

УДК 669.045

МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ СЛОЖНОГО ВНЕШНЕГО ТЕПЛООБМЕНА В ВЕРТИКАЛЬНОЙ КАМЕРНОЙ ПЕЧИ ДЛЯ ТЕРМООБРАБОТКИ ДЛИННОМЕРНЫХ ИЗДЕЛИЙ

Казяев М.Д., к.т.н., профессор кафедры «Теплофизика и информатика в металлургии»

Вохмяков А.В., к.т.н., доцент кафедры «Теплофизика и информатика в металлургии»

*Киселев Е.В., к.т.н., доцент кафедры «Теплофизика и информатика
в металлургии» (kiselev_tim@mail.ru)*

Спитченко Д.И., аспирант кафедры «Теплофизика и информатика в металлургии»

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

Аннотация. Расчет внешнего теплообмена в пламенных печах всегда осложняется недостаточными сведениями о характеристиках конвективно-го теплообмена. Особенно важно знать указанные характеристики в связи с применением на современных нагревательных печах скоростных горелок, обеспечивающих истечение газозвушной смеси со скоростью 100 – 150 м/с. Представлена методика и результаты исследования сложного внешнего теплообмена на действующей промышленной печи, оснащенной скоростными рекуперативными горелками и футерованной керамоволокнистыми блоками. Даны рекомендации по применению представленной методики и результатов исследований.

Ключевые слова: вертикальная камерная печь, рекуперативные скоростные горелки, конвективный теплообмен, методика исследований, результат расчетов, рекомендации.

DOI: 10.17073/0368-0797-2015-9-667-671

Современные нагревательные и термические печи оснащают скоростными горелками, обеспечивающими высокие скорости движения газов в рабочем пространстве и, как следствие, усиление конвективной составляющей сложного внешнего теплообмена.

В целях совершенствования методов расчета тепловой работы печей необходимо иметь данные о характеристиках теплообмена, получаемых при экспериментальных исследованиях.

Такие исследования были проведены на вертикальной печи для термообработки роторов турбин, представленной на рис. 1.

Футеровка печи выполнена из керамоволокнистых блоков. Печь оснащена двенадцатью скоростными рекуперативными горелками фирмы Elster Kromchroeder номинальной тепловой мощностью 250 кВт каждая.

Исследования тепловой работы печи проводили при нагреве поковки ротора турбины массой 28 т с целью нормализации по сложному режиму, приведенному на рис. 2.

На поверхность поковки были установлены восемь термпар, а в рабочем пространстве печи в каждой из пяти зон управления находились две термпары. По их показаниям были проведены расчеты осредненных температур греющей среды и металла на различных временных участках температурного режима.

Ниже приведена методика исследования сложного внешнего теплообмена, позволяющая рассчитывать пе-

редачу теплоты от печной среды к поверхности металла отдельно для лучистой и конвективной составляющих внешнего теплообмена.

На каждом временном участке рассчитывается приращение среднemasсовой температуры поковки ротора и по ней определяется количество теплоты, полученное металлом:

$$\Delta Q_M = G_M \bar{c}_M \Delta t_M, \text{ кДж.} \quad (1)$$

Далее рассчитывается плотность суммарного теплового потока, воспринятого металлом

$$\bar{q}_{M\Sigma} = \frac{\Delta Q_M}{F_M \Delta \tau}, \text{ кВт/м}^2, \quad (2)$$

где G_M – масса металла, кг; \bar{c}_M – средняя теплоемкость металла, кДж/(кгК); Δt_M – приращение среднemasсовой температуры металла, °С; F_M – поверхность металла, м²; $\Delta \tau$ – интервал времени нагрева металла на каждом этапе подъема температуры печи, с.

