



УДК 162.2:0043.94

DOI 10.17073/0368-0797-2021-2-89-94



ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ ТЕРМИЧЕСКОЙ ПЕЧИ С БАРАБАННЫМ МЕХАНИЗМОМ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ЗАГОТОВОК

Н. А. Черемискина¹, Н. В. Щукина¹, Н. Б. Лошкарев^{1,2}, В. В. Лавров¹

¹ Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (Россия, 620002, Екатеринбург, ул. Мира, 28)

² ОАО «Научно-исследовательский институт металлургической теплотехники» (ОАО «ВНИИМТ») (Россия, 620137, Екатеринбург, ул. Студенческая, 16)

Аннотация. Одной из наиболее энергоемких отраслей промышленности является черная металлургия. Металлургическая промышленность индустриально развитых стран ежегодно снижает удельный расход энергии на 1 т произведенной продукции примерно на 1,0 – 1,5 %. В России основной причиной высокой энергоемкости промышленной продукции являются устаревшие технологии. Энергосбережение в промышленном производстве связано с технологией производственного процесса, масштабами потребления топливно-энергетических ресурсов, поэтому поиск путей повышения энергоэффективности направлен на снижение затрат энергии любого вида при осуществлении конкретного процесса в конкретном технологическом или тепловом агрегате. Обеспечение экономичной работы печных агрегатов требует проведения детальных предварительных и поверочных расчетов, модернизации и внедрения современного оборудования. Представлены схема и особенности тепловой работы новой камерной печи барабанного типа для нагрева металлических изделий под закалку. Приведены технические характеристики печи, результаты теплотехнического расчета, теплового баланса и удельного расхода топлива применительно к созданной проектной конструкции. Разработанная схема работы печи имеет существенные преимущества в плане энергоэффективности топлива по сравнению с роликовыми и конвейерными способами организации движения металла. За счет размещения заготовок на барабане значительно снижена сложность их транспортировки. Предложенная конструкция является компактной, удобной к размещению в цехе благодаря малой протяженности. Применение рекуперативного топливосжигающего устройства позволяет эффективно использовать тепло отходящих газов в процессе нагрева. Разработанные конструкция и способ транспортировки изделий в рабочем пространстве печи могут быть использованы для термической обработки прутков, труб, полосы, а также сортового проката различной формы.

Ключевые слова: камерная печь, рекуперативное горелочное устройство, энергоэффективность, ресурсосбережение, черная металлургия, горение, теплообмен, тепловой баланс

Для цитирования: Черемискина Н.А., Щукина Н.В., Лошкарев Н.Б., Лавров В.В. Особенности конструкции термической печи с барабанным механизмом перемещения заготовок // Известия вузов. Черная металлургия. 2021. Т. 64. № 2. С. 89–94. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-2-89-94>

DESIGN FEATURES OF THERMAL FURNACE WITH A DRUM MECHANISM FOR BLANKS TRANSPORTATION

N. A. Cheremiskina¹, N. V. Shchukina¹, N. B. Loshkarev^{1,2}, V. V. Lavrov¹

¹ Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin (19 Mira str., Yekaterinburg 620002, Russian Federation)

² OJSC “Scientific Research Institute of Metallurgical Heat Engineering” (“VNIIMT”) (16 Studencheskaya str., Yekaterinburg 620137, Russian Federation)

Abstract. One of the most energy-intensive industries is ferrous metallurgy. The metallurgical sector in industrially developed countries is reducing its specific energy consumption per one ton of products by approximately 1.0 – 1.5 % per annum. In Russia, obsolete technology is the main reason for the high-energy intensity of industrial product. Energy saving in industrial production is associated with production technology and the scope of fuel and energy resources consumption. Therefore, ways to improve energy efficiency focus on reducing energy consumption of any kind during a specific process in a specific process or thermal unit. Ensuring the economical operation of furnace units requires detailed preliminary and verification analyses, upgrading and introduction of state-of-the-art equipment. The study presents a flow diagram and features of thermal operation of a new drum-type chamber furnace for heating metal products for quenching. The technical parameters of the furnace, the results of the thermo-technical analysis, the heat balance and the specific fuel consumption as applicable to the created design are also presented. The flow diagram of the furnace has significant advantages in terms of the energy efficiency of fuel as compared to the roller and conveyor methods of metal transportation. Placing blanks on the drum significantly reduces the complexity of their transportation. Thanks to its small length the proposed design is compact and easy to place in a workshop. The use of a recuperative fuel burning device allows the efficient use of the heat of waste gases in the heating process. The proposed design and method of products transportation in the furnace working space can be used for the heat treatment of bars, pipes, strips, as well as rolled steel of various shapes.

