

УДК 662.9

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТИПА ФУТЕРОВКИ НА ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТЬ ВОЗДУШНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ МЕТАЛЛА В КАМЕРНЫХ ПЕЧАХ

Гнитиев П.А., аспирант (paul.gnitiev@mail.ru)

Бирюков А.Б., д.т.н., профессор зав. кафедрой технической теплофизики (birukov.ttf@gmail.com)

Донецкий национальный технический университет
(83001, Украина, Донецк, ул. Артема, 58)

Аннотация. Для исследования влияния параметров футеровки на процесс воздушного охлаждения металла в камерных печах создана соответствующая математическая модель. Проведены численные эксперименты для различных схем компоновки футеровки: полностью плотный огнеупор, выполненный из шамотного кирпича; керамоволокнистое покрытие стен и свода при плотном огнеупоре подины; концептуальная футеровка всей камеры печи из керамоволокна. Обработка полученных результатов позволила наглядно продемонстрировать влияние типа футеровки на продолжительность охлаждения, тем самым показывая возможные резервы ускорения данной технологической операции.

Ключевые слова: воздушное охлаждение, сокращение операции воздушного охлаждения, термическая обработка, математическое моделирование, футеровка из керамоволокна, конвективный и лучистый теплообмен.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-11-759-763

В настоящее время в металлургии и машиностроении при производстве металлических изделий применяют термическую обработку в печах для управления их свойствами. Одним из важных участков операции термической обработки, влияющих на конечные свойства материалов, является процесс охлаждения. В зависимости от вида термической обработки, оно может быть как медленным, вместе с печью без подачи охладителя, так и быстрым – в жидкостях. В данной работе исследуется процесс воздушного охлаждения, который занимает среднее место по темпу охлаждения между быстрым в жидкостях и длительным с печью без подачи охладителя. Операция воздушного охлаждения имеет место при проведении такого вида термической обработки, как нормализация, а также как элемент изотермического отжига изделий.

В современных камерных печах термообработки используют два наиболее распространенных типа материалов для создания футеровки: плотный, выполненный из штучных шамотных огнеупоров или бетонных блоков [1 – 3] и керамоволокнистый, выполненный из современных низкоинерционных материалов [4, 5]. Несомненно, каждый тип футеровки напрямую влияет на продолжительность охлаждения металла. Из литературных источников известно, что процесс воздушного охлаждения металла в печах недостаточно полно исследован. Так, в частности, нет количественных представлений о влиянии параметров футеровки на продолжительность охлаждения [6].

Для исследования температурного поля металла и футеровки при воздушном охлаждении, а также продол-

жительности охлаждения при различной компоновке футеровки создана математическая модель, основанная на решении дифференциального уравнения нестационарной теплопроводности для металла и футеровки [7].

В данной модели принято использовать одномерную постановку для определения температуры металла и футеровки. Такой подход обусловлен тем, что по предварительным оценкам сопротивление отдаче тепла от наружной поверхности цилиндрической заготовки значительно превосходит внутренние термические сопротивления и, следовательно, тепловыми потоками в продольном и тангенциальном направлениях можно пренебречь. А для футеровки толщина огнеупора существенно меньше двух других размеров. В цилиндрической системе координат для заготовки круглого сечения запись уравнения выглядит следующим образом:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\lambda}{\rho c} \left(\frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial t}{\partial r} \right), \quad (1)$$

где t – температура, °С; τ – время, с; λ – коэффициент теплопроводности материала, Вт/(м·К); ρ – плотность материала, кг/м³; c – теплоемкость материала, Дж/(кг·К); r – радиус заготовки, м.

Для описания температурного поля по толщине футеровки дифференциальное уравнение нестационарной теплопроводности записывается в декартовой системе координат в одномерной постановке.

Для решения задачи необходимо выделить математическое описание частных особенностей текущего процесса в виде условий однозначности [8].

• *Геометрические условия.* Для цилиндрической заготовки в качестве характерного размера взят произвольный радиус в произвольном поперечном сечении (рис. 1, а). Для футеровки в качестве геометрических условий выступает произвольный отрезок, нормальный к поверхности футеровки (рис. 1, б).

• *Начальные условия.* В связи с тем, что рассматриваются изделия после предварительного нагрева, начальное температурное поле металла представляет собой температурное распределение, полученное после предшествующих операций нагрева и выдержки.

