



Математическое моделирование теплового режима агрегата печь-ковш с учетом внутренних тепловых источников

© Д.Д. Черемисин*, С.А. Новокрещенов**, В.С. Швыдкий**, В.П. Жуков***

*АО «Уралэнергочермет», г. Екатеринбург, Россия

**Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина,
г. Екатеринбург, Россия

***АО «Уралмеханобр», г. Екатеринбург, Россия

Резюме: Цель – исследование методами математического моделирования процессов теплообмена огневого рафинирования черновой меди в агрегате печь-ковш. Основным металлургическим агрегатом при моделировании был принят агрегат печь-ковш, предназначенный для апробации технологии рафинирования с использованием донной продувки в пузырьковом режиме с применением газообразных восстановителей (углеводородов) и окислителя. Использованы методы математического моделирования, позволяющие описывать свойства реального процесса на основе математической формализации физических законов и закономерностей. Вместо дорогостоящего мазута, используемого в качестве жидкого восстановителя, предложено использовать газообразные восстановители. Показано, что их использование в режиме продувки «снизу» позволяет достигнуть высоких технико-экономических показателей процесса. Этому также способствуют перенос части технологических операций непосредственно в ковш, исключение необходимости повторного расплавления и разогрева рафинируемой меди. Показано, что одной из проблем является необходимость поддержания заданного теплового режима, обеспечивающего как саму возможность проведения операций рафинирования, так и ввода в расплав при донной продувке газообразного реагента, от которого зависят гидрогазодинамические параметры. Предложена оригинальная методика учета в математических моделях влияния тепловых эффектов химических реакций (на примере экзотермических реакций окислительного периода рафинирования). Использование двух различных методов анализа позволило достаточно полно идентифицировать величину влияния основных экзотермических реакций на тепловой режим процесса рафинирования. Представленные математические модели позволяют определить удельное влияние различных технологических параметров (состав и расход топлива, температура и степень обогащения дутья, конструкция футеровки и т.д.) на динамику изменения температурного поля расплава и технико-экономические параметры плавки в целом.

Ключевые слова: рафинирование меди, печь-ковш, донная продувка, тепловой баланс, газообразные восстановители, гидрогазодинамические параметры

Для цитирования: Черемисин Д.Д., Новокрещенов С.А., Швыдкий В.С., Жуков В.П. Математическое моделирование теплового режима агрегата печь-ковш с учетом внутренних тепловых источников. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2021. Т. 25. № 4. С. 509–518. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-4-509-518>

Mathematical modelling of the thermal regime of a ladle- furnace unit considering internal heat sources

Dmitry D. Cheremisin*, Sergey A. Novokreschenov**,
Vladimir S. Shvydkiy**, Vladimir P. Zhukov***

*Uralenergochermet JSC

**Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia

***Uralmekhanobr JSC, Yekaterinburg, Russia

Abstract: We apply mathematical modelling to study heat transfer processes during fire refining of blister copper in a ladle-furnace unit. A ladle-furnace unit was designed to test the refining technology using bottom blowing in a bubble mode by gaseous reducing agents (hydrocarbons) and an oxidiser. Mathematical modelling allows the properties of a real process to be described based on mathematical formalisation of physical laws and regularities. It was proposed to use gaseous reducing agents, rather than expensive residual fuel, as a liquid-reducing agent. The use of gaseous reduc-

ing agents in the bottom blowing mode produces higher technical and economic indicators of the process. In addition, some technological operations were transferred directly to the ladle, thereby eliminating the need for re-melting and heating of refined copper. One of the identified problems was the need to maintain the predetermined thermal regime, which provides the very possibility of both performing refining operations and introducing a gaseous reagent (determining the hydro-gas-dynamic parameters) into the melt during bottom blowing. An original method for considering the thermal effects of chemical reactions in mathematical models was presented using an example of exothermic reactions during oxidative refining. The use of two different methods of analysis allowed a comprehensive assessment of the influence of the main exothermic reactions on the thermal regime of the refining process. The presented mathematical models can be used for determining the specific effect of various technological parameters (composition and fuel consumption, temperature and degree of blast enrichment, lining design, etc.) on the dynamics of changes in the temperature field of the melt and the technical and economic parameters of melting as a whole.

Keywords: copper refining, ladle furnace, bottom blowing, heat balance, gaseous reducing agents, hydro-gas-dynamic parameters

For citation: Cheremisin DD, Novokreschenov SA, Shvydkiy VS, Zhukov VP. Mathematical modelling of the thermal regime of a ladle- furnace unit considering internal heat sources. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2021;25(4):509–518. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-4-509-518>

ВВЕДЕНИЕ

Технический прогресс в области производства тяжелых цветных металлов развивается по пути совершенствования технологических процессов, решения экологических проблем производства и повышения качества конечной продукции [1–12].

В практике ведущих стран производителей меди на стадии огневого рафинирования распространено использование природного газа как восстановителя. Его доля среди прочих реагентов в настоящее время составляет более 35%. Спецификой работы уральских предприятий является то, что процесс огневого рафинирования осуществляется централизованно. С заводов- производителей на профильное предприятие комбината ОАО «Уралэлектромедь» привозят черновую медь, которую повторно расплавляют и рафинируют в стационарных анодных отражательных печах емкостью 350 т, где на стадии восстановления огневого рафинирования используют дорогостоящий мазут.

