



*It is shown that at carrying out of multivariant calculations the possibility to achieve uniformity of convection heating by means of variation of constructive parameters of working furnace chamber including burners location, and in such a way to intensify the heating of metal.*

И. А. ТРУСОВА, П. Э. РАТНИКОВ, Д. В. МЕНДЕЛЕВ, С. В. КОРНЕЕВ, БНТУ

УДК 669.04

## ВЫБОР ОПТИМАЛЬНЫХ КОНСТРУКТИВНЫХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПЛАМЕННЫХ ПЕЧЕЙ КАМЕРНОГО ТИПА С ВЫСОКОСКОРОСТНЫМИ ГОРЕЛКАМИ С ЦЕЛЬЮ ОБЕСПЕЧЕНИЯ РАВНОМЕРНОСТИ НАГРЕВА

В настоящее время снижение себестоимости нагрева металла в печах прокатного, кузнечного и штамповочного производств достигается как за счет реконструктивных мероприятий (внедрение новых горелочных устройств, установка эффективного теплоутилизационного оборудования, замена футеровки и т. д.), так и за счет интенсификации теплообменных процессов в рабочем пространстве.

Возможности дальнейшей интенсификации процессов нагрева металла за счет увеличения доли радиационной составляющей теплообмена практически исчерпаны, поскольку температура греющей среды лимитируется огнеупорностью используемых в печестроении материалов, степень черноты поверхностей теплообмена близка к единице, а степень черноты продуктов сгорания топлива в существующих конструкциях относительно низкая. Поэтому в настоящее время изучаются и реализуются различные способы интенсификации тепловой работы печей путем повышения конвективной составляющей теплообмена (например, за счет организации струйного конвективного теплообмена) [1].

Интенсификация конвективного теплообмена требует создания высоких скоростей газообразного теплоносителя при его канальном движении или организации его рециркуляции в рабочем пространстве печи. Такой вид нагрева основан на применении специальных газогорелочных устройств или так называемых скоростных горелок, обеспечивающих высокую скорость продуктов сгорания (100 м/с и более). При этом из-за высокой скорости потока продуктов сгорания и разрушения пограничного слоя ударной струей конвективная со-

ставляющая теплоотдачи резко возрастает и составляет не менее 50% от суммарного теплового потока [2]. Такая интенсификация теплообмена существенно ускоряет процесс нагрева при одновременном улучшении качества нагрева за счет уменьшения окисления и обезуглероживания поверхности по сравнению с традиционным нагревом.

В данной статье рассмотрены вопросы обеспечения равномерности конвективного теплообмена в рабочем пространстве камерных печей путем подбора оптимальных конструктивных параметров печи.

В работе [3] сделан однозначный вывод о преимуществе конструкции рабочего пространства печей с удалением дымовых газов через щелевую конструкцию пода по сравнению со схемой удаления дымовых газов через свод, поэтому рассмотрим именно такую конструкцию печи (конструктивные размеры рабочей камеры печи аналогичны полупромышленному стенду для нагрева заготовок в ГНУ ИТМО НАН Беларуси – печь ПВП-1). При выбранном способе удаления дымовых газов необходимо подобрать такие конструктивные параметры печи (высота установления боковых горелок, расстояние между заготовками и характерный размер щели подины), при которых наблюдается равномерность обтекания заготовки по ее поверхности дымовыми газами.

