



29. Klyuev R., Bosikov I., Gavrina O. A. Enhanced efficiency of relay protection and controls at a mining and processing facility. *Journal of Mining Institute*. 2021. Vol. 248. pp. 300–311.
30. Bedekar P. P., Bhide S. R., Kale V. S. Optimum coordination of overcurrent relay timing using simplex method. *Electric Power Components and Systems*. 2010. Vol. 38, Iss. 10. pp. 1175–1193.
31. Irfan M., Oh S.-R., Rhee S.-B. An effective coordination setting for directional overcurrent relays using modified harris hawk optimization. *Electronics*. 2021. Vol. 10, No. 23. p. 3007.
32. Huynh D. H., Tran X. K. A modeling of distance protection relay based on Kalman filter: An application for Vietnam's 500kV power transmission lines. *2017 IEEE International Conference on Smart Grid and Smart Cities (ICSGSC)*. 2017. pp. 157–161.
33. Brigadnov I., Lutonin A., Bogdanova K. Error state extended Kalman filter localization for underground mining environments: 2. *Symmetry*. 2023. Vol. 15, No. 2. p. 344.
34. Su C. et al. An adaptive control strategy of converter based DG to maintain protection coordination in distribution system. *5th IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe*. 2014. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7028900>.
35. Javadian S., Haghifam M.-R. Implementation of a new protection scheme on a real distribution system in presence of DG. *Joint International Conference on Power System Technology and IEEE Power India Conference*. 2008. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4745215>.
36. Ulakhovich D. A. Fundamentals of linear electric circuits. St. Petersburg: BkhV-Peterburg, 2009. 816 p.
37. Atkins K. et al. The structure of electrical networks: a graph theory based analysis. *International Journal of Critical Infrastructures*. Inderscience Publishers, 2009. Vol. 5, No. 3. pp. 265–284.
38. Shcherbinin A., Naumov M., Subbotin E. Direct, reverse and zero sequence resistances determined with the help of mathematical modelling of electromagnetic processes. *Elektrotehnika*. 2021. No. 11. pp. 24–28.
39. Nurmatov O., Muminova M. Symmetrical component method applied for transient process studies: Analysis. *Power Industry and Energy Conservation: Theory and Practice: Proceedings of the 4th National Russian Conference*. 2018. 243–1.
40. Skamyin A., Shklyarsky Ya., Dobush V., Dobush I. Experimental determination of parameters of nonlinear electrical load. *Energies*. 2021. Vol. 14, No. 22. p. 7762.

Цифровая модель конвертера с регулируемыми водоохлаждаемыми фурмами

УДК 669.02.09



В. Ю. Бажин,
заведующий кафедрой металлургии,
профессор,
докт. техн. наук,
эл. почта: bazhin_vyu@pers.spmi.ru



Т. Р. Косовцева,
доцент кафедры информатики
и компьютерных технологий,
канд. техн. наук,
эл. почта: Kosovtseva_TR@pers.spmi.ru



А. З. Музипов,
аспирант кафедры автоматизации
технологических процессов и производств,
эл. почта: s225026@stud.spmi.ru

Санкт-Петербургский горный университет,
Санкт-Петербург, Россия

Введение

Вопросы ресурсо- и энергосбережения при переработке полиметаллического и техногенного сырья являются первостепенными при решении проблем минерально-сырьевого комплекса [1]. В связи с этим разработка новых технологий, основанных на фундаментальных научных подходах, может иметь большую практическую значимость как для развития металлургической отрасли, так и для подготовки молодых специалистов соответствующей направленности [2]. В целях снижения объемов техногенных отходов и улучшения экологической обстановки необходимо было разработать способ, при котором отходы одного

Конвертирование медных штейнов успешно применяют в течение длительного времени на многих предприятиях по всему миру. Для устойчивой работы печей и конвертеров необходим рациональный подбор режимов дутья, направленных на снижение потерь сырья и количества вредных выбросов. В целях развития программы ресурсоэнергосбережения, а также для решения экологических задач рассмотрена цифровая модель конвертера с регулируемыми водоохлаждаемыми фурмами. Предложен вариант переработки медьсодержащей шихты, основанный на принципиально новом способе подачи кислородно-воздушной смеси в расплав — пространственно-ориентированном, который позволяет максимально совместить в агрегате зоны теплогенерации и теплообмена. Экспериментально подтверждено многократное увеличение удельной дутьевой нагрузки по сравнению с известными способами подачи дутья. При помощи математического моделирования и построения 3D-моделей доказана целесообразность увеличения удельной производительности автогенной функции конвертера с цилиндрическим профилем при снижении потерь капель расплава и теплового излучения путем формирования пространственно-ориентированных струй, исходящих из фурм конвертера. Полученные математические модели указывают на возможность обеспечения устойчивой работы конвертера при регулярном, управляемом тепломассопереносе за счет создания центробежного эффекта газовой фазы над расплавом и при его заданном движении внутри рабочей зоны конвертера. С учетом размеров агрегата для плавки и, соответственно, различных значений кинетической энергии струй, новых условий поведения расплава исследованы процессы изменения поля скоростей вращения расплава. Разработанная схема может быть применена для вертикальных конвертеров, что обеспечит более эффективную переработку медьсодержащей шихты. Представленную цифровую модель возможно адаптировать и для других печей, в частности при переработке медьсодержащего сырья.

Ключевые слова: кислородный конвертер, фурма, направленные струи, медьсодержащее сырье, шлак, цифровая модель, CFD-моделирование.