Применение в восстановительном периоде огневого рафинирования донной продувки расплава газообразными углеводородами [13, 14] в пузырьковом режиме позволяет значительно повысить степень использования восстановителя [15], в том числе за счет более равномерного распределения реагента в объеме расплава и большей удельной поверхности контакта фаз «восстановитель – расплав». Данный метод в совокупности с

возможностью переноса части объема производства в новый для цветной металлургии агрегат – печь-ковш – на площадку завода-производителя выведет технико-экономические показатели процесса на значительно более качественный уровень.

Реализация процесса сопряжена с определенными трудностями в поддержании заданного уровня температур расплава, выборе оптимального гидрогазодинамического режима донной продувки, оптимизирующего полноту и скорость химических взаимодействий при огневом рафинировании черновой меди. Для решения настоящих проблем был разработан комплекс нестационарных математических моделей, основными из которых являются модель теплового состояния расплава [16], гидродинамическая модель движения (всплытия) газовых пузырей [17], диффузионно-кинетическая модель восстановления оксида меди (I) продуктами неполного сгорания природного газа [13].

Моделирование любого объекта сопряжено с принятием ряда допущений, приближений, аппроксимаций, в той или иной степени влияющих на качество и адекватность получаемых результатов. Среди основных путей совершенствования математических моделей можно выделить не только уточнение за счет учета большего количества влияющих факторов, но и адаптацию элементов принятых математических моделей.

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ РАСПЛАВА
ЧЕРНОВОЙ МЕДИ В ОКИСЛИТЕЛЬНОМ
ПЕРИОДЕ РАФИНИРОВАНИЯ**

При производстве меди на АО «Урал-электромедь» черновую медь выпускают из конвертера с температурой порядка 1300°C, но в процессе разлива и транспортировки температура расплава снижается до 1100–1150°C, и для реализации процесса рафинирования необходимо подвести дополнительную тепловую энергию для достижения заданной температуры расплава. Одновременно с этим в работах [18–20] показано определяющее влияние температурного режима на изменение размера и динамики всплытия газового пузыря [21, 22], что, в свою очередь, воздействует на скорость и глубину химического взаимодействия газа и расплава. В то же время химическое взаимодействие на поверхности контакта «расплав – газовый пузырь» будет продуцировать изменение объема пузыря, а в результате экзо- или эндотермичности химических реакций – оказывать воздействие на тепловой и температурный режимы расплава, что показано в работе [23].

Основное уравнение математической модели [16] теплового режима печи-ковша было дополнено новым членом – уравнением теплопроводности в дифференциальной форме:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \alpha \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} \right) + \frac{q\Sigma}{c \cdot m_{расп}}, \quad (1)$$

где t – температура; x и y – горизонтальная и

вертикальная координаты; τ – время; $\alpha = \lambda / (c \cdot \rho)$ – коэффициент температуропроводности; $m_{расп}$ – масса расплава, $q\Sigma$ – суммарный тепловой поток экзотермических реакций.

Аналитически второе слагаемое в правой части уравнения, описывающее влияние внутренних источников тепла на стадии окисления, имеет следующий вид:

$$\frac{q\Sigma}{c \cdot m_{расп}} = \frac{1}{c \cdot m_{расп} \cdot \tau_{ок}} \times \left(\sum (m_{эле\text{м}} \cdot \Delta H_{эле\text{м}}) \right), \quad (2)$$

где ΔH – удельные тепловые эффекты реакций окисления Cu, Pb, Sb, As, Ni, Fe; $m_{эле\text{м}}$ – расчетные массы окисляемых компонентов; $\tau_{ок}$ – время проведения окислительного периода плавки, принятое равным 1,5 ч.

Величина теплового эффекта реакций изменяется в зависимости от температурных условий, и анализ табличных данных¹ по каждой из химических реакций в отдельности позволил математически описать зависимость ΔH (t). Графическая интерпретация зависимости изменения величины суммарного теплового потока $q\Sigma$ от температуры t представлена на рис. 1.

Полученная зависимость, заданная в виде логистического уравнения $y_1(t)$, позволила учесть нестационарный характер процесса и уточнить математическую модель теплового режима агрегата печь-ковш для огневого рафинирования меди [16]:

$$y_1(t) = \frac{1000}{4,087} \left[18,1751 - 0,00014646426 \cdot t - 1,6071429 \cdot 10^{-7} \cdot t^2 - \frac{0,907189 + 0,001388 \cdot t - 5,178571 \cdot 10^{-7} \cdot t^2}{1 + \left(\frac{t}{1246,8345} \right)^{16882,45132}} \right], \quad Bm / M^3.$$

¹ Outokumpu HSC Chemistry for Windows. Chemical Reaction and Equilibrium Software with Extensive Thermochemical Database [Электронный ресурс]. URL: <http://www.chemistry-software.com/pdf/HSC/full%20manual%20HSC%20Chemistry%205.pdf> (12.11.2020).

