

ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ ВЕРТИКАЛЬНОЙ ФУРМЫ В ПРЯМОТОЧНОМ РЕЖИМЕ

Ю.А. Король, U.Korol@mail.ru

АО «Русская медная компания», Екатеринбург, Россия

Аннотация. Для интенсификации процессов пирометаллургической переработки сырья тяжёлых цветных металлов широко используются автогенные режимы переработки, реализуемые в специальных пирометаллургических агрегатах. Одной из активно внедряемых в мире технологий плавки является процесс с использованием фурм типа TSL в печах Аусмелт и Айзасмелт. Фурмы TSL сохраняют свою стойкость за счёт обеспечения формирования слоя гарнисажа на теле фурмы при вдувании кислородовоздушной смеси (КВС) в расплав через вертикальную трубу особой конструкции. Практика реализации подобных процессов показала теоретическую и фактическую возможность использования дутья как с закручиванием (фурма TSL), так и без закручивания дутьевого потока. Подача природного газа в центральную часть воздушного дутья без закручивания оказывает влияние на общую крутку закрученных потоков при продувке расплава в печи. Существенные отклонения технологических параметров плавки от типового режима работы фурмы типа TSL возникают при организации прямооточного режима дутьевых смесей для всех спутных струй. С целью углубления анализа отличительных особенностей прямооточных и закрученных струй показаны основные параметры дутьевых смесей при истечении из фурмы и их взаимное влияние на характеристики факела. Для определения параметров вертикальной фурмы и её технологических особенностей предложена методика расчёта и оценки прямооточных струй для дутьевой смеси в условиях вертикального плавильного печного агрегата. При прямооточном истечении дутьевой смеси воздуха и кислорода для различных соотношений представлен математический аппарат с целью оценки диаметра дутьевой воронки и глубины её проникновения в расплав. Применительно к аппаратному оформлению печей Аусмелт и Айзасмелт при оснащении их прямооточными фурмами показана модель формирования зон циркуляции расплава во внутреннем горне и их влияние на технологические параметры плавки.

Ключевые слова: вертикальная фурма, Аусмелт, Айзасмелт, крутка, прямооточные струи, закрученные струи, дутьё, дутьевой режим, кислород, воздух, КВС, TSL, вертикальная печь

Для цитирования: Король Ю.А. Особенности работы вертикальной фурмы в прямооточном режиме // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». 2025. Т. 25, № 2. С. 51–63. DOI: 10.14529/met250205

Original article
DOI: 10.14529/met250205

FEATURES OF VERTICAL LANCE OPERATION IN DIRECT-FLOW MODE

Yu.A. Korol, U.Korol@mail.ru

JSC Russian Copper Company, Ekaterinburg, Russia

Abstract. Autogenous processing modes implemented in special pyrometallurgical plants are widely used to intensify the processes of pyrometallurgical processing of heavy non-ferrous metal raw materials. One of the actively implemented smelting technologies in the world is the process using TSL in Ausmelt® and ISASMELT™ furnaces. Top-Submerged Lance (TSL) maintains its durability by ensuring the formation of the skull layer on the lance body when blowing an oxygen-air mixture (OAM) into the melt through a vertical pipe of a special design. The practice of implementing these processes has shown the theoretical and actual possibility of using air blast both with swirling (TSL) and without swirling of the air blast flow. Feeding natural gas into the central part of the air blast without swirling affects the overall swirl of the swirling flows when blowing the melt in the furnace. The melting process parameters change significantly from the standard operation mode of the TSL when organizing a direct-flow mode of blast mixtures for all coherent jets. In order to analyze the distinctive features of direct-flow and swirling jets with more

detail, the main parameters of blast mixtures when flowing from the lance and their mutual influence on the flame characteristics are shown. To determine the parameters of a vertical lance and its process features, a calculation and evaluation method for direct-flow jets for a blast mixture in a vertical melting furnace is proposed. When the blast mixture of air and oxygen blows straight with different ratios, the mathematical means are presented to estimate the diameter of the blast funnel and the depth of its penetration into the melt. With regard to the hardware design of Ausmelt® and ISASMELT™ furnaces equipped with direct-flow lances, a model for the formation of melt circulation zones in the inner hearth and their influence on the process parameters of melting is shown.

Keywords: vertical lance, Ausmelt®, ISASMELT™, swirl, straight-through jets, swirling jets, blasting, blast mode, oxygen, air, OAM, TSL, vertical furnace

For citation: Korol Yu.A. Features of vertical lance operation in direct-flow mode. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*. 2025;25(2):51–63. (In Russ.) DOI: 10.14529/met250205

В современной металлургии тяжёлых цветных металлов для переработки концентратов по пирометаллургической технологии преимущественно используются автогенные плавильные агрегаты. Среди относительного разнообразия автогенных технологий и оборудования для реализации процессов переработки существенную долю занимают печи, работающие в режиме продувки расплава через вертикальные фурмы типа TSL с их частичным погружением в расплав [1–9]. Этот способ плавки в вертикальном цилиндрическом реакторе, где топливо, воздух и кислород подаются в печь через вертикальную фурму, реализован в России на единственном предприятии – АО «Карабашмедь» – в 2006 г. [10].

Главной отличительной особенностью фурмы TSL от аналогичного процесса в агрегате автогенной плавки (ААП), внедрённом на комбинате «Североникель» сотрудниками института «Гипроникель» [11] в период 1968–1970 гг., является закручивание дутьевой струи с целью обеспечения работоспособности неохлаждаемой конструкции фурмы. Степень закрутки, характеризующая струйные течения дутьевой смеси, поступающей из фурмы в печное пространство, определяется конструкцией фурмы, особенностями геометрии подсводового пространства печи, уровнем расплава, его физическими свойствами и другими параметрами, рассмотренными далее. Соответственно, управляя параметрами закрутки, можно существенно менять основные технологические режимы плавки при переходе от прямооточных к различной степени закрученным дутьевым струям. В то же время часть дутьевых струй, а именно природный газ, поступают в область смещения фурмы в прямооточном режиме, что накладывает существенные особенности на характеристики спутных струй при выходе из её наконечника. В лите-

ратурных источниках имеется крайне ограниченный объём информации по теоретическому обоснованию параметров дутьевых струй разной степени закрутки для расплавов тяжёлых цветных металлов в условиях плавильных агрегатов типа Аусмелт и Айзасмелт. Как правило, эти данные не раскрываются для широкого круга пользователей при внедрении подобного оборудования. Для оценки влияния дутьевых струй, подаваемых в прямооточном режиме, на вращение ванны расплава и на технологические параметры плавки автором был выполнен анализ теоретических работ в этом направлении, разработана и предложена модель расчёта параметров дутьевого факела при его прямооточном истечении в ванну расплава применительно для условий печей Аусмелт и Айзасмелт.