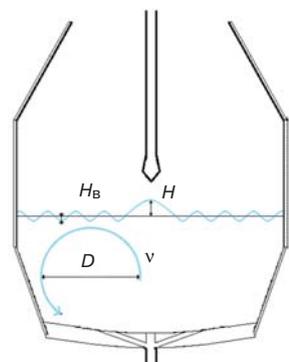
DOI: 10.17580/tsm.2023.04.04

производства являются сырьем для другого. Такой подход обеспечит снижение затрат на производство и соблюдение условий ресурсосбережения.

Работа выполнена с учетом рекомендаций и разработок по теплотехнике для некоторых металлургических агрегатов [3, 4]. Из-за большого количества отвальных скоплений отходов производства и ухудшения качества добываемых ископаемых сегодня вопросы, связанные с переработкой отходов, становятся ключевыми. При реализации различных металлургических процессов, таких как механическая обработка, плавка и др., в том числе отбраковка изделий, образуются отходы, содержащие цветные металлы, называемые металлошихтой, которую активно используют в качестве сырья для конвертера [5]. Пирометаллургический способ переработки полезных ископаемых, в частности сульфидного рудного и техногенного сырья, предусматривает продувку кислородом в конвертерах и других подобных автогенных аппаратах [6, 7]. Регулируемая атмосфера конвертера и управляемый при помощи фурм тепловой режим в замкнутом пространстве конвертера позволяют определить оптимальные параметры переработки медьсодержащей шихты [7, 8]. Решению этой задачи поможет цифровая модель конвертера с регулируемыми водоохлаждаемыми фурмами, разработанная в рамках создания ресурсоэнергосберегающих технологий в цветной металлургии — стратегического направления отрасли [9, 10].

Невозможность обеспечения посредством вертикальной продувки упорядоченного, равномерного и регулярного теплообмена в вертикальном кислородном конвертере обуславливает необходимость создания условий для перегрева металлошихты [11–13].

Для моделирования процесса автогенной плавки сульфидных медных и медно-никелевых концентратов был выбран вертикальный конвертер. Пример базовой расчетной модели представлен на **рис. 1**. Его работа основана на пространственно-ориентированной подаче дутья через регулируемые водоохлаждаемые фурмы [14, 15]. Исходные данные для расчета и построения 3D-модели: H — высота зоны барботаж в центральной части ванны; D — размер зоны циркуляции с учетом величины гарнисажа; H_B — амплитуда волны на поверхности расплава; ν — частота в зоне циркуляции.



В рабочем пространстве конвертера (цилиндре) создается эффект вращения расплава под действием динамического напора тангенциально направленных (ориентированных) кислородных струй, формируется

Рис. 1. Базовая расчетная модель вертикального конвертера [15]

упорядоченный характер движения расплава и теплообмена в объеме конвертера [16].

Основным конструктивным элементом конвертера, работающего по принципу подачи дутья в расплав, является фурменное устройство.

В Санкт-Петербургском горном университете была разработана новая конструкция водоохлаждаемых фурм*. Фурма получила название радиально-осевой [17], она имеет ряд особенностей по сравнению с традиционными, применяемыми в конвертерах:

- корпус фурмы расположен параллельно подине печи;
- дутьевая насадка находится в рабочей камере под углом от 15 до 30° в зависимости от условий;
- материал изготовления рабочей основы — медь, изготовление осуществляется по бесшовной технологии с применением резьбовых соединений;
- по центральной оси корпуса на конечный замыкающий колпак головки для охлаждения подается вода как на самую подверженную нагрузкам деталь.

Для обеспечения надежности работы такой фурмы потребовалась предварительная оценка эффективности системы ее охлаждения в плане подбора оптимальных режимов переплавки шихты [18, 19]. Исследования базировались на известных физико-химических закономерностях процессов, протекающих на стадии окислительной пирометаллургической переработки сульфидного полиметаллического сырья. Математическое моделирование выполняли с применением вычислительных пакетов MathCad и Ansys [20]. Был смоделирован циклонный эффект движения расплава (направления движения жидких фаз) в цилиндрическом рабочем пространстве вертикального конвертера с использованием программной среды Ansys CFX. Общая гидроаэродинамическая характеристика рассчитана методом контрольных объемов по исходным данным (**рис. 2**).

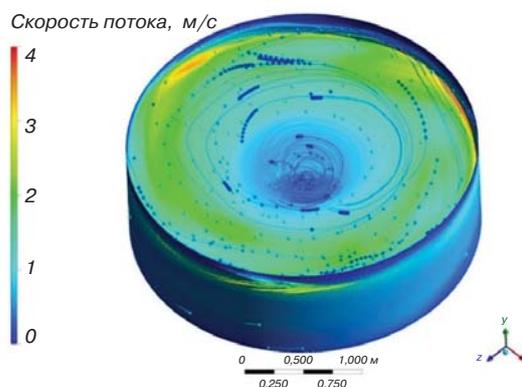


Рис. 2. Поведение и направление движения расплава в вертикальном конвертере

*Пат. 2244020 РФ. Фурма для продувки расплавов / Шалыгин Л. Н, Коновалов Г. В. ; заявл. 15.12.2003; опубл. 10.01.2005, Бюл. № 1.

Для определения основных динамических характеристик расплава с учетом приложения к его поверхности тангенциально направленных кислородных струй рационально применить систему дифференциальных уравнений в частных производных. Тогда уравнение движения расплава с применением безразмерных переменных имеет вид

$$\frac{\partial v}{\partial t} = \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial v}{\partial r} - \frac{v}{r^2}, \quad (1)$$

где пространственные координаты r и z отнесены к радиусу сосуда R , время t — к $\rho R^2/\mu$; скорость v — к $M_0/\mu R^2$, M_0 — момент относительно оси симметрии в конвертере, создаваемый распределенными по свободной поверхности касательными напряжениями от действия направленных струй [21].