• *Зависимость теплофизических характеристик обрабатываемого материала, футеровки и воздуха от температуры.* Для математической модели аппроксимированы справочные значения соответствующих теплофизических величин. Полученные уравнения представлены в математической модели в виде функций температуры. Так, например, получено уравнение зависимости теплопроводности для стали 40 [9, 10]:

$$\lambda(t) = 51,7 - 3,76 \cdot 10^{-4}t - 8,576 \cdot 10^{-5}t^2 + 5,979 \cdot 10^{-8}t^3.$$

Основные теплофизические свойства воздуха аппроксимированы в виде следующих зависимостей:

$$\lambda(t) = 0,025 + 7,457 \cdot 10^{-5}t - 1,929 \cdot 10^{-8}t^2;$$

$$Pr(t) = 0,707 - 2448 \cdot 10^{-4}t + 5,605 \cdot 10^{-7}t^2 - 3,049 \cdot 10^{-10}t^3;$$

$$\nu(t) = 1,247 \cdot 10^{-5} + 1,02 \cdot 10^{-7}t + 6,302 \cdot 10^{-11}t^3,$$

где $Pr(t)$ – число Прандтля; $\nu(t)$ – кинематическая вязкость воздуха, m^2/s .

Соответствующие уравнения получены также для теплоемкостей стали и футеровки. Значения коэффициентов теплопроводности шамота и керамоволокна выбраны постоянными в диапазоне исследуемых температур и равными 1,1 и 0,1 Вт/(м·К) соответственно.

• *Граничные условия теплообмена* формулируются, исходя из наличия следующих видов теплообмена между металлом и футеровкой: конвективный теплообмен между металлом и воздухом, лучистый теплообмен металла с футеровкой, конвективный теплообмен

внутренней поверхности футеровки с охлаждающим воздухом. Также учитывается конвективный и лучистый теплообмен наружной поверхности футеровки с окружающей средой [11].

Тогда граничные условия теплообмена для металла:

$$\begin{cases} r = r_3 : -\lambda \frac{\partial t}{\partial r} = \alpha_{\text{конв}}^{\text{мет}} (t_M - t_{\text{cp}}) + \alpha_{\text{луч}}^{\text{мет-ф}} (t_M - t_\phi); \\ r = 0 : \lambda \frac{\partial t}{\partial r} = 0, \end{cases} \quad (2)$$

для футеровки:

$$\begin{cases} y = 0 : \lambda \frac{\partial t}{\partial y} = \alpha_{\text{конв}}^\phi (t_\phi - t_\Pi) - [\alpha_{\text{луч}}^{\text{мет-ф}} (t_M - t_\phi)] \frac{F_M}{F_\phi}; \\ y = s : -\lambda \frac{\partial t}{\partial y} = \alpha_{\text{ос}} (t_{\text{нар}}^\phi - t_{\text{ос}}), \end{cases} \quad (3)$$

где r_3 – радиус цилиндрической заготовки, м; $\alpha_{\text{конв}}^{\text{мет}}$ – коэффициент конвективной теплоотдачи от металла к охлаждающему воздуху, Вт/($m^2 \cdot K$); t_M – температура поверхности охлаждаемого металла, °С; t_{cp} – температура среды, омывающей металл, °С; $\alpha_{\text{луч}}^{\text{мет-ф}}$ – лучистый коэффициент теплоотдачи от металла к футеровке, Вт/($m^2 \cdot K$); t_ϕ – температура внутренней поверхности футеровки, °С; $\alpha_{\text{конв}}^\phi$ – коэффициент конвективной теплоотдачи от футеровки к охлаждающему воздуху в печи, Вт/($m^2 \cdot K$); t_Π – средняя температура в камере печи, °С; s – толщина футеровки, м; $\alpha_{\text{ос}}$ – коэффициент конвективной теплоотдачи от наружной поверхности футеровки в атмосферу, Вт/($m^2 \cdot K$); $t_{\text{нар}}^\phi$ – наружная температура футеровки, °С; $t_{\text{ос}}$ – температура окружающей среды, °С; F_M – площадь поверхности металла, m^2 ; F_ϕ – площадь поверхности футеровки, m^2 .

Значение t_{cp} определяется на основании теории турбулентных струй с учетом смешения свежего воздуха с газовой средой печной камеры, имеющей температуру t_Π .