С учетом того, что печь выходит на рабочий режим в течение 6–9 мин, то основное время нагрева газодинамические процессы происходят в квазистационарном режиме. Математическая модель нагрева цилиндрических заготовок в камерной печи в двухмерной постановке с учетом представ-

ления выражений, констант и переменных для расчетного программного пакета FemLab Comsol Multiphysics имеет следующий вид [4]:

$$\left\{ \begin{aligned} -\frac{\partial}{\partial x} \left( \eta_1 \frac{\partial u}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left( \eta_1 \frac{\partial u}{\partial x} \right) &= -\rho_1 u \frac{\partial u}{\partial x} - \rho_1 v \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial p}{\partial x}, \\ -\frac{\partial}{\partial x} \left( \eta_1 \frac{\partial v}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left( \eta_1 \frac{\partial v}{\partial y} \right) &= -\rho_1 u \frac{\partial v}{\partial x} - \rho_1 v \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{\partial p}{\partial y}, \\ \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} &= 0, \\ \nabla(-k_1 \nabla T_1) &= \rho_1 C_{p1} T_1 \sqrt{(u^2 + v^2)}, \\ \delta_{ts} \rho_2 C_{p2} \frac{\partial T_{2j}}{\partial t} + n(k_1 \nabla T_1 - k_2 \nabla T_{2j}) &= \\ h_j (T_1 - T_{2j}) + \sum_{i=3}^{l+2} \varepsilon_i \sigma (T_i^4 - T_{2j}^4), \\ (u, v) &= (u(P), v(P)), \\ T_{2jt=0} &= T_{2j0} \quad T_1 = \text{const}, \end{aligned} \right. \quad (1)$$

где  $t$  – независимая переменная (время);  $u, v$  – компоненты вектора скорости дымовых газов (определяются через мощность  $P$  горелок);  $\rho_2, C_{p2}, k_2$  – соответственно плотность, теплоемкость и теплопроводность заготовок;  $\eta_1 = 0,272 T_1^{0,7265} \cdot 10^{-6}$  Пуаз,  $\rho_1 = 439,98 T_1^{-1,0319}$  кг/м<sup>3</sup>,  $k_1 = 0,126$  Вт/(м·К),  $C_{p1} = 1544$  Дж/(кг·К) – соответственно динамическая вязкость, плотность, теплопроводность, теплоемкость дымовых газов;  $h_j$  – коэффициент конвективной теплоотдачи от дымовых газов к  $j$ -й заготовке;  $T_1$  – температура дымовых газов;  $T_{2j}$  – температура  $j$ -й заготовки;  $\sum_{i=3}^{l+2} \varepsilon_i \sigma (T_i^4 - T_{2j}^4)$  – сумма падающих потоков излучения на  $j$ -ю заготовку от всех объектов в количестве  $l$ , участвующих в теплообмене, с учетом переизлучения  $j$ -й заготовки.

При решении уравнений Навье–Стокса, входящих в систему (1), можно получить распределение чисел Рейнольдса и поля скоростей дымовых газов при заданном рабочем температурном режиме

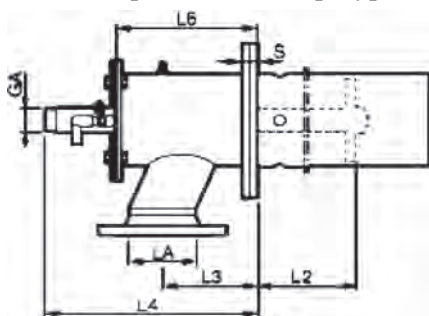


Рис. 1. Короткофакельная скоростная горелка Kromschroder BIC 140

печи. Полученное поле скоростей учитывается при расчете конвективной составляющей теплового потока, передаваемого заготовкам. Таким образом, можно оценить вклад конвективной составляющей при различных конструктивных и технических параметрах проходной печи и, тем самым, рассчитать оптимальные параметры технологии нагрева, что особенно важно при определении мест расположения горелочных устройств.

С учетом ряда уже определенных конструктивных и технологических параметров, обозначенных при постановке задачи математического моделирования, выполнена ее численная реализация на примере высокотемпературной установки (высота – 700 мм, ширина – 900 мм) для нагрева цилиндрических заготовок диаметром 150 мм. В качестве горелочных устройств приняты скоростные горелки Kromschroder BIC 140 (скорость истечения – 100 м/с, диаметр сопла – 142 мм) (рис. 1).