Тогда исходные условия для уравнения:

$$v = 0 \text{ при } t = 0. \quad (2)$$

Краевые условия для уравнения:

$$v = 0 \text{ при } r = 0 \text{ и } v = 1 \text{ при } z = 0. \quad (3)$$

Условия непрерывности касательных напряжений на свободной поверхности расплава:

$$\frac{\partial v}{\partial z} = T(r) \text{ при } z = h, \quad (4)$$

где $h = H/R$, H — высота слоя расплава; $T(r)$ — касательное напряжение, отнесенное к M_0/R_3 .

Решение начально-краевой задачи (1)–(4) проведем с помощью преобразования Лапласа по переменной t [22].

Таким образом, задача по уравнениям (1)–(4) принимает вид

$$p \cdot \hat{v} = \frac{\partial^2 \hat{v}}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 \hat{v}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \hat{v}}{\partial r} - \frac{\hat{v}}{r^2}. \quad (5)$$

Тогда матрица скоростей расплава может быть представлена в виде блока уравнений (6) и (7).

$$\hat{v}|_{r=0} = \hat{v}|_{r=1} = 0 \quad (6)$$

$$\hat{v}|_{z=0} = 0 \quad (7)$$

$$\frac{\partial \hat{v}}{\partial z} \Big|_{z=h} = \frac{1}{p} \cdot T(r) \quad (8)$$

где $\hat{v}(r, z, p) = \int_0^\infty v(r, z, p) \cdot e^{-pt} dt$.

Для решения задачи по уравнениям (5) – (8) воспользуемся методом Фурье для разделения переменных [23, 24]. Тогда решение уравнения (5) имеет вид

$$\hat{v}(r, z, p) = Z(z, p) \cdot R(r). \quad (9)$$

Полученное уравнение (9) подставим в уравнение (5) и получим

$$\frac{pz - \frac{\partial^2 Z}{\partial z^2}}{Z} = \frac{\frac{\partial^2 R}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial R}{\partial r} - \frac{1}{r^2} \cdot R}{R} = -\lambda^2.$$

Тогда по осям уравнения примут следующий вид:

$$\frac{\partial^2 R}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial R}{\partial r} + \left(\lambda^2 - \frac{1}{r^2} \right) \cdot R = 0, \quad (10)$$

$$\frac{\partial^2 Z}{\partial z^2} - (\lambda^2 + p) \cdot Z = 0. \quad (11)$$

Уравнение (10) есть уравнение Бесселя [25]. Его решением с ограничением по нулю является функция Бесселя I рода:

$$R = J_1(\lambda, r).$$

В соответствии с краевыми условиями (3) получаем:

$$J_1(0) = 0 \text{ и } J_1(\lambda) = 0.$$

Тогда $\lambda = \beta_k$ ($k = 1, 2, \dots$), где β_k — нулевые функции $J_1(z)$.

В результате получаем бесконечное множество решений уравнения (10), которое удовлетворяет краевым и начальным условиям (3).

Если $\lambda = \beta_k$ при условии $R = J_1(\beta_k, r)$, уравнение (11) будет иметь следующий вид:

$$\frac{\partial^2 Z}{\partial z^2} - (\beta_k^2 + p) \cdot Z = 0.$$

Решение уравнения (11), удовлетворяющее граничным условиям (4)

$$Z = C_k(p) \text{sh}(\sqrt{\beta_k^2 + pz}).$$

Из этого следует, что скорость определяется через ряд функций:

$$\hat{v}(r, z, p) = C_k(p) \cdot \text{sh}(\sqrt{\beta_k^2 + pz}) \cdot J_1(\beta_k, r). \quad (12)$$

В силу линейности уравнения (5) и однородности краевых условий (6), (7) этому уравнению и таким краевым условиям будет удовлетворять и сумма решений (8):

$$\hat{v}(r, z, p) = \sum_{k=1}^{\infty} C_k(p) \cdot \text{sh}(\sqrt{\beta_k^2 + pz}) \cdot J_1(\beta_k, r). \quad (13)$$

Остается удовлетворить условию на свободной поверхности расплава. Это условие соблюдается согласно следующему уравнению:

$$\sum_{k=1}^{\infty} C_k(p) \sqrt{\beta_k^2 + p} \cdot \text{ch}(\sqrt{\beta_k^2 + ph}) \cdot J_1(\beta_k, r) = \frac{1}{p} \cdot T(r). \quad (14)$$

Уравнение (14) и есть разложение функции $\frac{1}{p} \cdot T(r)$

в ряд по бесселевым функциям $J_1(\beta_k, r)$.

Дополнительно умножим уравнение (14) на $r, J_1(\beta_n, r)$ и проинтегрируем по промежутку $[0, 1]$. Учитывая, что матрица имеет следующий вид:

$$\int_0^1 r J_1(\beta_k, r) J_1(\beta_n, r) = \begin{cases} 0 & \text{при } k \neq n \\ -\frac{1}{2} J_0(\beta_n) & \text{при } k = n, \end{cases}$$

Получаем уравнение

$$C_k(p) = \frac{2q_k}{J_0(\beta_k)p\sqrt{\beta_k^2 + p} \cdot \text{ch}(\sqrt{\beta_k^2 + ph})}, \quad (15)$$

где $q_k = \int_0^1 rT(r)J_1(\beta_k, r)dr$.