Виды и особенности дутьевых струй

По классификации Р.Б. Ахмедова струйные течения подразделяются на прямооточные и закрученные [12]. Прямоточные характеризуются двумя составляющими скорости – радиальной и аксиальной. Радиальные скорости в этом случае значительно меньше аксиальных, направленных вдоль струи. Давление в прямооточной струе практически постоянно во всём объёме, за исключением ядра. Основные аэродинамические характеристики прямооточной струи определяются коэффициентом структуры струи, зависящим от формы устья сопла и скоростной неравномерности в устье. Коэффициентом структуры определяются угол раскрытия струи и её дальноточность, т. е. скорость падения вдоль струи максимальной скорости в сечении. От последнего зависит размер начального и основного участка струи. В соответствии с теорией, разработанной Г.Н. Абрамовичем [13], и выведенными им формулами расчёта струи на основе константы, названной

коэффициентом структуры (турбулентности) струи, для цилиндрической трубы он будет равен 0,08, что обеспечивает угол раскрытия прямооточной струи до $30^{\circ}30'$ [14].

Закрученная струя характеризуется тремя составляющими скорости – радиальной, аксиальной и тангенциальной, причём около сопла все эти три составляющие могут быть соизмеримы. Радиальная скорость направлена перпендикулярно оси струи, аксиальная – вдоль оси, а тангенциальная – по касательной к окружности вокруг оси струи. В закрученных струях имеется градиент давления как вдоль, так и поперёк струи. В отличие от прямооточных струй, давление во всём объёме закрученной струи ниже давления в окружающей среде.

Угол раскрытия (φ) закрученной струи является несколько условным понятием, так как границы струи у устья сопла образуют не конус, а гиперboloид вращения. Чем меньше разница в плотности закрученного потока и окружающей среды и чем сильнее закручен

поток, тем больше форма струи отличается от конической. Из нескольких способов определения границы потока выделим приём, основанный на экстраполяции величины скорости до её нулевых значений. В ряде работ в качестве границы струи принимают 5-, 10- или даже 50-процентную границу [12, 14].

В зависимости от формы сопла в прямооточных струях угол раскрытия наименьший – от 15° до 30° и строго зависит от коэффициента структуры потока. С увеличением коэффициента структуры потока угол раскрытия возрастает, а дальность струи падает.

Угол раскрытия закрученных струй больше, чем в прямооточных, что объясняется тем, что при закручивании потока резко увеличивается массообмен между струей и окружающей средой. Кроме того, центробежные силы способствуют «разлёту» струи, увеличивая угол раскрытия.

На рис. 1 представлены типы свободных затопленных струй различной степени кривки,

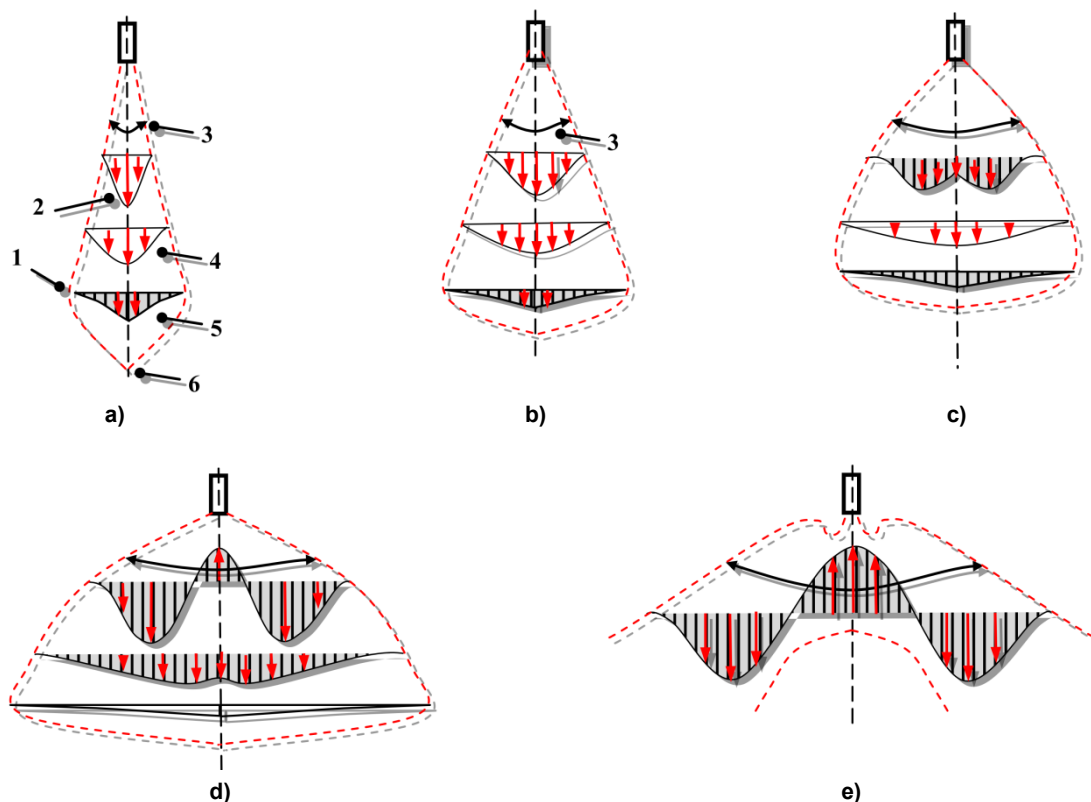


Рис. 1. Профиль скорости свободных затопленных струй различной степени кривки:
а – прямооточная струя; б – слабо закрученная струя; в – умеренно закрученная струя; д – сильно закрученная сомкнутая струя; е – сильно закрученная разомкнутая струя; 1 – границы струи; 2, 4, 5 – профиль скорости на различных расстояниях от сопла; 3 – угол раскрытия струи (φ); 6 – ось струи; стрелками показана величина и направление аксиальной скорости

Fig. 1. Velocity profile of free submerged jets with different degrees of swirl:

а – straight-through jet; б – weakly swirled jet; в – moderately swirled jet; д – strongly swirled closed jet; е – strongly swirled open jet; 1 – jet boundaries; 2, 4, 5 – velocity profile at different distances from the nozzle; 3 – jet opening angle (φ); 6 – jet axis; arrows indicate the magnitude and direction of the axial velocity

имеющие отличающиеся структуры истечения. Прямоточная струя (рис. 1а) имеет определённый угол раскрытия, который меняется в небольших пределах с изменением коэффициента структуры струи. Слабо закрученная струя (рис. 1б) из-за наличия центробежных сил имеет уже больший угол раскрытия. При этом максимум аксиальной скорости находится на оси струи, как и в прямооточной. Аксиальная скорость имеет в поперечном сечении форму гауссовского распределения. Давление в струе ниже давления в окружающей среде.

