

УДК 669.162.263

К МАТЕМАТИЧЕСКОМУ МОДЕЛИРОВАНИЮ СЛОЕВЫХ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПЕЧЕЙ И АГРЕГАТОВ. СООБЩЕНИЕ 1*

Швыдкий В.С., д.т.н., профессор кафедры «Теплофизика и информатика в металлургии»

Фатхутдинов А.Р., аспирант кафедры «Теплофизика и информатика в металлургии»

*Девярых Е.А., аспирант кафедры «Теплофизика и информатика
в металлургии» (evgeny.9h@gmail.com)*

Девярых Т.О., аспирант кафедры «Теплофизика и информатика в металлургии»

*Спирин Н.А., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Теплофизика
и информатика в металлургии»*

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина
(620002, Россия, Екатеринбург, ул. Мира, 19)

Аннотация. Выполнена постановка задачи разработки математических моделей газодинамики и стационарного теплообмена в шахтных слоевых печах, в которых газовый поток перемещается в сложной системе искривленных каналов переменной кривизны и площади поперечного сечения. Проблема разработки комплексных математических моделей слоевых металлургических печей и агрегатов состоит в том, чтобы получить уравнения течения газа в движущемся слое, связывающие среднюю скорость в межкусковом пространстве (истинную скорость), его действительное давление и температуру, так как именно от этих величин зависит интенсивность протекания физико-химических превращений. Решение этой проблемы выполнено с использованием параллели между течением газа в слое и движением гипотетической жидкости, занимающей весь объем аппарата, включая и объем кусковых материалов.

Ключевые слова: слоевой процесс, теплообмен, порозность слоя, вихревое течение, математическое описание, эквивалентные характеристики.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-9-634-638

Одной из главных проблем развития теории слоевых металлургических процессов является обеспечение максимального использования объема агрегатов, теплового и восстановительного потенциалов газов и, в конечном счете, достижение максимальной производительности печей и минимального расхода топлива.

С точки зрения этой проблемы исключительно большое значение имеет математическое описание физико-механических, тепловых и химических процессов, протекающих в слоевых металлургических печах и агрегатах, создание математических моделей агрегатов различного назначения.

Проблема разработки комплексных математических моделей слоевых металлургических печей и агрегатов состоит в том, чтобы получить уравнения течения газа в движущемся слое, связывающие среднюю скорость в межкусковом пространстве (истинную скорость), его действительное давление и температуру, так как именно от этих величин зависит интенсивность протекания физико-химических превращений. При этом должны выполняться законы сохранения массы, количества движения и энергии. По-видимому, решение этой проблемы должно быть основано на до-

стижениях современной теории сплошной среды [1] с использованием параллели между течением газа в слое и движением гипотетической жидкости, занимающей весь объем аппарата, включая и объем кусковых материалов. Последовательное удовлетворение требования равенства динамических свойств этой жидкости локальным усредненным параметрам действительной неоднородной среды (совокупность кусковых материалов и газов) позволяет свести сложную проблему движения газов в слое переменной структуры к относительно простой задаче движения однородной жидкости, преодолевающей, однако, некоторое добавочное сопротивление.

Подробный вывод всех уравнений газомеханики слоя в данном подходе приведен в работах [2 – 5], поэтому здесь ограничимся лишь иллюстрацией реализации аналогии течения газа в реальном слое и гипотетической однородной жидкости на примере уравнения неразрывности. Остальные уравнения приведем без вывода.

Итак, пусть шахтная печь произвольного профиля заполнена кусковым материалом с порозностью ϵ и просветностью $\epsilon_{\text{п}}$. В общем случае ϵ и $\epsilon_{\text{п}}$ являются функциями формы загруженных кусков и координат. Снизу в слой через фурмы или иным образом вдувается газ. Теплофизические свойства среды являются функ-

* Работа выполнена при финансовой поддержке, постановление № 211 Правительства РФ, контракт № 02.А03.21.0006.

циями давления, температуры и координат. Газ отдает теплоту материалу, может вступать с ним в химическое взаимодействие. Требуется найти распределение скоростей, давлений, температур и концентраций компонентов газа по высоте и сечению печи.