Таким образом, скорость рассчитываем по формуле

$$\hat{v}(r, z, p) = -\frac{2}{\rho} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{q_k}{J_0(\beta_k)} \cdot \frac{\text{sh}(\sqrt{\beta_k^2 + pz})}{p\sqrt{\beta_k^2 + p} \cdot \text{ch}(\sqrt{\beta_k^2 + pz})} \times J_1(\beta_k, r). \quad (16)$$

Возвращаясь к исходным условиям, последовательно получим:

$$\frac{\text{sh}(\sqrt{pz})}{\sqrt{p} \cdot \text{ch}(\sqrt{ph})} \rightarrow \frac{2}{h} \cdot \sum_{m=0}^{\infty} (-1)^m \cdot e^{-\alpha_m^2 t} \cdot \sin(\alpha_m z),$$

$$\alpha_m = \frac{(2m+1) \cdot \pi}{2h};$$

$$\frac{\text{sh}(\sqrt{p + \beta_k^2} \cdot z)}{\sqrt{p + \beta_k^2} \cdot \text{ch}(\sqrt{p + \beta_k^2} \cdot h)} \rightarrow \frac{2}{h} \cdot e^{\beta_k^2 t} \cdot \sum_{m=0}^{\infty} (-1)^m \cdot e^{-\alpha_m^2 t} \cdot \sin(\alpha_m z)$$

$$\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\text{sh}(\sqrt{p + \beta_k^2} \cdot z)}{\sqrt{p + \beta_k^2} \cdot \text{ch}(\sqrt{p + \beta_k^2} \cdot h)} \rightarrow \frac{2}{h} \cdot e^{\beta_k^2 t} \cdot \sum_{m=0}^{\infty} \frac{(-1)^m}{\alpha_m^2 + \beta_k^2} \times$$

$$\times (1 - e^{-(\beta_k^2 + \alpha_m^2)t}) \cdot \sin(\alpha_m z).$$

Тогда скорости в зоне ориентированных струй будут соответствовать уравнению

$$v(r, z, t) = -\frac{4}{h} \cdot \sum_{k=1}^{\infty} \frac{q_k}{J_0(\beta_k)} \cdot \left(\sum_{m=0}^{\infty} \frac{(-1)^m}{\alpha_m^2 + \beta_k^2} \times \right.$$

$$\left. \times (1 - e^{-(\beta_k^2 + \alpha_m^2)t}) \sin(\alpha_m z) \right) \cdot J_1(\beta_k, r). \quad (17)$$

Полученное уравнение (17) и есть решение исходной задачи (1)–(4).

Распределение скоростей в установившемся режиме получаем из уравнения (17) предельным переходом при $t \rightarrow +\infty$

$$v_{уст}(r, z) = \lim_{t \rightarrow +\infty} v(r, z, t) = -\frac{4}{h} \cdot \sum_{k=1}^{\infty} \frac{q_k}{J_0(\beta_k)} \cdot J_1(\beta_k, r) \times$$

$$\times \sum_{m=0}^{\infty} \frac{(-1)^m}{\alpha_m^2 + \beta_k^2} \cdot \sin(\alpha_m z).$$

С другой стороны, из уравнения (16) следуют следующие ограничения и допущения:

$$v_{уст}(r, z) = \lim_{t \rightarrow +\infty} v(r, z, t) = \lim_{\rho \rightarrow 0} \rho \hat{v}(r, z, t) =$$

$$= -2 \cdot \sum_{k=1}^{\infty} \frac{q_k}{J_0(\beta_k) \cdot \beta_k} \cdot \frac{\text{sh}(\beta_k z)}{\text{ch}(\beta_k h)} \cdot J_1(\beta_k, r).$$

Таким образом, поле скоростей (17) можно представить в виде:

$$v(r, z, t) = v_{уст}(r, z) + \frac{4}{h} \cdot \sum_{k=1}^{\infty} \frac{q_k}{J_0(\beta_k)} \cdot e^{-\beta_k^2 t} \times$$

$$\times \left(\sum_{m=0}^{\infty} \frac{(-1)^m}{\alpha_m^2 + \beta_k^2} \cdot e^{-\alpha_m^2 t} \cdot \sin(\alpha_m z) \right) \cdot J_1(\beta_k, r).$$

Установившийся режим плавки зависит от распределения скоростей в установившемся течении потока в конвертере цилиндрической формы:

$$v_{уст}(r, z) = -2 \cdot \sum_{k=1}^{\infty} \frac{q_k}{J_0(\beta_k) \cdot \beta_k} \cdot \frac{\text{sh}(\beta_k z)}{\text{ch}(\beta_k h)} \cdot J_1(\beta_k, r). \quad (18)$$

Значение размерной скорости:

$$v = -\frac{2M_0}{\mu R^2} \cdot \sum_{k=1}^{\infty} \frac{q_k}{J_0(\beta_k) \cdot \beta_k} \cdot \frac{\text{sh}(\beta_k z)}{\text{ch}(\beta_k h)} \cdot J_1(\beta_k, r).$$

Если выполняется условие, когда касательное напряжение на свободной поверхности сосредоточено в узком кольце радиусом $R_0 = r_0 \cdot R$ и толщиной $\delta \ll R$, то

$$q_k = \frac{1}{2\pi} r_0 J_1(\beta_k r_0);$$

$$v = -\frac{M_0 \cdot R_0}{\pi \mu R^3} \cdot \sum_{k=1}^{\infty} \frac{J_1(\beta_k, r_0)}{J_0(\beta_k) \cdot \beta_k} \cdot \frac{\text{sh}(\beta_k z)}{\text{ch}(\beta_k h)} \cdot J_1(\beta_k, r).$$

Значения функции $J_1(z)$ могут быть приближенно вычислены по формуле

$$\beta_k = \beta_1 + (k-1) \cdot \pi, \beta_1 = 3,832, \text{ при } k > 3, \beta_k = (4k+1) \cdot \pi/4.$$

Регулярный, упорядоченный массоперенос обуславливает однородность теплового и реакционных полей в объеме расплава и обеспечивает наиболее благоприятные условия протекания технологического процесса. Решение уравнения (18) в программе MathCad в стационарном режиме и безразмерных величинах представлено на **рис. 3**.