С дальнейшим повышением крутки (рис. 1с) профиль аксиальной скорости принимает М-образную форму, максимальная скорость при этом смещается от оси струи. Угол раскрытия струи увеличивается ещё больше. Далее, вниз по течению струи, профиль максимальной скорости вновь смещается к оси струи и его форма снова напоминает свободную прямооточную затопленную струю.

При дальнейшем увеличении крутки (рис. 1д) силы внешнего давления превзойдут аксиальный импульс и вблизи оси образуется обратное течение. Вниз по течению струя снова смыкается. Угол раскрытия сомкнутой струи в этом случае – максимальный.

Увеличение крутки далее (рис. 1е) ведёт к тому, что зона, занятая обратным течением, расширяется настолько, что струя вниз по течению больше не смыкается, а факел приобретает торообразную форму.

Цель исследования

Для анализа работы фурмы в печном пространстве и в зоне расплава необходимо рассматривать взаимодействие спутных струй как закрученных воздушной и кислородовоздушной дутьевых смесей, так и прямооточной струи природного газа. На рис. 2 представлено схематичное изображение вертикальной фурмы TSL, используемой для реализации процесса плавки в печи Аусмелт. Воздух охлаждения и дутьевая смесь, обогащённая кислородом (КВС), поступают в расплав, предварительно раскручиваясь с помощью лопаточных завихрителей с разной степенью крутки. Природный газ, вдуваемый через центральный канал, не имеет крутки в связи с отсутствием соответствующих устройств для реализации процесса закручивания.

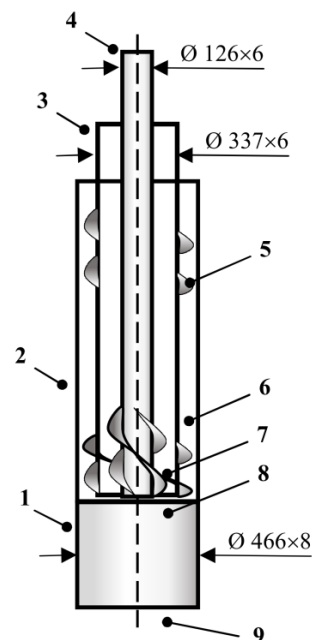


Рис. 2. Изображение рабочей части фурмы печи Аусмелт:

1 – наконечник; 2 – наружная воздухоохлаждаемая труба для ввода в расплав воздуха охлаждения; 3 – внутренняя труба для подачи воздуха на технологию в смеси с кислородом (КВС); 4 – труба для вдувания природного газа; 5, 6 – завихрители смеси для воздуха охлаждения; 7 – завихрители для КВС; 8 – устье фурмы; 9 – устье наконечника

Fig. 2. Image of the working part of the tuyere of the Aushmet furnace:

1 – tip; 2 – external air-cooled pipe for introducing cooling air into the melt; 3 – internal pipe for supplying air to the technology in a mixture with oxygen (KVS); 4 – pipe for blowing natural gas; 5, 6 – swirlers of the mixture for cooling air; 7 – swirlers for KVS; 8 – tuyere mouth; 9 – tip mouth

В то же время на примере агрегатов автогенной плавки, разработанных на комбинате «Североникель», при организации автогенного процесса возможно использование дутьевой смеси, исходящей из вертикальной фурмы в расплав в условиях истечения прямооточных или слабо закрученных струй.

С целью сопоставления и сравнения разных режимов работы дутьевых фурм для продувки расплавов тяжёлых цветных металлов предложена методика расчёта вертикальных фурм, несколько отличающаяся от общепринятых схем в стационарных плавильных агрегатах, имеющих большую площадь сечения и объёмы плавильной зоны [15, 16]. В рамках настоящей статьи автор рассмотрел параметры и представил для обсуждения методику расчёта вертикальной фурмы с прямооточной дутьевой струёй для условий печей Аусмелт и Айзасмелт, имеющих небольшой объём продуваемого расплава в ограниченном плавильном пространстве вертикальной печи.

Существующая методика расчёта проточных дутьевых струй для глубоких ванн с большой поверхностью

В СССР и РФ основными исследователями и теоретиками продувки расплавов цветных металлов (сульфидов меди, никеля и свинца, а также шлаков) являлись А.В. Гречко, Л.М. Шалыгин, А.А. Гальнбек и др. [5–7, 15, 17].

В соответствии с выводами в работе [17] Л.М. Шалыгина представим основные положения по продувке медно-никелевого расплава в печи Аусмелт с использованием вертикальной фурмы (рис. 3).

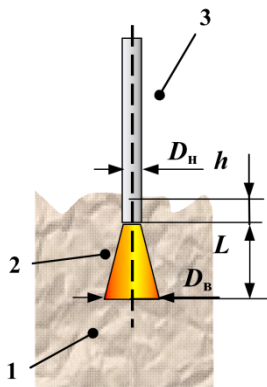


Рис. 3. Схема вертикальной фурмы:

1 – расплав; 2 – дутьевой факел; 3 – фурма; $D_{\text{в}}$ – диаметр воронки; $D_{\text{н}}$ – диаметр наконечника; h – глубина погружения в расплав наконечника; L – длина факела

Fig. 3. Schematic diagram of a vertical tuyere:

1 – melt; 2 – blast torch; 3 – tuyere; $D_{\text{в}}$ – funnel diameter; $D_{\text{н}}$ – tip diameter; h – tip immersion depth into the melt; L – torch length

Для типового и стабильного режима плавки в печи с использованием вертикальной фурмы, не оснащённой специальными завихрителями, давление кислородовоздушной смеси (КВС) на выходе из наконечника изменяется от 0,6 до 0,7 кг/см². Для дальнейших расчётов примем давление в наконечнике равным 0,6 кг/см² или 0,6 · 10⁴ кг/м². Для упрощения анализа и большей наглядности расчётов давление в подсводовом пространстве печи условно примем равным нулю, по факту – 40 Па или 4 кг/м², что может вносить минимальную погрешность в анализе.

При глубине погружения фурмы в окисидосульфидный расплав тяжёлых цветных металлов плотностью 3500 кг/м³ на $h = 0,3$ м создаётся противодействие, равное 0,3 · 3500 = 1050 кг/м².

Отношение абсолютного давления в наконечнике к противодействию расплава равно (6000 + 10 000)/(1050 + 10 000) = 1,45, что меньше критерия 1,9, характеризующего переход от докритического режима истечения к сверхкритическому. Критическое давление истечения при погружении наконечника в расплав на 0,3 м будет равно: 1,9 · (1050 + 10 000) = 20 995 кг/м² или 2,1 кг/см² или 1,1 ати.

В соответствии с исследованиями Л.М. Шалыгина, для расплавов тяжёлых цветных металлов можно применять основные выведенные им формулы для расчёта дутьевых характеристик фурмы, соответствующие докритическому истечению дутья в расплав для проточной и незакрытой струи.

