

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Коваленко Вадим Леонідович – кандидат технічних наук, доцент 1) кафедра аналітичної хімії та хімічної технології харчових добавок і косметичних засобів, ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет», пр. Гагаріна, 8, м. Дніпро, Україна, 49005

2) Кафедра технології неорганічних речовин та технологій електрохімічних виробництв, ФГБОУ ВО Вятський державний університетвул. Московська, 36, м. Кіров, Російська Федерація, 610000.

Коваленко Вадим Леонідович – Кандидат технических наук, доцент, 1) Кафедра аналитической химии и химической технологии пищевых добавок и косметических средств, ГВУЗ «Украинский государственный химико-технологический университет», просп. Гагарина, 8, г. Днепр, Украина, 49008; 2) Кафедра технологии неорганических веществ и электрохимических производств, ФГБОУ «Вятский государственный университет», ул. Московская, 36, г. Киров, Российская Федерация, 610000; E-mail: vadimchem@gmail.com

Коток Валерій Анатолійович – кандидат технічних наук, доцент: 1) Кафедра процесів і апаратів, та загальної хімічної технології, ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет», пр. Гагаріна, 8, м. Дніпро, Україна, 49005, 2) Кафедра технології неорганічних речовин та технологій електрохімічних виробництв, ФГБОУ ВО Вятський державний університет, вул. Московська, 36, м. Кіров, Російська Федерація, 610000, E-mail: valeriykotok@gmail.com

Коток Валерій Анатолійович – Кандидат технических наук, доцент, 1) процессов и аппаратов, и общей химической технологии, ГВУЗ «Украинский государственный химико-технологический университет», просп. Гагарина, 8, г. Днепр, Украина, 49008; 2) Кафедра технологии неорганических веществ и электрохимических производств, ФГБОУ «Вятский государственный университет», ул. Московская, 36, г. Киров, Российская Федерация, 610000, тел. +38050-602-11-15, E-mail: valeriykotok@gmail.com

Kovalenko Vadym – PhD, associate professor; 1) The Department of Analytical Chemistry and Food Additives and Cosmetics SHEI [Ukrainian State University of Chemical Technology](http://www.ukchemtech.edu), Gagarina ave, 8, Dnipro, Ukraine, 49005

2) The Department of Technologies of Inorganic Substances and Electrochemical Manufacturing, FSBEI HE Vyatka State University, Moskovskaya str., 36, Kirov city, Russian Federation 610000, E-mail: vadimchem@gmail.com

Kotok Valerii – PhD, associate professor; 1) The Department of Processes, Apparatus and General Chemical Technology, SHEI [Ukrainian State University of Chemical Technology](http://www.ukchemtech.edu), Gagarina ave, 8, Dnipro city, Ukraine, 49005; 2) The Department of Technologies of Inorganic Substances and Electrochemical Manufacturing, FSBEI HE Vyatka State University, Moskovskaya str., 36, Kirov city, Russian Federation 610000, E-mail: valeriykotok@gmail.com

УДК 662.614.2:661.975:669.18

И. Г. ЯКОВЛЕВА, А. А. ПЕТРИК

К ВОПРОСУ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ГАЗОВ В ВАННЕ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОГО АГРЕГАТА

Рассматривается аналитическая модель горения монооксида углерода в агрегате, позволяет анализировать зависимость концентрации газов от конструктивных параметров фурмы и дутьевого режима плавки. При этом в расчете рассматривается трехкомпонентная среда, состоящая из кислорода моно- и диоксида углерода. Результаты работы могут быть использованы при определении рациональных конструкций дутьевых устройств и технологических параметров продувки ванны сталеплавильного агрегата с учетом распределения концентраций газов, что позволит вплотную подойти к вопросу разработки энергосберегающих режимов выплавки стали.

Ключевые слова: трехкомпонентная среда, модель, энергосберегающий режим, дутьевое устройство, концентрация газов, монооксид углерода, газовый поток, реакционная зона, факел, сталеплавильный агрегат.

