

УДК 621.745

Исследование работы ротационных наклоняющихся плавильных печей

Канд. техн. наук, доц. С. Л. Ровин¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2016
Belarusian National Technical University, 2016

Реферат. Ротационные наклоняющиеся печи – новый тип топливных печей, обеспечивающих наиболее эффективный нагрев и переработку (рециклинг) полидисперсных материалов. В статье изложены результаты исследования тепловой работы ротационной наклоняющейся печи, движения материалов и газового неизотермического потока при вращении печи. Исследования выполнены на физической и компьютерной имитационных моделях, а также в реальных производственных условиях на опытно-промышленной установке. Результаты исследований послужили основанием для разработки рекомендаций по расчету и конструированию печей и использованы при проектировании ротационной наклоняющейся печи для нагрева и плавки чугуновой стружки, восстановительной плавки стальной прокатной окалины, переплавки отходов алюминия, плавки свинца из отходов аккумуляторного лома. Печи имеют высокий термический КПД (~50 %), технологическую гибкость, высокую удельную производительность и рентабельность. Апробированные технические решения при рециклинге черных и цветных металлов расширяют применение ротационной наклоняющейся печи в литейном и металлургическом производстве в качестве основного технологического агрегата при создании рентабельного малотоннажного рециклинга образующихся на предприятиях металлоотходов, открывают перспективу организации в Беларуси собственного производства высококачественных шихтовых материалов взамен импорта первичных металлов, позволяют решить важную экологическую задачу ликвидации многотонных отвалов металлосодержащих отходов.

Ключевые слова: ротационные наклоняющиеся печи, дисперсные материалы, процессы тепломассообмена, рециклинг металлоотходов

Для цитирования: Ровин, С. Л. Исследование работы ротационных наклоняющихся плавильных печей / С. Л. Ровин // *Наука и техника*. 2016. Т. 15, № 1. С. 18–28

Investigations on Operation of Rotary Tilting Furnaces

S. L. Rovin¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. Rotary tilting furnace (RTF) is a new type of fuel furnaces, that provide the most efficient heating and recycling of polydisperse materials. The paper describes results of the investigations on thermal processes in the RTF, movement of materials and non-isothermal gas flow during kiln rotary process. The investigations have been carried out while using physical and computer simulations and under actual operating conditions applying the pilot plant. Results of the research have served as a basis for development of recommendations on the RTF calculations and designing and they have been also used for constructional design of a rotary tilting furnace for heating and melting of cast iron chips, reduction smelting of steel mill scale, melting of aluminum scrap, melting of lead from battery scrap. These furnaces have a high thermal efficiency (~50 %), technological flexibility, high productivity and profitability. Proven technical solutions for recycling of ferrous and non-ferrous metals develop the use of RTF in the foundry and metallurgical industry as the main technological unit for creation of cost-effective small-tonnage recycling of metal waste generated at the plants. The research results open prospects for organization of its own production for high-quality charging material in Belarus in lieu of imported primary metal. The proposed technology makes it possible to solve environmental challenge pertaining to liquidation of multi-tonnage heaps of metal-containing wastes.

Keywords: rotary tilting furnace, disperse materials, processes of heat and mass transfer, recycling of metal-containing wastes

For citation: Rovin S. L. (2016) Investigations on Operation of Rotary Tilting Furnaces. *Science & Technique*. 15 (1), 18–28 (in Russian)

Адрес для переписки

Ровин Сергей Леонидович
Белорусский национальный технический университет
ул. Я. Коласа, 24,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 292-30-92
technolit@tut.by

Address for correspondence

Rovin Sergey L.
Belarusian National Technical University
24 Ya. Kolasa str.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 292-30-92
technolit@tut.by

Введение

Плавка и термообработка полидисперсных материалов представляют большие трудности, так как традиционно применяемые в литейных цехах печи (индукционные, дуговые, отражательные) предназначены и успешно перерабатывают только плотные кусковые материалы. Если требуется переплавить дисперсные материалы, то, как правило, их окомковывают или брикетируют, агломерируют и т. п. Однако это не является достаточной компенсацией негативных последствий, которые вызывает использование такой низкокачественной шихты. Вместе с тем актуальность данной задачи возрастает, так как постоянно увеличиваются объемы дисперсных металлоотходов, к которым относятся стружка, окалина, аспирационная пыль, шламы и т. п. В Беларуси ежегодно образуется 450–500 тыс. т таких отходов, а в отвалах накоплено около 10 млн т. В то же время потребности белорусских предприятий в исходной металлошихте покрываются в основном за счет импорта.

Перспектива решения проблемы рентабельной переработки дисперсного сырья, или рециклинга металлоотходов, включая оксидные и загрязненные, наметилась с появлением агрегатов нового типа – ротационных наклоняющихся печей (РНП), упоминания о которых появились в конце прошлого века. С 2000-х гг. первыми в Беларуси к их исследованию и разработке приступили специалисты БНТУ и ГГТУ имени П. О. Сухого. В настоящее время накоплен определенный опыт по конструированию и внедрению РНП в различных производственных условиях при рециклинге как цветных, так и черных металлоотходов. Полученные результаты и найденные принципиальные решения позволяют реализовать на базе РНП малотоннажный, эффективный, не требующий значительных инвестиций рециклинг дисперсных отходов без их предварительной обработки и подготовки [1].

Основные принципы работы ротационных печей

Для тепловой обработки полидисперсных материалов в настоящее время используются в основном вращающиеся печи. Это объясняется тем, что из-за малой площади контакта частиц дисперсный слой независимо от свойств

самого материала имеет весьма низкую теплопроводность. Как правило, теплопроводность слоя $\lambda_{\text{сл}}$ меньше теплопроводности материала $\lambda_{\text{м}}$ на два порядка и более, например для окалины в слое $\lambda_{\text{сл}} = 0,1\text{--}0,3$ Вт/(м·К), для частиц окалины $\lambda_{\text{ок}} = 56\text{--}123$ Вт/(м·К). Порозность слоя m «чешуек» окалины или стружки составляет $m = 0,4\text{--}0,6$ при насыпной плотности $\rho_{\text{сл}} = (1,2\text{--}2,0) \cdot 10^3$ кг/м³. Материал, находящийся в неподвижном слое, прогревается за счет конвекции от газового потока и излучением от газов и стен только на небольшую глубину (20–30 мм) [2].