Теоретический удельный расход воздушной дутьевой смеси через наконечник фурмы равен

$$V_{\text{уд}} = 34,8 \cdot \Phi \cdot P_1 \cdot 10^{-4} \sqrt{\frac{k \cdot \gamma}{(k-1) \cdot T} \left[\left(\frac{P_h}{P_1} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{P_h}{P_1} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]}, \quad (1)$$

где $V_{\text{уд}}$ – удельный расход воздушной смеси, м³/(см² · мин);

Φ – коэффициент диафрагмирования, учитывающий изменение сечения наконечника по сравнению с первоначальным значением, доли ед.;

P_1 – абсолютное давление истечения смеси в расплав, кг/м²;

P_h – абсолютное противодействие слоя расплава на глубине h , кг/м²;

T – абсолютная температура дутьевой смеси, К;

k – показатель адиабаты, равный для воздуха и кислорода 1,4;

γ – приведённый удельный вес газа, кг/нм³.

Для определения фактического расхода дутья через наконечник необходимо по результатам экспериментов или практической работы фурмы определить коэффициент Φ .

Теоретическая скорость дутья из наконечника фурмы равна

$$W_a = \varphi \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot k \cdot g}{(k-1)} \cdot \frac{T \cdot P_0}{\gamma \cdot T_0} \left[1 - \left(\frac{H}{P_2} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]}, \text{ м/с}, \quad (2)$$

где W_a – скорость газа на выходе из наконечника фурмы, м/с;

φ – коэффициент, учитывающий потери энергии на преодоление сопротивления воздухоподводящей системы;

P_0 – нормальное давление, кг/м²;

H – абсолютное гидростатическое давление слоя расплава, кг/м²;

T_0 – абсолютная температура, К.

Фактическая скорость истечения будет определяться с использованием коэффициента φ .

Методика расчёта прямооточного дутьевого режима для условий плавки в печах Аусмелт и Айзасмелт

Опираясь на расчёты Л.М. Шалыгина, выведем основные зависимости для расчёта вертикальной фурмы для прямооточного режима на воздушном дутье с использованием методик, разработанных Ю.А. Королём и С.С. Набойченко, и представленной в работах [18, 19].

Расчёт для прямооточного истечения природного газа будет представлен в рамках расчёта взаимодействия спутных струй закрученного потока.

Пропускная способность фурмы

Определим теоретическую пропускную способность фурмы в зависимости от давления дутья и температуры воздуха. Преобразуем уравнение Бернулли – Сен Вена относительно воздуха в указанной последовательности и получим первое расчётное уравнение для определения теоретической пропускной способности фурмы V_Φ :

$\frac{k}{k-1} \cdot \frac{P_\Phi}{\rho_\Phi} = \frac{k}{k-1} \cdot \frac{H}{\rho} + \frac{\omega^2}{2}$. Для рассматриваемых

условий изэнтропического процесса можно записать соотношение: $\frac{\rho}{\rho_\Phi} = \left(\frac{H}{P_\Phi} \right)^{\frac{1}{k}}$, $\rho = \rho_\Phi \cdot \left(\frac{H}{P_\Phi} \right)^{\frac{1}{k}}$,

где ρ – плотность газа в факеле, кг/м³. Отсюда скорость истечения воздуха из фурмы будет равна

$$\omega = \sqrt{\frac{2k}{k-1} \cdot \frac{P_\Phi}{\rho_\Phi} \left[1 - \left(\frac{H}{P_\Phi} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]}, \text{ м/с}, \quad (3)$$

где P_Φ – давление дутьевой смеси в фурме, кг/м²;

ρ_Φ – плотность смеси в фурме, кг/м³;

H – противодавление слоя расплава, кг/м²;

k – показатель адиабаты, равный для воздуха и кислорода 1,4.

В соответствии с уравнением Клайперона – Менделеева покажем следующее соотношение давления и плотности газа: $\frac{P_\Phi}{\rho_\Phi} = R \cdot T$. Соответственно, масса дутья G_H , проходящего через сече-

ние наконечника F_H , будет равна $G_H = \rho \cdot \omega \cdot F_H = \rho_\Phi \cdot \left(\frac{H}{P_\Phi} \right)^{\frac{1}{k}} \cdot \omega \cdot F_H$. Преобразуя эту зависимость, получим формулу для определения массы дутья:

$$G_H = F_H \cdot P_\Phi \sqrt{\frac{2k}{k-1} \cdot \frac{1}{RT} \cdot \left[\left(\frac{H}{P_\Phi} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{H}{P_\Phi} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]}, \text{ кг/с}. \quad (4)$$

Видоизменяя данную формулу в расход воздуха в м³/мин для воздуха, при k , равном 1,4, имеющего $R = 287,14$ Па·м³/(кг·К) и плотность – 1,29 кг/м³ с указанием давления смеси в кПа, получим

$$V_n = \frac{158,7}{1,29} \cdot F_n \cdot P_\phi \cdot 10^3 \sqrt{\frac{1}{287,14 \cdot T} \cdot \left[\left(\frac{H}{P_\phi} \right)^{1,425} - \left(\frac{H}{P_\phi} \right)^{1,715} \right]}, \text{ м}^3/\text{мин}, \quad (5)$$

где P_ϕ – абсолютное давление дутьевой смеси в фурме, кПа;

1,29 – плотность воздуха в фурме, кг/м³;

H – абсолютное противодавление слоя расплава ($0,3 \cdot 3500 - 0,00981 + 101,3$), кПа;

T – температура дутьевой смеси, К.

F_n – свободное сечение наконечника, м².

Представленные формулы характеризуют дутьевые параметры прямоточного дутья для воздушной смеси. Для кислородовоздушной смеси, содержащей 60 % кислорода, плотность дутьевой смеси будет равна 1,361 кг/м³ (см. таблицу), в этом случае формула (5) теоретического расхода дутья будет иметь вид:

$$V_n = \frac{158,7}{1,361} \cdot F_n \cdot P_\phi \cdot 10^3 \sqrt{\frac{1}{270 \cdot T} \cdot \left[\left(\frac{H}{P_\phi} \right)^{1,425} - \left(\frac{H}{P_\phi} \right)^{1,715} \right]}, \text{ м}^3/\text{мин}, \quad (6)$$

где 270 – универсальная газовая постоянная для смеси КВС, содержащей 60 % кислорода:

$$8314 / (29 \cdot 0,4 + 32 \cdot 0,6) = 270 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

Плотность обогащённого воздуха кислородом [20]
Density of oxygen-enriched air [20]

O ₂ , % об.	Воздух, % об.	Содержание кислорода, % об.	Плотность, кг/м ³
0	100	21,00	1,293
20	80	36,80	1,320
30	70	44,70	1,334
40	60	52,60	1,347
50	50	60,50	1,361
52	48	62,08	1,364
54	46	63,66	1,366
56	44	65,24	1,369
58	42	66,82	1,372
60	40	68,40	1,375
70	30	76,30	1,388
80	20	84,20	1,402
90	10	92,10	1,415
100	0	100,00	1,429

Расчёт для воздушного дутья при прямоточной струе показывает, что теоретическая пропускная способность наконечника диаметром 0,45 м для температуры 250 °С составляет 1993 м³/мин или 119 570 м³/ч. Для КВС, содержащей 60 % кислорода, теоретическая пропускная способность наконечника диаметром 0,45 м составит 1948 м³/мин или 116 888 м³/ч.