Выделим в слое элементарный объем V (м^3). Газ в этом объеме занимает V' (м^3). Если его плотность ρ ($\text{кг}/\text{м}^3$), то масса газа в выделенном объеме составит $\rho V'$ (кг).

Рассмотрим баланс массы в элементе объема V . Изменение массы газа в этом объеме равно

$$\frac{d}{d\tau} \int_{V'} \rho dV' = \int_V \frac{\partial}{\partial \tau} \left(\rho \frac{dV'}{dV} \right) dV = \int_V \frac{\partial}{\partial \tau} (\rho \varepsilon) dV, \quad (1)$$

где ε – средняя порозность слоя в объеме V :

$$\varepsilon = \frac{dV'}{dV} = \frac{1}{dV} \int_{V'} \varepsilon_n dV, \quad (2)$$

где ε_n – локальное (местное) значение порозности.

Изменение массы равно ее потоку через замкнутую поверхность S' (контур) объема V' , причем полный поток массы в этом случае составляет

$$\oint_{S'} (\rho \vec{v}) d\vec{S}' = \oint_S (\rho \vec{v}) \left(\frac{dS'}{dS} \right) d\vec{S} = \oint_S (\rho \varepsilon_n \vec{v}) d\vec{S} = \oint_S (\rho \varepsilon_n \vec{v}) \vec{n} dS, \quad (3)$$

где ε_n – средняя просветность слоя в объеме V ; n – нормаль к поверхности контура S' .

Учитывая действие внутренних источников (стоков) массы мощностью q_V (образование массы вследствие физико-химических превращений), после преобразования поверхностного интеграла в объемный по формуле Остроградского–Гаусса [6 – 8] получаем

$$\int_V \left[\frac{\partial}{\partial \tau} (\rho \varepsilon) + \nabla (\rho \varepsilon_n \vec{v}) - q_V \right] dV = 0, \quad (4)$$

откуда из-за произвольности объема V находим

$$\frac{\partial}{\partial \tau} (\rho \varepsilon) + \nabla (\rho \varepsilon_n \vec{v}) = q_V. \quad (5)$$

Сопоставляя выражение (5) с уравнением неразрывности гипотетического сплошного потока [9 – 11]

$$\frac{\partial \rho_*}{\partial \tau} + \nabla (\rho_* \vec{v}_*) = q_V, \quad (6)$$

находим, что соотношения (5) и (6) становятся эквивалентными, если выполняются равенства

$$\rho_* = \varepsilon \rho; \quad v_* = \left(\frac{\varepsilon_n}{\varepsilon} \right) v. \quad (7)$$

Таким образом, как показано в работах [12, 13], физический смысл содержания равенств (7) заключается

в следующем. Для описания процессов, протекающих в слое, возможно использование уравнений, полученных для сплошной среды, если известны эффективные значения ее теплофизических параметров. Совершенно очевидно, что эти значения не равны значениям параметров реального газа. Следует также подчеркнуть то обстоятельство, что любая математическая модель движения газа в слое описывает закономерности изменения среднестатистических характеристик поля течения.

При выводе уравнений движения обычно принимают в качестве постулата принцип напряжений Коши [4, 5, 9], утверждающий, что для любой замкнутой поверхности Ω существует распределение вектора напряжений t с результирующей и моментом, эквивалентными полю сил, действующую на сплошную среду, заключенную внутри Ω , со стороны среды, расположенной вне этой поверхности. Предполагается, что в данный момент времени вектор t зависит только от положения и ориентации элемента поверхности dS , т.е. если обозначить через n внешнюю нормаль к поверхности Ω , то $t = t(x, \tau, n)$.

Напомним теперь основной принцип динамики движения жидкости, называемый принципом сохранения количества движения [4, 5, 9]: «скорость изменения количества движения жидкости, заключенной в движущемся объеме Σ , равна результирующей сил, действующих на эту жидкость».

Аналитическим выражением этого принципа является уравнение

$$\frac{d}{d\tau} \int_{\Sigma} \rho_* \vec{v}_* dV = \int_{\Sigma} \rho_* \vec{f} dV + \int_{\Omega} \vec{i}_* dS, \quad (8)$$

где f – поле внешних сил, отнесенное к единице массы.

