



## Оптимизация нагревательных газовых печей с выкатным подом по критерию энергоэффективности

*Приведены результаты численного исследования температурного поля камерной нагревательной печи. Проанализировано влияние мест расположения горелочных устройств и окон для отвода продуктов горения на распределение температуры в зоне расположения металла и расход газа на печь. Ил. 2. Табл. 2. Библиогр.: 5 назв.*

**Ключевые слова:** камерная печь, горелка, температурное поле, расход газа

*The results of the numerical implementation of the algorithm synthesis temperature chamber heating furnace are given. The influence of the locations of burners and windows to remove the products of combustion to the temperature distribution in the zone of the metal and the gas flow to the furnace is analyzed.*

**Keywords:** chamber furnace, burner, temperature field, gas consumption

### Введение

Камерные нагревательные и термические печи относятся к основному оборудованию инструментальных, кузнечных и других цехов металлургических, трубных и машиностроительных предприятий. В указанных цехах доля потребления топлива составляет до 19% от общего расхода по предприятию. Причем долгосрочные прогнозы указывают на устойчивую тенденцию увеличения энергетической составляющей в себестоимости выпускаемой продукции. Большинство печного парка характеризуется низким коэффициентом использования теплоты топлива.

### Анализ предыдущих публикаций и постановка задачи исследований

Учитывая вышесказанное, возникает первоочередная задача повышения общей энерготехнологической эффективности камерных печей путем разработки высокоэффективных тепловых режимов, совершенствования конструкции печей, которые в последствии создадут оптимальные условия для интенсификации нагрева металла и энергосбережения.

В настоящее время разработана математическая модель камерной нагревательной печи [1], где распределение температурного поля в камере определяется путем использования численного метода контрольного объема наряду с известной инженерной методикой расчета. Такой подход основан на использовании большого количества экспериментальных данных полученных непосредственно на объекте исследования в промышленных условиях. Именно это позволяет исключить из модели необходимость моделирования процессов аэродинамики факела и продуктов сгорания. Так с использованием разработанного алгоритма в работе [2] было изучено влияние мест установки горелочных устройств на характер температурного поля в камере печи и определено оптимальное их месторасположение. За счет этого достигнуто сокраще-

ние расхода газа на печь в пределах 5,3–9,8 % в зависимости от марки стали нагреваемой заготовки. При этом не учитывались изменения местоположения вытяжных окон в камере печи.

### Изложение материалов разработки

Объектом исследования является нагревательная газовая печь с выкатным подом площадью 3,6 м<sup>2</sup>. Печь предназначена для нагрева металла инструментальных марок стали под ковку и прокат.

Внутренние размеры рабочей камеры составляют: длина 2550 мм, ширина 1400 мм, высота до арочного свода 1225–1514 мм. Толщина кладки равна: свода 302 мм (в том числе изоляция 70 мм) и боковых стен 822 мм (в том числе изоляция 116 мм).

Печь оснащена четырьмя двухпроводными горелками типа ГНП-3 и шестью вытяжными окнами (по 3 на каждой боковой стороне). Схема отопления камерной печи с изображением местоположения вытяжных окон и горелок приведена на рис. 1.

Печь отапливается природным газом с низшей теплотой сгорания 35 МДж/м<sup>3</sup>. Расход природного газа на печь может изменяться в пределах 21–82 м<sup>3</sup>/ч, а расход на действующей печи при проведении экспериментальных исследований составил 61,4 м<sup>3</sup>/ч (табл. 2). Время нагрева изделия по инструкции составляет до 16 ч. На камерной печи системой теплового контроля и регулирования осуществляется регулирование: температуры по торцевой термопаре ХА (рис. 1, поз. 9), давления в рабочем пространстве печи, соотношение расходов газ-воздух.

В табл. 1 приведены координаты точек исходного местоположения горелочных устройств и окон для отвода продуктов горения для одной боковой стенки (рис. 1, поз. 10, 11). Началом координат здесь считается точка А (рис. 1).