Фактическая максимальная пропускная способность фурмы по воздушному дутью на АО «Карабашмедь» находится на уровне 60 тыс. нм³/ч, соответственно, можно предположить, что смесь КВС нагревается в фурме, охлаждая её до уровня не выше 250 °С. По факту расход воздушной смеси через фурму равен $60 \cdot (273 + 250) / 273 = 115$ тыс. м³/ч, что сопоставимо с расчётным количеством – 117 тыс. м³/ч.

Расчёт давления дутья на срезе фурмы

Продолжая расчёт параметров прямооточной струи для фурмы печи Аусмелт, определим давление воздушной смеси на выходе из наконечника в расплав путём преобразования давления в фурме и уравнения неразрывности потока:

$$\omega = \sqrt{\frac{2k}{k-1} \cdot RT \cdot \left[1 - \left(\frac{H}{P_T} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]}, \text{ м/с}, \quad (7)$$

где P_T – давление дутьевой смеси на срезе наконечника, кг/м²;

H – противодавление слоя расплава, кг/м²;

k – показатель адиабаты, равный для воздуха и кислорода 1,4.

Давление воздуха в фурме равно давлению торможения смеси на выходе из наконечника P_T и сопротивлению трения внутри фурмы $P_{тр}$:

$$P_{\phi} = P_T + P_{тр}, \text{ кПа}. \quad (8)$$

Для оценочного расчёта потери давления на трение в трубе фурмы примем его по внутренней трубе для подачи основной доли кислородовоздушной смеси, отсюда

$$P_{тр} = \lambda \cdot \frac{L_{\phi}}{d_{вн}} \cdot \rho_{ср} \cdot \frac{\omega_{ср}^2}{2} \cdot 10^{-3}, \text{ кПа}, \quad (9)$$

где λ – коэффициент трения, являющийся функцией критерия Рейнольдса, равный для стальной трубы 0,04;

L_{ϕ} – длина фурмы – 18,6 м;

$d_{вн}$ – внутренний диаметр внутренней трубы фурмы для смеси КВС – 0,306 м;

$\rho_{ср}$ – средняя плотность смеси в канале фурмы, кг/см³;

$\omega_{ср}$ – средняя скорость смеси в фурме, м/с.

Среднюю плотность смеси в канале фурмы рассчитаем по формуле

$$\rho_{ср} = \rho_0 \cdot \frac{P_{ср} \cdot T_0}{P_0 \cdot T}, \text{ кг/м}^3, \quad (10)$$

где ρ_0 , T_0 и P_0 – плотность, температура и давление воздуха при н. у., кг/м³, К, кПа соответственно, 1,361 для смеси КВС (60 % об. кислорода), 273 К и 101,3 кПа;

T – температура воздуха на срезе фурмы, 250 + 273 = 523, К;

$P_{ср}$ – среднее давление воздуха в канале фурмы, равное $(P_{\phi} + P_T)/2$, кПа.

Из уравнения неразрывности потока находим среднюю скорость воздуха в канале фурмы:

$$\omega_{ср} = \frac{V_0 \cdot \rho_0}{\rho_{ср} \cdot F_T}, \text{ м/с}, \quad (11)$$

где F_T – площадь сечения наконечника, 0,16 м².

Преобразуя указанные уравнения относительно P_T и при P_0 , соответствующем 101,3 кПа, T_0 – 273 К, получим формулу для смеси КВС:

$$P_T = \sqrt{P_{\phi}^2 - 3,7 \cdot 10^{-4} \cdot \lambda \cdot \frac{L}{d_{вн}} \cdot \frac{\rho_0 \cdot V_{\phi}^2 \cdot T}{F_T}}, \text{ кПа}, \quad (12)$$

где V_{ϕ} – теоретический расход КВС на фурму, м³/с.

$$\text{Отсюда } P_T = \sqrt{161,3^2 - 3,7 \cdot 10^{-4} \cdot 0,04 \cdot \frac{18,6}{0,306} \cdot \frac{1,361 \cdot \left(\frac{1948}{60}\right)^2 \cdot 523}{0,07}} = 129,7 \text{ кПа}.$$

В соответствии с выполненным расчётом относительное давление торможения на срезе наконечника для прямооточной струи находится на уровне: 129,7 – 101,3 = 28,4 кПа.

Скорость истечения дутья

Для определения скорости истечения дутьевой смеси из наконечника фурмы, содержащей 60 % кислорода, воспользуемся формулой, где универсальная газовая постоянная для КВС равна 270 Па·м³/(кг·К):

$$\omega = \sqrt{\frac{2k}{k-1} \cdot RT \cdot \left[1 - \left(\frac{H}{P_T} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]} = \sqrt{7 \cdot 270 \cdot (250 + 273) \cdot \left[1 - \left(\frac{111,6}{129,7} \right)^{0,285} \right]} = 203,8 \text{ м/с}.$$

Отметим, что полученная скорость истечения КВС для рассматриваемой фурмы меньше критической скорости 402 м/с:

$$\omega_{кр} = 20,5 \cdot \sqrt{\frac{T}{\rho_0}} = 20,5 \cdot \sqrt{\frac{250 + 273}{1,361}} = 402 \text{ м/с.}$$

Глубина погружения струи в расплав

Для определения глубины погружения прямоточных струй в расплав рассчитаем критерий Архимеда по методике И.Г. Казанцева [15, 17]:

$$Ar = \frac{\omega^2 \cdot \rho_r}{g \cdot \rho_{расп} \cdot d}, \quad (13)$$

где Ar – критерий Архимеда;

ω – скорость истечения струи в расплав, 203,8 м/с;

ρ_r – плотность газа на выходе из наконечника на глубине 0,3 м, кг/м³;

$\rho_{расп}$ – плотность расплава, кг/м³;

d – диаметр наконечника, м.

$$\rho_r = \rho_0 \cdot \frac{T_0}{T_1} \cdot \frac{P_r}{P_0} \cdot \left(\frac{H}{P_r}\right)^{\frac{1}{k}} = 1,361 \cdot \frac{273}{523} \cdot \frac{129,7}{101,3} \cdot \left(\frac{111,6}{129,7}\right)^{\frac{1}{1,4}} = 0,82 \text{ кг/м}^3.$$

Соответственно, критерий Архимеда будет равен

$$Ar = \frac{203,8^2 \cdot 0,82}{9,81 \cdot 3500 \cdot 0,45} = 2,2.$$

Для определения глубины погружения струи дутья в расплав L при прямоточном истечении воспользуемся формулой, выведенной Л.М. Шалыгиным для вертикальной струи:

$$L = \frac{d}{2} \cdot Ar \cdot \left[1 - 0,95 \cdot \left(\frac{1}{90} \cdot \tan^{-1}\left(\frac{Ar}{25}\right)\right)\right], \text{ м.} \quad (14)$$

Отсюда при диаметре наконечника $d = 0,45$ м глубина погружения прямоточной струи в расплав будет равна 0,96 калибра или 0,4 м.