При наличии величины $\bar{q}_{M\Sigma}$ можно рассчитать средний суммарный коэффициент теплообмена между рабочим пространством печи и поверхностью металла (по балансу теплоты)

$$\bar{\alpha}_\Sigma = \frac{\bar{q}_{M\Sigma}}{t_{\text{печ}} - t_{\text{пов}}}, \text{ кВт/(м}^2 \cdot \text{К)}. \quad (3)$$

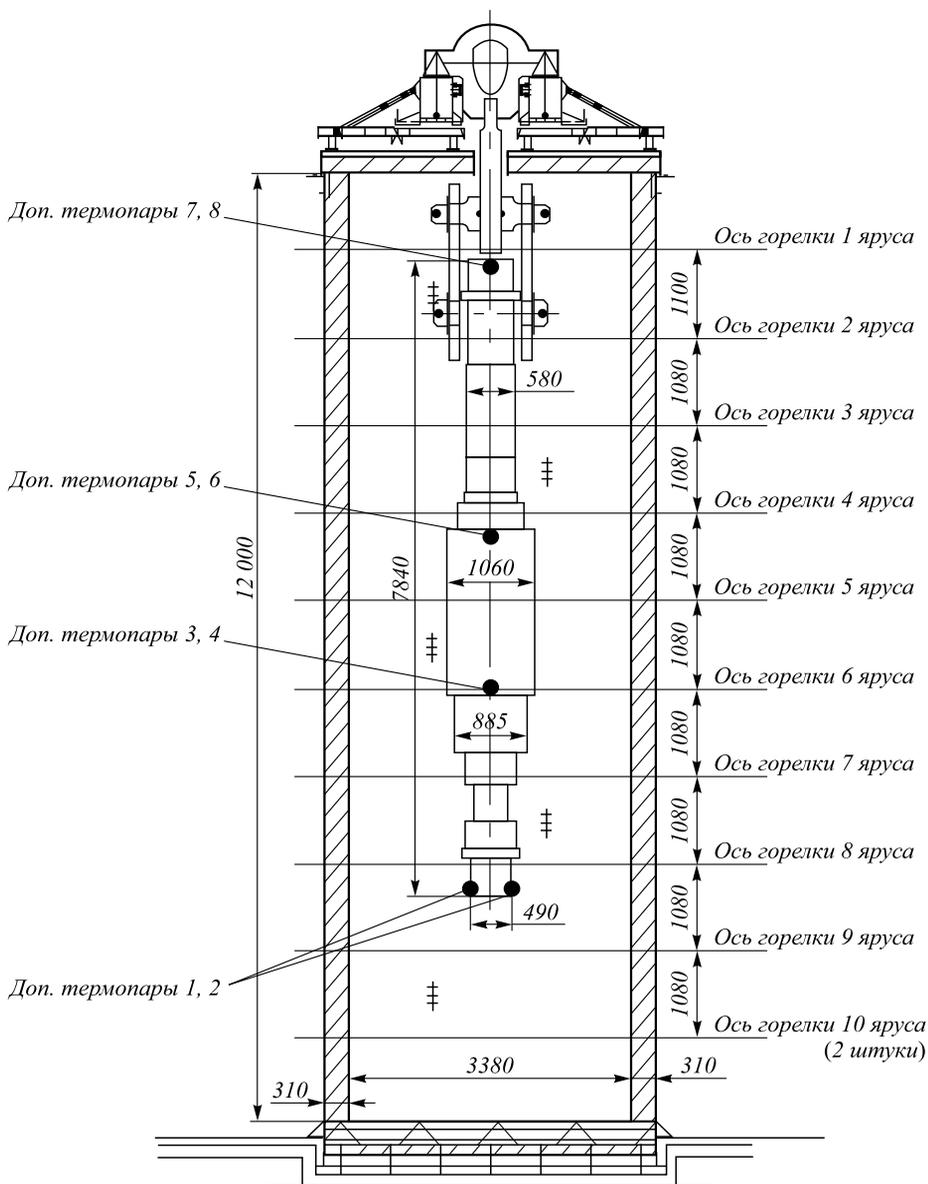


Рис. 1. Схема вертикальной термической печи с установкой опытного ротора массой 28 т и размещение основных (печных) и дополнительных термопар

Fig. 1. Scheme of the vertical heat-treating furnace equipped with a pilot rotor of 28 ton and location of the main (furnace) and additional thermocouples

Затем, по известным геометрическим и теплофизическим характеристикам печи, можно рассчитать среднюю плотность теплового потока излучением

$$\bar{q}_{м.л} = C_{гкм} \left[\left(\frac{\bar{T}_{печ}}{100} \right)^4 - \left(\frac{\bar{T}_{пов}}{100} \right)^4 \right], \text{ кВт/м}^2, \quad (4)$$

где $C_{гкм}$ – приведенный коэффициент излучения в системе газ–кладка–металл, Вт/(м²·К⁴).