Последовательность расчета распределения температуры в камерной печи выполнена по алгоритму, приведенному в работах [1, 2]. Расчеты проведены

для двух типичных марок стали нагреваемых в печи Р18 и 40Г. В расчетах учитывалось изменение коэффициента теплопроводности нагреваемого металла в зависимости от температуры. Например, для марки Р18 при температурах (300, 600, 900, 1200) °С,  $\lambda$  изменяется, соответственно, (22, 26, 26, 24) Вт/(мК), а для стали 40Г – при температурах, (300, 500, 700) °С, этот коэффициент составляет (65, 51, 46) Вт/(мК) [5].

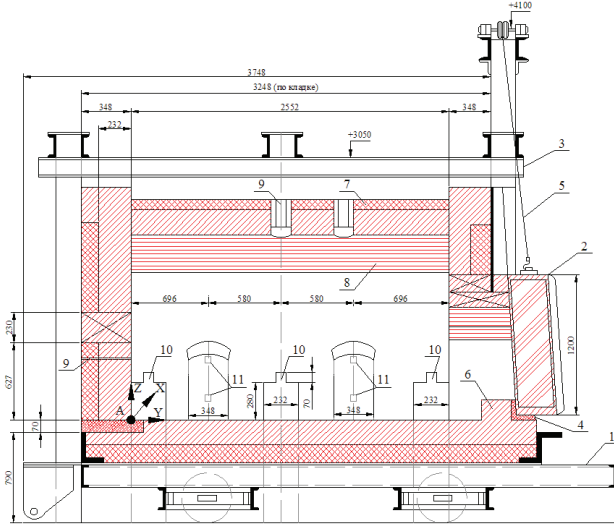


Рис. 1. Схема отопления камерной печи: 1 – выкатной под; 2 – заслонка; 3 – каркас печи; 4 – песочный затвор; 5 – механизм подъема заслонки двери; 6,7 – кладка печи; 8 – свод печи; 9 – места установки термопар; 10 – окна для отвода продуктов горения; 11 – места расположения горелочных устройств

Время нагрева металла в зависимости от коэффициента теплоотдачи и распределения температуры в печи определяется по зависимости

$$\tau = \frac{B^2 \cdot \rho \cdot c}{3,6 \cdot k_\phi \cdot \lambda \cdot S_k} \cdot (\Phi_{кон} - \Phi_{нач}), \quad (1)$$

где  $B$  – толщина заготовки, м;  $k_\phi = 1$  – коэффициент формы [4];  $\rho$  – плотность тела, т/м<sup>3</sup>;  $c$  – средняя теплоемкость металла при заданной температуре, (кДж/(кгК));  $S_k$  – радиационное число Старка [4];  $\Phi_{кон}$ ,  $\Phi_{нач}$  – начальное и конечное значения температурного фактора в зависимости от температуры и

Таблица 1. Местоположение горелочных устройств и вытяжных окон

Исходное местоположение горелочных устройств, м											
$X_{X1.1}$	$Y_{X1.1}$	$Z_{X1.1}$	$X_{X1.2}$	$Y_{X1.2}$	$Z_{X1.2}$	$X_{X1.3}$	$Y_{X1.3}$	$Z_{X1.3}$	$X_{X1.4}$	$Y_{X1.4}$	$Z_{X1.4}$
0,2	0,73	0,18	0,2	1,46	0,18	0,2	0,73	0,35	0,2	1,46	0,35
Исходное местоположение вытяжных окон, м											
	$X_{X4.1}$	$Y_{X4.1}$	$Z_{X4.1}$	$X_{X4.2}$	$Y_{X4.2}$	$Z_{X4.2}$	$X_{X4}$	$Y_{X4}$	$Z_{X4}$		
	0	0,5	0,25	0	1,09	0,25	0	1,82	0,25		
Оптимальное местоположение горелочных устройств, м											
$X_{X1.1}$	$Y_{X1.1}$	$Z_{X1.1}$	$X_{X1.2}$	$Y_{X1.2}$	$Z_{X1.2}$	$X_{X1.3}$	$Y_{X1.3}$	$Z_{X1.3}$	$X_{X1.4}$	$Y_{X1.4}$	$Z_{X1.4}$
0,2	0,55	0,43	0,2	1,1	0,43	0,2	0,55	0,6	0,2	1,1	0,6
Оптимальное местоположение вытяжных окон, м											
	$X_{X4.1}$	$Y_{X4.1}$	$Z_{X4.1}$	$X_{X4.2}$	$Y_{X4.2}$	$Z_{X4.2}$	$X_{X4}$	$Y_{X4}$	$Z_{X4}$	$X_{X4.1}$	
	0	0,42	0,52	0	1,01	0,52	0	1,74	0,52		

конвективного числа Био [4].