Выполняя усреднение этого уравнения по объему V , как это было сделано для уравнения баланса массы [4], приходим к промежуточной форме уравнений движения

$$\begin{aligned} \varepsilon \rho \frac{d}{d\tau} \left(\frac{\varepsilon_n \vec{v}}{\varepsilon} \right) &= \varepsilon \rho \vec{g} - \text{grad}(\varepsilon_n p) - \\ &- \frac{2}{3} \text{grad} \left[\varepsilon_n \mu \text{div} \left(\frac{\varepsilon_n \vec{v}}{\varepsilon} \right) \right] + 2 \text{div}(\varepsilon_n \mu D) + R, \end{aligned} \quad (9)$$

где p – давление газа; μ – коэффициент динамической вязкости газа; R – дополнительное сопротивление, возникающее при переходе от реального газа к однородной жидкости; D – тензор скорости деформации с компонентами

$$D_{ij} = 0,5 \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right), \quad (10)$$

где $i, j = 1, 2, 3$; $x_1 = x, x_2 = y, x_3 = z$; $v_1 = u, v_2 = v, v_3 = w$. Отметим, что в уравнении (9) $d/d\tau$ характеризует так

называемую полную или субстанциональную производную, т.е. $\frac{d}{d\tau} = \frac{\partial}{\partial\tau} + u\left(\frac{\partial}{\partial x}\right) + v\left(\frac{\partial}{\partial y}\right) + w\left(\frac{\partial}{\partial z}\right)$.

Последнее слагаемое правой части уравнения (9), представляющее собой дополнительное сопротивление движению газа через слой, при современном уровне развития знаний невозможно выразить в квадратурах. Единственным способом определения значения R является эксперимент. Ясно, однако, что сопротивление R должно быть однозначной функцией порозности слоя, т.е. $R = R(1 - \varepsilon)$, так как в отсутствии твердых частиц ($\varepsilon = 1$) величина $R \equiv 0$. В литературе [2 – 4, 14 – 16] обсуждаются различные аппроксимации результатов экспериментального определения R . В работе [4] утверждается, что наиболее достоверной зависимостью для условий работы шахтных металлургических печей является

$$R = -2\text{div}(\varepsilon_n \mu D) + \frac{2}{3} \text{grad} \left[\varepsilon_n \mu \text{div} \left(\frac{\varepsilon_n}{\varepsilon} v \right) \right] - 150 \left(\frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon d_k \Phi} \right)^2 \mu \frac{\varepsilon_n^2}{\varepsilon} v - 1,75 \left(\frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon d_k \Phi} \right) \rho \frac{\varepsilon_n^2}{\varepsilon} \left(\frac{\varepsilon_n}{\varepsilon} |v| \right) v. \quad (11)$$

Последние два слагаемые соотношения (11) для R определяют так называемый закон сопротивления С. Эргана.

С использованием (11) уравнения движения (9) упрощаются и принимают вид

$$\varepsilon \rho \frac{d}{d\tau} \left(\frac{\varepsilon_n}{\varepsilon} v \right) = \varepsilon \rho g - \text{grad}(\varepsilon_n p) - \left[150 \left(\frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon d_k \Phi} \right) \mu + 1,75 \rho \frac{\varepsilon_n}{\varepsilon} |v| \right] \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon d_k \Phi} \frac{\varepsilon_n^2}{\varepsilon} v. \quad (12)$$

Вместо соотношения С. Эргана можно применять любую экспериментальную зависимость [2 – 4, 14 – 16].

Уравнение энергии выводится способом, аналогичным изложенному в работе [4]. При этом необходимо дополнительно учесть два обстоятельства. Во-первых, перенос теплоты теплопроводностью осуществляется не только в газе, но и от газа к поверхности частиц материала. Поскольку для оценки последней составляющей теплопереноса нужны данные по выявлению закономерностей развития теплового и динамического пограничных слоев, то целесообразно заменить это слагаемое законом Ньютона для теплоотдачи конвекцией. Во-вторых, наличие дополнительной силы сопротивления в уравнениях движения приводит к появлению в уравнении энергии слагаемого, характеризующего переход механической энергии в тепловую. Опуская промежуточные выкладки [2 – 4], запишем окончательный результат