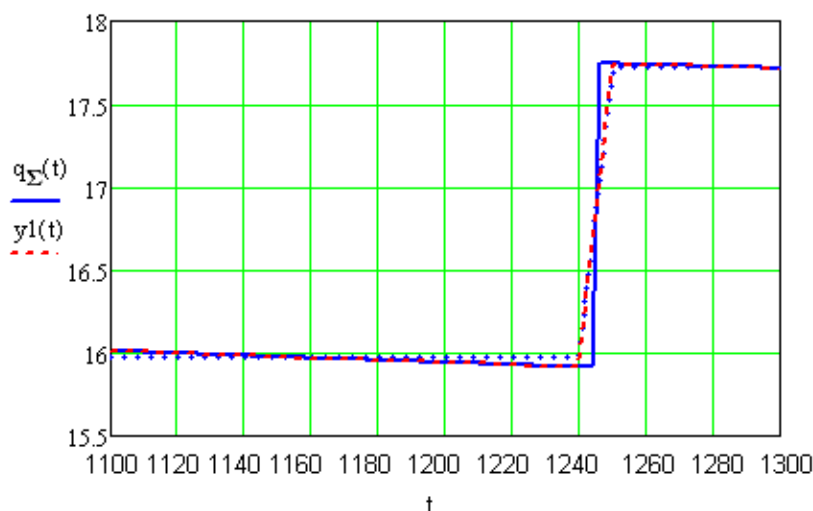


Рис. 1. Изменение величины суммарного теплового потока экзотермических реакций с изменением температуры
Fig. 1. Value of total heat flux of exothermic reactions vs temperature

Численное решение в плоской постановке, найденное с использованием метода конечных элементов, представлено на

рис. 2 в виде изотерм поля температур в сечении ковша.

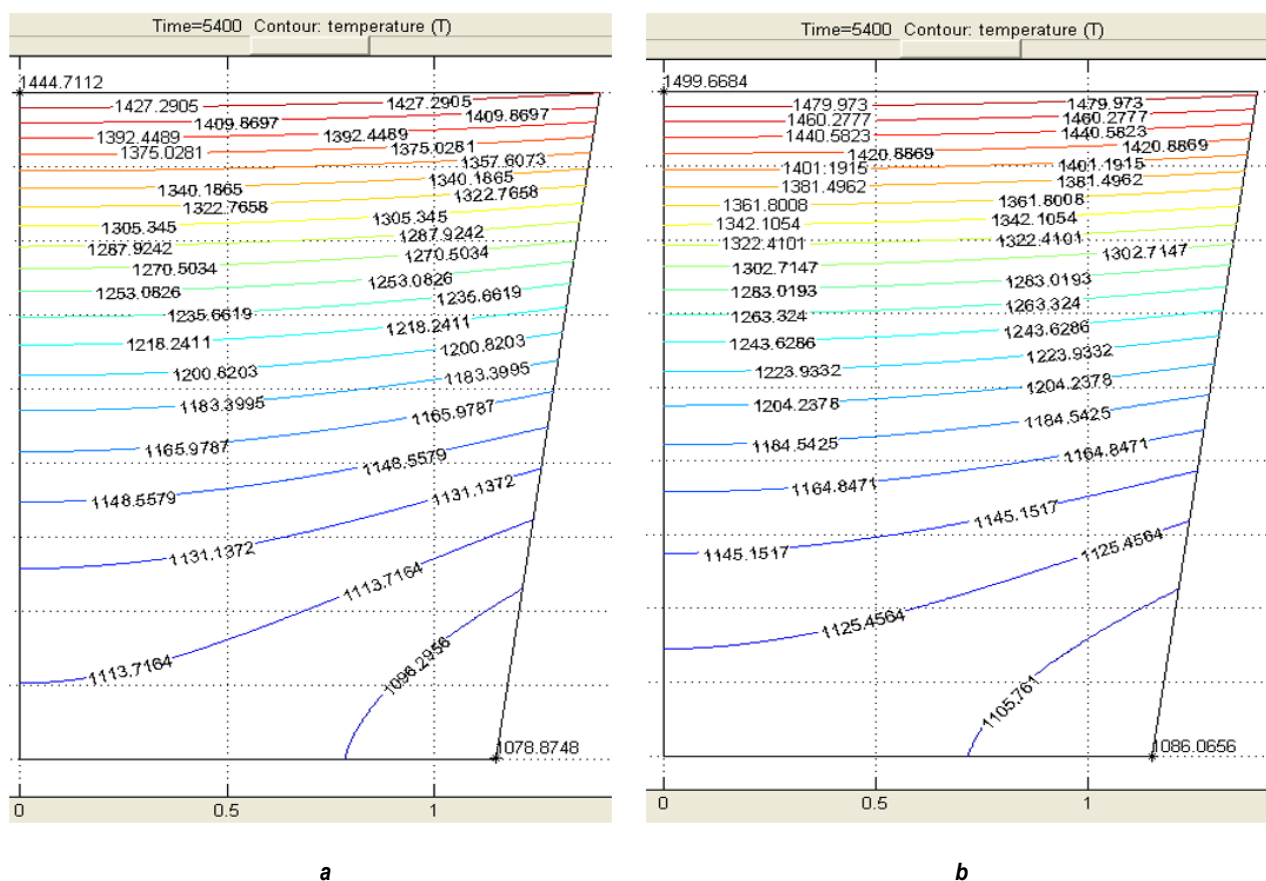


Рис. 2. Расчетное температурное поле расплава при температуре газа под крышкой 1850°C и времени нагрева 90 мин слева (a) – без учета; справа (b) – с учетом экзотермических реакций
Fig. 2. Calculated temperature field of the melt at the gas temperature under the cover of 1850°C and the heating time of 90 min: on the left (a) – ignoring exothermic reactions; on the right (b) – taking into account exothermic reactions