Коэффициент конвективной теплоотдачи от металла может быть упрощенно определен при помощи известных критериальных уравнений, характеризующих простейшие гидродинамические схемы взаимодействия [12, 13]:

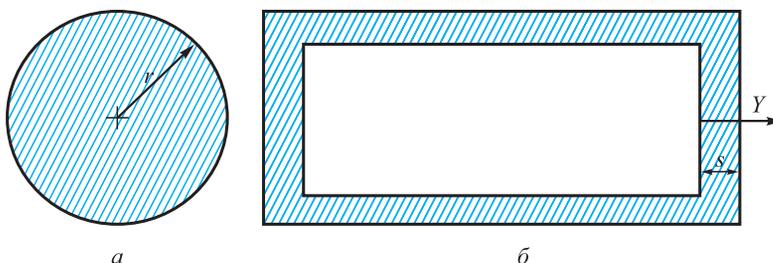


Рис. 1. Геометрические условия для металла и футеровки: S – толщина огнеупора; Y – выбранное положительное направление на координатной оси

Fig. 1. Geometric conditions for the metal and lining:

S – thickness of the refractory; Y – chosen positive direction of the coordinate axes

$$\alpha_{\text{конв}} = 0,28 \text{Re}^{0,6} \text{Pr}_{\text{ж}}^{0,36} \left(\frac{\text{Pr}_{\text{ж}}}{\text{Pr}_{\text{ст}}} \right)^{0,25}, \quad (4)$$

либо при помощи уравнений, полученных для условий, более точно соответствующих реальной картине натекания в работе [14].

При определении коэффициента лучистой теплоотдачи используется стандартный подход [15]:

$$\alpha_{\text{луч}} = \frac{C_{re} \left(\left[\frac{t_{\text{м}} + 273}{100} \right]^4 - \left[\frac{t_{\text{ф}} + 273}{100} \right]^4 \right)}{t_{\text{м}} - t_{\text{ф}}}. \quad (5)$$

При этом, при расчете приведенного коэффициента излучения C_{re} в системе тел «металл–футеровка» учитываются соответствующие угловые коэффициенты, степени черноты металла и внутренней поверхности футеровки.

Если некоторые элементы футеровки выполнены из различных материалов, то для каждого из них отдельно решается дифференциальное уравнение нестационарной теплопроводности с соответствующими условиями однозначности. При составлении условий однозначности для металла учитывается, что имеет место лучистый теплообмен с различными элементами футеровки, а для элементов футеровки предусмотрен учет лучистого теплообмена друг с другом.

Адекватность разработанной математической модели подтверждена путем сопоставления графиков изменения температуры, полученных при охлаждении поверхности цилиндрического тела в реальной печи и при использовании разработанной математической модели. Термограмма операции термообработки получена на одном из машиностроительных предприятий России.

Для анализа влияния типа футеровки на продолжительность воздушного охлаждения рассмотрены три типа компоновки футеровки:

- использование полностью плотной футеровки из шамотного кирпича толщиной 1 м;
- использование подины из огнеупорного бетона, а свода и стен из керамоволокна толщиной 0,2 м (наиболее распространенная компоновка для современных промышленных печей);
- использование керамоволокнистого покрытия всех стен, свода и подины печи – как концептуальный подход (полностью керамоволокнистая подина может быть создана путем размещения садки на отдельных бетонных подставках и заполнения остальной части подины керамоволокнистыми матами).

В качестве исследуемых тел выбраны типичные садки печи, состоящие из двух (a), четырех (b) и шести ($в$) цилиндрических заготовок диаметром 1 м и длиной

6 м (рис. 2). В данной модели исследована лишь часть операции термообработки, а именно участок воздушного охлаждения от 650 до 450 °С. Марка исследуемой стали – сталь 40. Также выделены четыре характерные количества расхода воздуха на охлаждение: 5, 10, 15 и 20 тыс. м³/ч. В результате проведены 36 различных численных экспериментов, полученные результаты представлены в удобном для сравнения виде (см. рис. 2).

Видно, что использование керамоволокна взамен плотного огнеупора существенно снижает требуемое время охлаждения. Например комбинированная футеровка (керамоволокнистое покрытие свода и стен и плотная подина) позволяет сократить продолжительность воздушного охлаждения на 31 – 45 % в зависимости от расхода воздуха и массы садки печи по сравнению со случаем, когда вся футеровка выполнена из плотного огнеупора. Дальнейшее сокращение продолжительности охлаждения может быть достигнуто с переходом от комбинированной футеровки к концептуальной полностью керамоволокнистой, при этом дополнительное сокращение продолжительности операции будет составлять от 10 до 22 % в зависимости от тех же параметров.