$$\varepsilon \rho C_v \frac{dT}{d\tau} = \varepsilon \rho q_R + \text{div}(\varepsilon_n \lambda \text{grad} T) - \alpha_v (T - t) - \varepsilon_n p \text{div} \left(\frac{\varepsilon_n}{\varepsilon} v \right) - \frac{2}{3} \varepsilon_n \mu \left[\text{div} \left(\frac{\varepsilon_n}{\varepsilon} v \right) \right]^2 + 2 \varepsilon_n \mu \sum_{i,j} D_{i,j}^2 + q'_r, \quad (13)$$

где C_v – теплоемкость газа (кДж/(кг·К)); λ – коэффициент теплопроводности газа (Вт/(м·К)); α_v – объемный коэффициент теплообмена (Вт/(м³·К)); q_R – скорость притока теплоты за счет излучения (Вт/кг); q'_r – источник (сток) теплоты, действующий в газе (Вт/м³). Это слагаемое, как уже отмечалось, включает также диссипацию механической энергии, происходящую на поверхности частиц материала.

Как правило, коэффициент теплообмена α_v определяют экспериментально. По этой причине трудно поддающаяся расчету лучистая составляющая оказывается включенной в α_v через зависимость последнего от температуры. Тем не менее, необходимо отметить, что данное упрощение не приводит к заметным ошибкам лишь для областей слоя, в которых температура теплоносителей не превышает 500 °С [9].

Следует учесть, что слагаемые, описывающие работу сил давления и диссипацию механической энергии (газодинамический нагрев) становятся соизмеримыми с конвективным теплопереносом лишь при до- и сверхзвуковых скоростях газа. В шахтных металлургических печах таких скоростей нет, следовательно без ущерба для точности расчетов этими слагаемыми можно пренебречь.

Таким образом, для условий тепловой и газодинамической работы шахтных металлургических печей уравнение энергии трансформируется в уравнение теплообмена

$$\varepsilon \rho C_v \frac{dT}{d\tau} = (\varepsilon \rho q_R) - \alpha_v (T - t) + q_r, \quad (14)$$

где q_r – источники (стоки) теплоты, обусловленные физико-химическими реакциями, протекающими в газе. Первое слагаемое правой части поставлено в скобках, чтобы подчеркнуть необходимость использования численных методов решения при учете теплообмена излучением.

Для замыкания системы необходимо добавить уравнения:

– состояния газа

$$\rho = f(T, p); \quad (15)$$

– нагрева кусков материала

$$(1 - \varepsilon) \rho_m C_m \frac{dT}{d\tau} = \alpha_v (T - t) + q_m; \quad (16)$$

- закономерности изменения вязкости и теплопроводности газа

$$\mu = \mu(T, p); \quad \lambda = \lambda(T, p); \quad (17)$$

- массообмена

$$\frac{dC}{d\tau} = -K_{\Sigma} f [C(1 + \bar{K}) - \bar{K}\Sigma] \quad (18)$$

и

$$\frac{d\varphi}{d\tau} = n \frac{dC}{d\tau}. \quad (19)$$

В этих выражениях ρ_m – плотность материала ($\text{кг}/\text{м}^3$); C_m – удельная теплоемкость материала ($\text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$); q_m – источники (стоки) теплоты, действующие в материале ($\text{Вт}/\text{м}^3$); C – концентрация восстановителя в газе ($\text{м}^3/\text{м}^3$); \bar{K} – константа равновесия; K_{Σ} – эффективная константа скорости реакции ($\text{м}/\text{с}$); f – величина реакционной поверхности ($\text{м}^2/\text{м}^3$); Σ – равновесная концентрация; φ – степень восстановления оксидов (доли ед.); n – отношение массоемкости потока газа W_r^* к массоемкости потока материала W_m^* .

Различные модификации уравнений (5), (12), (14) – (19) с учетом краевых условий и составляют математическую модель того или иного слоевого агрегата.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Слеттери Дж. С. Теория переноса импульса, энергии и массы в сплошных средах: Пер. с англ. – М.: Энергия, 1978. – 448 с.