Keywords: chamber furnace, recuperative burner, energy efficiency, resource saving, ferrous metallurgy, combustion, heat exchange, heat balance

For citation: Chermiskina N.A., Shchukina N.V., Loshkarev N.B., Lavrov V.V. Design features of thermal furnace with a drum mechanism for blanks transportation. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2021, vol. 64, no. 2, pp. 89–94. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-2-89-94>

ВВЕДЕНИЕ

Черная металлургия является одной из наиболее энергоемких отраслей промышленности. Мировой прогресс металлургической промышленности индустриально развитых стран задает темп на неуклонное снижение удельных расходов энергии на 1 т произведенной продукции примерно на 1,0–1,5 % в год. Основной причиной высокой энергоемкости промышленной продукции, произведенной в России, являются устаревшие технологии (технологические и тепловые агрегаты) для получения электроэнергии и тепла. Энергосбережение в промышленном производстве связано с технологией производственного процесса, масштабами потребления топливно-энергетических ресурсов, поэтому поиск путей повышения энергоэффективности направлен на снижение затрат энергии любого вида при осуществлении конкретного процесса в конкретном технологическом или тепловом агрегате. Все это требует проведения детальных предварительных и поверочных расчетов печных агрегатов, модернизации и внедрения современного оборудования и узлов для обеспечения экономичности работы печных агрегатов. По мнению многих отечественных [1–3] и зарубежных [4–20] исследователей значительное сокращение энергоемкости металлопродукции может быть достигнуто только за счет внедрения передовых энергоэффективных металлургических технологий.

Новая конструкция камерной печи

БАРАБАННОГО ТИПА

Применяемые в настоящее время конструкции термических печей имеют множество недостатков. Распространенными способами транспортировки металла в таких печах являются роликовые и конвейерные поды. Нагревательные роликовые печи, устанавливаемые в потоке прокатных станов, имеют большую протяженность, поэтому их сложно размещать в действующих цехах.

Учеными ОАО «ВНИИМТ» совместно с кафедрой «Теплофизика и информатика в металлургии» Уральского федерального университета разработана новая конструкция камерной печи барабанного типа для нагрева заготовок перед закалкой.

При реализации предложенной конструкции с транспортировкой проката в термических печах с барабанным механизмом, существенно уменьшающим габариты печи, упрощающим механизмы транспортировки и не имеющим водоохлаждаемых элементов, можно ожидать значительного снижения затрат топливно-энергетических ресурсов. Конструкция обеспечивает

постоянство температуры в рабочем пространстве печи за счет выдачи нагретого металла мелкими порциями. Заготовка проходит свой путь в печи за 30 мин, одновременно осуществляется загрузка новой холодной заготовки и проводится выгрузка нагретой.

Нагрев металлических изделий в камерной печи осуществляется рекуперативными горелочными устройствами типа ГСР-150, которые работают следующим образом: газ истекает из сопла в камеру горения и смешивается с частью воздуха, подогретого в теплообменнике до высокой температуры, и частично сгорает. Дополнительный воздух подается через кольцевой зазор между соплом камеры горения и торцевой стенкой горелки и дожигает топливо в рабочем пространстве печи, смешиваясь с продуктами неполного горения. Продукты горения из рабочего пространства удаляются через встроенные в горелки рекуператоры в сборный металлический, теплоизолированный дымопровод.

Схематично конструкция рассматриваемой термической печи для нагрева металла под закалку представлена на рис. 1.

Вращающийся барабан осуществляет транспортировку проката для процесса нагрева. Барабан изготовлен из жаропрочной стали, выполненной на основе никеля, и способен к долгосрочной работе под напряжением в условиях повышенных температур без заметной остаточной деформации и разрушения.

Металлические изделия в процессе транспортировки размещаются радиально по отношению к барабану в специальных гнездах с зацепами, расположенными на наружной поверхности. Такой способ транспортировки обеспечивает равномерный двухсторонний нагрев металла. За счет минимизации времени нагрева существенно сокращаются габариты печи и угар металла. Металлоконструкции барабана выполнены из жаропрочной стали, центральная часть барабана – в виде спиц из жаропрочной стали, футерована волокнистыми огнеупорными материалами.