Процесс передачи теплоты в стационарном слое отвечает граничным условиям I рода при решении уравнения Фурье [3]. Объемный коэффициент теплопередачи в поверхностном слое составляет $\alpha_{\nu} \approx 10^3$ кВт/(м³·К). Далее прогрев резко замедляется. Термический КПД (ТКПД) печи составляет в этих условиях $\eta = 0,05\text{--}0,07$, что является неудовлетворительным.

Динамичный пересыпающийся слой существенно глубже (до 50–80 мм) продувается газовым потоком, за счет чего интенсивность теплообмена повышается в 3–5 раз. Однако за счет малого времени пребывания и относительно низкой скорости газового потока во вращающихся барабанных проходных печах, а также низкого коэффициента заполнения рабочего пространства печи материалом $\varphi = 0,08\text{--}0,12$, ТКПД таких печей составляет не более $\eta = 0,07\text{--}0,15$.

Оптимальное решение было найдено при организации «петлеобразного» движения газов в рабочем пространстве. Именно в этом и состоит одно из существенных преимуществ РНП. Принципиальное устройство РНП представлено на рис. 1а.

В РНП отвод газов производится с того же торца печи, на котором установлена горелка, т. е. вход и выход газов осуществляются через отверстия в крышке печи. Вращающийся корпус при загрузке устанавливается вверх горловиной под углом $12^{\circ}\text{--}18^{\circ}$ к горизонту, а при выпуске металла или шлака наклоняется вниз на $30^{\circ}\text{--}40^{\circ}$.

Вращение корпуса производится, как правило, с возможностью регулировки оборотов в диапазоне $n = 0,5\text{--}5,0$ об./мин. Опора крышки неподвижна, при загрузке и выгрузке печи (сливе металла и шлака) крышка отводится в сторону.

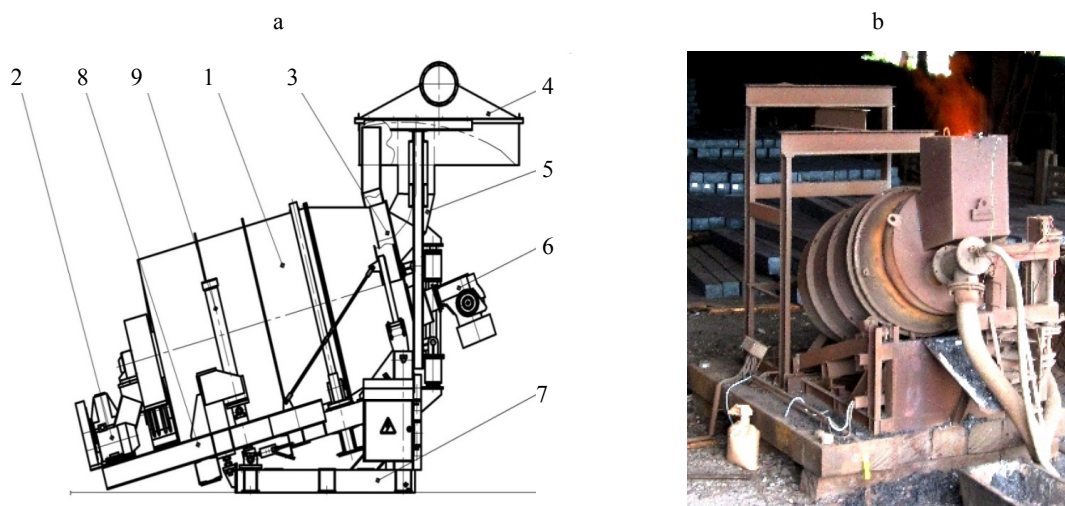


Рис. 1. Ротационная наклоняющаяся печь: 1 – корпус печи; 2 – привод вращения; 3 – поворотная крышка; 4 – зонт; 5 – дымоход; 6 – горелка; 7 – опорная рама; 8 – поворотная рама; 9 – привод наклона печи; а – общий вид РНП емкостью 1,5 т; б – опытно-экспериментальная РНП емкостью 0,5 т

Fig. 1. Rotary tilting furnace: 1 – furnace body; 2 – rotary drive; 3 – swinging cover; 4 – hood; 5 – smoke stack; 6 – burner; 7 – support frame; 8 – rotating frame; 9 – drive for furnace tilting; а – general view of 1.5t-capacity rotary tilting furnace (RTF); б – 0.5t-capacity experimental RTF

В РНП движение газов условно можно представить как турбулентный вращающийся «петлеобразный» поток. Линейные скорости газов во вращающемся потоке имеют значения, соответствующие скоростям потока в факеле горелки, а скорость поступательного движения потока определяется отношением расхода газа к половинному сечению рабочего пространства. Поступательная скорость потока значительно ниже вращательных скоростей, что увеличивает время пребывания газов в печи, а скорость вращательного движения обеспечивает высокую интенсивность конвективного теплообмена.

ТКПД РНП при нагреве дисперсных материалов, например стружки, в 2–3 раза превышает ТКПД барабанных печей, достигая 45–50 %. Большая горловина печи и возможность наклона последней позволяют значительно сократить время загрузки РНП шихтовыми материалами, слива расплава и скачивания шлака. Это в свою очередь сокращает продолжительность полного цикла плавки и повышает фактическую производительность печи [4].

Движение материала в печи

Движение дисперсного материала в ротационных печах определяется силами межчастичных связей (когезии), внутреннего трения в

слое, силами трения на границе «материал – футеровка», силами инерции (центробежными силами) и силой тяжести. Кроме того, на верхний слой частиц, особенно при обрушении, действуют аэродинамические силы скоростного потока газов.

Чем больше сцепление материала с поверхностью футеровки, тем выше поднимается материал при повороте печи и тем интенсивнее разрушается (сдвигается и обрушается) слой. В целом для понимания механики движения шихтовых материалов в ротационных печах может быть использована известная математическая модель, описывающая поведение материала в шаровой мельнице.

На частички, расположенные в непосредственной близости от поверхности барабана (рис. 2), действует радиальная сила N , возникающая от действия центробежной силы F_a и радиального вектора веса F_g [5]:

$$N = \frac{mv^2}{r} \pm mg \cos \alpha,$$

где m – масса частички; v – скорость частички; r – расстояние от оси вращения до частички; g – ускорение свободного падения; α – угол поворота радиуса, проведенного к рассматриваемой частичке, относительно вертикальной оси (угол подъема материала).

