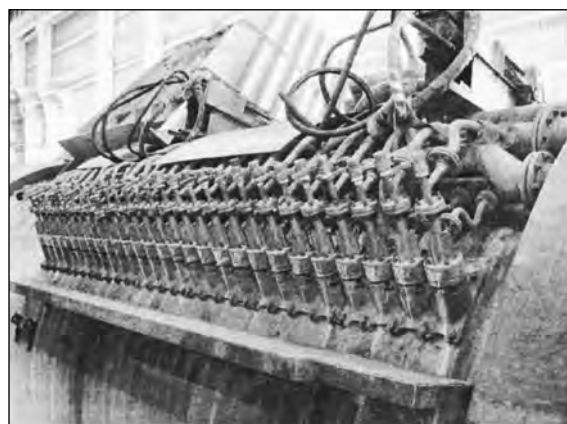


Рис. 5. Вид конвертера завода «Thai Copper» компании «Thai Copper Industry» в Тайланде, оснащенного оболочковыми фурмами

Fig. 5. View of Thai Copper plant converter by Thai Copper Industry in Thailand equipped with shell-type tuyeres

На рис. 4 приведен эскиз конструкции «фурма в фурме».

Использование предлагаемого технического решения позволяет минимизировать изменения, вносимые в конструкцию фурмоколлектора.

Нижнее расположение азотного фурмоколлектора (под основным фурмоколлектором) обеспечивает его защиту от попадания настыли и брызг расплава.

Вышеописанный вариант монтажа оболочковой фурмы дает возможность максимально использовать существующие подключения и оборудование, минимизировать внешние вмешательства в конструкцию конвертера. Прекращение подачи

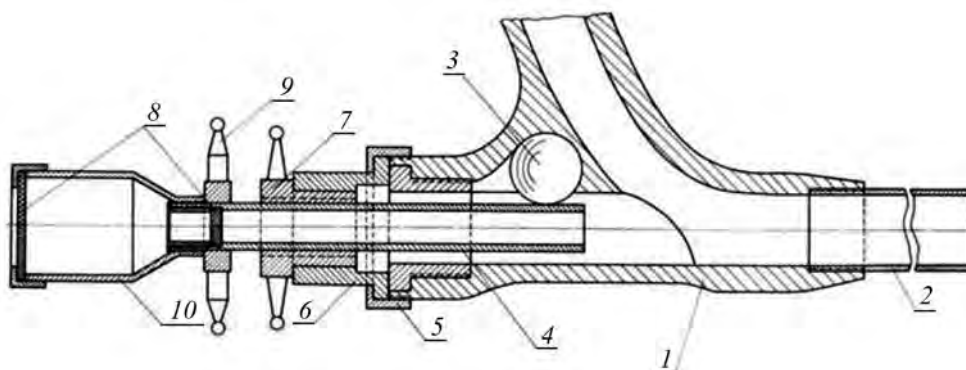


Рис. 6. Пример установки пирометра для постоянного измерения температуры расплава (факела дутья) на фурму

1 – фурменная отливка; 2 – фурменная трубка; 3 – шарик клапана; 4 – визирная трубка; 5 – крепежная гайка; 6 – стойка; 7 – гайка; 8 – стекло оптическое; 9 – рукоятки для центровки; 10 – пирометр

Fig. 6. Example of pyrometer installation for continuous temperature measurement of melt (blowing flame) to tuyere

1 – tuyere casting; 2 – tuyere tube; 3 – valve ball; 4 – sight tube; 5 – mounting nut; 6 – stand; 7 – nut; 8 – optical glass; 9 – centering handles; 10 – pyrometer

азота приведет к заливке оболочковых фурм, но не скажется на работоспособности центральных фурм, что позволит эксплуатировать конвертер с некоторой потерей производительности.

Похожее технологическое решение реализовано на заводе «Thai Copper» компании «Thai Copper Industry» в Таиланде. Завод модернизирован до производительности 165 тыс. т/год и запущен в эксплуатацию в 2006 г. [23]. Из трех заводских конвертеров, оснащенных оболочковыми фурмами, два находятся в работе, а третий — резервный или на ремонте. На каждом из них установлено 28 оболочковых фурм, которые имеют внутренний диаметр 5 см; общая скорость потока дутья составляет 25200—30000 н.м³/ч [7]. Общий вид конвертера приведен на рис. 5.

Стабильная работа оболочковых фурм обеспечивается при контроле температуры расплава (факела дутья), что позволяет своевременно снижать температуру ванны загрузкой холодных твердых оборотов.

