

УДК 621.77.07

КОМПЛЕКСНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВОЙ РАБОТЫ КАМЕРНОЙ ПЕЧИ ДЛЯ НАГРЕВА ПОД ЗАКАЛКУ ТОНКОГО СТАЛЬНОГО ЛИСТА

Казяев М.Д.¹, к.т.н., профессор кафедры «Теплофизика и информатика в металлургии» (m.d.kaziaev@urfu.ru)

Казяев Д.М.², директор (termokomplex@r66.ru)

Киселев Е.В.¹, к.т.н., доцент кафедры «Теплофизика и информатика в металлургии» (ev.kiselev@urfu.ru)

Вохмяков А.М.², к.т.н., начальник производственно-технического отдела (vam@termokomplex.ru)

Спитченко Д.И.^{1,2}, к.т.н., ассистент кафедры «Теплофизика и информатика в металлургии», начальник проектного отдела (d.i.spitchenko@urfu.ru)

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

² ООО «НПК «УралТермоКомплекс» (620026, Россия, Екатеринбург, ул. Народной воли, 65)

Аннотация. Повышение производительности сталеплавильных агрегатов возможно при изменении способов производства стали. Такие изменения влекут за собой и серьезные изменения в последующих переделах: в обработке металлов давлением, в термической обработке готовой металлической продукции. Известно, что именно эти два металлургических передела насыщены большим количеством нагревательных и термических печей, тепловая работа которых не всегда соответствует повышенным требованиям к качеству выпускаемой продукции. Вопросы улучшения тепловой работы печей также актуальны и в машиностроении. К повышенным требованиям технологического характера добавляются очень жесткие требования по улучшению экологической обстановки. Следовательно, требуется новая концепция проектирования и строительства современных производительных и высокоавтоматизированных промышленных нагревательных и термических печей. С целью совершенствования конструкции и улучшения технико-экономических показателей проводится техническое перевооружение устаревших и строительство новых промышленных печей. При проектировании и строительстве печей применяются топливосжигающие устройства новых конструкций и современные материалы. В свою очередь, это вызывает необходимость использования новых подходов к формированию рабочего пространства и системы отопления печи с учетом компоновки садки нагреваемых изделий. Такие мероприятия проводятся, как правило, в действующих цехах, что вызывает определенные трудности в связи с ограниченностью предоставляемых площадей для размещения новых печей и оборудования для работы и обслуживания. Рассмотрено комплексное исследование конструкции и тепловой работы блока из трех камерных термических печей со специфической загрузкой и выдачей нагреваемого тонкого листа, построенных в ограниченном пространстве цеха.

Ключевые слова: нагрев под закалку, камерная печь, стационарный под, особенность загрузки и выдачи, система отопления, рекуперативные горелки, теплотехническое исследование, газодинамический режим, моделирование.

DOI: 10.17073/0368-0797-2019-10-803-809

ВВЕДЕНИЕ

На металлургических и машиностроительных заводах для термической обработки металлических изделий при индивидуальном, мелкосерийном и массовом производстве широко используют камерные печи [1, 2].

В последнее время печи устаревших конструкций подвергаются техническому перевооружению, комплектуют современными топливосжигающими устройствами, используют малоинерционные огнеупорные и теплоизоляционные материалы с малой плотностью и низким коэффициентом теплопроводности [3]. Для выполнения жестких технологических требований

обработки металлической продукции нагревательные и термические печи оснащают современными автоматизированными системами управления тепловыми режимами (АСУ ТП) [4].

Одним из основных требований к тепловой работе камерных термических печей является осуществление качественного нагрева изделий с минимальными допусками по перепадам температур в объеме рабочего пространства [5]. Равномерность нагрева изделий зависит от системы отопления и от формирования садки нагреваемых изделий в рабочем пространстве печи [1, 6].

Опыт эксплуатации печей различного класса позволил утвердить некоторые стандартные схемы ото-

пления (размещение топливосжигающих устройств, каналов дымоудаления) [7]. Но иногда приходится разрабатывать иные, нестандартные компоновки горелок, нагреваемых изделий и каналов отвода продуктов сгорания [8, 9]. Чаще всего эти вопросы возникают, когда печное оборудование необходимо разместить в действующем цехе с ограниченными площадями. Такой вопрос встал при проектировании и строительстве блока из трех камерных печей со стационарным подом для нагрева под закалку тонкого стального листа. В дополнение было поставлено условие размещения тонкого листа в рабочем пространстве на массивных подставках, располагающихся вдоль оси печи. Это требование завода было вызвано необходимостью применения автопогрузчиков для загрузки и выдачи нагреваемого листа.

ПРОВЕДЕНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ

Общий вид блока из трех печей, размещенных на ограниченной площади и объединенных общими коммуникациями газо-воздухоснабжения и удаления продуктов сгорания, представлен на рис. 1. При выполнении таких условий невозможно применить стандартную схему размещения горелок на боковых стенках печи, поэтому была осуществлена установка

трех рекуперативных горелок в торцевой задней стенке печи (рис. 2).

Предполагалось осуществить «подковообразную» схему движения газов, при которой скоростные струи от трех горелок находятся под сводом печи, ударяются в поперечную сводовую балку (притолоку) и частично в верхнюю часть заслонки и разворачиваются на 180°. При этом часть продуктов сгорания движется вдоль верхней поверхности нагреваемого листа, а другая часть проходит между массивными подставками, разогревая их и нижнюю поверхность листа [10, 11]. Возвращенные к торцевой стенке продукты сгорания частично подсасываются горящими струями, а частично удаляются через рекуперативные горелки, где осуществляется подогрев воздуха.

Для оценки тепловой работы печи и системы автоматизации проведено комплексное исследование контролируемого нагрева листа с последующим составлением теплового баланса. Особое внимание уделено равномерности нагрева поверхности листа при выдержке при постоянной температуре рабочего пространства печи.

РЕЗУЛЬТАТЫ, ИХ АНАЛИЗ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для контроля температуры нагреваемого листа на его поверхности размещали гибкие термопары. Схе-

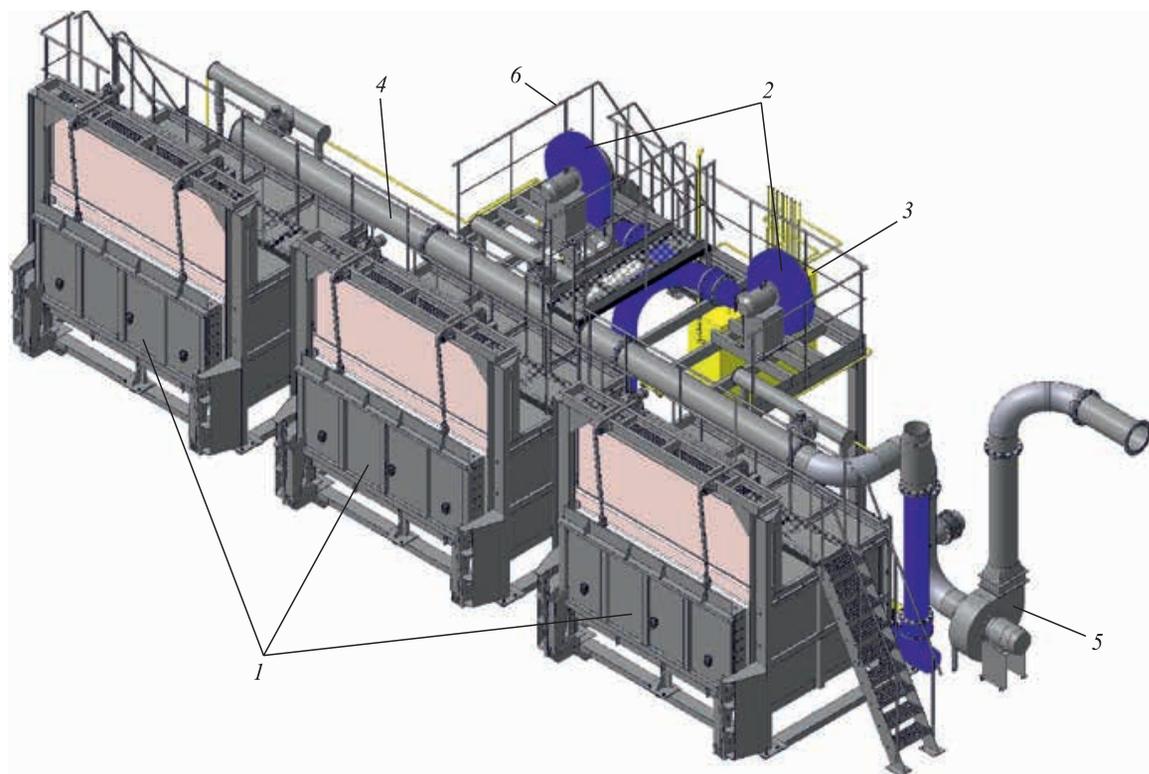


Рис. 1. Общий вид блока печей:

1 – камерная печь со стационарным подом; 2 – основной и резервный вентилятор; 3 – газораспределительное устройство; 4 – печной дымопровод; 5 – дымосос; 6 – рабочая площадка

Fig. 1. General view of the furnace unit:

1 – chamber furnace with fixed hearth; 2 – main and standby fans; 3 – gas distributor; 4 – furnace exhaust duct; 5 – exhaust stack; 6 – work platform