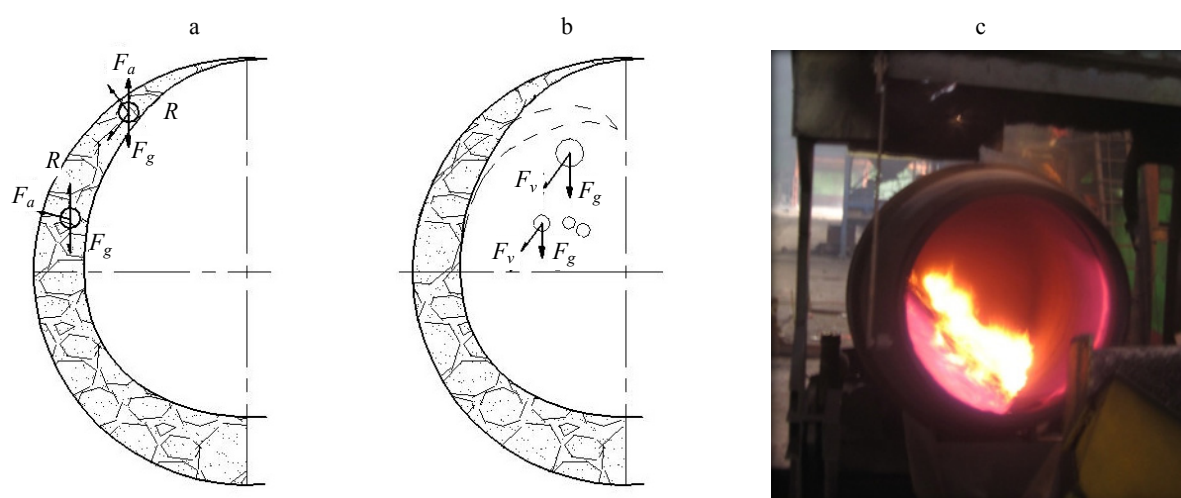


Рис. 2. Схема движения материалов во вращающейся печи: а – момент захвата материала; б – то же отрыва частиц; в – нагрев чугунной стружки в РНП (завод «Центролит», г. Гомель)

Fig. 2. Scheme of material movement in rotary tilting furnace: a – moment of material grasping; б – moment of particle disengagement; в – heating of cast iron chips in RTF (JSC “Tsentrolit”, Gomel)

Во время вращения барабана сила N вызывает реакцию R – трение между частицами материала и поверхностью барабана, в результате чего происходят «прилипание» частиц к поверхности барабана ($F_{тр} = R = NK_{тр}$), их подъем и ускорение.

С увеличением угла подъема материала радиальная компонента веса уменьшается и меняет знак, после того как частицы перейдут через горизонтальную ось ($\alpha = 90^\circ$, $\cos\alpha = 0$). В зависимости от скорости вращения раньше или позже частица теряет контакт с поверхностью барабана и по баллистической траектории падает вниз. Таким образом происходит перемешивание материала. При критической скорости v_k центробежная сила равна весу частицы. При такой скорости материал как бы прилипает к внутренней поверхности барабана.

Очень удобный способ для определения режимов, обеспечивающих максимально эффективное перемешивание материала в ротационных печах, предлагает равенство

$$v_k = n\pi D,$$

где n – скорость вращения корпуса; D – диаметр печи.

Поведение слоя материала сильно отличается от отдельно взятой частицы. Фактически критическая скорость зависит от степени наполнения печи и состава материала. Наиболее эффективные режимы соответствуют следующему диапазону угловых скоростей: при

плотной шихте $n = (6,5-12)D^{-0,5}$ [1], при «легком» скрапе $n = (10-27)D^{-0,5}$ [5].

В РНП к названным выше силам добавляется осевая сила. Это происходит благодаря углу наклона оси барабана к горизонтальной поверхности, что заставляет материал продвигаться по спирали к днищу печи и затем снова вперед к горловине. Дополнительные движения усиливают процессы перемешивания материала, что значительно увеличивает скорость прогрева слоя.

По мере того как температура повышается, в слое начинают преобладать сдвиговые деформации. Циркуляционный слой материала, образующийся при вращении печи, интенсивно прогревается потоком горячих газов и футеровкой. Конфигурация и объем этого слоя меняются с изменением адгезионных и когезионных свойств материала в процессе нагрева. При нагреве сектор, занимаемый дисперсным материалом, уменьшается, постепенно приближаясь к конфигурации, которую приобретает жидкость в подобных условиях.

Теплообмен в РНП

В ротационных печах передача теплоты осуществляется за счет радиации (от стен печи, факела и потока горячих газов), теплопроводности (от стен печи) и конвекции (от потока горячих газов). При этом решающую роль, безусловно, играет конвективный теплообмен.

Нагрев дисперсного материала в слое может быть описан параболой [6]

$$t = t_0(h+1)^n,$$

где t_0 – температура на поверхности слоя; h – текущая относительная толщина слоя; $n = k\alpha_V$, для дисперсных металлоотходов $n = 0,5-4,0$; α_V – объемный коэффициент теплопередачи, $\alpha_V = (1-3) \cdot 10^3$ Вт/(м³·К); k – эмпирический коэффициент, $k = (0,5-2,5) \cdot 10^{-3}$.

В начальной стадии нагрева в слое отмечаются достаточно высокие градиенты температур – до 1000–2000 К/м, что способствует его быстрому прогреву. Управляя скоростью вращения, можно изменять интенсивность перемешивания и тем самым интенсивность тепло- и массообмена, которая приближается к величине, характерной для печей с псевдоожиженным слоем. В этих условиях коэффициент теплопередачи α_V достигает значения $\alpha_V = 3000$ Вт/(м³·К), что на два порядка выше, чем при нагреве неподвижного слоя.

Проницаемость слоя дисперсного материала для газового потока определяется плотностью слоя и может быть охарактеризована критерием проточности. Проточность материалов с диаметром частиц $d = 0,2-5,0$ мм (окалина, мелкая стружка, песок и т. д.) соответствует критерию проточности $K_{п}$, лежащему в пределах 10^5-10^7 и соответственно коэффициенту объемной концентрации

$$\beta = \frac{V_{ч}}{V_{сл}} \approx 0,3-0,65,$$

где $V_{ч}$ – объем, занятый частицами в слое; $V_{сл}$ – объем слоя.