Для постоянного контроля температуры расплава предлагается использовать стационарный пирометр, установленный на одной из фурм. Общий вид конструкции со стационарным пирометром приведен на рис. 6.

Заключение

Внедрение оболочковых фурм с подачей экраняющего газа (азота) позволит продлить срок службы фурменного пояса горизонтальных конвертеров за счет смещения горячей зоны в глубь ванны благодаря увеличению вылета струи КВС.

Кроме того, использование оболочковых фурм существенно повысит переработку холодных оборотов.

Данное мероприятие положительно скажется на технико-экономических показателях конвертерного передела в целом.

Литература/References

1. Ваниюков А.В., Зайцев В.Я. Теория пирометаллургических процессов. М.: Металлургия, 1973.
Vanyukov A.V., Zaitsev V.Ya. Theory of pyrometallurgical processes. Moscow: Metallurgiya, 1973 (In Russ.).
2. Шалыгин Л.М. Конвертерный передел в цветной металлургии. М.: Металлургия, 1965.
Shalygin L.M. Converting process in metallurgy of non-ferrous metal. Moscow: Metallurgiya, 1965 (In Russ.).
3. Король Ю.А., Набойченко С.С. Конвертирование никельсодержащих штейнов. Екатеринбург: Изд-во АМБ, 2020.
Korol' Yu.A., Naboichenko S.S. Converting process of nickel-contained mattes. Ekaterinburg: Publ. AMB, 2020 (In Russ.).
4. Гальнбек А.А. Непрерывное конвертирование штейнов. М.: Металлургия, 1993.
Gal'nbek A.A. Continuous converting process of mattes. Moscow: Metallurgiya, 1993 (In Russ.).
5. Mojano A., Cabaljero S., Front J. Analysis of pilot scale tests of continuous converting process in Codelco metallurgical company. In: *Proc. 6-th Int. Conf. Copper-Cobre 2007* (Toronto, Canada, 25—30 Aug. 2007). P. 14—17.
6. Sitcin V., Keke J., Shyfen E. Implementation the technology of flash converting process at plants of Jinguang Copper Corporation. In: *Proc. XV Int. Flash Smelting Congr.* (Finland, Helsinki, Sept. 2017). P. 13—18.
7. Hills I.E., Warner A.E.M., Harris C.L. Review of high pressure tuyere injection. In: *Symposium Cu-2007* (Montreal, Canada, 29 April — 2 May 2007). CIM (Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum), 2007. Vol. III. Book 1. P. 471—482.
8. Король Ю.А., Набойченко С.С. Совершенствование способа обеднения методом перемешивания фаз. *Цвет. металлы*. 2018. No. 8. С. 37—44.
Korol' Yu.A., Naboichenko S.S. Improvement of the depletion method by mixing phases. *Tsvetnye Metally*. 2018. No. 8. P. 37—44 (In Russ.).
9. Chibwe D., Aldrich C., Akdogan G., Taskinen P. Modeling of mixing, mass transfer and phase distribution in a Peirce-Smith converter model. *Canad. Metall. Q. (Depart. Chem. Metall. Eng.)*. 2013. Vol. 52 (2). P. 176—189.
10. Chibwe D.K., Akdogan G., Eksteen J.J. Solid-liquid mass transfer in a Peirce-Smith converter: A physical modelling study. *Metall. Min. Ind.* 2011. Vol. 3. No. 5. P. 202—210.
11. Бантизманский В.И. Теория кислородно-конвертерного процесса. М.: Металлургия, 1975.
Baptizmanskii V.I. Theory of oxygen-converting process. Moscow: Metallurgiya, 1975 (In Russ.).
12. Bustos A.A., Kapusta J.P. High oxygen shrouded injection in copper and nickel converters. In: *Proc. Brimacombe Memorial Symp.* (Vancouver, 1—4 Oct. 2000). Eds. G.A. Irons, A.W. Cramb. Montreal, QC: The Metallurgical Society of CIM, 2000. P. 107—124.
13. Bustos A.A., Kapusta J.P., Macnamara B.R., Coffin M.R. High oxygen shrouded injection at falconbridge. In: *Proc. Int. Conf. Copper 99—Cobre 99* (Warrendale, The Minerals, Metals and Materials Society of AIME, 10—13 Oct. 1999). Vol. VI: Smelting, technology development, pro-