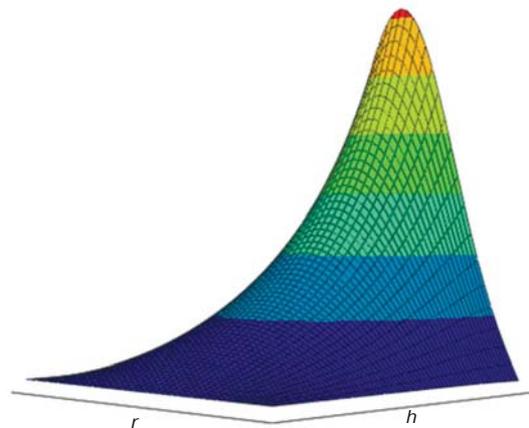


Рис. 3. Исходное поле скоростей вращающейся жидкости [10]

В качестве исходных данных модели и для создания первичной сетки для скоростей (см. рис. 3) приняли $k = 4$; r, h — радиус и высота цилиндрической части соответственно от 0 до 1 [26–28]. В результате реализации математической модели в среде MathCad может быть найдена максимальная скорость вращения расплава в области пространственно-ориентированных струй для интенсификации физико-химических взаимодействий, если радиус приложения и касательных напряжений $r_0 = 0,7R$, что на практике будет соотноситься с результатами моделирования.

Расчет тепломассообмена радиально-осевой фурмы (см. рис. 2) был выполнен в программной среде Ansys CFX [29–31] с применением SST-модели, которая подтвердила свою эффективность [32, 33]. Основная идея SST-модели заключалась в объединении лучших элементов моделей $k-\epsilon$, $k-\omega$ и J_k путем введения специальных функций. Очевидно, что такой прагматичный подход оправдан только улучшением характеристик модели.

На рис. 4 показана в разрезе рабочая зона радиально-осевой фурмы вертикального конвертера (исходные данные для расчета: диаметр дутьевой насадки 20 мм, диаметр продольных сквозных сечений 8 мм).

В основу SST-цифровой модели положены линейные комбинации $k-\omega$ в приповерхностных областях и $k-\epsilon$ модели вдали от поверхностей [34, 35].

В стационарном режиме SST по осям модель имеет вид

$$\frac{\partial \rho k u_i}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + \rho P_k - \rho C_\mu k \omega, \quad (19)$$

$$\frac{\partial \rho \omega u_i}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \right) + (1 - F_1) 2\rho \frac{1}{\sigma_\omega \omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i} + \alpha \frac{\omega}{k} \rho P_k - \rho \beta \omega^2, \quad (20)$$

где $\mu_t = \rho \frac{\alpha_1 k}{\max(\alpha_1 \omega, |\bar{S}| F_2)}$ — турбулентная вязкость; $\rho P_k =$

$= \min(\mu_t |\bar{S}|^2, 10 C_\mu k \rho \omega)$ — генерация кинетической энергии; $\partial k, \partial \omega, \alpha$ и β — коэффициенты, вычисляются как $\Phi = F_1 \Phi_1 + (1 - F_1) \Phi_2$; Φ_1 и Φ_2 — коэффициенты $k-\omega$ и $k-\epsilon$ модели; цифровые исходные значения; $C_\mu = 0,09$, $\alpha_1 = 5/9$, $\alpha_2 = 0,44$, $\beta_1 = 0,075$, $\beta_2 = 0,0828$, $\partial k_1 = 2$, $\partial k_2 = 1$, $\partial \omega_1 = 2$, $\partial \omega_2 = 1/0,856$, F_1 и F_2 — функции-переключатели, принимающие вид

$$F_1 = \begin{cases} 0, & \text{вдали от поверхности, модель } k-\epsilon \\ 1, & \text{внутри пограничного слоя, модель } k-\omega \end{cases}$$

$$F_2 = \begin{cases} 0, & \text{комбинация моделей } k-\epsilon \text{ и } k-\omega \\ 1, & \text{SST-модель.} \end{cases}$$

Расчетная сетка области переходного состояния при изменении профиля поверхности расплава представлена на рис. 5.

Сгенерированная сетка содержит более 10 млн элементов. Усредненные параметры построенной сетки:

детерминант — 1,83; отношение якобианов — 1,0; качество сетки — 0,84 (удовлетворяет указанным далее условиям).