Поставленная задача решалась в двухмерном пространстве в сечении, проходящем через продольные оси установленных горелок (рис. 2). Численное решение реализовано с помощью метода конечных элементов. В качестве конечного элемента выбран треугольник. На рис. 3 показана схема разбиения рабочего пространства камеры на конечные элементы. В ходе многовариантных расчетов варьировались конструктивные параметры исполнения рабочего пространства печи (высота установления горелок  $h_b$ , расстояние между осями заготовок  $x_b$ , размеры щелей в поду  $x_s$  и диаметр сопла горелки).

Анализ результатов численного моделирования (см. таблицу) позволил определить такие конструктивные и технологические параметры пламенной камерной печи, которые позволяют добиться наибольшей равномерности обогрева стальных заготовок, тем самым, способствуя улучшению качества нагрева, и снижения удельного топливопотребления. Критерием равномерности нагрева служило равенство скоростей продуктов сгорания, а, следовательно, и равенство коэффициентов конвективной теплоотдачи в контрольных точках заготовок. На рис. 4 показано расположение контрольных то-

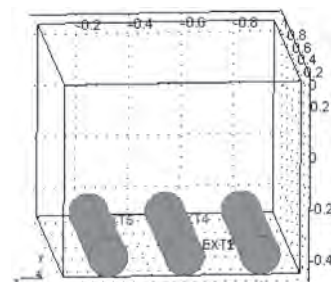


Рис. 2. Расположение нагреваемых заготовок в печи

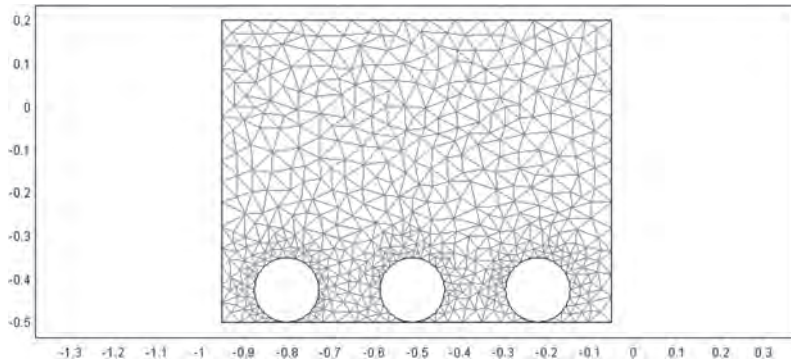


Рис. 3. Схема разбиения рабочего пространства камеры на конечные элементы

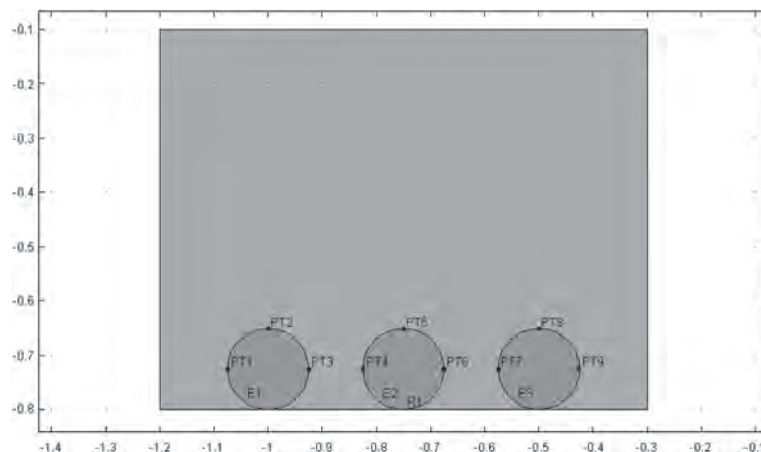


Рис. 4. Расчетная схема и контрольные точки

**Значения скоростей продуктов сгорания и чисел Рейнольдса в контрольных точках на поверхности заготовок в зависимости от конструктивных параметров печи при скорости продуктов сгорания 100 м/с**