При угле раскрытия струи, характерном для прямоточных струй 23°, диаметр образующейся воронки можно определить по формуле

$$D_b = d + 0,4 \cdot x,$$

где x – расстояние от наконечника фурмы, м.

Для расстояний от устья наконечника до 1,0 м, диаметр воронки прямоточной струи будет изменяться следующим образом:

Расстояние, м	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
Диаметр воронки, м	0,39	0,47	0,55	0,63	0,7

Аналогичный результат по глубине погружения прямоточной струи в расплав, равной 1,04 калибра или 0,7 м, даёт и другая уточнённая формула Л.М. Шалыгина [17]:

$$L = \frac{d}{2} \cdot Ar \cdot \left[1 - 0,95 \cdot \left(\frac{1}{90} \cdot \tan^{-1}\left(\frac{Ar}{25}\right)\right)\right], \text{ м.} \quad (15)$$

Зоны циркуляции и модель движения расплава и газовых потоков в печи

В соответствии с выполненными расчётами для прямоточной дутьевой струи по определению предельных значений объёмов дутьевых потоков (117 тыс. м³/ч), их температуры (250 °С), противодавления на выходе из фурмы (28,4 кПа), скорости смеси (203,8 м/с), диаметра (от 0,4 до 0,7 м) и глубины проникновения воронки в расплав (0,4 м) для условий вертикальной печи далее сделаем предположение о вероятном движении расплава и газовых потоков при реализации процесса в печах Аузмелт и Айзасмелт.

При этом отметим ряд характерных отличий, присущих рассматриваемым конструкциям печей, а именно:

- ограниченная по диаметру цилиндрическая зона плавления;
- центральное расположение дутьевой фурмы;
- боковая односторонняя загрузка шихты на расплав;
- большая зона свободного падения шихты в атмосфере печи;

- боковой вывод расплава через сифон, находящийся на сопоставимом уровне с накопником фурмы;
- относительно однородный расплав во всём внутреннем горне печи, без расслоения его на штейновую и шлаковую зоны;
- движение газового потока против падающего потока шихты;
- несимметричность циркуляционных потоков как для дутьевой смеси, так и для расплава;
- видимое вращение расплава за счёт непрерывного вывода его через сифон из внутренней ванны печи и колебаний накопника фурмы;
- односторонний вывод отходящих газов через аптейк в своде печи.

Конструктивные особенности печи приводят к тому, что при прямоточной струе движение расплава во внутреннем горне можно разделить на три неравные циркуляционные зоны (рис. 4).

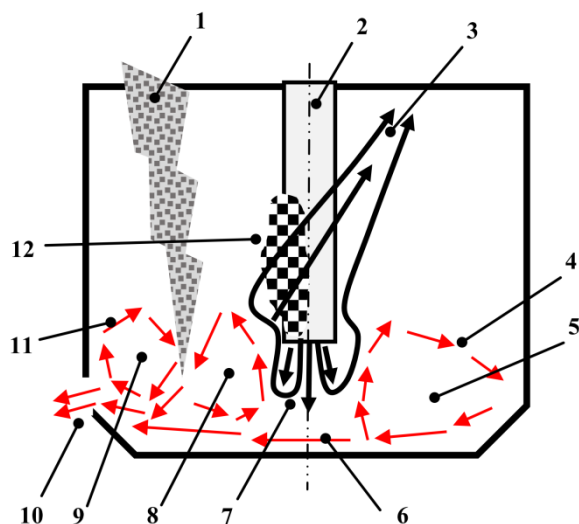


Рис. 4. Схематическое изображение потоков шихты, газа и расплава в печи Аусмелт при прямоточной дутьевой струе:

1 – загрузка шихты; 2 – вертикальная фурма; 3 – отходящий поток газов; 4 – третья зона циркуляции расплава; 5 – зона застоя; 6 – движение расплава в сторону сифона; 7 – дутьевая воронка; 8 – вторая зона циркуляции расплава; 9 – зона застоя первой области циркуляции расплава; 10 – выход расплава из печи через сифон; 11 – первая зона циркуляции расплава в зоне загрузки шихты

Fig. 4. Schematic representation of the flows of charge, gas and melt in the Ausmelt furnace with a direct-flow blast jet:

1 – charge loading; 2 – vertical tuyere; 3 – outgoing gas flow; 4 – third zone of melt circulation; 5 – stagnation zone; 6 – movement of melt towards the siphon; 7 – blast funnel; 8 – second zone of melt circulation; 9 – stagnation zone of the first region of melt circulation; 10 – melt exit from the furnace through the siphon; 11 – first zone of melt circulation in the charge loading zone

Первая и вторая зоны находятся в области загрузки шихты на расплав, где капли расплавленных сульфидов и окисленных компонентов шихты погружаются в расплав, имея больший удельный вес, и под действием потока расплава выводятся из зоны дутьевого факела фурмы продуктами окисления и кислородом дутья. Нисходящий поток расплава делится на две части, одна из которых частично участвует в восходящей циркуляции расплава вдоль стенки печи и частично перетекает в сифон выпуска расплава. Другая часть формирует восходящий поток вдоль дутьевой воронки, вторично попадая в зону загрузки шихты. Этот сульфидный расплав затягивается в дутьевую область факела, где активно взаимодействует с кислородом дутья, дегазируется с выделением диоксида серы, вспениваясь, теряет свой удельный вес за счёт насыщения газом и всплывает под действием сил Архимеда и дутьевых струй факела. Обе эти зоны имеют условные области застоя с минимальным перемешиванием и массообменом расплава с компонентами шихты и кислородом дутья (рис. 4, поз. 8, 9).

Поток расплава, движущийся через отверстие сифона в печи (рис. 4, поз. 10), имеет небольшое вращательное движение, передающееся на всю массу расплава, создавая его видимое вращение. Условия для придания расплаву вращения возникают из-за вибраций накопника фурмы при пульсациях дутья, продуцирующих дутьевые вихри, перпендикулярные поверхности расплава и создающие эффект его постепенного раскручивания перпендикулярно оси фурмы, а также боковой воронкообразный выпуск расплава.