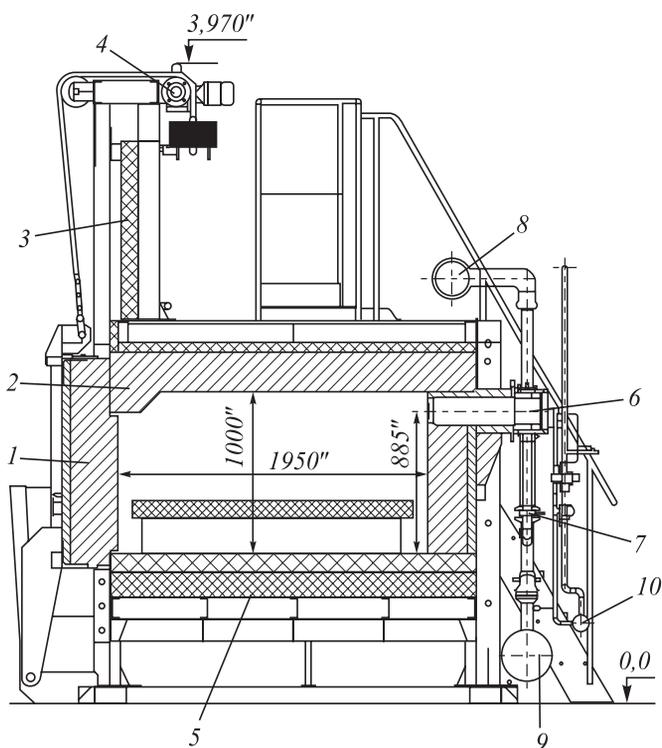


Рис. 2. Схема камерной печи со стационарным подом и установкой рекуперативных горелок:

- 1 – заслонка; 2 – панельный плоский свод с поперечной балкой (притолокой); 3 – защитный экран; 4 – механизм подъема заслонки;
- 5 – стационарный под с металлической усиленной рамой;
- 6 – скоростная рекуперативная горелка; 7 – запорно-регулирующая арматура горелки; 8 – дымопровод; 9 – воздухопровод;
- 10 – газопровод

Fig. 2. Scheme of chamber furnace with fixed hearth and recuperative burners:

- 1 – furnace door; 2 – panel flat roof with cross beam; 3 – protecting screen; 4 – door lifting mechanism; 5 – fixed hearth with metal reinforced frame; 6 – high-speed recuperative burner;
- 7 – shut-off and control burner valves; 8 – exhaust duct; 9 – air duct;
- 10 – gas duct

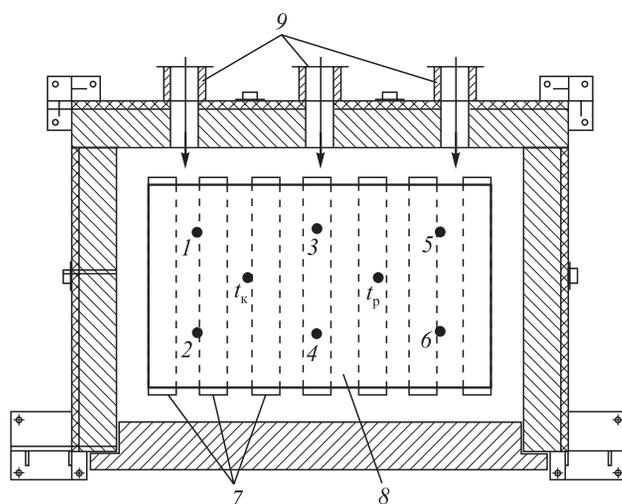


Рис. 3. Схема размещения в рабочем пространстве печи нагреваемого листа, подставок и спаев контрольных термпар:

- 1 – 6 – контрольные термпары, установленные на поверхности листа; t_p и t_k – основная рабочая и контрольная стационарная термопара; 7 – опорные подставки; 8 – нагреваемый лист; 9 – горелки

Fig. 3. Arrangement diagram of supporting fixtures, heated sheet and thermocouple junctions in the furnace work space:

- 1 – 6 – control thermocouples installed on the sheet surface; t_p and t_k – main working and control stationary thermocouple;
- 7 – supporting fixtures; 8 – heated sheet; 9 – burners

ма расположения контрольных точек приведена на рис. 3, а значения температуры – в табл. 1. В течение 1 ч выдержки при постоянной температуре печи максимальные колебания температуры поверхности листа в различных его точках составляли 4 – 12 °С. Колебания температуры объясняются импульсной работой АСУ ТП, что отражается на газодинамическом режиме в условиях ограниченных размеров рабочего пространства печи.