Эти параметры относятся к подвижному верхнему слою материала. В общем случае интенсивность межфазного переноса для продуваемого слоя связана с размером частиц соотношением

$$\alpha_V = \alpha(1 + 0,2\text{Bi})^{-1},$$

где α – внешний коэффициент теплообмена; $\text{Bi} = \alpha d/\lambda$ – критерий Био; λ – коэффициент теплопроводности материала.

При уменьшении скорости потока газов, омывающего частицы в слое, и размеров частиц турбулентность потока снижается ($\text{Re} \rightarrow 0$). А так как критерий Нуссельта является функцией от числа Рейнольдса [6], соответственно снижается и интенсивность нагрева α .

$$\text{Nu} = \frac{\alpha d}{\lambda_r} = f(\text{Re}),$$

где λ_r – теплопроводность газов; d – диаметр частиц.

При этом, однако, сохраняется высокая степень неоднородности потока, поэтому даже в глубине динамического слоя $\text{Nu} \gg \text{Nu} = f(\text{Re}_0)$. Сохраняется и концентрационный напор на реакционной поверхности частиц.

Нагрев верхнего динамического слоя материала в ротационной печи может быть рассчитан по модифицированному уравнению нестационарной теплопроводности, где вместо коэффициента теплопроводности слоя $\lambda_{сл}$ используется произведение αd , рассчитанное для отдельных частиц продуваемого слоя. Для одномерной схемы в этом случае можно записать

$$\frac{dt}{d\tau} = \frac{\alpha d}{c\rho} \frac{d^2t}{dx^2},$$

где t – температура слоя; x – высота (толщина) слоя.

Для верхней продуваемой части слоя $\alpha_V \approx 1-3$ кВт/(м³·К), для внутренних слоев $\alpha_V \approx 10-30$ Вт/(м³·К) при тех же диаметрах $d \leq 5$ мм.

Максимальная интенсивность нагрева дисперсного материала достигается во взвешенном состоянии (в кипящем слое). В таких условиях время нагрева частицы, например чешуйки окалины или песчинки, составляет примерно 0,004–0,100 с. Однако на практике режим кипящего слоя используется только для монодисперсных материалов.

Во вращающихся печах, где имеет место механическое перемешивание материала, тепло- и массообмен зависят от соотношения толщин внешней динамической и неподвижной внутренней частей слоя. Толщину продуваемого слоя можно определить по сопротивлению Δp_c , которое не должно быть больше скоростного напора потока газов в печи. Для потока газов, движущихся со скоростью $v_r = 13-15$ м/с, можно записать

$$\Delta p_c \leq \frac{136v_r^2\rho_r}{273-t},$$

где v_r , ρ_r – скорость и плотность газового потока.

Таким образом, передача теплоты и интенсивность прогрева слоя материала за счет кон-

векции тем выше, чем больше скорость движения газа-теплоносителя, турбулентность потока и интенсивнее перемешивание самого слоя. Для РНП толщина продуваемого слоя составляет 50–80 мм.

Движение газового потока в печи

Одним из эффективных инструментов при исследовании аэродинамических и теплообменных процессов, протекающих в условиях высоких градиентов температур и скоростей, является применение прикладных программных комплексов (ППК), таких как ANSYS и Solid Works Flow Simulation [7, 8]. Движение газового потока описывается при этом с помощью систем уравнений Навье – Стокса для реальных неизотермических потоков, уравнений неразрывности, сохранения энергии и состояния, а изменения температуры – в соответствии с уравнением Фурье – Кирхгофа [3, 6]. Тепловой баланс проверяется путем совместного решения для тех же исходных данных уравнения Фурье с граничными условиями III и IV рода для динамического слоя материала, при замене коэффициента теплопроводности λ на приведенный коэффициент теплопередачи α_k для продуваемого слоя.

Для решения системы уравнений принимаются следующие допущения: фазовое состояние материала не изменяется, характер движения газового потока турбулентный, газ сжимаемый. Уравнение неразрывности с учетом нагрева газа (для двумерной задачи) может быть записано в следующем виде:

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_y)}{\partial y} = 0,$$

где v_x, v_y – компоненты вектора скорости в направлениях x, y ; ρ – плотность газового потока.

Алгоритм сжимаемого течения применяется для стабилизации параметров при использовании сложной геометрии и сгущения конечно-элементной сетки в местах экстремальных значений температур и скоростей в связи с тем, что рабочие объемы газа-теплоносителя уменьшаются пропорционально температурному бинному $1 + \alpha t$, где $\alpha = 1/273$. Уравнение сохранения энергии с учетом теплопереноса может быть записано в следующем виде:

$$\frac{\partial}{\partial \tau}(\rho c_p t_0) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho v_x c_p t_0) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v_y c_p t_0) =$$

$$= \frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial t_0}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K \frac{\partial t_0}{\partial y} \right) + W^v + E^k + \frac{\partial P}{\partial \tau},$$

где c_p – удельная теплоемкость; t_0 – температура поверхности; $K = a_{np}$, a_{np} – приведенный коэффициент теплопроводности; W^v – работа сил вязкости; E^k – кинетическая энергия.

Статическая температура вычисляется из общей температуры и кинетической энергии

$$t = t_0 - \frac{v^2}{2c_p},$$

где t – статическая температура; v – вектор скорости газа.

Статическая и полная температуры для узлов, формирующих твердые элементы модели, равны.

Кинетическая энергия записывается формулой

$$E^k = -\frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{K}{c_p} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{2} v^2 \right) \right] - \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{K}{c_p} \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{2} v^2 \right) \right].$$

Мгновенные скорости в любой точке нестабильного (флуктуационного) потока изменяются как по абсолютному, так и по векторному значениям. Скорость при этом

$$v_x = \bar{v}_x + v'_x,$$

где \bar{v}_x – средний компонент скорости в направлении x ; v' – флуктуационный компонент скорости в направлении x .