Розглядається аналітична модель горіння монооксиду вуглецю в агрегаті, яка дозволяє аналізувати залежність концентрації газів від конструктивних параметрів фурми і дутьєвого режиму плавки. При цьому в розрахунок розглядається трикомпонентне середовище, що складається з кисню моно- і діоксиду вуглецю. Результати роботи можуть бути використані при визначенні раціональних конструкцій дуттєвих пристроїв і технологічних параметрів продувки ванни сталеплавильного агрегату з урахуванням розподілу концентрацій газів, що дозволить підійти до питання розробки енергозберігаючих режимів виплавки стали.

Ключові слова: трикомпонентне середовище, модель, енергозберігаючий режим, дуттєвий пристрій, концентрація газів, монооксид вуглецю, газовий потік, реакційна зона, факел, сталеплавильний агрегат.

In the article is shows the burning of carbon monoxide in the steelmaking unit, which allow to analyze the dependence of the gas concentration on the design parameters of the lance and the blowing mode of melting. The result of the work is the calculation of the volume fraction of gases in the working space of the steelmaking unit, namely O₂, CO, CO₂ for various designs of blowing devices. As a scientific novelty, the existing technique has been improved and the possibility of analyzing the flow of gases (O₂, CO, CO₂) in the unit. It allows studying the influence of the structural features of the lance (height, nozzle angle, diameters of the nozzles of the lance) and the process parameters of purging (pressure, oxygen flow and speed) on the distribution of gas concentrations.

Practical significance lies in the possibility of using the results of the work to determine the rational design of blowing devices, which will allow us to the issue of developing energy-saving steelmaking modes.

Keywords: three-component medium, model, energy-saving modes, blowing device, gas concentration, carbon monoxide, gas stream, reaction zone, torch, steelmaking unit.

© И. Г. Яковлева, А. А. Петрик. 2017

Введение. В соответствии с представлениями [1], в струях, истекающих из сопел фурмы, можно выделить следующие зоны: сверхзвуковую, переходную и свободной струи.

Процесс горения СО в струе относится к типу диффузионного горения [2], так как смешение СО и О₂ происходит по цепному механизму с участием активных центров. В данной постановке при изучении процесса горения проведение прямых опытных экспериментов чрезвычайно затруднено, поэтому необходимую для практических целей информацию можно получить при проведении численного моделирования [3, 4].

Анализ литературных данных и постановка проблемы моделирования продувки ванны сталеплавильного агрегата. В трудах [5–8] авторами рассмотрен механизм и приведена визуализация гидродинамических процессов с нанесением изолиний концентраций образования оксида углерода для конвертера при условии подачи кислорода через 4-х сопловую фурму, при изменении углов наклона сопел от 0 до 25°. При этом учет и распределение других газовых элементов, участвующих в реакции при взаимодействии О₂ с расплавом не учитывается.

Цель и задачи исследования. Целью исследования является определение влияния конструктивных особенностей дутьевого устройства и технологических параметров продувки на распределение концентраций газов.

Задачей исследования является расчет концентрации газов при различных конструктивных параметрах дутьевого устройства.

Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

1. Усовершенствовать математическую модель распределения концентраций газов при продувке расплава сталеплавильного агрегата кислородом.

2. Определить объемные доли газов в рабочем пространстве сталеплавильного агрегата, а именно О₂, СО, СО₂ для различных конструкций дутьевых устройств.

Материалы и методы исследования определения концентрации газов в ванне сталеплавильного агрегата. Поток газов в рабочем пространстве сталеплавильного агрегата образует сложную пространственную структуру турбулентных вихревых течений, крайне сложную для теоретического анализа. В связи с этим при выполнении численного моделирования использовали следующие предположения и допущения:

1. Кислородная фурма находится по оси симметрии объема.

2. Контакт газа с металлической ванной происходит по горизонтальной поверхности.

3. В модели используется осевая симметрия потока.

4. Течение стационарно в макроскопическом масштабе времени, а пульсационные скорости подчиняются гипотезе Прандтля.

5. В любой точке рабочего объема агрегата присутствуют только кислород, СО и СО₂ в концентрациях, определяемых динамикой течения.

6. Поток кислорода, вдуваемого в агрегат, полностью поглощается ванной, из которой выделяется газовая смесь СО и СО₂.

Условия:

1. На цилиндрической границе, действует условие непротекания.

2. На поверхности раздела сред и атмосферы действуют граничные условия свободного потока (непрерывность скоростей и давлений).