На данном этапе моделирования было принято, что окисляемые примеси равномерно распределены в объеме расплава и выделение тепла происходит непрерывно в течение всего окислительного периода рафинирования. В дальнейшем модель можно уточнить, выделив отдельно реакционную зону, хотя при пузырьковом режиме движения газов эта область будет находиться в большей части объема ванны.

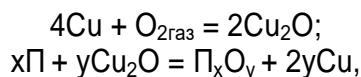
Анализ результатов моделирования с учетом и без учета тепловых эффектов химических реакций окисления показывает, что для температуры газов под крышкой 1850°C, начальной температуры расплава 1100°C, времени, соответствующего длительности нагрева 1,5 ч, уровень среднеинтегральной температуры различается на 24°C, что является весьма значительной величиной в условиях необходимости поддержания температур процесса рафинирования в достаточно узком диапазоне. Максимальная температура для данных условий увеличилась почти на 55°C, минимальная – на 7°C до уровня 1086°C, однако следует учитывать, что данные абсолютные величины получены без учета движения расплава в ковше, происходящего под действием свободной и вынужденной конвекции, и всплытия газовых пузырей.

ТЕПЛОВОЙ БАЛАНС ОКИСЛИТЕЛЬНОЙ СТАДИИ ПРОЦЕССА ОГНЕВОГО РАФИНИРОВАНИЯ МЕДИ В АГРЕГАТЕ ПЕЧЬ-КОВШ

Другим способом провести комплексную оценку теплотехнических характеристик агрегата является составление теплового баланса процесса. На основе материального баланса по известной методике^{2,3} был состав-

лен тепловой баланс процесса огневого рафинирования меди в печи-ковше и представлен в табличной форме. Расчет горения топлива произведен по методике⁴, за основу взят усредненный состав газа, используемого на предприятии, а воздух, подаваемый на горелки, подогревается до 200°C. Продувка ведется смесью кислорода и воздуха в соотношении 40:60. Параметры футеровки и конструкции печи-ковша емкостью 36 т соответствуют параметрам проекта переоборудования⁵ разливочного ковша ОАО «Уралэлектромедь».

На основе табличных данных [13] для внесения в приходную часть теплового баланса статьи «Тепло экзотермических реакций в окислительном периоде рафинирования» (табл. 1) были рассчитаны величины суммарных тепловых эффектов химических реакций окисления основных примесей Pb, Sb, As, Ni, Fe, а также реакции образования оксида меди (I):



где П – металл-примесь.

Тепловой и топливный КПД агрегата составили 17,64% и 19,41%, соответственно, удельный расход условного топлива – 15,29 кг у.т/т меди. Исходя из производительности имеющихся в парке предприятий и предлагаемых к установке горелочных устройств, расчетное время достижения температуры 1300°C – 197 мин (11820 с). Представленные теплотехнические характеристики агрегата можно улучшить за счет дополнительной футеровки ковша, подогрева топлива до 300°C, продувки чистым кислородом (вместо смеси

² Старцев В.А., Воронов Г.В., Лобанов В.И., Шумахер Э.А., Шумахер Э.Э. Скрап-карбюраторный процесс при производстве стали в мартеновских печах: учеб. пособ. Екатеринбург: Изд-во УГТУ-УПИ, 2004. 225 с.

³ Зобнин Б.Ф. Казяев М.Д., Китаев Б.И., Лисиенко В.Г., Телегин А.С., Ярошенко Ю.Г. Теплотехнические расчеты металлургических печей. 2-е изд. М.: Металлургия, 1982. 360 с.

⁴ Гушин С.Н., Зайнуллин Л.А., Казяев М.Д., Юрьев Б.П., Ярошенко Ю.Г. Топливо и расчеты его горения: учеб. пособ. Екатеринбург: ООО «Уральский центр академического обслуживания», 2007. 88 с.

⁵ Разработка математической модели теплового режима печи-ковша для рафинирования меди с использованием природного газа: отчет о НИР / ГОУ ВПО «УГТУ-УПИ»; рук. С.А. Новокрещенов. Екатеринбург, 2009. 72 с. Док. № 0420.