Третья циркуляционная зона (рис. 4, поз. 4) находится в противоположной от загрузки и выпуска расплава части печи, характеризуется невысокой скоростью циркуляции расплава под действием восходящих газовых струй и вспенивания расплава при его насыщении газами в дутьевой зоне. Часть расплава этой зоны повторно засасывается в дутьевую факел и участвует во вторичной стадии окисления и ошлакования, повышая тем самым свой удельный вес, что способствует выводу расплава из этой зоны циркуляции по подине печи в сторону сифона (рис. 4, поз. 6).

Для этой зоны характерна большая область застоя с пониженным массообменом компонентов шихты, расплава и кислорода дутья (рис. 4, поз. 5). Кроме того, в этой части

в первую очередь возникают предпосылки для переокисления расплава и образования магнетита, способствующего массовому вспениванию расплава и выбросу его из печи.

Отсутствие возможности значимой подачи шихты в эту область печи требует от персонала строгого контроля за соотношением железа, серы в шихте и кислорода дутья, за количеством подаваемой смеси КВС и уровнем заглубления наконечника фурмы в расплав, что, в конечном итоге, ограничивает производительность печи по перерабатываемой шихте.

Для снятия этой проблемы возможны два пути: организация загрузки шихты как минимум из двух, противоположных относительно фурмы, течек или обеспечение циркуляции расплава, выравнивающего неравномерное распределение шихты во внутреннем горне печи; обеспечение вращения ванны для улучшения массообмена.

Разработчики процесса TSL пошли по второму пути, предложив закручивание дутьевого факела, что приводит к крутке расплава, увеличению массо- и теплообмена в печи, способствует выравниванию распределения сульфидов и флюсов по всему объёму ванны.

Кроме того, эффект закручивания дутья позволил повысить эффективность конвективного теплообмена в фурме и, соответственно, охлаждения её поверхности, что, в свою очередь, дало возможность опустить наконечник фурмы в расплав, усиливая процессы перемешивания во внутреннем горне печи.

Отличительной особенностью прямоточной струи из вертикальной фурмы при погружении её в расплав является наличие почти сплошных и непрерывных газовых полостей вдоль поверхности наконечника фурмы, соединяющих дутьевой факел с атмосферой печи. Это обстоятельство приводит к снижению противодавления истечению дутья в расплав, но одновременно уменьшает массообмен в объёме ванны, часть кинетической энергии струи выводится из зоны контакта вверх, попутно увлекая капли расплава в подсводовое пространство печи, повышая брызгоунос.

Масса расплава, увлекаемая вверх вдоль фурмы образующимися газовыми струями, движется под углом к оси фурмы из-за небольшого вращения ванны, а соответственно, и газового потока, усиливаемого боковым отводом газа из печи (рис. 4, поз. 3), что в итоге приводит к налипанию массы на поверхность наружной трубы фурмы и образованию одностороннего гарнисажа на ней (рис. 4, поз. 12). Объём гарнисажа и его долговечность определяются химическим составом шлака, температурой в печи и теплосъёмом внутри фурмы, потоком охлаждающего воздуха. В рассматриваемом случае основная доля гарнисажа образуется на одной из сторон фурмы, что приводит к нарушению её балансировки, сложностям управления и искривлению по оси фурмы, в конечном итоге требующим остановки плавки и очистке фурмы от настыли.

Заключение

В представленной статье показаны особенности работы вертикальных фурм при продувке расплавов тяжёлых цветных металлов в процессах автогенной плавки с использованием фурм, обеспечивающих различную степень крутки дутьевого факела. Для условий прямоточного дутья предложена математическая модель расчёта параметров фурмы, обеспечивающих получение данных о предельных количествах воздушной смеси, подаваемой в расплав, её скорости истечения и величины противодавления расплава воздушному потоку, диаметре воронки и глубине погружения дутья в расплав. Все эти параметры позволяют управлять процессом плавки, обеспечивая её максимальную эффективность. Кроме этого, представленная модель расчёта параметров дутья позволяет выполнить прогноз и оценку зон циркуляции расплавов в печи, выделяя участки, влияющие на её стабильную работу, предотвращая вспенивание ванны расплава путём реализации как технологических приёмов плавки, так и внесением определённых управляющих воздействий на массо- и теплообмен в ванне печи.

Список литературы

1. Extractive Metallurgy of Copper / M.E. Schlesinger, K.C. Sole, W.G. Davenport, G.R.F. Alvear Flores. Sixth Edition. ISBN 978-0-12-821875-4. Elsevier Ltd., 2022. 573 p.
2. Wood J., Matuszewicz R. Decarbonisation of the Outotec ® Ausmelt Process // Conference Proceedings of Copper 2019. Vancouver, Canada, 2019. URL: <https://www.researchgate.net/publication/343097593.3>.

3. Copper Smelting: 2019 Copper Smelting Data / S. Wang, S.P. Yao, T. Gonzalez, A. Siegmund // 9th International Symposium on High-Temperature Metallurgical Processing. URL: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-319-72138-5>.
4. Joubert H., Nikolic S., Mc Dougall I. Design, Construction and Performance of the Copper Cooling System Installed in the First ISACONVERT™ Copper Converting Furnace // International Conference. Santiago, Chile, 2023.
5. Шалыгин Л.М., Гулевич А.Г. Пути повышения показателей конвертерного передела штейнов // Цветные металлы. 1976. № 12. С. 16–20.
6. Гречко А.В., Нестеренко Р.Д., Кудинов Ю.А. Практика физического моделирования на металлургическом заводе. М.: Металлургия, 1976. 224 с.
7. Гречко А.В., Фролова И.Г. Исследование процесса пылевыноса при загрузке сыпучих материалов в барботажный агрегат // Совершенствование технологии производства тяжелых цветных металлов: сб. науч. тр. М.: Гинцветмет, 1983. С. 11–18.
8. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11663-021-02233-3>.
9. URL: https://www.researchgate.net/publication/270337912_AUSMELT_TECHNOLOGY_DEVELOPMENTS_IN_COPPER.
10. Король Ю.А. Аусмелт. В 4 т. Т. 2: Внедрение и освоение. Екатеринбург: Издательство АМБ, 2024. 456 с.
11. Король Ю.А. Аусмелт. В 4 т. Т. 1: Автогенные процессы для переработки медного сырья. Екатеринбург: Издательство АМБ, 2024. 320 с.
12. Аэродинамика закрученной струи / Р.Б. Ахмедов, Т.Б. Балагула, Ф.К. Рашидов, А.Ю. Сакаев; под ред. Р.Б. Ахмедова. М.: Энергия, 1977. 240 с.
13. Теория турбулентных струй / Г.Н. Абрамович, Т.А. Гиршович, С.Ю. Крашенинников и др.; под ред. Г.Н. Абрамовича. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1984. 716 с.
14. Теплотехнический справочник: в 2 т. / под общ. ред. В.Н. Юренева и П.Д. Лебедева. Изд. 2-е, перераб. М.: Энергия, 1976. Т. 2. 896 с.
15. Гальнбек А.А., Шалыгин Л.М., Шмонин Ю.Б. Расчёты пирометаллургических процессов и аппаратуры цветной металлургии. М.: Металлургия, 1988. 380 с.
16. Сизов А. М. Газодинамика и теплообмен газовых струй в металлургических процессах. М.: Металлургии, 1987. 256 с.
17. Шалыгин Л.М. Исследование гидроаэромеханики и тепловые расчёты конверторов цветной металлургии и пути их совершенствования: дис. ... д-ра техн. наук. Л.: Горный ин-т им. Г.В. Плеханова, 1965. 398 с.
18. Король Ю.А., Набойченко С.С. Конвертирование никельсодержащих штейнов. Екатеринбург: Издательство АМБ, 2020. 460 с.
19. Король Ю.А. Аусмелт. В 4 т. Т. 3: Теория и модели расчёта. Екатеринбург: Издательство АМБ, 2024. 360 с.
20. Иссерлин А.С. Основы сжигания газового топлива: справочное пособие. 2-е изд., перераб. и доп. Л.: Недра, 1987. 336 с.