Расход газа на печь определялся из уравнения теплового баланса, с учетом времени нагрева металла  $\tau$

$$V_m = \frac{7,92 \cdot G \cdot (c_M^{кон} \cdot t_M^{кон} - c_M^{нач} \cdot t_M^{нач}) + 7,92 \cdot G_{он} \cdot c_{он} \cdot (t_{он}^{кон} - t_{он}^{нач}) + 3,96 \cdot M_{кл} \cdot c_{кл} \cdot (t_{вн}^{нач} - t_{нар}^{нач} - 2 \cdot \bar{t}_{кл}) - 409,94 \cdot a \cdot G + 28,5 \cdot \tau \cdot (Q_{кл} + Q_{изл})}{7,2 \cdot \tau \cdot (Q_H^p - i_0)}, \quad (2)$$

где  $G$  – садка печи, т;  $c_M^{кон}$ ,  $c_M^{нач}$  – конечная и начальная теплоемкость металла (кДж/кгК) на интервале нагрева при  $t_M^{кон}$ ,  $t_M^{нач}$ , °С;  $G_{он}$  – общая масса опорных устройств, загруженных в печь, т;  $c_{он}$  – теплоемкость материала опорных устройств, кДж/(кгК);  $t_{он}^{кон}$ ,  $t_{он}^{нач}$  – конечная и начальная температура опорных устройств, °С;  $M_{кл}$  – масса кладки, т;  $c_{кл}$  – теплоемкость материала кладки, кДж/(кгК);  $t_{вн}^{нач}$ ,  $t_{нар}^{нач}$  – температура на внутренней и наружной поверхностях кладки в конце предыдущего нагрева, °С;  $t_{кл}$  – средняя температура кладки, °С;  $\alpha$  – экспериментальное значение угара металла для нагревательных печей без контроля параметров атмосферы [4].

Аналогично работе [2], где определены оптимальные места расположения горелочных устройств, проведены расчеты нагрева с учетом изменения координаты окон для отвода продуктов горения. При этом наблюдалось повышение температуры газов в области, примыкающей к поверхности металла, результаты многовариантных расчетов позволили определить оптимальное расположение дымовых окон приведенное в табл. 1.

На рис. 2 приведено распределение температур в камере печи при нагреве заготовки из марки стали 40Г при исходном расположении горелочных устройств и вытяжных окон (а) и полученном оптимальном варианте (б).

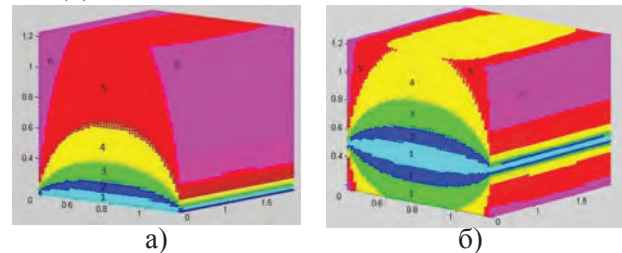


Рис. 2. Распределение температур в камере печи при нагреве заготовки соответствующее существующему положению горелочных устройств и вытяжных окон (а) и полученному оптимальному варианту (б), °С: 1) 755–820; 2) 820–885; 3) 885–950; 4) 950–1015; 5) 1015–1080; 6) 1080–1145

В табл. 2 приведен сравнительный анализ значений расхода газа на печь в исходном варианте  $V_{мб}$  [3]; в случае оптимальных положений только горелок  $V_{мн1}$  (рис. 2а) и одновременно го-

релочных устройств и вытяжных окон  $V_{мн2}$  (рис. 2б).