Номер параметра	$D_B$	$u$	$x_B$	$x_S$	$h_B$	$U_1$	$U_2$	$U_3$	$U_4$	$U_5$
1	0,05	100	0,225	0,05	0,175	32,35	36,7	21,6	27	4,73
2	0,05	100	0,225	0,05	0,275	25,8	15,77	23,27	27,05	1,75
3	0,05	100	0,225	0,05	0,375	18,45	12,41	22,87	25,65	0,21
4	0,05	100	0,225	0,05	0,475	14,65	20,6	22,8	25,15	2,365
5	0,05	100	0,225	0,05	0,575	13,84	17,64	22,24	24,25	0,201
6	0,05	100	0,225	0,1	0,175	31,68	40,45	25,45	30,6	1,3
7	0,05	100	0,225	0,1	0,275	21,53	16,5	30,45	34,48	0,79
8	0,05	100	0,225	0,1	0,375	15,34	11,77	28,6	30,65	2,85
9	0,05	100	0,225	0,1	0,475	12,73	17,63	26,65	28,3	0,688
10	0,05	100	0,225	0,1	0,575	12,85	17,18	24,9	26,53	0,08
11	0,05	100	0,225	0,15	0,175	31,5	43,58	32,2	37,1	3,19
12	0,05	100	0,225	0,15	0,275	18,64	19,8	36,75	39,95	2,485
13	0,05	100	0,225	0,15	0,375	11,57	10,4	33,35	34,48	2,68
14	0,05	100	0,225	0,15	0,475	10,72	16,3	29,9	30,55	2,49
15	0,05	100	0,225	0,15	0,575	11,73	16,74	26,58	26,85	1,22
16	0,05	100	0,25	0,05	0,175	37,6	37,85	12,74	15,33	1,96
17	0,05	100	0,25	0,05	0,275	25,2	9,64	14,12	14,55	1,81
18	0,05	100	0,25	0,05	0,375	19,47	19,55	12,61	13,75	1,33
19	0,05	100	0,25	0,05	0,475	17,75	24,53	11,66	13,17	0,08
20	0,05	100	0,25	0,05	0,575	17,57	22,74	11,27	12,59	0,89
21	0,05	100	0,25	0,1	0,175	32,22	43,44	21,05	25,52	0,94
22	0,05	100	0,25	0,1	0,275	15,95	14,37	25,75	27,9	2,7
23	0,05	100	0,25	0,1	0,375	12,6	14,35	22,73	24,32	3,04
24	0,05	100	0,25	0,1	0,475	12,17	20,63	20,23	21,74	0,19
25	0,05	100	0,25	0,1	0,575	13,28	18,2	18,25	19,65	0,95
26	0,05	100	0,25	0,15	0,175	30,6	48,53	27,45	32,79	0,09