Лучистый тепловой поток позволяет рассчитать коэффициент лучистого теплообмена

$$\bar{\alpha}_{л} = \frac{\bar{q}_{м.л}}{\bar{t}_{печ} - \bar{t}_{пов}}, \text{ кВт/(м}^2 \cdot \text{К)}. \quad (5)$$

По разности между $\bar{q}_{м.к}$ и $\bar{q}_{м.л}$ можно определить плотность теплового потока конвекцией

$$\bar{q}_{м.к\Sigma} = \bar{q}_{м.к} - \bar{q}_{м.л} \quad (6)$$

и далее – коэффициент конвективного теплообмена

$$\bar{\alpha}_{м.к} = \frac{\bar{q}_{м.к}}{\bar{t}_{печ} - \bar{t}_{пов}}, \text{ кВт/(м}^2 \cdot \text{К)}. \quad (7)$$

Учитывая сложный температурный режим печи и переменное поперечное сечение поковки ротора, производили расчет средней суммарной плотности теплового потока для всей поковки с учетом долевого массового коэффициента каждой части изделия, для каждой

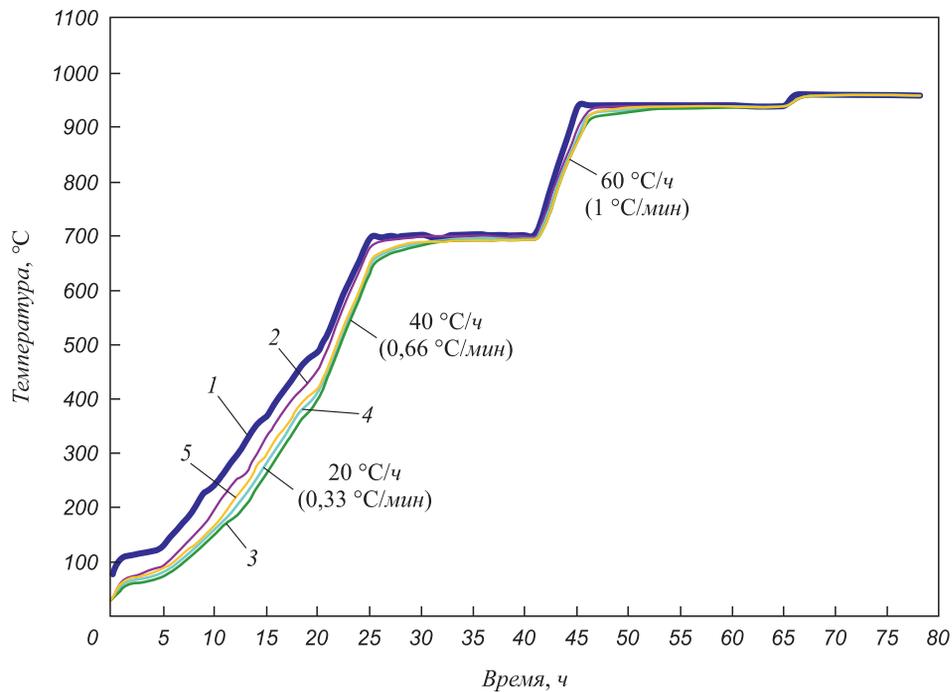


Рис. 2. Температурный режим печи при нагреве ротора массой 28 т при средней температуре:
 1 – по рабочему пространству без нижней зоны; 2 – по металлу, первая зона; 3 – по металлу, вторая зона; 4 – по металлу, третья зона; 5 – по металлу, четвертая зона

Fig. 2. Temperature furnace conditions at heating of a rotor of 28 ton at a mass average temperature of:
 1 – the workspace without the lower zone; 2 – metal, the first zone; 3 – metal, the second zone; 4 – metal, the third zone; 5 – metal, the fourth zone

зоны печи в отдельности и для каждого температурного интервала нагрева:

$$\bar{q}_{m\Sigma} = \left(\frac{G_1}{G_\Sigma}\right) q_{m\Sigma I} + \left(\frac{G_2}{G_\Sigma}\right) q_{m\Sigma II} + \left(\frac{G_3}{G_\Sigma}\right) q_{m\Sigma III} + \left(\frac{G_4}{G_\Sigma}\right) q_{m\Sigma IV}, \quad (8)$$

где $\left(\frac{G_1}{G_\Sigma}\right) \dots \left(\frac{G_4}{G_\Sigma}\right)$ – долевые массовые коэффициенты каждой части поковки ротора в каждой зоне печи; G_Σ – масса всей поковки ротора; $q_{m\Sigma I} \dots q_{m\Sigma IV}$ – значения плотностей суммарных тепловых потоков в каждой зоне печи, рассчитанные по показаниям термопар, установленных на металле и в рабочем пространстве печи.