Таким образом, получена информация о влиянии параметров футеровки на продолжительность воздушного охлаждения, показаны способы ускорения данной операции. Эта информация имеет большое практическое значение, так как в современных условиях одним из лимитирующих звеньев операции термической обработки массивных изделий является скорость охлаждения.

Выводы. Для исследования влияния типа футеровки на процесс воздушного охлаждения металла в печах камерного типа создана математическая модель. С использованием разработанной модели проведены численные эксперименты для определения продолжительности охлаждения при различных параметрах футеровки. Таким образом, получено дальнейшее развитие научных представлений о реализации технологий воздушного охлаждения металла в печи за счет установления и систематизации данных о влиянии параметров футеровки камеры печи на время, необходимое для реализации процесса. Установлено, что в пределе при переходе от полностью плотного огнеупора к концептуальной полностью керамоволокнистой футеровке ускорение операции воздушного охлаждения составит 44 – 52 % в зависимости от расхода охладителя и массы садки печи.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Курбатов Ю.Л., Василенко Ю.Е. *Металлургические печи: Учеб. пособие.* – Донецк: ГВУЗ «ДонНТУ», 2013. – 388 с.
2. Кривандин В.А., Егоров А.В. *Тепловая работа и конструкция печей черной металлургии.* – М.: Металлургия, 1989. – 463 с.
3. Свинолобов Н.П., Бровкин В.Л. *Печи черной металлургии: Учеб. пособие для вузов.* – Днепропетровск: Пороги, 2004. – 154 с.