Для настройки Ansys CFX приняты следующие условия (рис. 6): максимальная интенсивность перемешивания расплавленной ванны достигается, если угол атаки дутьевой струи составляет 65° к поверхности расплава, угол поворота фурмы — 25° ; рабочая часть фурмы в зоне футеровки находится в зоне воздействия пылегазовой смеси с известными теплофизическими свойствами при температуре 1300°C и скорости 1 м/с. Температура охлаждающего агента на входе, например

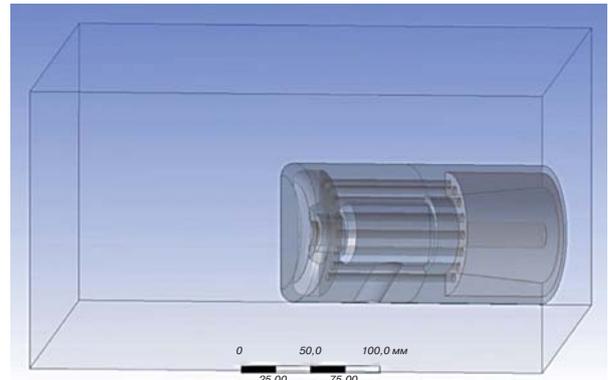


Рис. 4. Рабочая зона радиально-осевой фурмы вертикального конвертера (в разрезе)

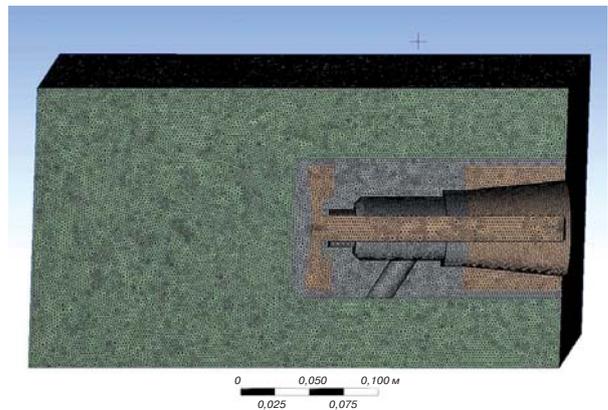


Рис. 5. Расчетная сетка, сгенерированная программным комплексом Ansys CFX

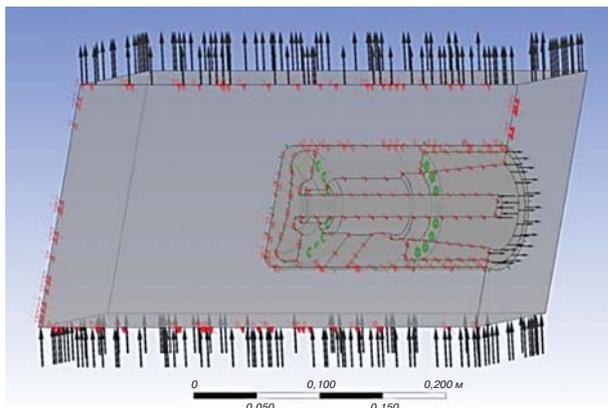


Рис. 6. Настройка программной среды Ansys CFX

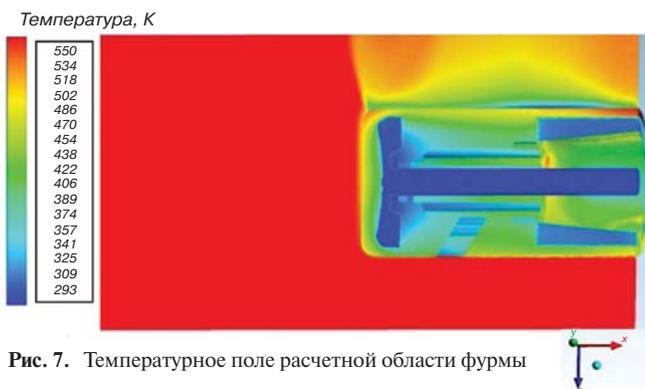


Рис. 7. Температурное поле расчетной области фурмы



Рис. 8. Линии потока охлаждающего агента

воды, составляет 20 °С, а давление воды с учетом возможности работы водоохлаждаемой системы под разрежением принимаем равным 0,03 МПа.

Расчетное время выполнения поставленной задачи составило более 45 ч на одном ПК с 4-ядерным процессором Intel Core i5 производительностью 3,1 ГГц.

Результаты математического моделирования конвективной теплопередачи и гидродинамики охлаждающего агента показаны на **рис. 7 и 8**.

Из рис. 7 видно, что изменение поля скоростей в расчетной области фурмы особенно заметно вдоль стенок на выходе газового потока.

Согласно расчетной области поля скоростей, линии потока охлаждающего агента на выходе характеризуются переходом от ламинарного режима к турбулентному (см. рис. 8).

Полученные модели сопоставимы с практическими данными и технологической ситуацией при изменении теплового потока внутри вертикального конвертера.

В результате решения и построения цифровой модели фурм в программной среде Ansys CFX определено поле скоростей охлаждающего агента. Найдены тепловые поля всех фаз. Установлено, что в условиях теплопередачи

расход воды недостаточен для охлаждения рабочей поверхности фурмы, поскольку температура воды на выходе выше 100 °С, что неизбежно приведет к кипению жидкости и термическому разрушению фурмы.

Заключение

Снижение запасов минерального сырья требует решения задач ресурсосбережения, в том числе при использовании конвертеров. Математическое моделирование технологической ситуации при изменении условий дутья в вертикальном конвертере позволяет управлять параметрами плавки и прогнозировать ситуацию во время всего технологического цикла. Для осуществления процесса автогенной плавки полиметаллического сырья в форсированном режиме предлагается принципиально новый, пространственно-ориентированный способ подачи дутья, обеспечивающий максимальное совмещение в пространстве конвертера зон теплогенерации и теплообмена.

С помощью цифровой модели конвертера решены задачи по применению энергосберегающих режимов дутья и плавки медьсодержащих руд.

В ходе построения цифровой модели выявлена возможность прогноза изменения поля скоростей вращения расплава внутри аппарата под влиянием кинетической энергии струй применительно ко всему его объему. Прогноз технологической ситуации возможен с учетом различных факторов, таких как размеры цилиндрического сосуда, динамические и геометрические характеристики струй и физические свойства расплава.