Среднее значение лучистой составляющей внешнего теплообмена рассчитывали для всей печи с учетом долевого поверхностного коэффициента каждой части изделия, для каждой зоны печи в отдельности и для каждого температурного интервала нагрева:

$$\bar{q}_{m,\lambda\Sigma} = \left(\frac{F_1}{F_\Sigma}\right) q_{m,\lambda I} + \left(\frac{F_2}{F_\Sigma}\right) q_{m,\lambda II} + \left(\frac{F_3}{F_\Sigma}\right) q_{m,\lambda III} + \left(\frac{F_4}{F_\Sigma}\right) q_{m,\lambda IV}, \quad (8)$$

где $\left(\frac{F_1}{F_\Sigma}\right) \dots \left(\frac{F_4}{F_\Sigma}\right)$ – долевые поверхностные коэффициенты каждой части поковки ротора в каждой зоне печи; F_Σ – общая площадь поверхности поковки ротора; $q_{m,\lambda I} \dots q_{m,\lambda IV}$ – расчетные значения плотностей тепловых потоков излучением для каждой части изделия в каждой зоне печи.

В таблице приведены результаты измерений и расчета параметров теплообмена в камерной вертикальной печи, оснащенной скоростными рекуперативными горелками.

Анализ данных таблицы позволяет сделать некоторые выводы, касающиеся расчета теплообмена в камерной печи.

Прежде всего, следует констатировать тот факт, что применение скоростных горелок резко увеличивает конвективную составляющую внешнего теплообмена: доля конвекции в общем внешнем теплообмене в данном случае составляет в среднем во всем интервале температур 61 %.

С ростом температуры печи увеличиваются обе составляющие внешнего теплообмена: лучистая на 35 – 40 %, конвективная на 60 – 65 %.

Объяснением этому может быть увеличение скорости нагрева ротора по мере перехода от нагрева при температуре печи в интервале 100 – 500 °С к нагреву в интервале 700 – 940 °С, при котором возрастает тепловая нагрузка печи и происходит увеличение коли-

Результаты измерений и расчета параметров теплообмена в камерной вертикальной печи

The results of measurements and calculation of heat exchange parameters in the vertical chamber furnace

Интервал температур печи, °С	Средние температуры, °С		Плотности тепловых потоков, Вт/м ²			Коэффициенты теплообмена, Вт/(м ² ·К)		$\frac{q_{м.к}}{q_{м.л}}$
	\bar{t}_r	\bar{t}_n	$\bar{q}_{м.с}$	$\bar{q}_{м.л}$	$\bar{q}_{м.к}$	$\bar{\alpha}_л$	$\bar{\alpha}_к$	
100 – 500	311	239	4143	1556	2587	21,6	35,9	1,663
500 – 700	616	563	12 270	4297	7973	81,1	150,4	1,855
700 – 940	820	788	11 466	4921	6545	153,8	204,5	1,330

чества продуктов сгорания и кратности циркуляции газов. Как показали исследования тепловой работы других типов печей, кратность циркуляции газов, создаваемая скоростными горелками, может составлять $K_{ц} = 8 - 12 [1 - 8]$.

Следует подчеркнуть, что полученные соотношения конвективной и лучистой составляющих внешнего теплообмена можно применять для расчетов суммарных плотностей тепловых потоков только в случаях, подобных конструктивной обстановке, изображенной на рис. 1, которая характеризуется низким коэффициентом заполнения рабочего пространства печи металлом

$$K_3 = \frac{V_{м.}}{V_{р.п.}}$$

где $V_{м.}$ – объем нагреваемого металла, м³; $V_{р.п.}$ – объем рабочего пространства печи, м³.