Вращение барабана производится шаговым двигателем, что обеспечивает установку барабана в положение «загрузка – выгрузка» с высокой точностью. Цапфы барабана и подшипниковые узлы вынесены за пределы рабочего пространства, что увеличивает срок их службы. Для обеспечения нормальных условий работы подшипниковых узлов применяется воздушное охлаждение вала барабана, выполненного в виде толстостенной трубы.

Отопление печи проводят через автоматические скоростные рекуперативные горелки, позволяющие эффективно использовать теплоту горения, подогревая воздух, идущий на горение, до высоких температур. Продукты горения удаляют через встроенные в горелки

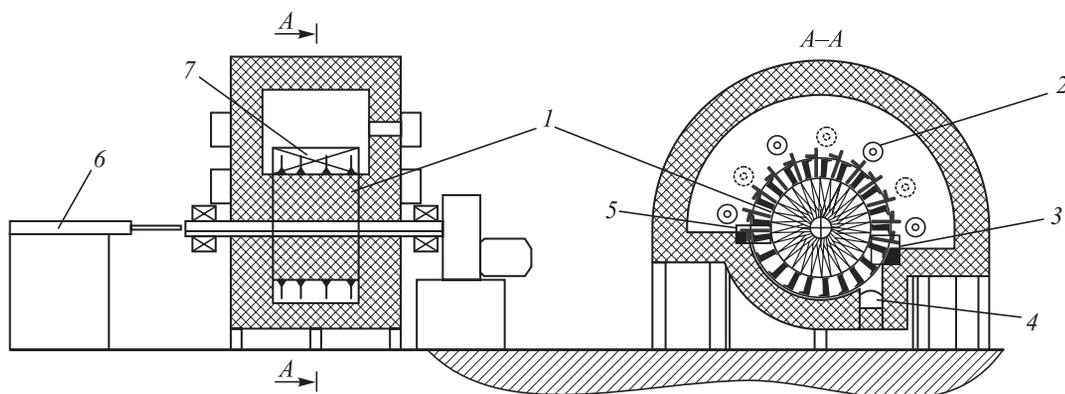


Рис. 1. Схема конструкции термической печи:

1 – барабан с зубьями; 2 – топливосжигающие устройства; 3 – выгрузочное окно; 4 – окалиносорбник; 5 – загрузочное окно; 6 – толкатель; 7 – нагреваемые заготовки

Fig. 1. Scheme of the heating furnace:

1 – drum with teeth; 2 – fuel combustion device; 3 – discharge window; 4 – scale collector; 5 – charge window; 6 – pusher; 7 – heated billets

рекуператоры в сборный металлический, теплоизолированный дымопровод.

Свод печи и торцевые стены футерованы волокнистыми огнеупорными материалами, что позволяет снизить потери тепла теплопроводностью через футеровку печи в окружающую среду. Нижнее строение печи футеровано огнеупорным кирпичом.

ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ НОВОЙ КОНСТРУКЦИИ КАМЕРНОЙ ПЕЧИ БАРАБАННОГО ТИПА

Теплотехнические расчеты включают в себя расчет горения топлива, нагрева металла, статей теплового баланса и удельного расхода топлива [21 – 23].

В результате расчета горения природного газа определен объем продуктов горения при коэффициенте расхода воздуха $\alpha = 1,05$, который составил $V_{\alpha} = 10,94 \text{ м}^3/\text{м}^3$. В результате расчета нагрева металла определены масса садки $G_M = 522 \text{ кг}$, удельная производительность печи $P_{\text{а.п}} = 135,348 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$.

По $i - t$ диаграммам [21 – 23] определены балансовые (t_0° ; t_{α}°) температуры горения $t_0^{\circ} = 1940 \text{ }^{\circ}\text{C}$; $t_{\alpha}^{\circ} = 2000 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Температура дымовых газов определена [23] по формуле $t_r = t_{\alpha}^{\circ} \eta_{\text{пир}} = 2000 \cdot 0,58 = 1160 \text{ }^{\circ}\text{C}$, где $\eta_{\text{пир}} = 0,58$ (для камерных печей) – безразмерный пирометрический коэффициент.

Температура металла на выходе из печи составляет $880 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Поскольку расчетная температура дымовых газов на $280 \text{ }^{\circ}\text{C}$ превышает конечную температуру нагретого металла, то предложенный технологический процесс осуществим при выбранном топливе и условиях его сжигания.