Установлено, что при возврате печных газов в сторону горелок происходит «расслоение» потока с большим

Таблица 1

Изменение во времени температуры поверхности листа и печной среды при режиме выдержки

Table 1. Change of the sheet surface temperature and furnace work space temperature over time in holding conditions

Термопара	Температура, °С, при времени выдержки, мин							Δt_{\max} , °С
	0	10	20	30	40	50	60	
1	960	960	969	968	965	965	964	9
2	967	961	973	961	972	970	963	12
3	960	961	962	961	962	963	964	4
4	960	960	967	961	966	962	961	7
5	962	962	963	964	964	960	961	4
6	964	962	972	967	970	967	966	10
t_p	967	962	967	967	968	968	965	6
t_k	973	971	973	971	973	975	973	4

Примечание. В режиме выдержки садки АСУ ТП должна была поддерживать технологическую температуру печи $t_p = 965$ °С по показаниям рабочей термопары (t_k – контрольная термопара).

его сосредоточением в верхней свободной части рабочего пространства и с ограниченным движением газов между массивными подставками, удерживающими нагреваемый лист [12]. Тем не менее по прошествии 1 ч технологической выдержки перепады температуры на поверхности листа снижаются и не превышают $\pm 5^\circ\text{C}$, что полностью соответствует техническому заданию.

С целью изучения возможности дальнейшего совершенствования конструкции печи с торцевым раз-

мещением горелок было осуществлено компьютерное моделирование газодинамического режима, от которого в большей степени зависит теплообмен в рабочем пространстве топливного теплового агрегата [13 – 17]. На рис. 4 представлено движение газов в модели печи. Верхняя поверхность листа омывается достаточно равномерно потоком циркулирующих газов (рис. 4, а). На рис. 4, б четко просматривается интенсивная циркуляция газов в верхней части рабочего пространства и воз-