В данном случае коэффициент заполнения рабочего пространства вертикальной печи составлял $K_3 = 0,045$.

Следует также отметить, что вертикальные термические печи всегда работают с низкими коэффициентами заполнения рабочего пространства металлом. Это обусловлено тепловой обработкой индивидуальной металлической продукции (роторов турбин, крупных валков прокатных станов и др.), которая требует особо качественного нагрева с высокой степенью равномерности температуры печных газов и поверхности нагреваемого металла, что вообще характерно для камерных печей с изменяющейся рабочей температурой, и особенно для печей термической обработки изделий.

Поскольку расчет конвективного теплообмена в сложной конструктивной обстановке всегда представляет большие трудности, то получение экспериментальных данных на действующих печах является необходимой и важной работой.

Представленный материал исследований является частью общего направления изучения конвективного теплообмена в печах различных конструкций, проводимого на кафедре теплофизики и информатики в металлургии Уральского федерального университета.

Получение большого количества данных о соотношении конвективной и лучистой составляющих внешнего теплообмена позволяет более точно рассчитывать суммарные тепловые потоки, передаваемые нагреваемому металлу, используя расчет лучистого теплообмена

$$q_{м.с} = q_{м.л} \left(1 + \frac{q_{м.к}}{q_{м.л}} \right),$$

где $q_{м.л}$ – расчетная плотность теплового потока излучением; $\frac{q_{м.к}}{q_{м.л}}$ – экспериментально полученное соотношение конвективной и лучистой составляющих внешнего теплообмена.

Рассмотренная в данной работе тема особенно важна при конструировании современных камерных печей с изменяющейся рабочей температурой, оснащаемых скоростными горелками, создающими прецедент резкого увеличения конвективной составляющей теплообмена. Поэтому любые экспериментальные исследования, проводимые на действующих печах, позволяют развивать и совершенствовать теорию теплообмена и разрабатывать новые конструкции современных печей, обеспечивающих качественный и производительный нагрев металла.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Казяев М.Д., Вохмяков А.М., Киселев Е.В. и др. Исследование тепловой работы камерных вертикальных термических печей с различными системами отопления и конструкциями футеровок. – В кн.: Сб. тр. Междунар. науч.-практич. конф. «Творческое наследие В.Е. Грум-Гржимайло». В 2-х частях. Ч. 1. – Екатеринбург: УрФУ, 2014. С. 246 – 259.
2. Казяев М.Д., Вохмяков А.М., Киселев Е.В. и др. Энергосберегающие технологии в промышленности. Печные агрегаты. Экология: Сб. матер. VII Междунар. науч.-практич. конф., посвященной 150-летию великого русского металлурга В.Е. Грум-Гржимайло. – М: Издательский дом МИСиС, 2014. С. 224 – 235.
3. Спитченко Д.И., Вохмяков А.М., Казяев М.Д. и др. Техническое перевооружение вертикальной камерной печи для термической обработки крупных поковок: Сб. докл. Междунар. науч.-практич. конф. «Теория и практика тепловых процессов в металлургии». – Екатеринбург: УрФУ, 2012. С. 367 – 370.

4. Михеев М.А., Михеева И.М. Краткий курс теплопередачи. – М. – Л.: Госэнергоиздат, 1960. – 208 с.
5. Зобнин Б.Ф. Нагревательные печи. – М.: Машиностроение, 1964. – 311 с.
6. Теплотехнические расчеты металлургических печей. / Под ред. А.С. Телегина. – М.: Металлургия, 1982. – 358 с.
7. Гусовский В.Г., Лившиц А.Е. Методики расчета нагревательных и термических печей. – М.: Теплотехник, 2004. – 395 с.
8. Расчет нагревательных и термических печей. / Под ред. В.М. Тымчака, В.Л. Гусовского. – М.: Металлургия, 1983. – 481 с.

Поступила 7 июля 2015 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2015. Vol. 58. No. 9, pp. 667–671.