Полезное тепловое напряжение $q_{\text{м.п}}$ поверхности пода найдено с учетом приращения теплосодержания металла за время нагрева по формуле [23]:

$$q_{\text{м.п}} = p_{\text{п}} \Delta i_{\text{м}},$$

где $p_{\text{п}}$ – удельная производительность, $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$; $\Delta i_{\text{м}}$ – приращение энтальпии материала в интервале температур нагрева от t_0 до $t_{\text{м}}$ (τ) с учетом среднего для рассматриваемого интервала значения удельной теплоемкости $c_{\text{м}}$ материала.

Удельная теплоемкость $c_{\text{м}} = 0,1645 \text{ ккал}/(\text{кг} \cdot \text{ }^{\circ}\text{C})$ [26] для стали Гадфильда в интервале температур $20 - 880 \text{ }^{\circ}\text{C}$. В этом случае тепловое напряжение $q_{\text{м.п}}$ составит $33\,685,67 \text{ Вт}/\text{м}^2$.

Тепловое напряжение свободного объема найдено с учетом определения коэффициента полезного действия η печи по формуле

$$\eta = \frac{\Delta i_{\text{м}}}{7b} = \frac{214}{7 \cdot 100} = 0,30571 \text{ Вт}/\text{м}^3,$$

где b – удельный расход условного топлива, $\text{кг у.т.}/\text{т}$.

Таким образом, тепловое напряжение, отнесенное к свободному объему рабочего пространства (без учета горелочных каналов), составит

$$q_{\text{об}} = \frac{q_{\text{м.п}}}{\eta H_{\text{пр}}} = \frac{28\,964,47}{0,30571 \cdot 0,727} = 130\,321,37 \text{ Вт}/\text{м}^3,$$

где $H_{\text{пр}}$ – максимальный диаметр факела, м .

С учетом найденных величин длины факела $l_{\text{ф}} = 3,175 \text{ м}$ и теплового напряжения печи $q_{\text{об}} = 130\,321,34 \text{ Вт}/\text{м}^3$ предложено использовать семь рекуперативных горелочных устройств ГСР-150, которые необходимо разместить на передней и задней стенках печи. Конструкция горелки, разработанная сотрудниками ОАО «ВНИИМТ», представлена на рис. 2.

Общий расход топлива B составил $0,131 \text{ м}^3/\text{с}$ ($124,2 \text{ м}^3/\text{ч}$), расход топлива на одну горелку $b_r = 17,74 \text{ м}^3/\text{ч}$. С учетом расхода получен сводный тепловой баланс печи (см. таблицу). Статья полезно затрачиваемой теплоты при таких условиях и расходе значительно выше по сравнению с термической обработкой

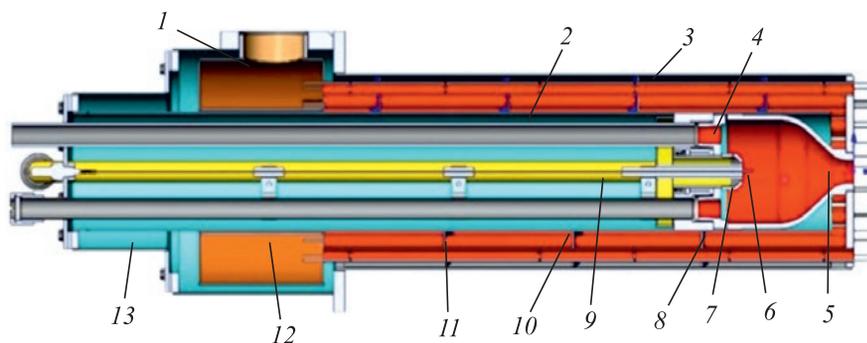


Рис. 2. Горелка скоростная рекуперативная ГСР-150:

1 – патрубок отвода продуктов горения; 2 – внутренняя труба теплообменника; 3 – наружная труба теплообменника; 4 – разделительная стенка; 5 – керамическая камера горения; 6 – электрод розжига и контроля пламени; 7 – газовое сопло; 8 – коллектор подвода газа; 9 – газовый патрубок; 10 – винтовая перегородка; 11 – турбулизирующие кольца; 12 – сборный коллектор дымовых газов; 13 – воздушный коллектор

Fig. 2. GSR-150 high-speed recuperative burner:

1 – branch pipe for combustion products removal; 2 – inner tube of heat exchanger; 3 – outer tube of heat exchanger; 4 – dividing wall; 5 – ceramic combustion chamber; 6 – electrode for ignition and flame control; 7 – gas nozzle; 8 – gas supply collector; 9 – gas pipe; 10 – screw shape partition wall; 11 – turbulizing rings; 12 – prefabricated collector of flue gases; 13 – air collector

Тепловой баланс камерной печи барабанного типа

Heat balance of a drum-type chamber furnace

Приход			Расход		
Статья прихода	кВт	%	Статья расхода	кВт	%
Химическая теплота топлива	145,9	75,4	Полезные затраты теплоты	97,8	50,6
Физическая теплота подогретого воздуха	47,6	24,6	Потери теплоты с уходящими газами	74,6	38,6
			Потери теплоты теплопроводностью	21,1	10,8
Итого	193,5	100	Итого	193,5	100

в роликовых или конвейерных печах. Это обуславливается применением воздушного охлаждения вала центральной части барабана вместо сложного и дорогостоящего водяного охлаждения.