References

1. Schlesinger M.E., Sole K.C., Davenport W.G., Alvear Flores G.R.F. *Extractive Metallurgy of Copper*. Sixth Edition. ISBN 978-0-12-821875-4. Elsevier Ltd., 2022. 573 p.
2. Wood J., Matuszewicz R. Decarbonisation of the Outotec® Ausmelt Process. In: *Conference Proceedings of Copper2019*. Vancouver, Canada, 2019. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/343097593.3>.
3. Wang S., Yao S.P., Gonzalez T., Siegmund A. Copper Smelting: 2019 Copper Smelting Data. In: *9th International Symposium on High-Temperature Metallurgical Processing*. Available at: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-319-72138-5>.
4. Joubert H., Nikolic S., McDougall I. Design, Construction and Performance of the Copper Cooling System Installed in the First ISACONVERT™ Copper Converting Furnace. In: *International Conference*. Santiago, Chile, 2023.
5. Shalygin L.M., Gulevich A.G. [Ways to Improve the Performance of Converter Matte Processing]. *Tsvetnye metally*. 1976;(12):16–20. (In Russ.)

6. Grechko A.V., Nesterenko R.D., Kudinov Yu.A. *Praktika fizicheskogo modelirovaniya na metallurgicheskom zavode* [Practice of Physical Modeling at a Metallurgical Plant]. Moscow: Metallurgiya, 1976. 224 p. (In Russ.)

7. Grechko A.V., Frolova I.G. [Study of the dust removal process during loading of bulk materials into a bubbling unit]. In: *Sovershenstvovanie tekhnologii proizvodstva tyazhelykh tsvetnykh metallov: sb. nauch. tr.* [Improvement of the Heavy Non-Ferrous Metals Production Process: Scientific paper. Moscow: Gintsvetmet, 1983. P. 11–18. (In Russ.)

8. Available at: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11663-021-02233-3>.

9. Available at: https://www.researchgate.net/publication/270337912_AUSMELT_TECHNOLOGY-DEVELOPMENTS_IN_COPPER.

10. Korol Yu.A. *Ausmelt. V 4 t. T. 2: Vnedrenie i osvoenie* [Ausmelt. In 4 volumes. Vol. 2: Implementation and Development]. Ekaterinburg: AMB Publ., 2024. 456 p. (In Russ.)

11. Korol Yu.A. *Ausmelt. V 4 t. T. 1: Avtogennye protsessy dlya pererabotki mednogo syr'ya* [Ausmelt. In 4 volumes. Vol. 1: Autogenous Processes for Processing Copper Raw Materials]. Ekaterinburg: AMB Publ., 2024. 320 p. (In Russ.)

12. Akhmedov R.B., Balagula T.B., Rashidov F.K., Sakaev A.Yu. *Aerodinamika zakruchennoy strui* [Aerodynamics of a Swirling Jet]. Moscow: Energiya, 1977. 240 p. (In Russ.)

13. Abramovich G.N., Girshovich T.A., Krashenninikov S.Yu., Sekundov A.N., Smirnova I.P. *Teoriya turbulentnykh struy* [Theory of Turbulent Jets]. 2nd ed., revised and enlarged. Moscow: Nauka. The main editorial office of physical and mathematical literature, 1984. 716 p. (In Russ.)

14. Yurenev V.N., Lebedev P.D. (Eds.). *Teplotekhnicheskii spravochnik: v 2 t. T. 2.* [Heat Engineering Handbook. In 2 volumes. Vol. 2]. 2nd ed., revised. Moscow: Energiya, 1976. 896 p. (In Russ.)

15. Gal'nbek A.A., Shalygin L.M., Shmonin Yu.B. *Raschety pirometallurgicheskikh protsessov i apparatury tsvetnoy metallurgii* [Calculations of Pyrometallurgical Processes and Equipment for Non-Ferrous Metallurgy]. Moscow: Metallurgiya, 1988. 380 p. (In Russ.)

16. Sizov A. M. *Gazodinamika i teploobmen gazovykh struy v metallurgicheskikh protsessakh* [Gas Dynamics and Heat Transfer of Gas Jets in Metallurgical Processes]. Moscow: Metallurgiya, 1987. 256 p. (In Russ.)

17. Shalygin L.M. *Issledovanie gidroaeromekhaniki i teplovye raschety konvertorov tsvetnoy metallurgii i puti ikh sovershenstvovaniya: dis. d-ra tekhn. nauk* [Study of Hydro-Aeromechanics and Thermal Calculations of Non-Ferrous Metallurgy Converters and Ways to Improve Them. Doct. sci. diss.]. Leningrad: Plekhanov Mining Institute, 1965. 398 p. (In Russ.)

18. Korol Yu.A., Naboychenko S.S. *Konvertirovanie nikel'soderzhashchikh shteynov* [Converting Nickel-Containing Mattes]. Ekaterinburg: AMB Publ., 2020. 460 p. (In Russ.)

19. Korol Yu.A. *Ausmelt. V 4 t. T. 3: Teoriya i modeli rascheta* [Ausmelt. In 4 volumes. Vol. 3: Theory and Calculation Models]. Ekaterinburg: AMB Publ., 2024. 360 p. (In Russ.)

20. Isserlin A.S. *Osnovy szhiganiya gazovogo topliva: sprav. posobie* [Fundamentals of Gas Fuel Combustion. Reference Book]. 2nd ed., revised and enlarged. Leningrad: Nedra, 1987. 336 p. (In Russ.)

Информация об авторе

Король Юрий Александрович, инженер, АО «Русская медная компания», Екатеринбург, Россия; U.Korol@mail.ru.

Information about the author

Yuriy A. Korol, Engineer, JSC Russian Copper Company. Ekaterinburg, Russia; U.Korol@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 04.04.2025

The article was submitted 04.04.2025