

The solving of problem of structural identification of the mathematical model of heat exchange in chamber reheating furnace is presented.

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

УДК 669.04

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В ТОПЛИВНЫХ НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ ПЕЧАХ КАМЕРНОГО ТИПА

Об эффективности работы нагревательных печей судят по таким технико-экономическим показателям, как коэффициенты полезного действия и использования топлива, производительность, равномерность нагрева заготовок. Последний показатель тесно связан с производительностью агрегата. Эффективность работы печи можно повысить путем рационализации конструкции рабочего пространства, оптимального выбора и расположения горелочных устройств.

В качестве примера приведем данные по исследованию возможности оптимизации технико-экономических показателей работы камерной печи (нагревательная печь ПВП-1 ГНУ «Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова» НАН Беларуси).

Калориметрическая температура сгорания природного газа составляла 2073 К. Относительная

высота установки горелок $0,5/0,7 = 0,643$. Нагреватели заготовки диаметром 150 мм и длиной 730 мм из углеродистой стали.

Нагрев печи до рабочей температуры осуществляли за 15 мин при максимальной суммарной мощности горелочных устройств 320 кВт. Расход природного газа составил $8,6 \text{ м}^3$. Дальнейший нагрев заготовок, соответствующий процессу термообработки под закалку, производили в течение 61 мин при суммарной тепловой мощности горелок 40 кВт. При этом было израсходовано $4,37 \text{ м}^3$ газа. Общий расход природного газа составил $12,97 \text{ м}^3$ [1].

Расчетная модель конструкции рабочего пространства данной печи при оптимальном расположении горелочных устройств приведена на рис. 1–4.

При проведении расчетов учитывалось, что на заготовки падает интегральный поток излучения

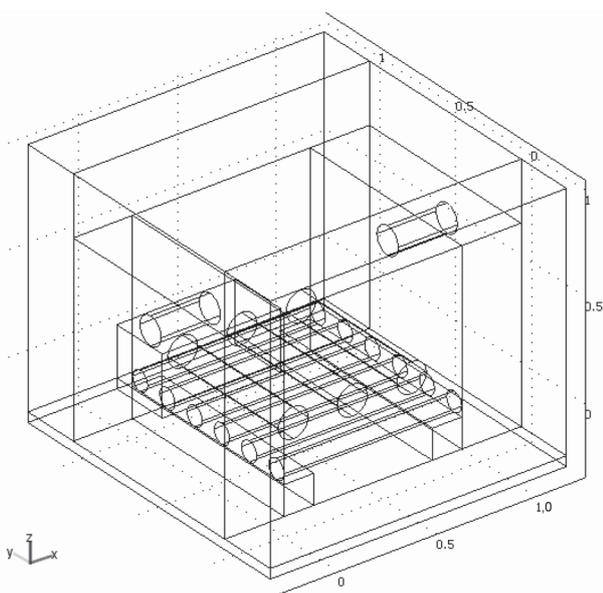


Рис. 1. Расчетная схема нагревательной печи ПВП-1 ГНУ «Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова» НАН Беларуси (объемный вид)

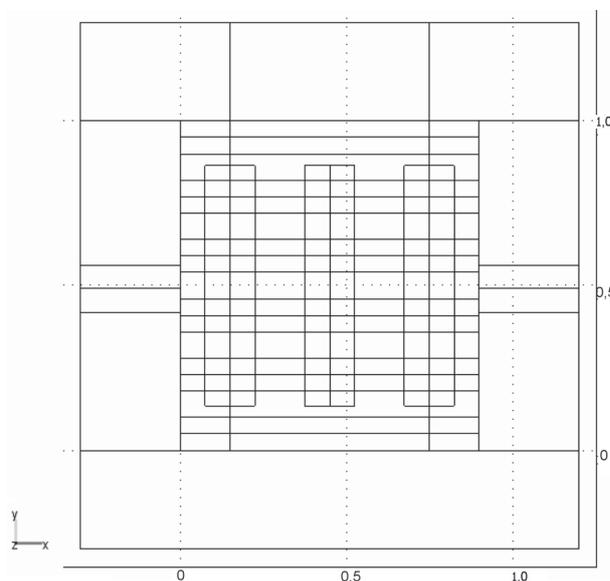


Рис. 2. Расчетная схема печи (вид сверху)

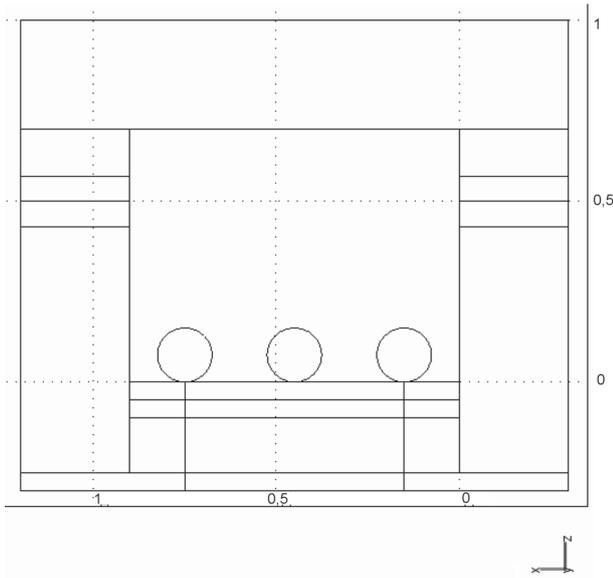


Рис. 3. Расчетная схема печи (вид сверху) (вид спереди)