Выводы

В результате работы выполнены теплотехнические расчеты камерной печи барабанного типа применительно к разработанной проектной конструкции. Представленная схема работы печи имеет существенные преимущества в плане энергоэффективности использования топлива по сравнению с роликовыми

и конвейерными способами организации движения металла. За счет размещения заготовок на барабане значительно снижена сложность их транспортировки. Предложенная конструкция является компактной, удобной к размещению в цехе благодаря малой протяженности. Применение рекуперативного топливосжигающего устройства позволяет эффективно использовать тепло отходящих газов в процессе нагрева. Разработанные конструкция и способ транспортировки изделий в рабочем пространстве печи могут быть использованы для термической обработки прутков, труб, полосы, а также сортового проката различной формы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

1. Volkov E.P., Prokhorov V.B., Arkhipov A.M., Kirichkov V.S., Kaverin A.A. Furnace devices aerodynamics optimization for fuel combustion efficiency improvement and nitrogen oxide emission reduction // *Journal of Physics: Conference Series*. 2017. Vol. 891. No. 1. Article 012220. <http://doi.org/10.1088/1742-6596/891/1/012220>
2. Anshakov A.S., Aliferov A.I., Sinitsyn V.A., Domarov P.V. Simulation of heat and mass transfer in a shaft of plasma electric furnace, when utilizing technogeneous wastes // *Journal of Physics: Conference Series*. 2017. Vol. 899. No. 9. Article 092003. <http://doi.org/10.1088/1742-6596/899/9/092003>

1. Volkov E.P., Prokhorov V.B., Arkhipov A.M., Kirichkov V.S., Kaverin A.A. Furnace devices aerodynamics optimization for fuel combustion efficiency improvement and nitrogen oxide emission reduction. *Journal of Physics: Conference Series*. 2017, vol. 891, no. 1, article 012220. <http://doi.org/10.1088/1742-6596/891/1/012220>
2. Anshakov A.S., Aliferov A.I., Sinitsyn V.A., Domarov P.V. Simulation of heat and mass transfer in a shaft of plasma electric furnace, when utilizing technogeneous wastes. *Journal of Physics: Conference Series*. 2017, vol. 899, no. 9, article 092003. <http://doi.org/10.1088/1742-6596/899/9/092003>