- cess modeling and fundamentals. Eds. C. Diaz, C. Landolt, T. Utigard. P. 93—107.
14. Kapusta J.P., Stickling H., Tai W. High oxygen shrouded injection at falconbridge: five years of operation. In: *Converter and fire refining practices*. Eds. A. Ross, T. Warner, K. Scholey. Warrendale: The Minerals, Metals and Materials Society of AIME, 2005. P. 47—60.
 15. Король Ю.А., Набойченко С.С. Расчет фурмы в защитной оболочке для конвертирования никелевых и медных штейнов, рекомендации по ее применению. *Цвет. металлы*. 2018. No. 5. С. 31—39.
Korol' Yu.A., Naboichenko S.S. Calculation of protected-shield lances for converting process of nickel and copper mattes and recommendations for industrial application. *Tsvetnye Metally*. 2018. No. 5. P. 31—39 (In Russ.).
 16. Kapusta J.P., Lee R.G.H. The savard-lee shrouded injector: A review of its adoption and adaptation from ferrous to non-ferrous pyrometallurgy. In: *Proc. Copper-2013* (Santiago, Chile, 1—4 Oct. 2013). The Chilean Institute of Mining Engineers (IIMCH). P. 1115—1151.
 17. Король Ю.А., Набойченко С.С., Гуляев С.В. Использование природного газа в фурмах с защитной оболочкой. *Цвет. металлы*. 2018. No. 7. С. 46—50.
Korol' Yu.A., Naboichenko S.S., Gulyaev S.V. Application of natural gas for protected-shield lances. *Tsvetnye Metally*. 2018. No. 7. P. 46—50 (In Russ.).
 18. Барсуков Н.М., Король Ю.А., Русаков М.Р., Гальнбек А.А., Пашковский А.А., Пронин А.Ф. Переработка никелевых штейнов в горизонтальных конвертерах с фурмами в защитной оболочке. *Цвет. металлы*. 1992. No. 3. С. 12—13.
Barsukov N.M., Korol' Yu.A., Rusakov M.R., Gal'nbek A.A., Pashkovskii A.A., Pronin A.F. Treatment of nickel mattes in horizontal converters with protected-shield lances. *Tsvetnye Metally*. 1992. No. 3. P. 12—13 (In Russ.).
 19. Король Ю.А., Набойченко С.С., Гуляев С.В. Практика применения фурм в защитной оболочке при конвертировании. *Цвет. металлы*. 2018. No. 6. С. 14—20.
Korol' Yu.A., Naboichenko S.S., Gulyaev S.V. Application of protected-shield lances at converting process. *Tsvetnye Metally*. 2018. No. 6. P. 14—20 (In Russ.).
 20. Недвецкий Е.П., Хомченков Б.М., Арефьев К.М., Цемехман Л.Ш. Некоторые закономерности работы кислородных фурм с защитной азотной оболочкой. В сб.: *Новые направления в пирометаллургии никеля*. Вып. 8. (72). Л.: Гипроникель, 1980. С. 49—56.
Nedvetskii E.P., Khomchenkov B.M., Arefev K.M., Tsemekhman L.Sh. Some peculiarities of oxygen lances operations with protective nitrogen shields. In: *New directions in nickel pyrometallurgy*. No. 8 (72). Leningrad: Gipronikel', 1980. P. 49—56 (In Russ.).
 21. Гальнбек А.А., Барсуков Н.М., Русаков М.Р., Ежов Е.И., Недвецкий Е.П. Особенности продувки жидкости фурмой с защитной оболочкой (ФЗО). В сб. науч. тр.: *Автогенные и автоклавные процессы в медно-никелевом производстве*. Л.: Гипроникель, 1987. С. 57—62.
Gal'nbek A.A., Barsukov N.M., Rusakov M.R., Ezhov E.I., Nedvetskii E.P. Peculiarities of liquid blowing through the protected-shield lances. In: *Autogeneous and autoclaves processes in copper-nickel industry*. Leningrad: Gipronikel', 1987. P. 57—62 (In Russ.).
 22. Bustos A.A. Process to convert non-ferrous metal such as copper or nickel by oxygen enrichment: Pat. 5 435 833 (US). 1995.
 23. Kapusta J.P., Wachgama N., Pagador R.U. Implementation of Air Liquide shrouder injector (ALSI) technology at the Thai copper industries smelter. In: *Symposium Cu-2007* (Montreal, Canada, 29 April — 2 May 2007). CIM (Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum), 2007. Vol. III. Book 1. P. 483—500.