Уравнение для кинетической энергии может быть записано следующим образом:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \rho K}{\partial \tau} + \frac{\partial(\rho v_x K)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_y K)}{\partial y} = \\ & = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial K}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial K}{\partial y} \right) + \frac{C_4 \mu_t}{\sigma_1} \left(g_x \frac{\partial t}{\partial x} + g_y \frac{\partial t}{\partial y} \right), \end{aligned}$$

где σ_k, C_4 – постоянные в k - ϵ -модели турбулентности; σ_t – число Шмидта; μ_t – вязкость потока, обусловленная турбулентностью.

Численное моделирование аэродинамических процессов проводили с учетом химических реакций горения топлива. Расчетная область представляет собой рабочее пространство печи с полной загрузкой, отапливаемое газоз воздушной горелкой. Основным топливом яв-

лялся метан, в качестве окислителя применялся воздух в соотношениях 1/10.

Моделирование можно разбить на два этапа: на первом определяли расположение горелки, для этих целей использовали ППК Solid Works Flow Simulation. На втором этапе моделировали процесс горения и движения газового потока в ротационной печи, для данной задачи выбрали программный комплекс ANSYS CFX.

Результатами численного моделирования являются поля температур, скоростей, давлений, траектории движения потока, концентрации топлива, окислителя, продуктов реакций, а также конвективные и лучистые потоки. Для исследования тепло- и массообменных процессов в РНП создали трехмерную модель ротационной печи с использованием ППК Solid Works 14.0. С помощью ANSYS Meshing эту модель разбили на сетку конечных элементов – 290665 элементов (рис. 3). Для моделирования турбулентных течений упомянутые уравнения Навье – Стокса усредняются по Рейнольдсу, т. е. используется усредненное по малому масштабу времени влияние турбулентности на параметры потока, а крупномасштабные временные изменения усредненных по малому масштабу времени составляющих газодинамических параметров потока (давления, скоростей, температуры) учитываются введением соответствующих производных по времени.

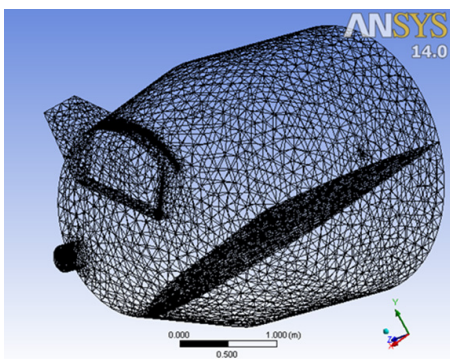


Рис. 3. Расчетная сетка ротационной печи
Fig. 3. Computational grid of rotary furnace

Система уравнений сохранения массы, импульса и энергии нестационарного пространственного течения в декартовой системе координат $(x_i, i = 1, 2, 3)$, вращающейся с угловой скоростью Ω вокруг оси, проходящей через ее начало, имеет следующий вид:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} (\rho u_k) = 0;$$

$$\frac{\partial (\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} (\rho u_i u_k - \tau_{ik}) + \frac{\partial}{\partial x_i} = S_i;$$

$$\frac{\partial (\rho E)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} ((\rho E + p)u_k + q_k) - \tau_{ik} u_i = S_k u_k + Q_H,$$

где τ – время; u – скорость потока; ρ – плотность потока; p – давление потока; S_i – внешние массовые силы; E – полная энергия единичной массы потока; Q_H – теплота, выделяемая источником в единичном объеме потока; τ_{ik} – тензор вязких сдвиговых напряжений; q_i – диффузионный тепловой поток; нижние индексы в формулах означают суммирование по трем координатным направлениям.

Наряду с моделированием процесса диффузии теплоты в текучей (газовой) среде моделируется также теплопередача в твердых телах с помощью уравнения Фурье

$$\frac{\partial \rho e}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + Q_H,$$

где $e = cT$; c – удельная теплоемкость; T – температура; λ – теплопроводность; Q_H – удельное тепловыделение.

Конвективный теплообмен моделируется в пограничном слое текучей среды между поверхностями твердых тел и этой средой.

При радиационном теплообмене учитывается только суммарное излучение. В итоге излучаемая с единицы поверхности теплота согласно закону Стефана – Больцмана определяется как [9]

$$Q_R = \varepsilon \sigma_0 T_W^4,$$

где ε – степень черноты поверхности; σ_0 – постоянная Стефана – Больцмана; T_W – температура поверхности.

Для дискретизации дифференциальных уравнений используется метод конечных объемов (элементов). Собственно дискретизация рассмотренной непрерывной математической модели состоит в том, что значения физических переменных рассчитываются в центрах расчетных элементов, а на их границах определяются потоки массы, импульса, энергии, необходимые

для нахождения этих значений. Пространственные производные аппроксимируются с помощью неявных разностных операторов второго порядка точности. Потoki рассчитываются с использованием их аппроксимаций второго порядка и метода минимизации полной вариации.

Результаты моделирования движения газового потока в рабочем пространстве РНП при

различных вариантах установки горелок представлены на рис. 4–7. На рис. 4, 5 видно, что факел горячих газов, встречаясь со слоем материала на входе в печь, отклоняется, образуя многочисленные вихри. Слой, прилегающий к крышке печи, прогревается меньше, чем у дна корпуса, кроме того, образующиеся вихревые потоки препятствуют проникновению нагретого потока в глубь материала.