Для определения поля средних и пульсационных скоростей в объеме агрегата в качестве исходных использовали дифференциальные уравнения Эйлера в дивергентном виде [9]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \bar{w}) = 0, \quad \frac{\partial \rho u}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho u \bar{w}) + \frac{\partial p}{\partial z} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho v}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho v \bar{w}) + \frac{\partial p}{\partial r} = 0, \quad \frac{\partial \rho E}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho E \bar{w}) + \operatorname{div}(\rho \bar{w}) = 0, \quad (2)$$

где r и z - цилиндрические координаты, ρ - плотность, p - давление, u , v - составляющие вектора скорости \bar{w} вдоль осей z и r .

Для замыкания системы (1, 2) использовали уравнение состояния в виде:

$$p = p(\rho, J), \quad (3)$$

где $J = E - w^2 / 2$ - удельная внутренняя энергия.

При замене размерных величин нормированными (w нормируется из скорости звука в невозмущенном потоке a_∞ , плотность ρ на ρ_∞ - плотность невозмущенного потока, координаты z и r - на радиус R цилиндра, время t - на $(\frac{R}{a_\infty})$ получим:

$$w_\infty = M_\infty, \rho_\infty = 1, \quad (4)$$

$$\rho_\infty = \frac{1}{\gamma}, J_\infty = \frac{J}{[\gamma^*(\gamma-1)]}, \quad (5)$$

где M - число Маха; $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$ - отношение теплоемкостей при постоянном давлении и постоянном объеме.

Уравнения (4), (5) будем решать с помощью разностной схемы методом установления [10]. Для этого введем следующие начальные условия: $w_0 = 0$, плотность и давление газа в агрегате задаются, при этом примем следующую конкретизацию уравнения состояния (5):

$$J_0 = \left(\frac{p_0}{p_\infty}\right) * \left(\frac{\rho_\infty}{\rho}\right) * J_\infty. \quad (6)$$

В дальнейшем алгоритм решения строится на расщеплении по физическим процессам [10], причем каждый шаг решения состоит из трех этапов: 1. Эйле-

ров этап. Учитываются эффекты ускорения газа лишь за счет давления. 2. Лагранжев этап. Учитываются потоки массы через границы ячеек расчетной сетки. 3. Вычисление окончательных значений параметров потока на основе законов сохранения массы, импульса и энергии для каждой ячейки, и всей системы в целом на фиксированной расчетной сетке.

Сходимость проверяли по критериям невязки массы втекающего и вытекающего газа, а также максимального изменения скорости по сравнению с предыдущим приближением. Итерации заканчиваются при одновременном выполнении обоих критериев.

$$\tilde{E}_{i,j}^n = E_{i,j}^n - \left[\frac{j \cdot p_{i,j+\frac{1}{2}}^n \cdot v_{i,j+\frac{1}{2}}^n - (j-1) p_{i,j-\frac{1}{2}}^n \cdot v_{i,j-\frac{1}{2}}^n + \frac{p_{i+\frac{1}{2},j}^n - p_{i-\frac{1}{2},j}^n}{\Delta z} \cdot u_{i+\frac{1}{2},j}^n}{\left(j - \frac{1}{2}\right) \cdot \Delta r} \right] \cdot \frac{\Delta t}{\rho_{i,j}^n}; \quad (9)$$

для второго этапа

$$\Delta m_{i+\frac{1}{2},j}^n = \begin{cases} (j^{-1/2}) \cdot \rho_{i,j}^n \cdot \frac{\tilde{u}_{i,j}^n + \tilde{u}_{i+1,j}^n}{2} \cdot \Delta r^2; \\ \Delta t > 0, \tilde{u}_{i,j}^n + \tilde{u}_{i+1,j}^n > 0; \\ (j^{-1/2}) \cdot \rho_{i+1,j}^n \cdot \frac{\tilde{u}_{i+1,j}^n}{2} \cdot \Delta r^2; \Delta t < 0, \tilde{u}_{i,j}^n + \tilde{u}_{i+1,j}^n < 0; \end{cases} \quad (10)$$