COMPLICATED EXTERNAL HEAT EXCHANGE IN THE VERTICAL CHAMBER FURNACE DESIGNED FOR HEAT TREATMENT OF LONG PRODUCTS

Kazyayev M.D., *Cand. Sci. (Eng.), Professor of the Chair “Thermal Physics and Informatics in Metallurgy”*

Vokhmyakov A.V., *Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair “Thermal Physics and Informatics in Metallurgy”*

Kiselev E.V., *Cand. (Eng.), Assist. Professor of the Chair “Thermal Physics and Informatics in Metallurgy”*
(kiselev_tim@mail.ru)

Spitchenko D.I., *Postgraduate of the Chair “Thermal Physics and Informatics in Metallurgy”*

Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin (19, Mira str., Ekaterinburg, 620002, Russia)

Abstract. Calculation of the external heat exchange in the combustion furnaces is always complicated because of insufficient knowledge of the convective heat transfer characteristics. It is extremely important to know the above-mentioned characteristics as the modern heating furnaces are equipped with the high-speed burners providing for running of the gas-air mixture at a speed of 100 – 150 m/sec. The present article demonstrates a procedure and results of the investigation of the complicated external heat transfer in the operating industrial furnace equipped with high-speed recuperative burners and lined with ceramic-and-fibrous blocks. The article also includes the recommendations on application of the submitted procedure and results of the above-mentioned investigations.

Keywords: vertical chamber furnace, high-speed recuperative burners, convective heat transfer, procedure of investigations, results of calculations, recommendations.

DOI: 10.17073/0368-0797-2015-9-667-671

REFERENCES

1. Kazyayev M.D., Vokhmyakov A.M., Kiselev E.V., Spitchenko D.I., Kazyayev D.M., Eremin A.O. Investigation of thermal work of chamber vertical heat treatment furnaces with different heating systems and lining designs. In: *Sb. trudov mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Tvorcheskoe nasledie V.E. Grum-Grzhimailo»* [Papers of International scientific and practical conference «Artistic legacy of V.Ye. Grum-Grzhymaylo»]. Part. 1. Ekaterinburg: UrFU, 2014, pp. 246–259. (In Russ.).
2. Kazyayev M.D., Vokhmyakov A.M., Kiselev E.V., Spitchenko D.I., Kazyayev D.M. Energy-saving technologies in the industry. Furnace units. Ecology. In: *Sb. materialov VII Mezhdunarodnoi nauchno-praktich. konf. posvyashchennoi 150-letiyu velikogo russkogo metallurga V.E. Grum-Grzhimailo* [Materials of the 7th International Scientific-and- Practical conference dedicated the 150th anniversary of V.E. Groom-Grzhimailo, the famous Russian metallurgist]. Moscow: Izdatel'skii dom MISiS. NITU «MISiS», 2014, pp. 224–235. (In Russ.).
3. Spitchenko D.I., Vokhmyakov A.M., Kazyayev M.D., Kiselev E.V., Kazyayev D.M. Modernization of vertical chamber furnace for heat treatment of large forgings. In: *Sb. dokladov Mezhdunarodnoi nauchno-praktich. konf. “Teoriya i praktika teplovykh protsessov v metallurgii”* [Materials of the International Scientific-and-Practical Conference “Theory and Practice of Thermal Processes in Metallurgy”]. Ekaterinburg: UrFU, 2012, pp. 367–370. (In Russ.).
4. Mikheev M.A., Mikheeva I.M. *Kratkii kurs teploperedachi* [A brief course of heat transfer]. Moscow, Leningrad: Gosenergoizdat, 1960, 208 p. (In Russ.).
5. Zobnin B.F. *Nagrevatel'nye pechi* [Heating furnaces]. Moscow: Mashinostroenie, 1964, 311 p. (In Russ.).
6. *Teplotekhnicheskie raschety metallurgicheskikh pechei* [Thermotechnical calculation the metallurgical furnaces]. Telegin A.S. ed. Moscow: Metallurgiya, 1982, 358 p. (In Russ.).
7. Gusovskii V.G., Livshits A.E. *Metodiki rascheta nagrevatel'nykh i termicheskikh pechei* [Procedures of the heating and heat-treating furnace calculation]. Moscow: Teplotekhnika, 2004, 395 p. (In Russ.).
8. *Raschet nagrevatel'nykh i termicheskikh pechei* [Calculation of the heating and heat-treating furnaces]. Tymchak V.M., Gusovskii V.L. eds. Moscow: Metallurgiya, 1983, 481 p. (In Russ.).

Received July 7, 2015