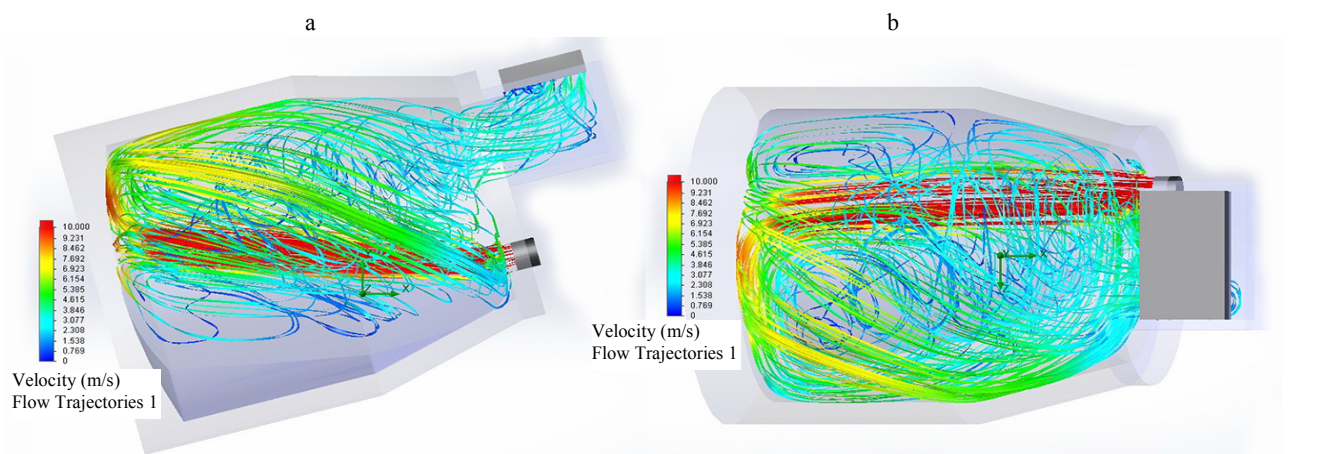


Рис. 4. Траектории движения и скорости потоков при расположении горелки справа: а – вертикальное сечение печи; б – горизонтальное сечение

Fig. 4. Trajectories of motion and flow rates with burner in right position: а – vertical section of furnace; б – horizontal section

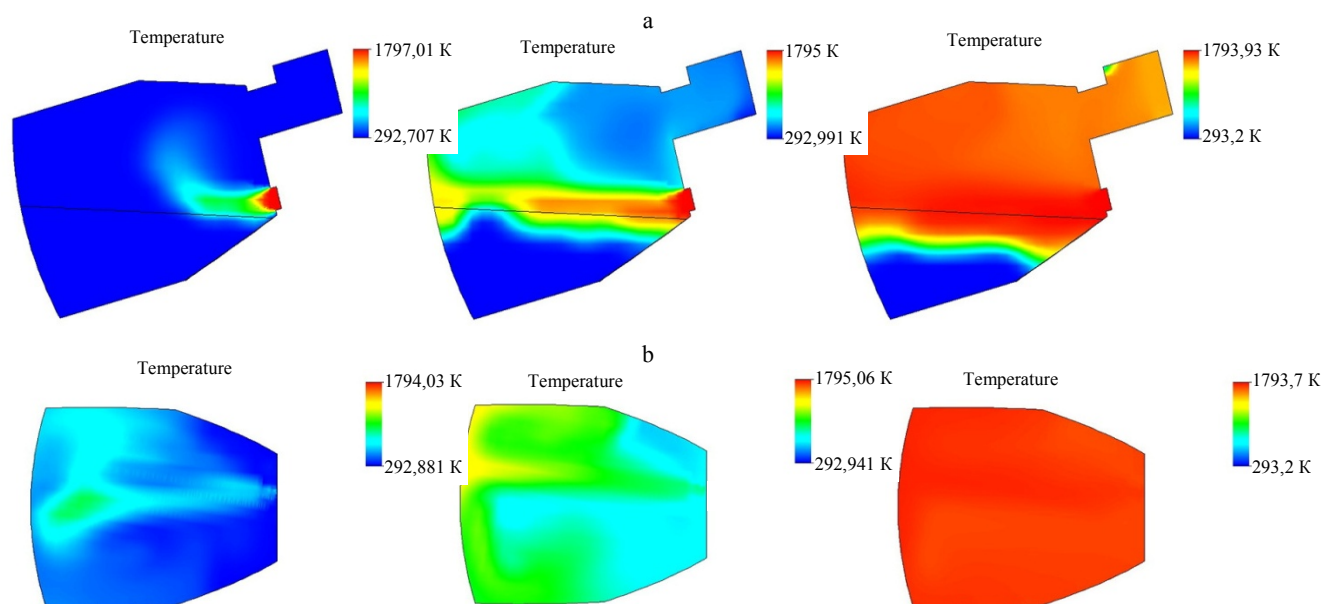


Рис. 5. Распределение температур в ротационной печи, горелка справа: а – вид сбоку – распределение температур по сечению печи, совпадающему с осью горелки; б – вид сверху – распределение температур на поверхности шихты

Fig. 5. Distribution of temperature in rotary furnace with burner in right position: а – side-view – distribution of temperature according to furnace section which lies in burner axis; б – top-view – distribution of temperature on furnace charge surface

Наиболее рациональным при заданном направлении вращения печи (против часовой стрелки) является расположение газозвушной горелки внизу слева, т. е. со стороны, где слой материала минимален. При этом пламя практически не испытывает никакого сопротивления со стороны материала, обеспечивается максимальная настильность пламени, поток по дуге омывает

ет всю поверхность материала, максимально передавая теплоту и проникая глубоко в слой между его частицами (рис. 6, 7). Такое расположение горелки позволяет повысить эффективность теплообменных процессов и соответственно сократить продолжительность цикла плавки в целом. Результаты моделирования структуры потока представлены на рис. 8.

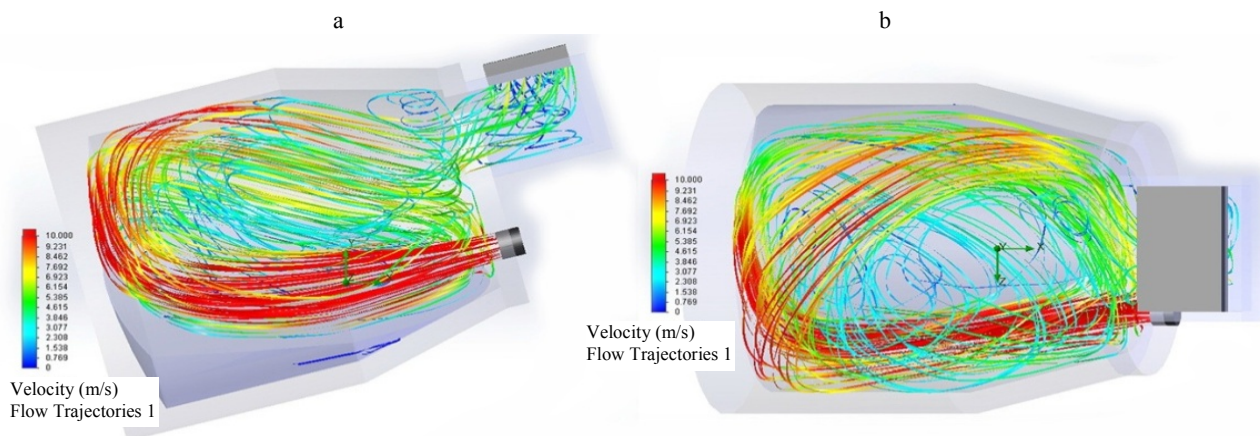


Рис. 6. Траектории движения и скорости потоков при расположении горелки слева: а – вертикальное сечение печи; б – горизонтальное сечение