для третьего этапа

$$\rho_{i,j}^{n+1} = \rho_{i,j}^n + \frac{1}{\left(j - \frac{1}{2}\right) \cdot \Delta r^2 \cdot \Delta z} \cdot \left[\Delta m_{i-\frac{1}{2},j}^n - \Delta m_{i+\frac{1}{2},j}^n + \Delta m_{i,j-\frac{1}{2}}^n - \Delta m_{i,j+\frac{1}{2}}^n \right]; \quad (11)$$

$$X_{i,j}^{n+1} = \left\{ D_{i,j}^1 \cdot \tilde{X}_{i-1,j}^n \cdot \Delta m_{i-\frac{1}{2},j}^n + D_{i,j}^2 \cdot \tilde{X}_{i,j-1}^n \cdot \Delta m_{i,j-\frac{1}{2}}^n - D_{i,j}^3 \cdot \tilde{X}_{i+1,j}^n \cdot \Delta m_{i+\frac{1}{2},j}^n - D_{i,j}^4 \cdot \tilde{X}_{i,j+1}^n \cdot \Delta m_{i,j+\frac{1}{2}}^n + \tilde{X}_{i,j}^n \cdot \left[\left(j - \frac{1}{2}\right) \cdot \Delta r^2 \cdot \Delta z \cdot \rho_{i,j}^n + (1 - D_{i,j}^1) \cdot \Delta m_{i-\frac{1}{2},j}^n + (1 - D_{i,j}^2) \cdot \Delta m_{i,j-\frac{1}{2}}^n - (1 - D_{i,j}^3) \cdot \Delta m_{i+\frac{1}{2},j}^n - (1 - D_{i,j}^4) \cdot \Delta m_{i,j+\frac{1}{2}}^n \right] \right\} // \left[\left(j - \frac{1}{2}\right) \cdot \Delta r^2 \cdot \Delta z \cdot \rho_{i,j}^{n+1} \right], \quad (12)$$

здесь Δm – изменение массы ячейки; X – одна из величин (u, v, E),

$$D_{i,j}^k = \begin{cases} 1, \text{поток втекает в прямоугольник } (i, j) \text{ со стороны } k \\ 0, \text{поток вытекает из прямоугольника } (i, j) \text{ со стороны } k \end{cases} \quad (13)$$

В данных условиях для трехкомпонентной среды, состоящем из кислорода моно- и диоксида углерода, необходимо учитывать все три составляющие втекающей и вытекающей из ячейки массы. С этой целью введем в рассмотрение объемные (молярные) доли каждого из газов. Тогда на эйлеровом этапе парциальное давление определится:

$$p_{i,j}^\alpha = \rho_{i,j}^\alpha \cdot (\gamma_\alpha - 1) \cdot \left(E_{i,j}^\alpha - \frac{1}{2} \cdot W_{i,j}^2 \right), \quad (14)$$

здесь α – обобщенное обозначение одного из трех газов.

Расчет течения газов в сталеплавильном агрегате проводили по указанной методике на сетке, содержащей 37 узлов в осевом и 15 узлов в радиальном направлении в соответствии с расчетной областью. Расчет выполнялся в пакете программ на языке C++.

Разностная аппроксимация дифференциальных уравнений (1, 2) приводит к следующим расчетным формулам:

для первого этапа

$$\tilde{u}_{i,j}^n = u_{i,j}^n - \frac{p_{i+\frac{1}{2},j}^n - p_{i-\frac{1}{2},j}^n}{\Delta z} \cdot \frac{\Delta t}{\rho_{i,j}^n}; \quad (7)$$

$$\tilde{v}_{i,j}^n = v_{i,j}^n - \frac{p_{i,j+\frac{1}{2}}^n - p_{i,j-\frac{1}{2}}^n}{\Delta r} \cdot \frac{\Delta t}{\rho_{i,j}^n}; \quad (8)$$

Итерации продолжались до одновременного достижения относительной невязки втекающей и вытекающей массы не более 10^{-6} и изменения средних скоростей за одну итерацию на величину не более 1 %.