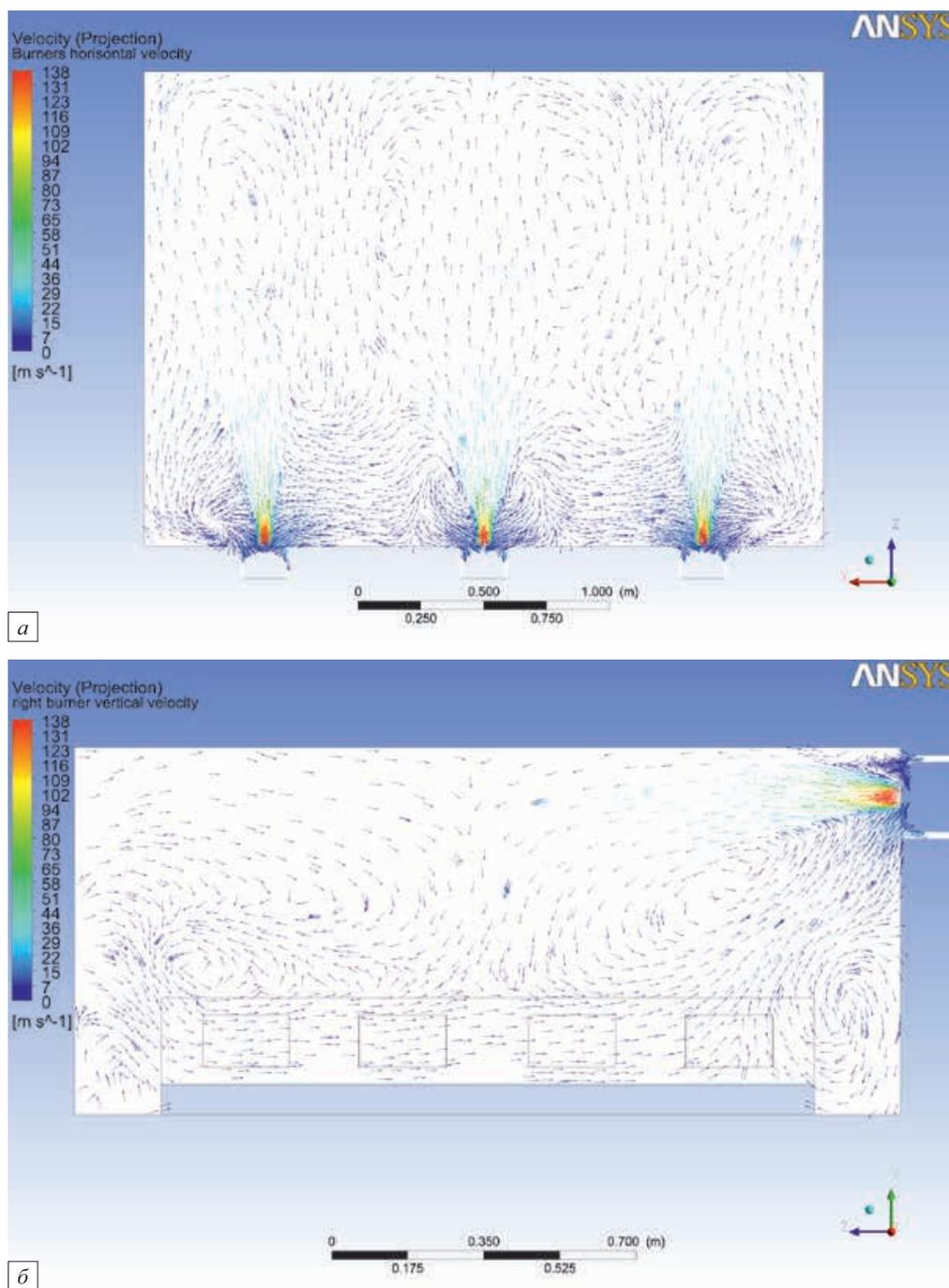


Рис. 4. Схема движения продуктов сгорания в рабочем пространстве модели печи с торцевым отоплением над верхней поверхностью листа (а) и в продольной плоскости (б)

Fig. 4. Scheme of movement of combustion products in the working space of the model of a stove with end heating above the upper surface of the sheet (a) and in the longitudinal plane (b)

Тепловой баланс действующей термической печи со стационарным подом

Table 2. Heat balance of the existing thermal furnace with a stationary hearth

Приход теплоты			Расход теплоты		
Статьи	МДж	%	Статьи	МДж	%
Химическая теплота топлива	4,114	89,5	Нагрев листа	0,325	7,1
Физическая теплота подогретого воздуха	0,483	10,5	Потери теплоты с уходящими газами	1,830	39,8
			Нагрев подставок	1,558	33,9
			Потери теплопроводностью и с аккумуляцией теплоты футеровкой	0,884	19,2
Итого	4,597	100	Итого	4,597	100

вратное, прямоочное их движение между подставками в сторону торцевой стенки печи с дальнейшим подсосом в горящие скоростные струи горелок.

Анализ газодинамического режима позволяет сделать вывод о возможности дальнейшего улучшения конструкции печи при торцевом отоплении: во-первых, возможно понижение свода печи к поверхности металла; во-вторых, как следствие, возможно перемещение горелок на более низкий уровень. Предполагаемые мероприятия позволят усилить конвективную составляющую теплообмена как в верхней, так, особенно, и в нижней части рабочего пространства печи и повысить скорость и равномерность нагрева тонкого листа и массивных подставок [18 – 20].

Для выявления и анализа основных показателей тепловой работы печи был исследован тепловой баланс (табл. 2) (тепловой баланс составлен при работе печи за время 3,18 ч, включающем подъем температуры печи с садкой и выдержку).

Основные теплотехнические показатели печи: КПД – 7,1 %, удельный расход условного топлива (b) 280 кг_{у.т.}/т. Низкий КПД объясняется малой ($g_m = 500$ кг) массой нагреваемого листа. Значительные потери теплоты с аккумуляцией (19,2 %) и с нагревом (33,9 %) подставок массой 2400 кг объясняются разогревом печи вместе с нагреваемым листом от холодного состояния.

Подобные теплотехнические показатели соответствуют тепловой работе нагревательных печей с изменяющейся рабочей температурой с малым коэффициентом заполнения рабочего пространства нагреваемым металлом [21, 22]. Дальнейшее совершенствование работы печи возможно при усилении конвективного теплообмена и при снижении массы подставок измененной конструкции.

Выводы

Предложена схема отопления рекуперативными горелками, расположенными на задней торцевой стенке печи. Подтверждается возможность такого способа

отопления печи. При этом обязательно предварительное моделирование газодинамического режима с целью исследования равномерности нагрева поверхности изделия для указанных размеров рабочего пространства печи и соответствующего размещения нагреваемого металла и приспособлений (подставок). Предлагается также изменение конструкции подставок с целью уменьшения их массы при той же схеме размещения на стационарном поду с учетом существующего способа загрузки и выгрузки обрабатываемого тонкого листа с помощью автопогрузчика.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Зобнин Б.Ф. Нагревательные печи. Теория и расчет. – М.: Машиностроение, 1964. – 311 с.
2. Кривандин В.А., Егоров А.В. Тепловая работа и конструкции печей черной металлургии. – М.: Металлургия, 1989. – 462 с.
3. Казяев М.Д., Вохмяков А.М., Киселев Е.В., Спитченко Д.И., Казяев Д.М. Влияние конструкции футеровки и типа топливосжигающих устройств на тепловую работу камерных вертикальных печей. – В кн.: Энергосберегающие технологии в промышленности. Печные агрегаты. Экология. Сборник материалов VII Международной научно-практической конференции, посвященной 150-летию великого русского металлурга В.Е. Грум-Гржимайло. 15-17 октября 2014 г. – М.: Изд. дом МИСиС, 2014. С. 224 – 235.
4. Вохмяков А.М., Казяев М.Д., Казяев Д.М. Автоматизация системы управления тепловым режимом камерной термической печи с выдвигаемым подом. – В кн.: Труды VIII Всероссийской научно-практической конференции «Системы автоматизации в образовании, науке и производстве». – Новокузнецк, СибГИУ, 2013. С. 201 – 206.
5. Filippini M., Rossi F., Presciutti A., De Ciantis S., Castellani B., Carpinelli A. Thermal analysis of an industrial furnace // *Energies*. 2016. Vol. 9. No. 10. Article number 833.
6. Зобнин Б.Ф., Казяев М.Д., Китаев Б.И. Теплотехнические расчеты металлургических печей: учебное пособие для студентов вузов. – М.: Металлургия, 1982. – 360 с.
7. Гусовский В.Л., Ладыгичев М.Г., Усачев А.Б. Современные нагревательные и термические печи (конструкции и технические характеристики). Справочник. – М.: Машиностроение, 2001. – 656 с.
8. Martín E., Meis M., Mourenza C., etc. Fast solution of direct and inverse design problems concerning furnace operation conditions in steel industry // *Applied Thermal Engineering*. 2012. Vol. 47. P. 41 – 53.