Fig. 6. Trajectories of motion and flow rates with burner in left position: а – vertical section of furnace; б – horizontal section

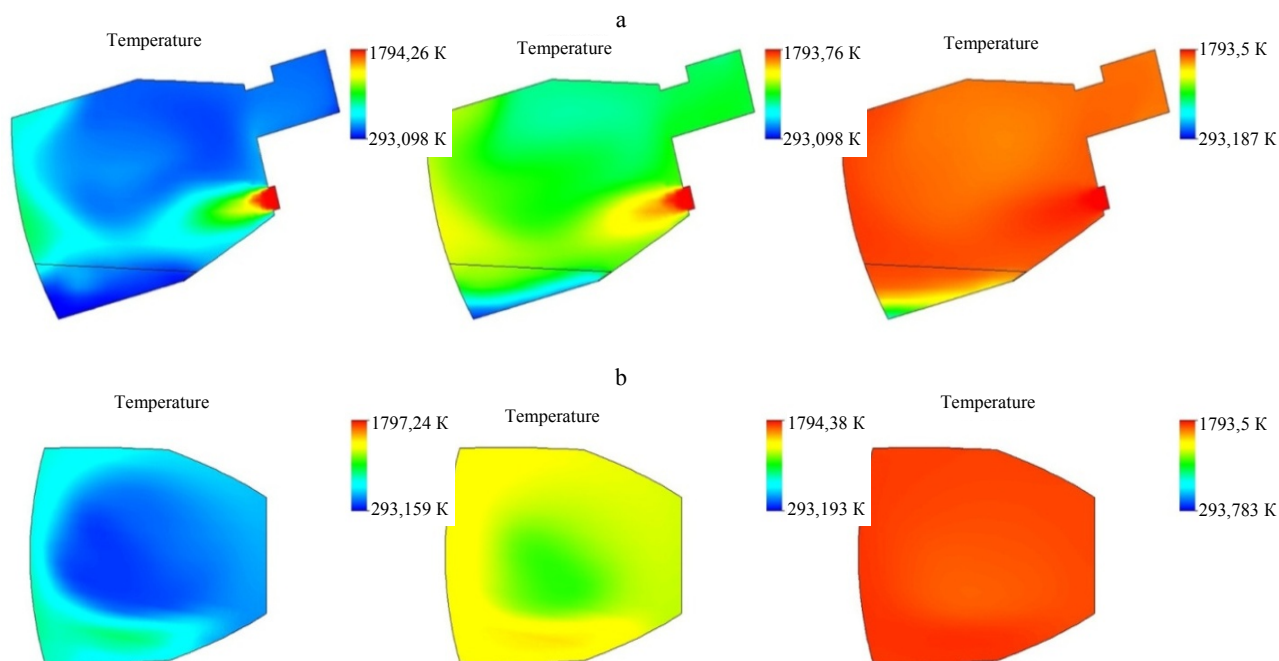


Рис. 7. Распределение температур в ротационной печи, горелка слева: а – вид сбоку – сечение по горелке; б – вид сверху – распределение температур на поверхности шихты

Fig. 7. Distribution of temperature in rotary furnace with burner in left position: а – side-view – section according to burner; б – top-view – distribution of temperature on furnace charge surface

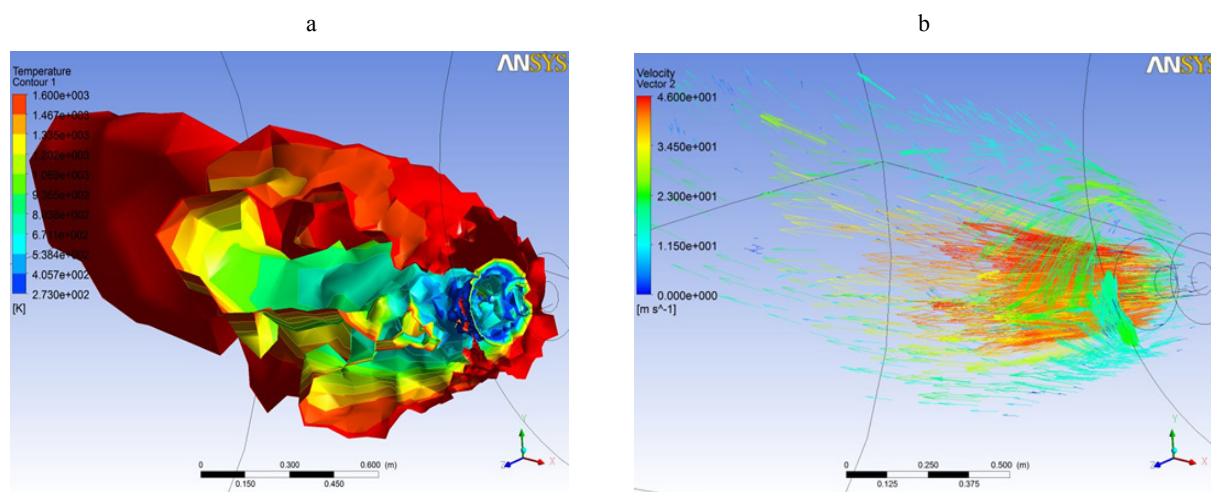


Рис. 8. Структура газовоздушного потока на выходе из горелки:
а – структура турбулентного потока; б – вектор скоростей на выходе из горелки

Fig. 8. Structure of gas air flow on exit from burner:
а – structure of turbulent flow; б – velocity vector on exit from burner

Для отработки технологии рециклинга создали опытно-промышленную РНП емкостью 500 кг. Процессы тепло- и массообмена осуществляются в РНП в условиях высокой интенсивности взаимодействия реагентов. Так, весь процесс плавки чугунной стружки занимает не более 40–45 мин. Процесс восстановления прокатной окалины от загрузки шихты до получения жидкого металла в РНП занял около 3 ч, в то время как процессы только твердофазного восстановления в известных агрегатах требуют для получения металлизированных окатышей (губчатого железа) до 20 ч и более [10].