2. Теплотехника доменного процесса / Б.И. Китаев, Ю.Г. Ярошенко, Е.Л. Суханов Е.Л. и др. – М.: Metallurgy, 1978. – 248 с.
3. Тепловая работа шахтных печей и агрегатов с плотным слоем / Я.М. Гордон, Б.А. Боковиков, В.С. Швыдкий, Ю.Г. Ярошенко. – М.: Metallurgy, 1989. – 120 с.
4. Гордон Я.М., Максимов Е.В., Швыдкий В.С. Механика движения материалов и газов в шахтных печах. – Алма-Ата: Наука, 1989. – 144 с.
5. Лыков А. В. Теплообмен: Справочник. – М.: Энергия, 1972. – 560 с.
6. Смирнов В.И. Курс высшей математики. Т. 1. – М.: Наука, 1955. – 480 с.
7. Мышкин А.Д. Лекции по высшей математике. – М.: Наука, 1969. – 640 с.
8. Швыдкий В.С., Ладыгичев М.Г., Шаврин В.С. Математические методы теплофизики: Учебник для вузов. – М.: Машиностроение, 2001. – 232 с.
9. Серрин Дж. Математические основы классической механики жидкости. – М.: ИЛ, 1963. – 256 с.
10. Механика жидкости и газа: Учеб. пособие для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. / В.С. Швыдкий, Ю.Г. Ярошенко, Я.М. Гордон и др. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2003. – 464 с.
11. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. – М.: Наука, 1974. – 586 с.
12. Prager S. Viscous flow through Porous Media // Phys. of Fluids. 1961. No. 4. P. 1477 – 1485.
13. Гольдштейн М.А. Процессы переноса в зернистом слое. – Новосибирск: Ин-т теплофизики СО АН СССР, 1984. – 164 с.
14. Богданди Л.Ф., Энгель Г.-Ю. Восстановление железных руд. – М.: Metallurgy, 1971. – 520 с.
15. Brauer H. Resistance law for irrigated vertical columns with countercurrent gas flow // Chem. Ing. Tech. 1960. Vol. 32. P. 585 – 590.
16. Ешар Р., Бредегефт Р., Мавродис М. и др. Газодинамика и теплотехника доменного процесса // Черные металлы. 1971. № 12. С. 1 – 40.

Поступила 16 мая 2016 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2016. Vol. 59. No. 9, pp. 634–638.

ON MATHEMATICAL MODELING OF LAYER METALLURGICAL FURNACES AND AGGREGATES. REPORT 1

V.S. Shvydkii, A.R. Fatkhutdinov, E.A. Devyatykh, T.O. Devyatykh, N.A. Spirin

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

Abstract. The authors have established the aim of mathematical modeling of gas dynamics and steady-state heat transfer in layer shaft furnaces, in which the gas stream moves to a complex system of curved channels of variable curvature and cross-sectional area. The problem of the development of complex mathematical models of layer metallurgical furnaces and units is to obtain the equations of gas flow in the moving bed, linking average speeds at space between pieces (true speed), its actual pressure and temperature, as from these values depends the intensity of physical and chemical transformations. The solution to this problem is performed using a parallel between the passage of the gas in the bed and the movement of a hypothetical fluid, which occupies the entire volume of the device, including the amount of lump materials.

Keywords: layer process, heat transfer, porosity of layer, vortex flow, mathematical description, equivalent performance.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-9-634-638