Таблица 1. Тепловой баланс агрегата печь-ковш для огневого рафинирования черновой меди
Table 1. Heat balance of the ladle furnace unit for fire refining of blister copper

| Приходная часть | | | Расходная часть | | |
|---|---------------|---------|--|---------------|---------|
| Статья | Значение, МДж | Доля, % | Статья | Значение, МДж | Доля, % |
| Химическое тепло сгорания топливовоздушной смеси | 16 135,6 | 90,88 | Полезно затраченное тепло (на получение металла) | 3 132,0 | 17,64 |
| Физическое тепло топлива | 15,5 | 0,09 | Потери с отходящими газами | 13 560,3 | 76,37 |
| Физическое тепло воздуха, подаваемого на горелки | 1 222,0 | 6,88 | В том числе дымовые газы | 13 382,5 | 75,37 |
| Физическое тепло дутья | 56,9 | 0,32 | Продукты продувки | 177,8 | 1,00 |
| Тепло экзотермических реакций в окислительном периоде рафинирования | 324,9 | 1,83 | Тепловые потери теплопроводностью | 973,3 | 5,48 |
| – | – | – | В том числе дно ковша | 118,8 | 0,67 |
| | | | Стенки ковша (расплав) | 315,4 | 1,78 |
| | | | Стенки ковша (под крышкой) | 180,4 | 1,02 |
| | | | Крышка ковша | 358,6 | 2,02 |
| | | | Неучтенные потери | 89,4 | 0,50 |
| Итого | 17 755,0 | 100,00 | Итого | 17 755,0 | 100,00 |

кислорода и воздуха). В табл. 2 представлен сопоставительный анализ влияния факторов (1 – температура подогрева воздуха, подаваемого на горелки, 2 – обогащение окислительного дутья кислородом, 3 – футеровка ковша, 4 – состав топлива) на расчетную продолжительность процесса нагрева расплава в

окислительном периоде рафинирования.

Расчетная длительность нагрева расплава определена на основе расходных и приходных статей теплового баланса и лимитирована мощностью горелочных устройств, выраженной фиксированным номинальным расходом топлива 120 м³/ч для всех вариантов.

Таблица 2. Влияние различных факторов на расчетную длительность процесса нагрева расплава с учетом тепловых эффектов экзотермических реакций рафинирования меди

Таблица 2. Effect of various factors on the estimated duration of melt heating taking into account the thermal effects of exothermic reactions of copper refining

| Температура подогрева воздуха, °С (1) | 25 | 100 | 200 | 300 |
|--|-----------------------------|-------------------------------------|-------|-------|
| Расчетное время процесса нагрева, с | 12986 | 12633 | 12080 | 11529 |
| Соотношение воздуха и кислорода в дутье, % (2) | 100:0 | 80:20 | 60:40 | 0:100 |
| Расчетное время процесса нагрева, с | 12986 | 12863 | 12725 | 12219 |
| Вариант футеровки агрегата (3)* | базовый вариант футерования | вариант с дополнительной футеровкой | – | – |
| Расчетное время процесса нагрева, с | 12986 | 12554 | – | – |
| Вид топлива (4) | природный газ | пропан-бутановая смесь | – | – |
| Расчетное время процесса нагрева, с | 12986 | 11446 | – | – |

*Стандартный, не переоборудованный разливочный ковш, расчетное время нагрева – 13605 с.

Анализ данных табл. 2 показывает более значительное сокращение расчетной длительности нагрева за счет применения подогрева подаваемого на горелочные устройства воздуха в сравнении с обогащением донного дутья кислородом, даже несмотря на снижение объема подаваемого «холодного» газа непосредственно в расплав. Считаем целесообразным футерование разливочного ковша, обеспечивающее существенное снижение расчетной длительности нагрева. Опционально приведено значение для нагрева с использованием пропан-бутановой смеси на этапе полигона без подключения к газовым сетям.

При составлении табл. 2 рассмотрено влияние факторов в отдельности относительно базового варианта (температура подаваемого на горелки воздуха 25°C, продувка снизу атмосферным воздухом, ковш футерован, отопление природным газом; значение расчетной длительности процесса нагрева – 12986 с). Представленная балансовая модель позволяет учитывать все эти факторы и в совокупности, например, для температуры подогрева воздуха 300°C, продувки чистым кислородом и дополнительной футеровки печи-ковша расчетная длительность процесса нагрева составит 10717 с. Но следует учесть, что балансовый метод исследования предполагает рассмотрение расплава как гомогенного, однородного по температуре нагреваемого тела, а в условиях реального эксперимента, даже при условии принятия допущения о «неподвижности расплава», время достижения заданной среднеинтегральной температуры ограничено теплопроводностью самого расплава. Поэтому для выбора окончательного режима нагрева необходимо учитывать нестационарный характер процесса нагрева, что и позволяет

реализовать математическая модель температурного поля расплава, представленная выше в настоящей работе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе двух различных математических моделей проведена оценка основных теплотехнических характеристик окислительной стадии процесса, показана принципиальная возможность достижения и поддержания температуры, необходимой для проведения огневого рафинирования меди в агрегате печь-ковш. Представленные математические модели позволяют определить удельное влияние различных технологических параметров (состав и расход топлива, температура и степень обогащения дутья, конструкция футеровки и т.д.) на динамику изменения температурного поля расплава и технико-экономические параметры плавки в целом, а также будут использованы на дальнейших этапах моделирования продувки металлических расплавов газами.