На основе полученных данных разработаны рекомендации по технологии рециклинга и конструированию печей емкостью от 0,5 до 7,0 т по жидкому металлу для плавки и тепловой обработки металлоотходов. Внедрение в производство и опыт эксплуатации РНП различного назначения доказали высокую эффективность этих агрегатов при переработке дисперсных материалов.

ВЫВОДЫ

1. Разработка и совершенствование ротационных наклоняющихся печей и технологических процессов их использования для рециклинга низкосортных дисперсных металлоотходов позволяют без предварительной подготовки

с применением практически любых восстановителей и любого топлива перерабатывать отходы в местах их образования и получать высококачественные шихтовые материалы и/или литейные сплавы.

2. В масштабах Беларуси переработка только вновь образующихся отходов такого рода обеспечит ежегодный возврат в производство до 150 тыс. т чугуна и стали. Учитывая расчетную стоимость получаемого металла (150–200 тыс. дол. за 1 т), рентабельность производственных участков по переработке собственных дисперсных металлоотходов, организованных на металлургических и машиностроительных предприятиях, составит не менее 50–75 %, а возврат инвестиций – не более 9–12 месяцев. Производственная мощность таких участков может составлять от одной-двух до десятков тысяч тонн перерабатываемых отходов в год.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ровин, С. Л. Восстановление оксидов железа в ротационных печах / С. Л. Ровин, Л. Е. Ровин, Т. М. Заяц // *Литье и металлургия*. 2011. № 1. С. 38–45.
2. Лисиенко, В. Г. Вращающиеся печи: теплотехника, управление, экология / В. Г. Лисиенко, Я. М. Щелочков, М. Г. Ладыгичев. М.: Теплотехник, 1986. 544 с.
3. *Металлургическая теплотехника: в 2 т* / В. А. Кривандин [и др.]; под ред. В. А. Кривандина. М.: Металлургия, 1986. Т. 1. 486 с.

4. Ровин, С. Л. Использование ротационных печей для рециклинга железосодержащих отходов / С. Л. Ровин // Литье и металлургия. 2014. № 1. С. 56–61.
 5. Шмитц, К. Роторно-поворотная барабанная печь: современная технология в производстве вторичного алюминия / К. Шмитц // Металлургическое производство и технология металлургических процессов. 2006. № 1. С. 30–41.
 6. Зобнин, Б. Ф. Теплотехнические расчеты металлургических печей / Б. Ф. Зобнин, М. Д. Казяев, Б. И. Китаев. Минск: Металлургия, 1982. 360 с.
 7. Solid Works. Компьютерное моделирование в инженерной практике / А. А. Алямовский [и др.]. СПб.: БВХ-Петербург, 2005. 800 с.
 8. Sonavane, Y. Numerical Analysis of the Heat Transfer in the Wall of Rotary Kiln Using Finite Element Method ANSYS / Y. Sonavane, E. Specht. Germany: Magdeburg, 2009. 186 с.
 9. Блох, А. Г. Теплообмен излучением / А. Г. Блох, Ю. А. Журавлева, Л. Н. Рыжкова; под ред. А. Г. Блоха. М.: Энергоатомиздат, 1991. 432 с.
 10. Юсфин, Ю. С. Металлургия железа / Ю. С. Юсфин, Н. Ф. Пашков. М.: Академкнига, 2007. 464 с.
- Поступила 25.02.2015
Подписана в печать 24.04.2015
Опубликована онлайн 22.01.2016
- REFERENCES
1. Rovin S. L., Rovin L. E., Zayats T. M. (2011) Restoration of Iron Oxides in Rotary Kilns. *Litiyo i Metallurgiya* [Foundry and Metallurgy], (1), 38–45 (in Russian).
 2. Lisienko V. G., Shchelokov Ya. M., Ladygichev M. G. (1986) *Rotary Kilns: Heat Engineering, Control, Ecology*. Moscow, Teplotekhnika. 544 p. (in Russian).
 3. Krivandin V. A., Arutiunov V. A., Mastriukov B. S., Sborshchikov G. S., Egorov A. V., Kobakhidze V. V., Filimonov Iu. P., Shteingardt Rolf. (1986) *Metallurgical Heat Engineering. Vol. 1*. Moscow, Metallurgiya. 486 p. (in Russian).
 4. Rovin S. L. (2014) Usage of Rotary Kilns for Recycling of Iron-Containing Wastes. *Litiyo i Metallurgiya* [Foundry and Metallurgy], (1), 56–61 (in Russian).
 5. Shmits K. (2006) Rotary Tilting Drum Furnace: Modern Technology in Production of Secondary Aluminium. *Metallurgicheskoye Proizvodstvo i Tekhnologiya Metallurgicheskikh Protessov* [Metallurgical Production and Technology of Metallurgical Processes], (1), 30–41 (in Russian).
 6. Zobnin B. F., Kazyaev M. D., Kitaev B. I. (1982) *Thermotechnical Calculations for Metallurgical Furnaces*. Minsk, Metallurgiya. 360 p. (in Russian).
 7. Alyamovsky A. A., Sobachkin A. A., Odintsov E. V., Kharitonovich A. I., Ponomarev N. B. (2005) *Solid Works. Computer Simulation in Engineering Practice*. Saint-Petersburg, BVKh-Petersburg. 800 p. (in Russian).
 8. Sonavane Y., Specht E. (2009) *Numerical Analysis of the Heat Transfer in the Wall of Rotary Kiln Using Finite Element Method ANSYS*. Germany, Magdeburg. 186 p.
 9. Blokh A. G., Zhuravlyova Yu. A., Ryzhkova L. N. (1991) *Radiation Heat Transfer*. Moscow, Publishing House "Energoatomizdat". 432 p. (in Russian).
 10. Yousfin Yu. S., Pashkov N. F. (2007) *Iron Metallurgy*. Moscow, Publishing and Booksellers Centre "Akademkniga". 464 p. (in Russian).

Received: 25.02.2015

Accepted: 24.04.2015

Published online: 22.01.2016