Определено, что под воздействием динамического напора тангенциально направленных кислородных струй создается упорядоченный характер движения расплава и формируется устойчивый теплообмен во всем пространстве конвертера.

Расчетным путем доказано, что максимальная скорость вращения расплава в рабочем объеме печи наблюдается, если радиус приложения касательных напряжений равен 0,7R. Внедрение предложенной схемы работы вертикального конвертера будет способствовать реализации ресурсо- и энергосберегающих технологий на предприятиях минерально-сырьевого комплекса.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

См. англ. блок

ЦМ

Tsvetnye Metally. 2023. No. 4. pp. 31–37
DOI: 10.17580/tsm.2023.04.04

DIGITAL MODEL OF A CONVERTER WITH ADJUSTABLE WATER-COOLED TUYERES

Information about authors

V. Yu. Bazhin, Head of the Metallurgy Department¹, Professor, Doctor of Technical Sciences, e-mail: bazhin_vyu@pers.spmi.ru

T. R. Kosovtseva, Associate Professor at the Department of Computer Science and Technology¹, Candidate of Technical Sciences, e-mail: Kosovtseva_TR@pers.spmi.ru

A. Z. Muzipov, Postgraduate Student at the Department of Process and Plant Automation¹, e-mail: s225026@stud.spmi.ru

¹Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia.

Abstract

The process of copper matte conversion has been in use for a long time at multiple sites around the world. The steady operation of furnaces and converters can be achieved through a good selection of blasting modes aimed at minimizing raw material losses and hazardous emissions. With the aim to develop the resource and energy saving plan and tackle the environmental issues, this paper considers a digital model of a converter equipped with adjustable water-cooled tuyeres. It describes how copper-bearing burden



can be processed based on a completely new technique of delivering the oxygen-air mixture into the melt. It is a spatially oriented technique, which helps combine as much as possible the heat generation and heat transfer zones inside a unit. Experiments were conducted, which confirmed a significant increase of specific blasting rate compared with known blasting techniques. With the help of mathematical modelling, the authors built a 3D model to demonstrate that, by creating spatially-oriented jets coming from the converter tuyeres, one can raise the specific capacity of an autogenous cylindrical converter while reducing the loss of melt droplets, as well as heat radiation. The resultant mathematical models suggest that the steady operation of a converter can be secured by regular, controlled heat and mass transfer, which can be achieved by making the gas phase move centrifugally above the melt and making the melt move in a certain way inside the converter. Considering the size of the converter and, correspondingly, the different values of kinetic jet energy, as well as the different melt behaviour, the authors looked at the changing melt rotation speed field. The developed scheme can be used with vertical converters, which will ensure more efficient processing of copper-bearing burden. The described model can be adapted to other types of furnaces – in particular, to those used for processing copper-bearing raw materials.

Key words: oxygen converter, tuyere, jet direction, copper-bearing raw material, slag, digital model, CFD modelling.