3. Матюхин В.И., Ярошенко Ю.Г., Матюхина А.В., Дудко В.А., Пуненков С.Е. Использование природного газа при отоплении шахтных печей ваграночного типа для повышения энергоэффективности технологических процессов выплавки чугуна // Известия вузов. Черная металлургия. 2017. Т. 60. № 8. С. 629–636. <http://doi.org/10.17073/0368-0797-2017-8-629-636>
4. Vasserman A.A., Shutenko M.A. Methods of increasing thermal efficiency of steam and gas turbine plants // Journal of Physics: Conference Series. 2017. Vol. 891. No. 1. Article 012248. <http://doi.org/10.1088/1742-6596/891/1/012248>
5. Giovannoni V., Sharma R.N., Raine R.R. Thermal performances of a small-scale regenerative combustion chamber for ultra-micro gas turbine // Combustion Science and Technology. 2017. Vol. 189. No. 11. P. 1859 – 1877. <http://doi.org/10.1080/00102202.2017.1333986>
6. Sai Varun V., Tejesh P., Prashanth B.N. Design and development of tilting rotary furnace // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 310. No. 1. Article 012084. <http://doi.org/10.1088/1757-899X/310/1/012084>
7. Jabari F., Mohammadi-ivatloo B., Bannae Sharifian M.B., Nojavan S. Design and robust optimization of a novel industrial continuous heat treatment furnace // Energy. 2018. Vol. 142. P. 896–910. <http://doi.org/10.1016/j.energy.2017.10.096>
8. Seo M.-J., Yoo J.-C. Lab-on-a-Disc platform for automated chemical cell lysis // Sensors (Switzerland). 2018. Vol. 18. No. 3. Article 687. <http://doi.org/10.3390/s18030687>
9. Akhlaghi M., Tayebifard S.A., Salahi E., Shahedi A.M., Schmidt G. Self-propagating high-temperature synthesis of Ti₃AlC₂MAX phase from mechanically-activated Ti/Al/graphite powder mixture // Ceramics International. 2018. Vol. 44. No. 8. P. 9671–9678. <http://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.02.195>
10. Xue Y., Yu B., Li W., Feng Sh., Wang Yu., Huang Sh., Zhang C., Qiao Z. Effect of annealing atmosphere on properties of Cu₂ZnSn(S, Se)₄ films // Superlattices and Microstructures. 2017. Vol. 112. P. 311–317. <http://doi.org/10.1016/j.spmi.2017.09.036>
11. Bu Y.-K. Study on design and operation of cyclohexanone wastewater incineration waste heat boiler // Petrochemical Equipment. 2017. Vol. 46. No. 6. P. 18–23. <http://doi.org/10.3969/j.issn.1000-7466.2017.06.004>
12. Shu Q., Liu J., Lan X., Long L., Yang J., Wang C., Yang Y. Correction analysis for the deviation between vacuum furnace and material growth temperatures // Vacuum. 2017. Vol. 144. P. 21–26. <http://doi.org/10.1016/j.vacuum.2017.07.006>
13. Bessada C., Zanghi D., Pauvert O., Maksoud L., Gil-Martin A., Sarou-Kanian V., Melin P., Brassamin S., Nezu A., Matsuura H. High temperature EXAFS experiments in molten actinide fluorides: The challenge of a triple containment cell for radioactive and aggressive liquids // Journal of Nuclear Materials. 2017. Vol. 494. P. 192–199. <http://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2017.07.023>
14. Sobota T. Improving steam boiler operation by on-line monitoring of the strength and thermal performance // Heat Transfer Engineering. 2018. Vol. 39. No. 13-14. P. 1260–1271. <http://doi.org/10.1080/01457632.2017.1363641>
15. Dzierwa P., Taler D., Trojan M., Taler J. Optimum Heating of Boiler Evaporator // Heat Transfer Engineering. 2018. Vol. 39. No. 13-14. P. 1217–1226. <http://doi.org/10.1080/01457632.2017.1363630>
16. Zhang N., Li Z., Zheng J., Yang X., Shen K., Zhou T., Zhang Y. Multielemental analysis of botanical samples by ICP-OES and ICP-MS with focused infrared lightwave ashing for sample preparation // Microchemical Journal. 2017. Vol. 134. P. 68–77. <http://doi.org/10.1016/j.microc.2017.05.006>
17. Motyl P., Łach J. Numerical analysis for the low-emission dual fuel combustion in a boiler type OP-230 // European Biomass Conference and Exhibition Proceedings. 2017. Vol. 2017. No. 25th EUBCE. P. 666–679. <https://doi.org/10.5071/25theubce2017-2bv.1.44>
18. Fiedler T., Groß R., Rösler J., Bäker M. Damage mechanisms of metallic HVOF-coatings for high heat flux application // Surface and Coatings Technology. 2017. Vol. 316. P. 219–225. <http://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2017.03.037>
3. Matyukhin V.I., Yaroshenko Y.G., Matyukhina A.V., Dudko V.A., Punenkov S.E. The use of natural gas for heating of shaft furnaces of cupola type to increase the technological processes efficiency of pig iron smelting. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2017, vol. 60, no. 8, pp. 629–636. (In Russ.). <http://doi.org/10.17073/0368-0797-2017-8-629-636>
4. Vasserman A.A., Shutenko M.A. Methods of increasing thermal efficiency of steam and gas turbine plants. *Journal of Physics: Conference Series*. 2017, vol. 891, no. 1, article 012248. <http://doi.org/10.1088/1742-6596/891/1/012248>
5. Giovannoni V., Sharma R.N., Raine R.R. Thermal performances of a small-scale regenerative combustion chamber for ultra-micro gas turbine. *Combustion Science and Technology*. 2017, vol. 189, no. 11, pp. 1859–1877. <http://doi.org/10.1080/00102202.2017.1333986>
6. Sai Varun V., Tejesh P., Prashanth B.N. Design and development of tilting rotary furnace. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018, vol. 310, no. 1, article 012084. <http://doi.org/10.1088/1757-899X/310/1/012084>
7. Jabari F., Mohammadi-ivatloo B., Bannae Sharifian M.B., Nojavan S. Design and robust optimization of a novel industrial continuous heat treatment furnace. *Energy*. 2018, vol. 142, pp. 896–910. <http://doi.org/10.1016/j.energy.2017.10.096>
8. Seo M.-J., Yoo J.-C. Lab-on-a-Disc platform for automated chemical cell lysis. *Sensors (Switzerland)*. 2018, vol. 18, no. 3, article 687. <http://doi.org/10.3390/s18030687>
9. Akhlaghi M., Tayebifard S.A., Salahi E., Shahedi A.M., Schmidt G. Self-propagating high-temperature synthesis of Ti₃AlC₂MAX phase from mechanically-activated Ti/Al/graphite powder mixture. *Ceramics International*. 2018, vol. 44, no. 8, pp. 9671–9678. <http://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.02.195>
10. Xue Y., Yu B., Li W., Feng Sh., Wang Yu., Huang Sh., Zhang C., Qiao Z. Effect of annealing atmosphere on properties of Cu₂ZnSn(S, Se)₄ films. *Superlattices and Microstructures*. 2017, vol. 112, pp. 311–317. <http://doi.org/10.1016/j.spmi.2017.09.036>
11. Bu Y.-K. Study on design and operation of cyclohexanone wastewater incineration waste heat boiler. *Petrochemical Equipment*. 2017, vol. 46, no. 6, pp. 18–23. <http://doi.org/10.3969/j.issn.1000-7466.2017.06.004>
12. Shu Q., Liu J., Lan X., Long L., Yang J., Wang C., Yang Y. Correction analysis for the deviation between vacuum furnace and material growth temperatures. *Vacuum*. 2017, vol. 144, pp. 21–26. <http://doi.org/10.1016/j.vacuum.2017.07.006>
13. Bessada C., Zanghi D., Pauvert O., Maksoud L., Gil-Martin A., Sarou-Kanian V., Melin P., Brassamin S., Nezu A., Matsuura H. High temperature EXAFS experiments in molten actinide fluorides: The challenge of a triple containment cell for radioactive and aggressive liquids. *Journal of Nuclear Materials*. 2017, vol. 494, pp. 192–199. <http://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2017.07.023>
14. Sobota T. Improving steam boiler operation by on-line monitoring of the strength and thermal performance. *Heat Transfer Engineering*. 2018, vol. 39, no. 13-14, pp. 1260–1271. <http://doi.org/10.1080/01457632.2017.1363641>
15. Dzierwa P., Taler D., Trojan M., Taler J. Optimum Heating of Boiler Evaporator. *Heat Transfer Engineering*. 2018, vol. 39, no. 13-14, pp. 1217–1226. <http://doi.org/10.1080/01457632.2017.1363630>
16. Zhang N., Li Z., Zheng J., Yang X., Shen K., Zhou T., Zhang Y. Multielemental analysis of botanical samples by ICP-OES and ICP-MS with focused infrared lightwave ashing for sample preparation. *Microchemical Journal*. 2017, vol. 134, pp. 68–77. <http://doi.org/10.1016/j.microc.2017.05.006>
17. Motyl P., Łach J. Numerical analysis for the low-emission dual fuel combustion in a boiler type OP-230. *European Biomass Conference and Exhibition Proceedings*. 2017, vol. 2017, no. 25th EUBCE, pp. 666–679. <https://doi.org/10.5071/25theubce2017-2bv.1.44>
18. Fiedler T., Groß R., Rösler J., Bäker M. Damage mechanisms of metallic HVOF-coatings for high heat flux application. *Surface and Coatings Technology*. 2017, vol. 316, pp. 219–225. <http://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2017.03.037>