**Выводы**

Разработанный алгоритм исследования температурного поля в рабочей камере печи основанный на экспериментальных исследованиях температуры рабочего пространства печи в промышленных условиях позволил оптимизировать расположение горелок и окон для отвода продуктов горения. При этом

**Таблица 2. Сравнительный анализ расхода газа на печь**

	Марка стали						
	P18	40Г	X12M	15X	ШХ15	30ХГТ	60С2
$V_{тб}, M^3 / ч$	61,4	47,1	52,3	50,2	56,8	59,7	49,4
$V_{тн1}, M^3 / ч$	57,3	43,6	47,2	46,8	52,1	54,8	46,8
$V_{тн2}, M^3 / ч$	55,4	42,5	46,4	45,3	51,6	53,2	45,6
Снижение расхода топлива от $V_{тн1}$ и $V_{тн2}$ , %	6,7/9,7	7,4/9,8	9,8/11,3	6,8/9,8	8,3/9,2	8,2/10,9	5,3/7,7

расчетное снижение расхода топлива, достигнутое за счет интенсификации теплообмена между газом и металлом, составило 7,7–11,3 % в зависимости от марки стали нагреваемой заготовки.

**Библиографический список**

1. Качан Ю.Г., Степкин В.В., Спекторова Ю.Б. Математическая модель камерной нагревательной

печи // Энергетика: економіка, технології, екологія. – 2011. – № 4. – С. 54-61.

2. Качан Ю.Г., Степкин В.В., Лиуш Ю.Б. О повышении энергоэффективности камерных нагревательных печей с выкатным подом путем изменения положения горелочных устройств // Теория и практика металлургии: общегосударственный научно-технический журнал. – 2012. – № 6. – С. 21-27.

3. Качан Ю.Г., Коваленко В.Л., Спекторова Ю.Б. Количественная оценка энергоэффективности камерных печей с выкатным подом // Вісник Хмельницького національного університету. – Хмельницький. – 2012. – № 3. – С. 66-69.

4. Василькова С.Б., Генкина М.М., Гусовский В.Л. и др. Расчет нагревательных и термических печей: Справ. изд. Под ред. Тымчака В.М. и Гусовского В.Л. – М.: Металлургия, 1983. – 480 с.

5. Бабичев А.П., Бабушкина Н.А., Братковский А.М. и др. Физические величины. Справ. Под ред. Григорьева И.С., Мейлихова Е.З. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.

**Поступила 02.04.2013**

УДК 661.666: 66.096.5

**Федоров С.С. /к.т.н./**

Национальная металлургическая Академия Украины

Наука

## Анализ эффективности применения высокотемпературных секционных утилизаторов теплоты с кипящим слоем. Постановка проблемы и разработка методики исследования. Сообщение I

*Переработка углеродных материалов в высокотемпературных электротермических печах кипящего слоя характеризуется значительным выходом вторичных энергоресурсов. С целью повышения тепловой эффективности данных агрегатов для нагрева исходного сырья предложены секционные утилизаторы теплоты готового продукта (каскадные аппараты кипящего слоя). Разработана математическая модель таких аппаратов, позволяющая исследовать влияние на их тепловую работу режимных и конструктивных параметров. Ил. 4. Табл. 1. Библиогр.: 9 назв.*

**Ключевые слова:** переработка углеродных материалов, высокотемпературная электротермическая печь, кипящий слой, повышение тепловой эффективности, секционный утилизатор теплоты готового продукта, нагрев сырья, математическое моделирование

*The processing of carbon materials in high-temperature thermal-electric furnaces with a fluidized bed is characterized by a significant loss of secondary energy. In order to improve the thermal efficiency of these units, the final product sectional heat exchangers (cascading fluidized bed apparatuses) for raw materials heating are proposed. The mathematical model of these apparatuses, which allows researching the effect of their operational and design parameters on the thermal performance, was created.*

**Keywords:** processing of carbon materials, high-temperature thermal-electric furnace, fluidized bed, improvement of thermal efficiency, sectional heat exchanger of final product heat, heating of raw materials, mathematical simulation

Динамичный рост мирового рынка углеродных материалов [1] обусловлен высокой химической стойкостью, температуро- и электропроводностью изделий на их основе. Область применения углерода

© Федоров С.С., 2013 г.