9. Смольков А.Н., Wohlschlaeger G. Системы прямого и косвенного отопления печей с применением рекуперативных горелок типа VICR. – В кн.: Труды международного конгресса. Печетрубостроение: тепловые режимы, конструкции, автоматизация и экология. – М.: Теплотехник, 2004. С. 118 – 125.
10. Kurek H., Wagner J., Chudnovsky Ya., etc. Direct flame impingement for the efficient and rapid peating of metal shapes. – International Gas Research Conference. – Vancouver, B.C., Canada, 2004. P. 10.
11. Wagner J., Kurek H., Chudnovsky Ya., etc. Direct flame impingement for the efficient and rapid heating of ferrous and nonferrous shapes. – Reheating Symposium at the Materials Science and Technology. – Pittsburg, Pennsylvania, U.S.A., 2005. P. 23 – 33.
12. Холлуорт Б.Р., Берри Р.Д. Теплообмен при натекании на поверхность системы струй с большим шагом отверстий // Теплопередача. 1978. № 2. С. 203 – 210.
13. Khalil E.E. Mathematical modeling of radiative heat transfer in axisymmetric furnaces // AIAA Paper. 1979. No. 99. P. 9.
14. Johnson T.R., Lowes T.M., Bعر J.M. Comparison of calculated temperatures and heat flux with measurements in furnace // Journal of the Institute on Fuel. 1974. Vol. 47. No. 3. P. 39 – 51.
15. Pollhammer W., Spijker C., Six J., Zoglauer D., Raupenstrauch H. Modeling of a walking beam furnace using CFD-methods // Energy Procedia. 2017. Vol. 120. P. 477 – 483.
16. Yang Y., Zhou B., Post J.R., etc. Computational fluid dynamics simulation of high temperature metallurgical processes. – TMS Fall Extraction and Processing Division: Sohn International Symposium, San Diego, CA, United States, 2006. Vol. 7. P. 417 – 433.
17. Gosman A.D., Lockwood F.C. Incorporation of flux model of radiation into a finite difference procedure for furnace calculations. – Proceedings of the 14th. International Symposium of Combustion, USA, 1972. P. 661 – 671.
18. Михеев М.А. Основы теплопередачи. – М.: Госэнергоиздат, 1956. – 392 с.
19. Samantaray S., Mahapatra S.K., Jena S.K., Sarkar A. Transient mixed convection coupled with surface radiation inside a square cavity with different configurations-A critical study // International Journal of Fluid Mechanics Research. 2013. Vol. 40. No. 6. P. 545 – 563.
20. Тимофеев В.Н., Февралева И.А. Исследование конвективного теплообмена применительно к нагревательным печам // Всеобщий научно-исследовательский институт металлургической теплотехники (ВНИИМТ). Бюллетень научно-технической информации. – Свердловск: Металлургиздат, 1958. С.34 – 45.
21. Гусовский В.Л., Лифшиц А.Е. Методики расчета нагревательных и термических печей. – М.: Теплотехник, 2004. – 400 с.
22. Campos I.B., Aguirrezabala N.N., Valdes L.D., Ezenarro B.E., Arantzamendi H.G. Energy efficiency and line productivity improvements for a continuous heat treatment process. – Industrial Summer Study on Industrial Efficiency: Leading the Low-Carbon Transition, Kalkscheune, Berlin, Germany, 2018. P. 431 – 441.

Поступила в редакцию 28 мая 2019 г.
 После доработки 14 июня 2019 г.
 Принята к публикации 17 июня 2019 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2019. Vol. 62. No. 10, pp. 803–809.