На рис. 1 (А, Б, В) - 2 (А, Б, В) приведены варианты расчета течения газов: на рис. 1 (А, Б, В) – продувка ванны агрегата через 6-ти сопловую фурму с углом наклона сопел 30° ; на рис. 2 (А, Б, В) – через экспериментальную фурму (комбинированное расположение углов наклона сопел): т. 1, 23 – нижняя и верхняя границы контакта газа с металлом. Сравнивая результаты, можно отметить, что при опытной конструкции фурмы проникновение молекул кислорода в расплав значительно выше, что приводит к интенсификации процесса выделения СО. Объемная доля каждого из газов однозначно определяется, если известна объемная доля кислорода.

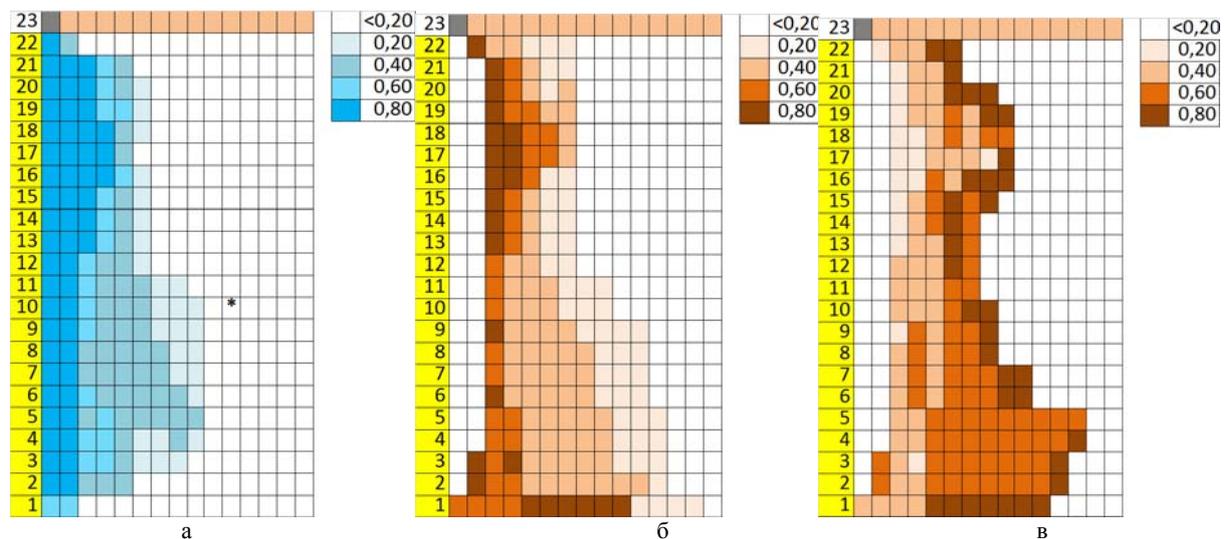


Рис. 1 – Объемная концентрация газов в рабочем пространстве конвертера для базового варианта конструкции фурмы: а – O_2 ; б – CO ; в – CO_2