Модели дополнены авторской методикой учета влияния экзотермических реакций рафинирования, позволяющей значительно их уточнить. Составленный тепловой баланс показал достаточно низкий «удельный вес» подводимой в результате протекания основных экзотермических реакций теплоты в расплаве в окислительном периоде плавки в сравнении с количеством тепла, поступающим за весь период плавки из всех источников. Однако если рассматривать в отдельности окислительный период рафинирования меди, показано, что тепловые эффекты реакций окисления значительно влияют на температуру расплава на локальном временном отрезке, находящемся ближе к концу окислительного периода огневого рафинирования черновой меди.

Список литературы

1. Dong Joon Min, Tsukihashi F. Recent advances in understanding physical properties of metallurgical slags // Metals and Materials International. 2017. Vol. 23. Iss. 1. P. 1–19. <https://doi.org/10.1007/s12540-017-6750-5>
2. Sarfo Prince, Young Jamie, Ma Guojun, Young Courtney. Characterization and recovery of valuables from waste copper smelting slag // Advances in Molten Slags, Fluxes, and Salts: Proceedings of the 10th International Conference on Molten Slags, Fluxes and Salts (Berlin, 1st January 2016). Berlin: Springer, Cham, 2016. P. 889–898. https://doi.org/10.1007/978-3-319-48769-4_95
3. Шнеерсон Я.М., Иванова Н.Ф. Применение автоклавных методов для рафинирования труднообогатимых медных полиметаллических концентратов //

Цветные металлы. 2003. № 7. С. 63–67.

4. Davenport W.G., King M.J., Schlesinger M.E., Biswas A.K. Extractive metallurgy of copper. London: Oxford, Pergamon, 2002. 452 p. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.elsevier.com/books/extractive-metallurgy-of-copper/davenport/978-0-08-044029-3> (12.05.2021).

5. Комков А.А., Камкин Р.И. Поведение меди и примесей при продувке медеплавильных шлаков газовой смесью CO–CO₂ // Цветные металлы. 2011. № 6. С. 26–31.

6. Coursol P., Valencia C.N., Mackey V.P., Bell S., Davis B. Minimization of copper losses in copper smelting slag during electric furnace treatment // JOM. 2012. Vol. 64. No. 11. P. 1305–1313. <https://doi.org/10.1007/s11837-012-0454-6>

7. Лукавый С.Л., Федоров А.Н., Хабиев М.П., Хабиев Р.П., Мин М.Г. Исследование динамической вязкости высокомединых шлаковых расплавов // Цветные металлы. 2012. № 2. С. 32–35.

8. Булатов К.В., Жуков В.П. Технологические возможности металлургической переработки промпродуктов обогащения полиметаллических руд и обеднения шлаков медеплавильного производства в агрегате «Победа» // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2020. Т. 24. № 2. С. 421–433. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-2-421-433>

9. Паньшин А.М., Якорнов С.А., Скопов Г.В. Переработка техногенных отходов металлургических предприятий Уральской горно-металлургической компании // Техноген-2019: сб. науч. тр. Екатеринбург: УрО РАН, 2019. С. 29–34.

10. Selivanov E.N., Popov A.I., Selmenskikh N.I., Lebed A.B. Oxide inclusions in copper during its fire refining // Non-ferrous Metals. 2013. No. 2. P. 19–22.

11. Жуков В.П., Холод С.И., Лисиенко В.Г., Лаптева А.В. Возможность оптимизации состава шихты анодной плавки черновой меди методом математического планирования // Цветные металлы. 2017. № 9. С. 35–38. <https://doi.org/10.17580/tsm.2017.09.05>

12. Жмурова В.В., Немчинова Н.В., Васильев А.А. Гидрохимическая очистка от меди и свинца золотосодержащих катодных осадков // Цветные металлы. 2019. № 8. С. 64–74. <https://doi.org/10.17580/tsm.2019.08.07>

13. Жуков В.П., Новокрещенов С.А., Агеев Н.Г. Математическое моделирование кинетики восстановления оксида меди (I) продуктами неполного сгорания природного газа. Сообщение 2 // Известия вузов. Цветная металлургия. 2013. № 3. С. 58–62.

14. Широков А.В., Пискунов И.Н., Миллер О.Г. Исследование кинетики раскисления меди продуктами неполного сгорания природного газа // Цветная металлургия. 1966. № 11. С. 34–37.

15. Вольхин А.И., Елисеев Е.И., Жуков В.П., Смирнов Б.Н. Анодная и катодная медь: физико-химические и технологические основы. Челябинск: Южно-Уральское книжное изд-во, 2001. 431 с.

16. Швыдкий В.С., Новокрещенов С.А., Гольцев В.А., Берняев О.Г. Разработка математической модели теплового режима печи-ковша для проведения процессов огневого рафинирования меди // Творческое наследие Б.И. Китаева: тр. Междунар. науч.-практ. конф. (г. Екатеринбург, 11–14 февраля 2009 г.). Екатеринбург: Изд-во УГТУ-УПИ, 2009. С. 324–328.