References

1. Litvinenko V. S., Tsvetkov P. S., Molodtsov K. V. The social and market mechanism of sustainable development of public companies in the mineral resource sector. *Eurasian Mining*. 2020. No. 1. pp. 36–41. DOI: 10.17580/em.2020.01.07.
2. Litvinenko V., Bowbrick I., Naumov I., Zaitseva Z. Global guidelines and requirements for professional competencies of natural resource extraction engineers: Implications for ESG principles and sustainable development goals. *Journal of Cleaner Production*. 2022. Vol. 338. pp. 1–9. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.130530.
3. Shalygin L. M. Analyzing the efficiency of using oxygen for matte conversion. *Tsvetnye Metally*. 1996. No. 2. pp. 12–16.
4. Baptizmanskii V. I. Theory of basic oxygen process. Moscow : Metallurgiya, 1975. 374 p.
5. Tsemekhman L. Sh., Ryabko A. G., Lukashev L. P. Autogenous smelting of copper and copper-nickel sulphide material and middlings in top-blown oxygen converters. *Tsvetnye Metally*. 1998. No. 2. pp. 26–32.
6. ANSYS CFX, Release 11.0. Ansys Inc., 2007.
7. Menter F. R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *AIAA Journal*. 1994. Vol. 32, No. 8. pp. 1598–1605.
8. Snegirev A. Yu. Applied physics and high-performance calculations. Numerical modelling of turbulent flows: Learner's guide. St. Petersburg : Izdatelstvo Politehnicheskogo universiteta, 2008. 142 p.
9. Menter F. R., Kuntz M., Langtry R. Ten years of experience with the SST turbulence model. *Turbulence, Heat and Mass Transfer 4*. Ed. by K. Hanjalic, Y. Nagano, M. Tummers. Begell House Inc., 2003. pp. 625–632.
10. Colton H. A., Kononov G. V., Kosovtseva T. R. Mathematical description of rotation of liquid under the influence of tangential stresses. *International Journal of Pure and Applied Mathematics*. 2018. Vol. 119, No. 10. Special Issue. pp. 423–426.
11. Kuskova Y. V., Erokhina O. O., Simakov A. S. Problematics and perspectives of the development of automatic control systems for concentration tables using computer simulation. *Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing*, 2019. Vol. 1384, No. 1. p. 012023. DOI: 10.1088/1742-6596/1384/1/012023.
12. Fedorova E., Pupysheva E., Morgunov V. Modelling of red-mud particle-solid distribution in the feeder cup of a Thickener using the combined CFD-DPM approach. *Symmetry*. 2022. Vol. 14. 2314. DOI: 10.3390/sym14112314.
13. Martynov S. A., Masko O. N., Fedorov S. N. Innovative ore-thermal furnace control systems. *Tsvetnye Metally*. 2022. No. 4. pp. 87–94. DOI: 10.17580/tsm.2022.04.11.
14. Pardo F. R. O. et al. Metallographic properties evaluation of the specimens obtained by the vibratory method (cast iron ISO 400-12). *Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing*. 2022. Vol. 2388, No. 1. p. 012058. DOI: 10.1088/1742-6596/2388/1/012058.
15. Ishimbaev A. V., Matyukhin V. I. Computer simulation of fluid dynamics in an oxygen converter. *Important problems of engineering sciences: Proceedings of the 24th Regional Competition of Research Papers Olympus of Science in the area of Engineering Sciences. Yekaterinburg : Uralskiy federalnyi universitet*, 2021. pp. 75–80.
16. Nakamura H., Makino S., Ishii M. Continuous shear thickening and discontinuous shear thickening of concentrated monodispersed silica slurry. *Advanced Powder Technology*. 2020. Vol. 31, No. 4. pp. 1659–1664.
17. Shestakov A. K., Petrov P. A., Nikolaev M. Yu. Automatic system for detecting visible emissions in a potroom of aluminium plant based on technical vision and a neural network. *Metallurg*. 2022. No. 10. pp. 105–112. DOI: 10.52351/00260827_2022_10_105.
18. Kononov G. V. Peculiarities of mass transfer under the influence of radial-axial blasting jets. *Journal of Mining Institute*. 2002. Vol. 150. pp. 120–122.
19. Beloglazov I., Krylov K. An interval-simplex approach to determine technological parameters from experimental data. *Mathematics*. 2022. Vol. 10, No. 16. p. 2959. DOI: 10.3390/math10162959.
20. Sharikov F. Y., Sharikov Y. V., Krylov K. A. Selection of key parameters for green coke calcination in a tubular rotary kiln to produce anode petcoke. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2020. Vol. 15. pp. 2904–2912.
21. Shestakov A. K., Sadykov R. M., Petrov P. A. Multifunctional crust breaker for automatic alumina feeding system of aluminum reduction cell. *E3S Web of Conferences. EDP Sciences*, 2021. Vol. 266. 09002. DOI: 10.1051/e3sconf/202126609002.
22. Zakharov L. A., Martyushev D. A., Ponomareva I. N. Predicting dynamic formation pressure using artificial intelligence methods. *Journal of Mining Institute*. 2022. Vol. 253. pp. 23–32. DOI: 10.31897/PMI.2022.11.
23. Vasilyeva N. V. et al. Automated digitization of radial charts. *Journal of Mining Institute*. 2021. Vol. 247. pp. 82–87. DOI: 10.31897/PMI.2021.1.9.
24. Shklyarskiy Y. E., Batueva D. E. Operation mode selection algorithm development of a wind-diesel power plant supply complex. *Journal of Mining Institute*. 2022. Vol. 253. pp. 115–126. DOI: 10.31897/PMI.2022.7.
25. Bazhin V. Y., Nguyen H. H. Vietnamese metallurgy on the way out of the crisis with the use of automated control systems. *AIP Conference proceedings. AIP Publishing LLC*. 2022. Vol. 2467. 030018. DOI: 10.1063/5.0092750.
26. Simakov A. S., Trifonova M. E., Gorlenkov D. V. Virtual Analyzer of the Voltage and Current Spectrum of the Electric Arc in Electric Arc Furnaces. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2021. Vol. 2021, No. 6. pp. 713–719. DOI: 10.1134/S0036029521060252.
27. Kulchitskii A. A., Kashin D. A. The choice of a method for non-contact assessment of the composition of briquetted charge materials. *Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing*. 2019. Vol. 1399, No. 4. p. 044108. DOI: 10.1088/1742-6596/1399/4/044108.
28. Boikov A., Payor V. The present issues of control automation for levitation metal melting. *Symmetry*. 2022. Vol. 14, No. 10. p. 1968. DOI: 10.3390/sym14101968.
29. Skuratov A. P., Skuratova S. D. Design options and thermal design of electric smelters: Learner's guide. Krasnoyarsk : Sibirskiy federalnyi universitet, 2012. 168 p.
30. Voronin v. A., Nepsha F. S. Simulation modelling of the electric drive of a shearer for analyzing the efficiency of the power supply system. *Journal of Mining Institute*. 2020. Vol. 246. pp. 633–639. DOI: 10.31897/PMI.2020.6.5.
31. Davenport W. G. I. et al. Extractive metallurgy of copper. Elsevier, 2002. 432 p. DOI: 10.1016/B978-0-12-821875-4.00017-1.
32. Skuratov A. P., Ivlev A. V., Pinykh A. A. Calculated study of the influence of overheating aluminum melt on the dynamics the granulation process. *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*. 2020. Vol. 13, No. 1. pp. 84–93.
33. Shalygin L. M., Kononov G. V. The structure of heat balance, heat generation and heat transfer in autogenous metallurgical units of different type. *Tsvetnye Metally*. 2003. No. 10. pp. 17–24.
34. Sizyakov V. M., Kononov G. V. Spatially-oriented submerged jets as the basis of the novel design autogenous units. *Tsvetnye Metally*. 2016. No. 10. pp. 14–20. DOI: 10.17580/tsm.2016.10.02.
35. Solero L., Lidozzi A., Pomilio J. A. Design of multiple-input power converter for hybrid vehicles. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2005. Vol. 20, Iss. 5. pp. 1007–1016. DOI: 10.1109/TPEL.2005.854020.