19. Cong H., Zhao L., Yao Z., Meng H., Jia J., Li X., Wang Y. Energy balance analysis of corn straw continuous distillation // *Nongye Gongcheng Xuebao/Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*. 2017. Vol. 33. No. 7. P. 206–212. <http://doi.org/10.11975/j.issn.1002-6819.2017.07.027>
20. Wang L., Zhu B., Wang Q., Zhang Y. Modeling of hot stamping process procedure based on finite state machine (FSM) // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2017. Vol. 89. No. 1-4. P. 857–868. <http://doi.org/10.1007/s00170-016-9097-z>
21. Теплотехнические расчеты металлургических печей / Б.И. Китаев, Б.Ф. Зобнин, В.Ф. Ратников и др.; под общ. ред. А.С. Телегина. М.: Металлургия, 1970. 528 с.
22. Зобнин Б.Ф., Казыев М.Д., Китаев Б.И. Теплотехнические расчеты металлургических печей. М.: Металлургия, 1982. 360 с.
23. Топливо и расчеты его горения / С.Н. Гушин, Л.А. Зайнуллин, М.Д. Казыев, Б.П. Юрьев, Ю.Г. Ярошенко; под ред. Ю.Г. Ярошенко. Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2007. 105 с.
24. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М.: Наука, 1972. 721 с.
25. Советкин В.Л., Федяева Л.А. Теплофизические свойства веществ. Свердловск: УПИ, 1990. 101 с.
26. Казанцев Е.И. Промышленные печи. Справочное руководство для расчета и проектирования. М.: Металлургия, 1975. 368 с.
19. Cong H., Zhao L., Yao Z., Meng H., Jia J., Li X., Wang Y. Energy balance analysis of corn straw continuous distillation. *Nongye Gongcheng Xuebao/Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*. 2017, vol. 33, no. 7, pp. 206–212. <http://doi.org/10.11975/j.issn.1002-6819.2017.07.027>
20. Wang L., Zhu B., Wang Q., Zhang Y. Modeling of hot stamping process procedure based on finite state machine (FSM). *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2017, vol. 89, no. 1-4, pp. 857–868. <http://doi.org/10.1007/s00170-016-9097-z>
21. Kitaev B.I., Zobnin B.F., Ratnikov V.F. etc. *Heat Engineering Calculations of Metallurgical Furnaces*. Telegin A.S. ed. Moscow: Metallurgiya, 1970, 528 p. (In Russ.).
22. Zobnin B.F., Kazyayev M.D., Kitaev B.I. *Thermal Engineering Calculations of Metallurgical Furnaces*. Moscow: Metallurgiya, 1982, 360 p. (In Russ.).
23. Gushchin S.N., Zainullin L.A., Kazyayev M.D., Yur'ev B.P., Yaroshenko Yu.G. *Fuel and Calculations of its Combustion*. Yaroshenko Yu.G. ed. Yekaterinburg: USTU-UPI, 2007, 105 p. (In Russ.).
24. Vargaftik N.B. *Reference Book on Thermophysical Properties of Gases and Liquids*. Moscow: Nauka, 1972, 721 p. (In Russ.).
25. Sovetkin V.L., Fedyayeva L.A. *Thermophysical Properties of Substances*. Sverdlovsk: UPI, 1990, 101 p. (In Russ.).
26. Kazantsev E.I. *Industrial Furnaces. Reference Guide for Calculation and Design*. Moscow: Metallurgiya, 1975, 368 p. (In Russ.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Надежда Александровна Черемискина, магистрант кафедры «Теплофизика и информатика в металлургии», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина

E-mail: n.a.cheremiskina@urfu.ru

Наталья Владимировна Щукина, магистрант кафедры «Теплофизика и информатика в металлургии», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина

E-mail: n.v.shchukina@urfu.ru

Николай Борисович Лошкарев, к.т.н., доцент кафедры «Теплофизика и информатика в металлургии», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, ОАО «Научно-исследовательский институт металлургической теплотехники» (ОАО «ВНИИМТ»)

E-mail: nb.loshkarev@urfu.ru

Владислав Васильевич Лавров, д.т.н., профессор кафедры «Теплофизика и информатика в металлургии», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина
ORCID: 0000-0002-6953-5519

E-mail: v.v.lavrov@urfu.ru

Nadezhda A. Cheremiskina, MA Student of the Chair “Thermal Physics and Informatics in Metallurgy”, Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin

E-mail: n.a.cheremiskina@urfu.ru

Natal'ya V. Shchukina, MA Student of the Chair “Thermal Physics and Informatics in Metallurgy”, Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin

E-mail: n.v.shchukina@urfu.ru

Nikolai B. Loshkarev, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair “Thermal Physics and Informatics in Metallurgy”, Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin, OJSC “Scientific Research Institute of Metallurgical Heat Engineering” (“VNIIMT”)

E-mail: nb.loshkarev@urfu.ru

Vladislav V. Lavrov, Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Chair “Thermal Physics and Informatics in Metallurgy”, Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin

ORCID: 0000-0002-6953-5519

E-mail: v.v.lavrov@urfu.ru

Поступила в редакцию 15.05.2018

После доработки 08.08.2020

Принята к публикации 26.10.2020

Received 15.05.2020

Revised 08.08.2020

Accepted 26.10.2020