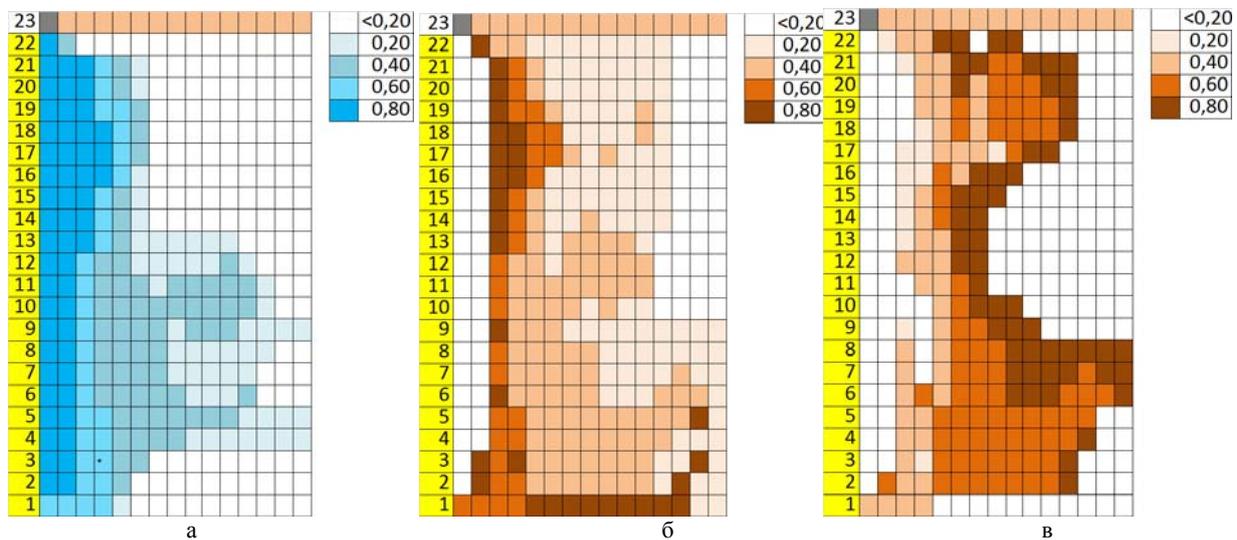


Рис. 2 – Объемная концентрация газов в рабочем пространстве конвертера для опытного варианта конструкции фурмы: а – O_2 ; б – CO ; в – CO_2

Выводы

1. Предложенная математическая модель позволяет анализировать зависимость концентрации газов (O_2 , CO , CO_2) от конструктивных параметров фурмы и дутьевого режима плавки.

2. Полученные результаты работы позволяют исследовать влияние конструктивных особенностей фурмы на распределение концентраций газов, что позволит вплотную подойти к вопросу определения рациональной конструкции дутьевого устройства, обеспечивающего наибольшее тепловыделение.

Список литературы:

1. Протопопов, Е. В. О повышении эффективности дожигаания отходящих газов в полости конвертера [Текст] / Е. В. Протопопов, А. Г. Чернятевич, Е. Л. Мастероженко, С. В. Юдин // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 1999. – № 3 – С. 30–35.
2. Охотский, В. Б. Физико-химическая механика сталеплавильных процессов [Текст] / В. Б. Охотский. – М.: Металлургия, 1993. – 151 с.
3. Айзатулов, Р. С. Теоретические основы сталеплавильных процессов [Текст] / Р. С. Айзатулов, Е. В. Протопопов, П. С. Харлашин, Л. Ю. Назюта. – М.: МИСиС, 2002. – 320 с.
4. Крикент, И. В. Численное исследование гидродинамики расплава в установке ковш-печь постоянного тока [Текст] / И. В. Крикент, С. Е. Самохвалов, Д. Ю. Кабаков, И. В. Кривцун, В. Ф. Демченко, В. П. Питюк, С. В. Греков // Современная электрометаллургия. – 2014. – № 3. – С. 45–49.
5. Самохвалов, С. Е. Квazitрехмерная математическая модель гидродинамических процессов в полости конвертера [Текст] / С. Е. Самохвалов, А. Н. Сокол // Математическое моделирование. – 2008. – № 19. – С. 67–70.
6. Сокол, А. Н. Математическое моделирование гидродинамических процессов в полости конвертера во время верхней продувки в трехмерной постановке [Текст] / А. Н. Сокол // Вестник ХНТУ. – 2010. – № 39. – С. 448–454.
7. Сокол, А. Н. Сопряженная трехмерная математическая модель гидродинамических и массопереносных процессов в шлаковой и металлических фазах металлургического конвертера [Текст] / А. Н. Сокол // Математическое моделирование. – 2012. – № 27. – С. 101–104.
8. Сокол, А. Н. Математическое моделирование гидродинамических и массопереносных процессов в полости конвертера с учетом наличия лома [Текст] / А. Н. Сокол // Математическое моделирование. – 2013. – № 29. – С. 54–57.
9. Митрофанова, О. В. Гидродинамика и теплообмен закрученных потоков в каналах ядерно-энергетических установок [Текст] / О. В. Митрофанова. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. – 288 с.