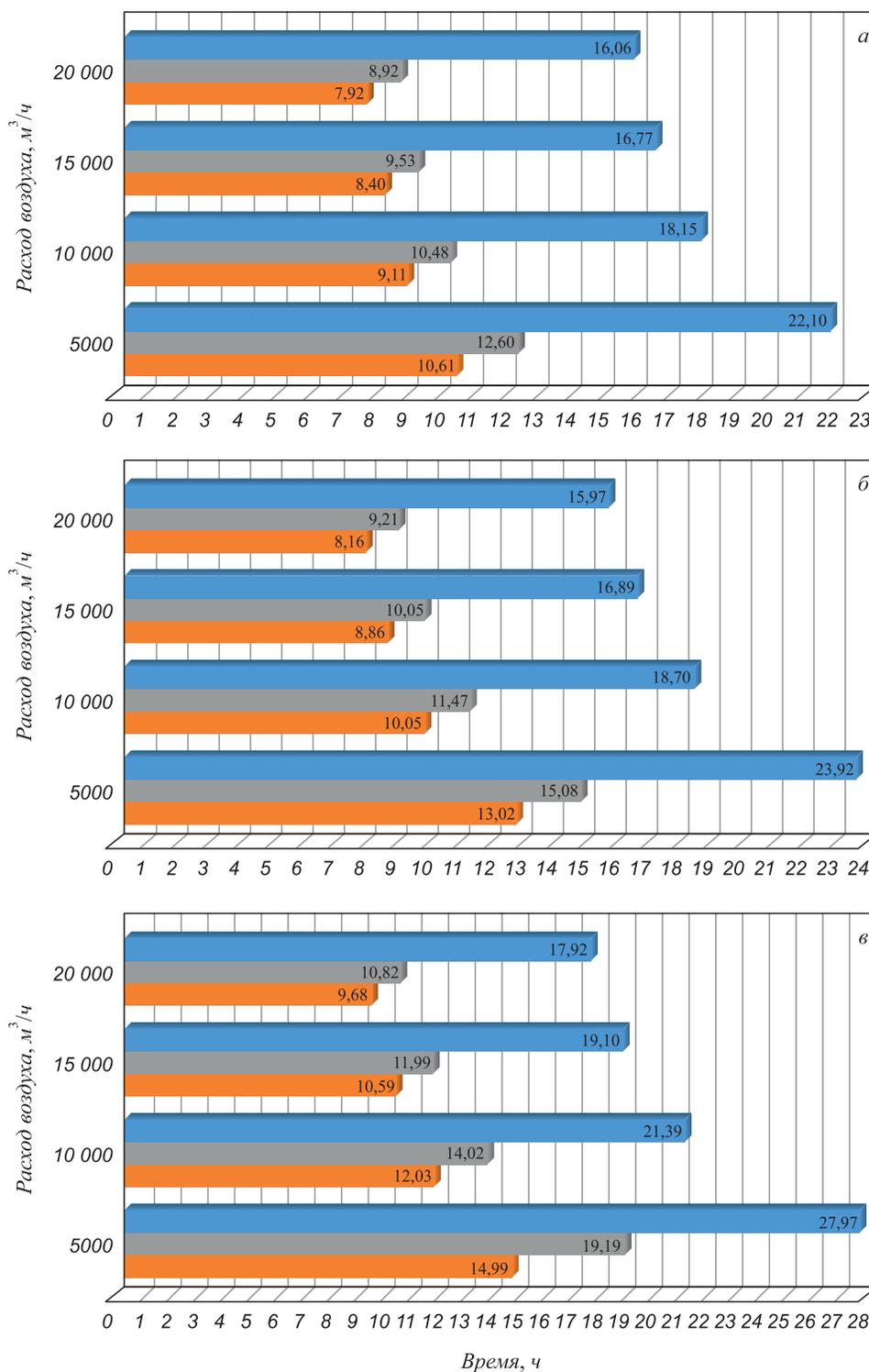


Рис. 2. Сравнение времени охлаждения при различных параметрах футеровки:

■ – плотная; ■ – П + К; ■ – керамоволокно

Fig. 2. Comparison of cooling time for different parameters of the lining:

■ – hard-textured; ■ – П + К; ■ – ceramic fiber

- Губинский В.И. Металлургические печи: Учеб. пособие. – Днепропетровск: НМетАУ, 2006. – 85 с.
- Оснос С.П., Гололобов О.И. Опыт применения современных волокнистых огнеупорных материалов и систем отопления // Строительные материалы и изделия. 2001. № 4. С. 130 – 136.
- Бирюков А.Б., Сафьянц С.М., Гнигив П.А. Анализ современного состояния технологии воздушного охлаждения металла в

- печах // Черная металлургия. Бюл. ин-та «Черметинформация». 2014. № 11. С. 42 – 46.
- Румянцев В.Д. Теория тепло- и массообмена: Учеб. пособие. – Днепропетровск: Пороги, 2006. – 532 с.
- Бирюков А.Б. Теплотехника непрерывной разливки стали и тепловой обработки заготовок. – Saarbrücken: LAMBERT Academic Publishing, 2015. – 444 с.

9. Казанцев Е.И. Промышленные печи: Справочное руководство для расчетов и проектирования. – 2-е изд., доп. и перераб. – М.: Metallurgiya, 1975. – 368 с.
10. Недопекин Ф.В., Гинкул С.И., Новикова Е.В. Теоретические и прикладные аспекты теплопередачи. – Донецк: ДонНУ, 2013. – 321 с.
11. Шорин С. Теплопередача. – М.: ГИЗЛСА, 1952. – 340 с.
12. Дымнич А.Х., Троянский А.А. Вопросы теплообмена в сталеплавильных процессах: Учебник-монография. – Донецк: ГВУЗ «ДонНТУ», 2009. – 581 с.
13. Себиси Т., Брэдшоу П. Конвективный теплообмен. Физические основы и вычислительные методы. – М.: Мир, 1987. – 592 с.
14. Гнитиев П.А. Конвективный теплообмен в печах при импульсном и безимпульсном режимах подачи теплоносителя // Промышленная теплотехника. 2015. № 2. С. 39 – 47.
15. Невский А.С. Лучистый теплообмен в печах и топках. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Metallurgiya, 1971. – 440 с.

Поступила 3 июня 2015 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2016. VOL. 59. NO. 11, pp. 759–763.

INVESTIGATION OF LINING PARAMETERS IMPACT ONTO METAL AIR-COOLING PROCESS IN CHAMBER FURNACE

P.A. Gnitiev, A.B. Biryukov

Donetsk National Technical University, Donetsk, Ukraine

Abstract. The appropriate mathematical model was created for the investigation of lining parameters impact onto metal air-cooling process in chamber furnace. Numerical computing for various lining composition was conducted: fully dense refractory material, made from chamotte brick; refractory ceramic fibers on the wall and arch with fully dense refractory of hearth; conceptual lining of entire chamber furnace with refractory ceramic fibers. Processing of the results allowed to illustrate the impact of the lining type on the length of air-cooling process, thereby showing possible reserves for accelerating of this process step.