17. Новокрещенов С.А., Швыдкий В.С., Жуков В.П., Овчинников Ю.Н., Черемисин Д.Д. Математическое моделирование гидродинамики пузырькового режима при донной продувке печи-ковша. Сообщение III // Известия вузов. Цветная металлургия. 2013. № 5. Р. 58–62. <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2013-5-58-62>

18. Новокрещенов С.А., Швыдкий В.С., Жуков В.П., Черемисин Д.Д. Математическое моделирование теплового режима печи-ковша при пузырьковой продувке расплава газом. Сообщение IV // Известия вузов. Цветная металлургия. 2016. № 1. Р. 72–78. <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2016-1-72-78>

19. Шилиев М.И., Толстых А.В., Деренок А.Н., Хромова Е.М. Моделирование тепломассообмена при формировании пузырей в барботажных аппаратах // Теоретические основы химической технологии. 2003. Т. 37. № 6. С. 575–583.

20. Pis'menov S.A., Povolotskii D.Ya., Ustyugov A.A. Bath hydrodynamics with gas injection in a ladle-furnace unit: physical modeling // Steel in Translation. 2007. Vol. 37. No. 3. P. 189–190. <https://doi.org/10.3103/S0967091207030023>

21. Пиптюк В.П., Поляков В.Ф., Самохвалов С.Е., Исаев О.Б., Павлов С.Н., Травинчев А.А. Изучение теплового состояния ванны установки ковш-печь // Металлург. 2011. № 7. С. 50–53.

22. Драганов Б.Х., Алмаев Р.А. Анализ динамики и теплообмена паровых пузырьков в газожидкостной среде // Энергетика и автоматика. 2014. № 3. С. 21–26.

23. Новокрещенов С.А., Жуков В.П., Черемисин Д.Д., Холод С.И. Математическое описание внутренних источников тепла в процессе огневого рафинирования меди в печи-ковше // Цветные металлы. 2011. № 4. С. 28–30.

References

1. Dong Joon Min, Tsukihashi F. Recent advances in understanding physical properties of metallurgical slags. *Metals and Materials International*. 2017;23(1):1–19. <https://doi.org/10.1007/s12540-017-6750-5>

2. Sarfo Prince, Young Jamie, Ma Guojun, Young Courtney A. Characterization and recovery of valuables from waste copper smelting slag. In: *Advances in Molten Slags, Fluxes, and Salts: Proceedings of the 10th International*

Conference on Molten Slags, Fluxes and Salts. 1st January 2016, Berlin. Berlin: Springer, Cham; 2016, p. 889–898. https://doi.org/10.1007/978-3-319-48769-4_95

3. Schneerson YaM, Ivanova NF. Using pressure oxidation methods for refining refractory polymetallic copper concentrates. *Tsvetnye Metally*. 2003;7:63–67. (In Russ.)

4. Davenport WG, King MJ, Schlesinger ME, Biswas AK. *Extractive metallurgy of copper*. London: Oxford,

Pergamon; 2002. 452 p. Available from: <https://www.elsevier.com/books/extractive-metallurgy-of-copper/davenport/978-0-08-044029-3> [Accessed 12th May 2020].

5. Komkov AA, Kamkin RI. Behaviors of copper and impurity elements during expulsion copper melt slags with CO-CO₂ gas mixture. *Tsvetnye Metally*. 2011;6:26–31. (In Russ.)

6. Coursol P, Valencia CN, Mackey VP, Bell S, Davis B. Minimization of copper losses in copper smelting slag during electric furnace treatment. *JOM*. 2012; 64(11):1305–1313. <https://doi.org/10.1007/s11837-012-0454-6>

7. Lukavy SL, Fedorov AN, Habiev MP, Abiev RP, Min MG. Researching of dynamic viscosity of high-copper slag melts. *Tsvetnye Metally*. 2012; 2:32–35. (In Russ.)

8. Bulatov KV, Zhukov VP. Technological capabilities for metallurgical processing of industrial products in polymetallic ore preparation and copper smelting slag depletion in the Pobeda smelting unit. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2020;24(2):421–433. (In Russ.)

<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-2-421-433>

9. Panchin AM, Jakornov SA, Skopov GV. Processing of technogenic waste of metallurgical enterprises of the Ural mining and metallurgical company. In: *Technogen-2019: Collected scientific works*. Yekaterinburg: Ural branch of the Russian Academy of Sciences; 2019, p. 29–34. (In Russ.)

10. Selivanov EN, Popov AI, Selmenskikh NI, Lebed AB. Oxide inclusions in copper during its fire refining. *Tsvetnye Metally*. 2013;2:19–22. (In Russ.)

11. Zhukov VP, Kholod SI, Lisenko VG, Lapteva AV. The possibility of optimization of composition of anode smelting charge of blister copper by mathematical planning. *Tsvetnye Metally*. 2017;9:35–38. (In Russ.)

12. Zhmurova VV, Nemchinova NV, Vasiliev AA. Removal of copper and lead from gold-bearing cathode deposits by hydrochemical treatment. *Tsvetnye Metally*. 2019;8:67–74. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/tsm.2019.08.07>

13. Zhukov VP, Novokreshchenov SA, Ageyev NG. Mathematical simulation of copper (I) oxide reduction kinetics by the products of incomplete consumption of natural gas. Report 2. *Izvestiya Vuzov. Tsvetnaya Metallurgiya = Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy*. 2013;(3):58–62. (In Russ.) <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2013-3-231-236>

14. Shirokov AV, Piskunov IN, Miller OG. Studying kinetics

of copper deoxidation by the products of natural gas incomplete combustion. *Tsvetnaya metallurgiya = Non-ferrous metallurgy*. 1966;11:34–37. (In Russ.)