10. Огурцов, А. П. Методи розщеплення в задачах гідродинаміки і тепломасопереносу [Текст] / А. П. Огурцов, С. Є. Самохвалов, Т. Ж. Надригайло. – Дніпропетровськ: Системні технології, 2003. – 260 с.
- Bibliography (transliterated):**
1. Protopopov, E. V., Chernyatevich, A. G., Masterovenko, E. L., Yudin, S. V. (1999). On increasing the efficiency of afterburning of waste gases in the converter cavity. *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Chernaja metallurgija*, 3, 30–35.
 2. Okhotsky, V. B. (1993). *Physico-chemical mechanics of steel-smelting processes*. Moscow: Metallurgy, 151.
 3. Aizatulov, R. S., Protopopov, E. V., Kharlashin, P. S. Nazjuta L. Ju. (2002). *The theoretical foundations of steelmaking processes*. Moscow: MISiS, 320.
 4. Krikent, I. V., Samokhvalov, S. E., Kabakov, D. Ju., Krivcun, I. V., Demchenko, V. F., Pipjuk, V. P., Grekov, S. V. (2014). Numerical study of melt hydrodynamics in the installation of a ladle-furnace of direct current. *Modern electrometallurgy*, 3, 45–49.
 5. Samokhvalov, S., Sokol, A. (2008). Quasi-three-dimensional mathematical model of hydrodynamic processes in the converter cavity. *Mathematical modeling*, 19, 67–70.
 6. Sokol, A. (2010). Mathematical modeling of hydrodynamic processes in the cavity of the converter during the upper purge in a three-dimensional setting. *Messenger of the KhNTU*, 39, 448–454.
 7. Sokol, A. (2012). Conjugated three-dimensional mathematical model of hydrodynamic and mass transfer processes in slag and metallic phases of metallurgical converter. *Mathematical modeling*, 27, 101–104.
 8. Sokol, A. (2013). Mathematical modeling of hydrodynamic and mass transfer processes in the cavity of the converter taking into account the presence of scrap. *Mathematical modeling*, 29, 54–57.
 9. Mitrofanova, O. (2010). *Gidrodinamika i teploobmen zakruchennyh potokov v kanalah jaderno-jenergeticheskikh ustanovok*. Moscow: FIZMATLIT, 288.
 10. Ogurtsov, A., Samokhvalov, S., Nadrigajlo, T. (2003). *Splitting methods in problems in problems of hydrodynamics and heat transfer*. Dnipropetrovsk: system technologies, 260.

Поступила (received) 24.04.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

До питання визначення концентрації газів у ванні сталеплавильних агрегатів / І. Г. Яковлєва, О. А. Петрик // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 16(1238). – С. 94–98. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

К вопросу определения концентрации газов в ванной сталеплавильных агрегатов / И. Г. Яковлева, А. А. Петрик // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 16(1238). – С.94–98. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

To the question of determining the concentration of gases in the bath of steel-smelting unit / I. Jakovleva, A. Petrik // Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2017. – № 16 (1238). – P. 94–98. – Bibliogr.: 10. – ISSN 2079-5459

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Яковлева Ірина Геннадіївна – доктор технічних наук, професор, Запорізька державна інженерна академія, кафедра "Теплоенергетики"; Пр. Соборний 226, м. Запоріжжя, Україна, 69007; e-mail: yakovleva@zgia.zp.ua.

Петрик Олексій Анатолійович – аспірант, Запорізька державна інженерна академія, кафедра "Теплоенергетики"; Пр. Соборний 226, м. Запоріжжя, Україна, 69007; e-mail: iternell17@mail.ru.

Яковлева Ірина Геннадіївна – доктор технических наук, профессор, Запорожская государственная инженерная академия, Кафедра «Теплоэнергетики», Пр. Соборный 226, г. Запорожье, Украина, 69007; e-mail: yakovleva@zgia.zp.ua.

Петрик Алексей Анатольевич – аспирант, Запорожская государственная инженерная академия, Кафедра «Теплоэнергетики»; Пр. Соборный 226, г. Запорожье, Украина, 69007; e-mail: iternell17@mail.ru.

Jakovleva Irina – doctor of technical sciences, Professor, Zaporozhye State Engineering Academy; Department of Power Engineering,; Sobornyy 226, Zaporozhye, Ukraine, 69006; e-mail: iternell17@mail.ru.

Petrik Aleksey – post-graduate student, Zaporozhye State Engineering Academy, Department of Power Engineering,; Sobornyy 226, Zaporozhye, Ukraine, 69006; e-mail: yakovleva@zgia.zp.ua.