REFERENCES

1. Slattery John S. *Momentum, energy, and mass transfer in continua*. New York: McGraw-Hill, 1971, 679 p. (Russ.ed.: Slattery J.S. *Teoriya perenosa impul'sa, energii i massy v sploshnykh sredakh*. Moscow: Energiya, 1978, 448 p.).
2. Kitaev B.I., Yaroshenko Yu.G., Sukhanov E.L., Ovchinnikov Yu.N., Shvydkii V.S. *Teplotekhnika domennogo protsesssa* [Heat engineering of blast furnace process]. Moscow: Metallurgiya, 1978, 248 p. (In Russ.).
3. Gordon Ya.M., Bokovikov B.A., Shvydkii V.S., Yaroshenko Yu.G. *Teplovaya rabota shakhtnykh pechei i agregatov s plotnym sloem* [Heat work of shaft furnaces and aggregates with a dense layer]. Moscow: Metallurgiya, 1989, 120 p. (In Russ.).
4. Gordon Ya.M., Maksimov E.V., Shvydkii V.S. *Mekhanika dvizheniya materialov i gazov v shakhtnykh pechakh* [Mechanics of movement of materials and gases in blast furnaces]. Alma-Ata: Nauka, 1989, 144 p. (In Russ.).
5. Lykov A.V. *Tplomassoobmen (spravochnik)* [Heat and mass transfer (handbook)]. Moscow: Energiya, 1972, 560 p. (In Russ.).
6. Smirnov V.I. *Kurs vysshei matematiki: T. 1* [Course of higher mathematics. Vol. 1]. Moscow: Nauka, 1955, 480 p. (In Russ.).

7. Myshkis A.D. *Lektsii po vysshei matematike* [Lectures on higher mathematics]. Moscow: Nauka, 1969, 640 p. (In Russ.).
 8. Shvydkii V.S., Ladygichev M.G., Shavrin V.S. *Matematicheskie metody teplofiziki: Uchebnik dlya vuzov* [Mathematical models of thermal physics: Textbook for universities]. Moscow: Mashinostroenie, 2001, 232 p. (In Russ.).
 9. Serrin James. *Mathematical Principles of Classical Fluid Mechanics. Series: Encyclopedia of Physics*. Springer-Verlag OHG. Berlin – Göttingen – Heidelberg, 1959. (Russ.ed.: Serrin J. *Matematicheskie osnovy klassicheskoi mekhaniki zhidkosti*. Moscow: IL, 1963, 256 p.)
 10. Shvydkii V.S., Yaroshenko Yu.G., Gordon Ya.M., Shavrin V.S., Noskov A.S. *Mekhanika zhidkosti i gaza: Uchebnoe posobie dlya vuzov* [Fluid mechanics: Manual for universities]. Shvydkii V.S. ed. Moscow: IKTs “Akademkniga”, 2003, 464 p. (In Russ.).
 11. Schlichting Hermann. *Grenzschicht-Theorie*. Verlag G. Braun, Karlsruhe, 1965, 736 s. (Russ.ed.: Schlichting H. *Teoriya pogrannichnogo sloya*. Moscow: Nauka, 1969, 743 p.).
 12. Prager S. Viscous flow through porous media. *Phys. of Fluids*. 1961, no. 4, pp. 1477–1485.
 13. Gol'dshtik M.A. *Protsessy perenosa v zernistom sloe* [Transport processes in the granular layer]. Novosibirsk: In-t teplofiziki SO AN SSSR, 1984, 164 p. (In Russ.).
 14. Bogdandi L., Engell H.-J. *Die Reduktion der Eisenerze*. Duesseldorf, 1967. 539 p. (Russ. ed.: Bogdandi L., Engell H.-J. *Vosstanovlenie zheleznykh rud*. Moscow: Metallurgiya, 1971, 519 p.).
 15. Brauer H. Resistance law for irrigated vertical columns with countercurrent gas flow. *Chem. Ing. Tech.* 1960, vol. 32, pp. 585–590.
 16. Eshar R., Bredegeft R., Mavrodīs M. etc. Gas dynamics and heat engineering of blast furnace process. *Chernye metally*. 1971, no. 12, pp. 1–40. (In Russ.).
- Acknowledgements.** The work was financially supported by resolution no. 211 of the Russian Federation Government, contract no. 02.A03.21.0006.
- Information about the authors:**
- V.S. Shvydkii**, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair “Thermal Physics and Informatics in Metallurgy”
- A.R. Fatkhutdinov**, Postgraduate of the Chair “Thermal Physics and Informatics in Metallurgy”
- E.A. Devyatykh**, Postgraduate of the Chair “Thermal Physics and Informatics in Metallurgy” (evgeny.9h@gmail.com)
- T.O. Devyatykh**, Postgraduate of the Chair “Thermal Physics and Informatics in Metallurgy”
- N.A. Spirin**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Chair “Thermal Physics and Informatics in Metallurgy”

Received May 16, 2016