Keywords: air-cooling, reducing air-cooling operation, thermal processing, mathematical modeling, refractory ceramic fibers, convective and radiative heat transfer.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-11-759-763

REFERENCES

1. Kurbatov Yu.L., Vasilenko Yu.E. *Metallurgicheskie pechi: uchebnoe posobie* [Metallurgical furnaces: Manual]. Donetsk: DonNTU, 2013, 388 p. (In Russ.).
2. Krivandin V.A., Egorov A.V. *Teplovaya rabota i konstruktsiya pechei chernoi metallurgii* [Thermal operation and construction of furnaces of ferrous metallurgy]. Moscow: Metallurgiya, 1989, 463 p. (In Russ.).
3. Svinolobov N.P., Brovkin V.L. *Pechi chernoi metallurgii: Uchebnoe posobie dlya vuzov* [Furnaces of ferrous metallurgy: Manual]. Dnepropetrovsk: Porogi, 2004, 154 p. (In Russ.).
4. Gubinskii V.I. *Metallurgicheskie pechi: Ucheb. posobie* [Metallurgical furnaces: Manual]. Dnepropetrovsk: NMetAU, 2006, 85 p. (In Russ.).
5. Osnos S.P., Gololobov O.I. Experience of application of modern fibrous refractory materials and heating systems. *Stroitel'nye materialy i izdeliya*. 2001, no. 4, pp. 130–136. (In Russ.).
6. Biryukov A.B., Saf'yants S.M., Gnitiev P.A. Analysis of the current state of air cooling technology of metal in furnaces. *Chernaya metallurgiya. Byul. in-ta "Chermetinformatsiya"*. 2014, no. 11, pp. 42–46. (In Russ.).
7. Rumyantsev V.D. *Teoriya teplo- i massoobmena: Uchebnoe posobie* [Theory of heat and mass transfer: Manual]. Dnepropetrovsk: Porogi, 2006, 532 p. (In Russ.).
8. Biryukov A.B. *Teplotekhnika nepreryvnoi razlivki stali i teplovoi obrabotki zagotovok* [Heat engineering of continuous steel casting and billets thermal treatment]. Saarbrücken: LAMBERT Academic Publishing, 2015, 444 p. (In Russ.).
9. Kazantsev E.I. *Promyshlennyye pechi. Spravochnoe rukovodstvo dlya raschetov i proektirovaniya* [Industrial furnaces. Reference manual for the calculation and design]. Moscow: Metallurgiya, 1975, 368 p. (In Russ.).
10. Nedopekin F.V., Ginkul S.I., Novikova E.V. *Teoreticheskie i prikladnye aspekty teploperenosa* [Theoretical and applied aspects of heat transfer]. Donetsk: DonNU, 2013, 321 p. (In Russ.).
11. Shorin S. *Teploperedacha* [Heat transfer]. Moscow: GIZLSA, 1952, 340 p. (In Russ.).
12. Dymnich A.Kh., Trojanskii A.A. *Voprosy teplomassoobmena v staleplavil'nykh protsessakh: uchebnik-monografiya* [Questions of heat and mass transfer in steelmaking processes]. Donetsk: DonNTU, 2009, 581 p. (In Russ.).
13. Cebeci Tuncer, Bradshaw Peter. *Physical and Computational Aspects of Convective Heat Transfer*. New York: Springer-Verlag Inc, 1984. (Russ.ed.: Cebeci T., Bradshaw P. *Konvektivnyi teploobmen. Fizicheskie osnovy i vychislitel'nye metody*. Moscow: Mir, 1987, 592 p.).
14. Gnitiev P.A. Convective heat transfer in furnaces under pulsed and non-pulsed modes of coolant supply. *Promyshlennaya teplotekhnika*. 2015, no. 2, pp. 39–47. (In Russ.).
15. Nevskii A.S. *Luchisty teploobmen v pechakh i topkakh* [Radiative heat transfer in furnaces and fire chambers]. Moscow: Metallurgiya, 1971, 440 p. (In Russ.).

Information about the authors:

P.A. Gnitiev, Postgraduate (paul.gnitiev@mail.ru)
A.B. Biryukov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Chair "Technical Thermophysics" (birukov.ttf@gmail.com)

Received June 3, 2015