THERMAL WORK OF CHAMBER FURNACE FOR HEATING FOR HARDENING OF THIN STEEL SHEET

*M.D. Kazyayev¹, D.M. Kazyayev², E.V. Kiselev¹,
 A.M. Vokhmyakov², D.I. Spitchenko^{1,2}*

¹Ural Federal University named after the first President of Russia
 B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

²SPC “UralTermoKompleks” Ltd., Ekaterinburg, Russia

Abstract. Increasing performance of steelmaking units is possible with changing methods of steel production. Such variances entail serious changes in the subsequent redistributions: in metals processing by pressure and in thermal treatment of finished metal products. It is known that these two metallurgical processes are equipped with a large number of heating and thermal furnaces, and their thermal work does not always meet increased requirements for products quality. Issues of improving thermal performance of furnaces are also relevant in mechanical engineering. High technological requirements are associated with very strict environmental ones. Therefore, a new concept is needed for the design and construction of modern highly automated industrial heating furnaces. In order to improve the design and technical and economic indicators, technical obsolescence and the construction of new industrial furnaces are carried out. In design and construction of furnaces, fuel-burning devices of new designs and modern materials are used. In turn, this necessitates the use of new approaches to working space and heating system design of the furnace, taking into account arrangement of heated products charge. Such events are carried out, as a rule, in operating workshops, that causes certain difficulties due to limited space provided for placement of new furnaces and equipment for their operation and maintenance. A complex study was made of the design and thermal performance of a block of three chamber thermal furnaces. They were built in a limited space of the workshop with specific loading and delivery of heated thin sheet.

Keywords: thin steel sheet, heating for hardening, chamber furnace, stationary hearth, loading and delivery, heating system, recuperative burners, heat engineering research, gas dynamic mode, simulation.

DOI: 10.17073/0368-0797-2019-10-803-809

REFERENCES

1. Zobnin B.F. *Nagrevatel'nye pechi. Teoriya i raschet* [Heating furnaces. Theory and design]. Moscow: Mashinostroenie, 1964, 311 p. (In Russ.).
2. Krivandin V.A., Egorov A.V. *Teplovaya rabota i konstruktsii pechei chernoi metallurgii* [Thermal work and design of iron and steel furnaces]. Moscow: Metallurgiya, 1989, 462 p. (In Russ.).
3. Kazyayev M.D., Vokhmyakov A.M., Kiselev E.V., Spitchenko D.I., Kazyayev D.M. Influence of lining design and type of fuel burning devices on thermal performance of vertical chamber furnaces. In: *Energoberegayushchie tekhnologii v promyshlennosti. Pechnye agregaty. Ekologiya. Sbornik materialov VII Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, posvyashchennoi 150-letiyu velikogo russkogo metallurga V.E. Grum-Grzhimailo. 15-17 oktyabrya 2014 g.* [Energy-saving technologies in industry. Furnace units. Ecology. Coll. of materials of the VII Int. Sci. and Pract. Conf. dedicated to the 150th Anniversary of V.E. Grum-Grzhimailo, the Great Russian Metallurgist. October 15-17, 2014]. Moscow: ID MISiS, 2014, pp. 224–235. (In Russ.).
4. Vokhmyakov A.M., Kazyayev M.D., Kazyayev D.M. Automation of thermal control system of carhearth thermal furnace. In: *Trudy VIII Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Sistemy avtomatizatsii v obrazovanii, nauke i proizvodstve"* [Proc. of the VIII All-Russian Sci. and Pract. Conf. "Automation Systems in Education, Science and Production"]. Novokuznetsk, SibGIU, 2013, pp. 201–206. (In Russ.).