15. Vol'hin AI, Eliseev EI, Zhukov VP, Smirnov BN. *Anode and cathode copper: physicochemical and technological fundamentals*. Chelyabinsk: Yuzhno-Ural'skoe knizhnoe izdatel'stvo; 2001, 431 p. (In Russ.)

16. Shvydkij VS, Novokreshchenov SA, Gol'cev VA, Bernyaev OG. Development of a mathematical model of a ladle furnace thermal regime for carrying out fire refining of copper. *Tvorcheskoe nasledie B.I. Kitaeva: trudy Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii = B.I. Kitaev's creative heritage: Proceedings of International scientific and practical conference*. 11–14 February 2009, Ekaterinburg. Ekaterinburg: Ural State Technical University; 2009, p. 324–328. (In Russ.)

17. Novokreshchyonov SA, Shvydky VS, Zhukov VP, Ovchinnikov YuN, Cheremisin DD. Mathematical modeling of bubble mode modeling in case of bottom blowing-through of ladle-furnace. Report III. *Izvestiya Vuzov. Tsvetnaya Metallurgiya = Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy*. 2013;(5):58–62. (In Russ.)

<https://doi.org/10.17073/0021-3438-2013-5-58-62>

18. Novokreshchenov SA, Shvydkii VS, Zhukov VP, Cheremisin DD. Mathematical modeling of ladle furnace thermal conditions during gas-bubble melt blowing. Report IV. *Izvestiya Vuzov. Tsvetnaya Metallurgiya = Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy*. 2016;(1):72–78. (In Russ.) <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2016-1-72-78>

19. Shilyaev MI, Tolstykh AV, Derenok AN, Khromova EM. Modeling of heat and mass transfer during bubble formation in bubblers. *Teoreticheskie osnovy himicheskoy tekhnologii = Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. 2003;37(6):539–546. (In Russ.)

20. Pis'menov SA, Povolotskii DY, Ustyugov AA. Bath hydrodynamics with gas injection in a ladle-furnace unit: physical modeling. *Steel in Translation*. 2007;37(3):189–190. <https://doi.org/10.3103/S0967091207030023>

21. Pipyuk VP, Polyakov VF, Samokhvalov SE, Isaev OB, Pavlov SN, Travinchey AA. Investigation of metal bath thermal state for a ladle-furnace plant. *Metallurg*. 2011;7:50–53. (In Russ.)

22. Draganov BH, Almaev RA. Analysis of dynamics and of heat exchange vapor bubble in gas-liquid environments. *Energetika i avtomatika*. 2014;3:21–26.

23. Novokreshchenov SA, Zhukov VP, Cheremisin DD, Kholod SI. Mathematical description of internal thermal source in process of fire refining of copper in ladle furnace. *Tsvetnye Metally*. 2011;4:28–30. (In Russ.)

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Черемисин Дмитрий Дмитриевич,

кандидат технических наук,

инженер,

АО «Уралэнергочермет»,

620137, г. Екатеринбург, ул. Александровская, 3/А,

Россия;

✉ e-mail: e1.ry@e1.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Dmitry D. Cheremisin,

Cand. Sci. (Eng.),

Engineer,

Uralenergochermet JSC,

3/A, Aleksandrovskaya St., Yekaterinburg 620137,

Russia;

✉ e-mail: e1.ry@e1.ru

Новокрещенов Сергей Александрович,
кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры экономики и управления
на металлургических и машиностроительных
предприятиях,
Уральский Федеральный университет им. первого
Президента России Б.Н. Ельцина,
620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, Россия;
e-mail: novokreschenov@e1.ru

Швыдкий Владимир Серафимович,
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры теплофизики и
информатики в металлургии,
Уральский Федеральный университет им.
первого Президента России Б.Н. Ельцина,
620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, Россия;
e-mail: vshvit_1@isnet.ru

Жуков Владимир Петрович,
доктор технических наук, профессор,
ведущий научный сотрудник,
АО «Уралмеханобр»,
620144, г. Екатеринбург, ул. Хохрякова, 87, Россия;
e-mail: zhukov.v.p@mail.ru

Заявленный вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 25.12.2020; одобрена после рецензирования 15.04.2021; принята к публикации 19.08.2021.

Sergey A. Novokreschenov,
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Economy
and Management at Metallurgical and Machine-Building
Enterprises,
Ural Federal University named after the first
President of Russia B.N. Yeltsin,
19, Mira St., Yekaterinburg 620002, Russia;
e-mail: novokreschenov@e1.ru

Vladimir S. Shvydkiy,
Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Professor of the Department of Thermal Physics
and Information Science in Metallurgy,
Ural Federal University named after the first
President of Russia B.N. Yeltsin,
19, Mira St., Yekaterinburg 620002, Russia;
e-mail: vshvit_1@isnet.ru

Vladimir P. Zhukov,
Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Leading Researcher,
Uralmekhanobr JSC,
87, Khokhryakov St., Yekaterinburg 620144, Russia;
e-mail: zhukov.v.p@mail.ru

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

Information about the article

The article was submitted 25.12.2020; approved after reviewing 15.04.2021; accepted for publication 19.08.2021.