Номер параметра	$D_b$	$u$	$x_b$	$x_s$	$h_b$	$U_1$	$U_2$	$U_3$	$U_4$	$U_5$
27	0,05	100	0,25	0,15	0,275	12	10,21	27,8	28,64	1,81
28	0,05	100	0,25	0,15	0,375	6,22	12,59	31,15	33,54	1,3
29	0,05	100	0,25	0,15	0,475	6,94	17,59	26,35	28,09	0,52
30	0,05	100	0,25	0,15	0,575	10,28	16,32	24	24,61	1,7
31	0,1	100	0,225	0,05	0,175	49,85	59,2	42,5	51,9	5,45
32	0,1	100	0,225	0,05	0,275	47,3	25,9	45,2	52,4	2,92
33	0,1	100	0,225	0,05	0,375	35,58	15,6	44,73	50,1	0,944
34	0,1	100	0,225	0,05	0,475	29,95	27,73	44,5	48,55	0,543
35	0,1	100	0,225	0,05	0,575	28,75	27,28	44,8	49,05	0,116
36	0,1	100	0,225	0,1	0,175	49,8	59,7	46,45	54,75	3,45
37	0,1	100	0,225	0,1	0,275	40,95	28	53,8	60,15	3,13
38	0,1	100	0,225	0,1	0,375	32,15	12,38	52,2	56,85	2,725
39	0,1	100	0,225	0,1	0,475	28,35	25,93	50,35	53,15	1,29
40	0,1	100	0,225	0,1	0,575	27,85	26,47	48,4	51,1	2,04
41	0,1	100	0,225	0,15	0,175	52,9	64,8	58,2	66,1	6,93
42	0,1	100	0,225	0,15	0,275	39,2	30,9	62,1	67	2
43	0,1	100	0,225	0,15	0,375	27,58	11,9	59,3	61,1	1,24
44	0,1	100	0,225	0,15	0,475	26,43	24,24	53,55	54,4	2,09
45	0,1	100	0,225	0,15	0,575	25,37	25,85	49,8	49,9	0,39
46	0,1	100	0,25	0,05	0,175	58,4	59,22	32,4	35,4	2,03
47	0,1	100	0,25	0,05	0,275	44,15	20,84	34,2	34,8	6,65
48	0,1	100	0,25	0,05	0,375	34,4	23,22	33,9	34,33	0,67
49	0,1	100	0,25	0,05	0,475	31,6	33,4	33,5	34,5	2,39
50	0,1	100	0,25	0,05	0,575	31,4	31,9	33,15	34	1,03
51	0,1	100	0,25	0,1	0,175	54,2	62,5	39,7	42,75	5,67
52	0,1	100	0,25	0,1	0,275	36,95	25,1	44,7	46,5	4,11
53	0,1	100	0,25	0,1	0,375	29	19,74	42,5	43,5	0,32
54	0,1	100	0,25	0,1	0,475	26,45	31,1	39,8	40,45	3,4
55	0,1	100	0,25	0,1	0,575	27,9	29,3	37,7	38,5	0,17
56	0,1	100	0,25	0,15	0,175	49,7	72,2	49,85	58,2	2,36
57	0,1	100	0,25	0,15	0,275	23,4	31,4	56,5	61,9	3,04
58	0,1	100	0,25	0,15	0,375	16,2	14,6	51,8	54,3	0,16
59	0,1	100	0,25	0,15	0,475	18,55	26,7	47,4	48,65	3,29
60	0,1	100	0,25	0,15	0,575	21,33	26,8	43,83	44,5	2,09

чек при нагреве цилиндрических заготовок в пламенной печи, работающей по камерному режиму.

Как видно из таблицы, наибольшей равномерности нагрева заготовок (при скорости истечения продуктов сгорания из горелок со скоростью 100 м/с) удается добиться при конструктивных параметрах № 49 и 50.

Таким образом, при проведении многовариантных расчетов появляется возможность путем варьирования конструктивных параметров рабочей камеры печи, включая месторасположение горелок, добиться равномерности конвективного обогрева и, тем самым, интенсифицировать нагрев металла.

### Литература

1. Тимошпольский В. И., Трусова И. А., Ратников П. Э. Возможности применения струйного нагрева металла перед прокаткой // Литье и металлургия. 2007. № 2. С. 63–66.
1. Краснокутский П. Г. Исследование и разработка печей скоростного струйного нагрева заготовок на сплошном керамическом поду: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. М.: МИСиС, 1980.
2. Подбор конструктивных и технических параметров проходной нагревательной печи для нагрева заготовок под штамповку с целью создания энергосберегающих технологий / И. А. Трусова, Д. В. Менделев, П. Э. Ратников, С. В. Корнеев // Республ. межвед. сб. науч. тр. «Металлургия». Вып. 32. Мн.: Выш. шк., 2009. С. 30–40.
3. Математическое моделирование процесса теплообмена в камерной нагревательной печи / В. И. Тимошпольский, И. А. Трусова, Д. В. Менделев, П. Э. Ратников // Литье и металлургия. 2009. № 3. С. 317–321.