5. Filippini M., Rossi F., Presciutti A., De Ciantis S., Castellani B., Carpinelli A. Thermal analysis of an industrial furnace. *Energies*. 2016, vol. 9, no. 10, article no. 833.
6. Zobnin B.F., Kazyaev M.D., Kitaev B.I. *Teplotekhnicheskie raschety metallurgicheskikh pechei: uchebnoe posobie dlya studentov vuzov* [Thermotechnical calculations of metallurgical furnaces: University manual]. Moscow: Metallurgiya, 1982, 360 p. (In Russ.).
7. Gusovskii V.L., Ladygichev M.G., Usachev A.B. *Sovremennyye nagrevatel'nye i termicheskie pechi (konstruktsii i tekhnicheskie kharakteristiki). Spravochnik* [Modern heating and thermal furnaces (designs and specifications). Reference book]. Moscow: Mashinostroenie, 2001, 656 p. (In Russ.).
8. Martín E., Meis M., Mourenza C. etc. Fast solution of direct and inverse design problems concerning furnace operation conditions in steel industry. *Applied Thermal Engineering*. 2012, vol. 47, pp. 41–53.
9. Smol'kov A.N., Wohlschlaeger G. Direct and indirect heating systems for furnaces with recuperative burners of BICR type]. In: *Trudy mezhdunarodnogo kongressa. Peche-trubostroenie: teplovye rezhimy, konstruktsii, avtomatizatsiya i ekologiya* [Proc. of the Int. Congress. Furnace and Pipe Construction Industry: Thermal Conditions, Designs, Automation and Ecology]. Moscow: Teplotekhnika, 2004, pp. 118–125. (In Russ.).
10. Kurek H., Wagner J., Chudnovsky Ya. etc. Direct flame impingement for the efficient and rapid heating of metal shapes. *International Gas Research Conference. Vancouver, B.C., Canada, 2004*, p. 10.
11. Wagner J., Kurek H., Chudnovsky Ya. etc. Direct flame impingement for the efficient and rapid heating of ferrous and nonferrous shapes. *Reheating Symposium at the Materials Science and Technology. Pittsburg, Pennsylvania, U.S.A., 2005*, pp. 23–33.
12. Kholluort B.R., Berri R.D. Heat transfer at leaking of jets with large spread of holes onto the system surface. *Teplotepredacha*. 1978, no. 2, pp. 203–210. (In Russ.).
13. Khalil E.E. Mathematical modeling of radiative heat transfer in axisymmetric furnaces. *AIAA Paper*. 1979, no. 99, pp. 9.
14. Johnson T.R., Lowes T.M., Becr J.M. Comparison of calculated temperatures and heat flux with measurements in furnace. *Journal of the Institute on Fuel*. 1974, vol. 47, no. 3, pp. 39–51.
15. Pollhammer W., Spijker C., Six J., Zoglauer D., Raupenstrauch H. Modeling of a walking beam furnace using CFD-methods. *Energy Procedia*. 2017, vol. 120, pp. 477–483.
16. Yang Y., Zhou B., Post J.R., etc. Computational fluid dynamics simulation of high temperature metallurgical processes. *TMS Fall Extraction and Processing Division: Sohn Int. Symposium, San Diego, CA, United States, 2006*, vol. 7, pp. 417–433.
17. Gosman A.D., Lockwood F.C. Incorporation of flux model of radiation into a finite difference procedure for furnace calculations. *Procs. of the 14th Int. Symposium of Combustion, USA, 1972*, pp. 661–671.
18. Mikheev M.A. *Osnovy teploperedachi* [Basics of heat transfer]. Moscow: Gosenergoizdat, 1956, 392 p. (In Russ.).
19. Samantaray S., Mahapatra S.K., Jena S.K., Sarkar A. Transient mixed convection coupled with surface radiation inside a square cavity with different configurations-A critical study. *International Journal of Fluid Mechanics Research*. 2013, vol. 40, no. 6, pp. 545–563.
20. Timofeev V.N., Fevraleva I.A. Convective heat transfer in heating furnaces. In: *Vsesoyuznyi nauchno-issledovatel'skii institut metallurgicheskoi teplotekhniki (VNIIMT). Byulleten' nauchno-tekhnicheskoi informatsii* [All-Union Research Institute of Metallurgical Heat Engineering (VNIIMT). Bulletin of sci. and tech. information]. Sverdlovsk: Metallurgizdat, 1958, pp. 34–45. (In Russ.).
21. Gusovskii V.L., Lifshits A.E. *Metodiki rascheta nagrevatel'nykh i termicheskikh pechei* [Methods of design of heating and thermal furnaces]. Moscow: Teplotekhnika, 2004, 400 p. (In Russ.).
22. Campos I.B., Aguirrezabala N.N., Valdes L.D., Ezenarro B.E., Arantzamendi H.G. Energy efficiency and line productivity improvements for a continuous heat treatment process. *Industrial Summer Study on Industrial Efficiency: Leading the Low-Carbon Transition, Kalkscheune, Berlin, Germany, 2018*, pp. 431–441.

Information about the authors:

M.D. Kazyaev, Cand. Sci. (Eng.), Professor of the Chair “Thermal Physics and Informatics in Metallurgy” (m.d.kazyaev@urfu.ru)

D.M. Kazyaev, Director (termokomplex@r66.ru)

E.V. Kiselev, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair “Thermal Physics and Informatics in Metallurgy” (ev.kiselev@urfu.ru)

A.M. Vokhmyakov, Cand. Sci. (Eng.), Head of Industrial Engineering Department (vam@termokomplex.ru)

D.I. Spitchenko, Cand. Sci. (Eng.), Assistant of the Chair “Thermal Physics and Informatics in Metallurgy”, Head of Design Department (d.i.spitchenko@urfu.ru)

Received May 28, 2019

Revised June 14, 2019

Accepted June 17, 2019