G_j (j – номер заготовки) от стенок, свода и факелов, который частично отражается $\rho_j G_j$ и частично поглощается $\varepsilon_j G_j$ заготовкой ($1 = \rho_j + \varepsilon_j$). Заготовки также имеют собственное излучение $\varepsilon_j \sigma T_j^4$ (ε_j – степень черноты заготовки; σ – постоянная Стефана-Больцмана; T_j – температура поверхности заготовки).

Интегральный поток переизлучения от заготовок имеет следующий вид:

$$J_j = \rho_j G_j + \varepsilon_j \sigma T_j^4. \quad (1)$$

Интегральный поток излучения, который усвоился заготовкой:

$$q_j = G_j - J_j, \quad (2)$$

$$q_j = (1 - \rho_j) G_j - \varepsilon_j \sigma T_j^4, \quad (3)$$

$$q_j = \varepsilon_j (G_j - \sigma T_j^4). \quad (4)$$

При представлении печи в виде серого тела со средней интегральной температурой T_{II} выражение (4) запишется в виде:

$$q_j = \varepsilon_j \sigma (\varepsilon_i T_{II}^4 - T_j^4), \quad (5)$$

где ε_i – степень черноты i -го элемента серого тела (печи).

Из выражения (5) вытекает следующее: при постоянной температуре печи (характерная особенность тепловой работы камерных печей) максимальный тепловой поток, усваиваемый заготовкой, определяется в инерционный период нагрева.

Были проведены расчеты с целью оценки такого технологического показателя работы печи, как равномерность нагрева металла в рабочем пространстве печи, равномерность тепловых потоков на поверхности заготовок и равномерность про-

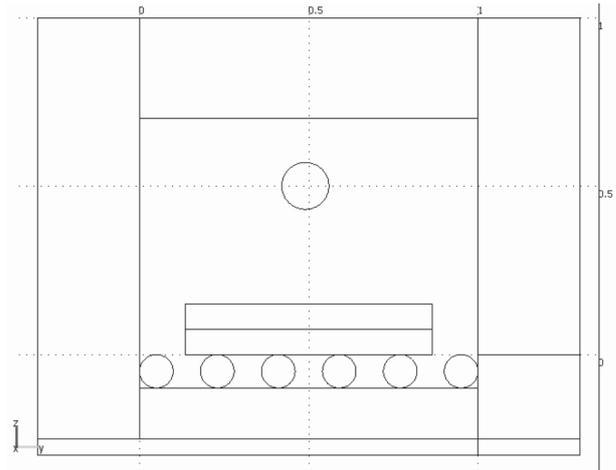


Рис. 4. Расчетная схема печи (вид сверху) (вид сбоку)

грева заготовок по сечению. При исследовании равномерности нагрева заготовок были определены тепловые потоки, падающие на поверхности заготовок (схема поверхностей показана на рис. 5). Результаты в безразмерных координатах (относительно собственных размеров рассматриваемых поверхностей) приведены на рис. 6. По остальным поверхностям наблюдается зеркальная симметрия.

Расход природного газа на одну горелку определяли по выражению:

$$B = \frac{Q_{\text{гор}}}{Q_M^P} = \frac{20000}{33500000} = 5,97 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}.$$

Расход дымовых газов для одной горелки будет составлять $0,00658 \text{ м}^3/\text{с}$.

Скорость истечения дымовых газов из сопла площадью сечения $0,0152 \text{ м}^2$ будет составлять $0,432 \text{ м/с}$ (конвективную составляющую можно не учитывать).

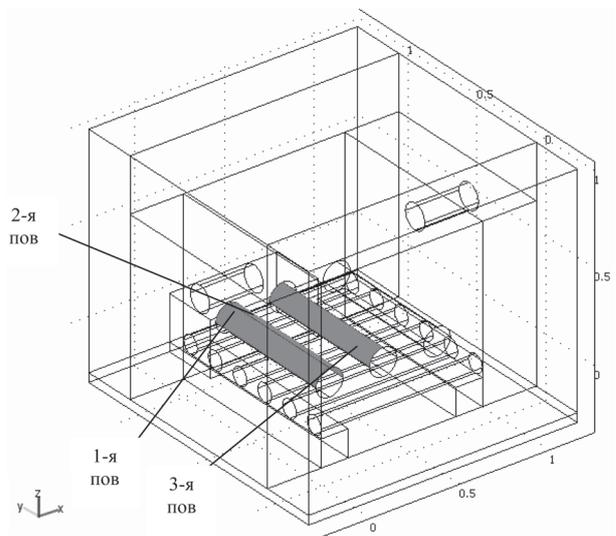


Рис. 5. Схема расположения расчетных поверхностей при определении радиационных потоков на металл

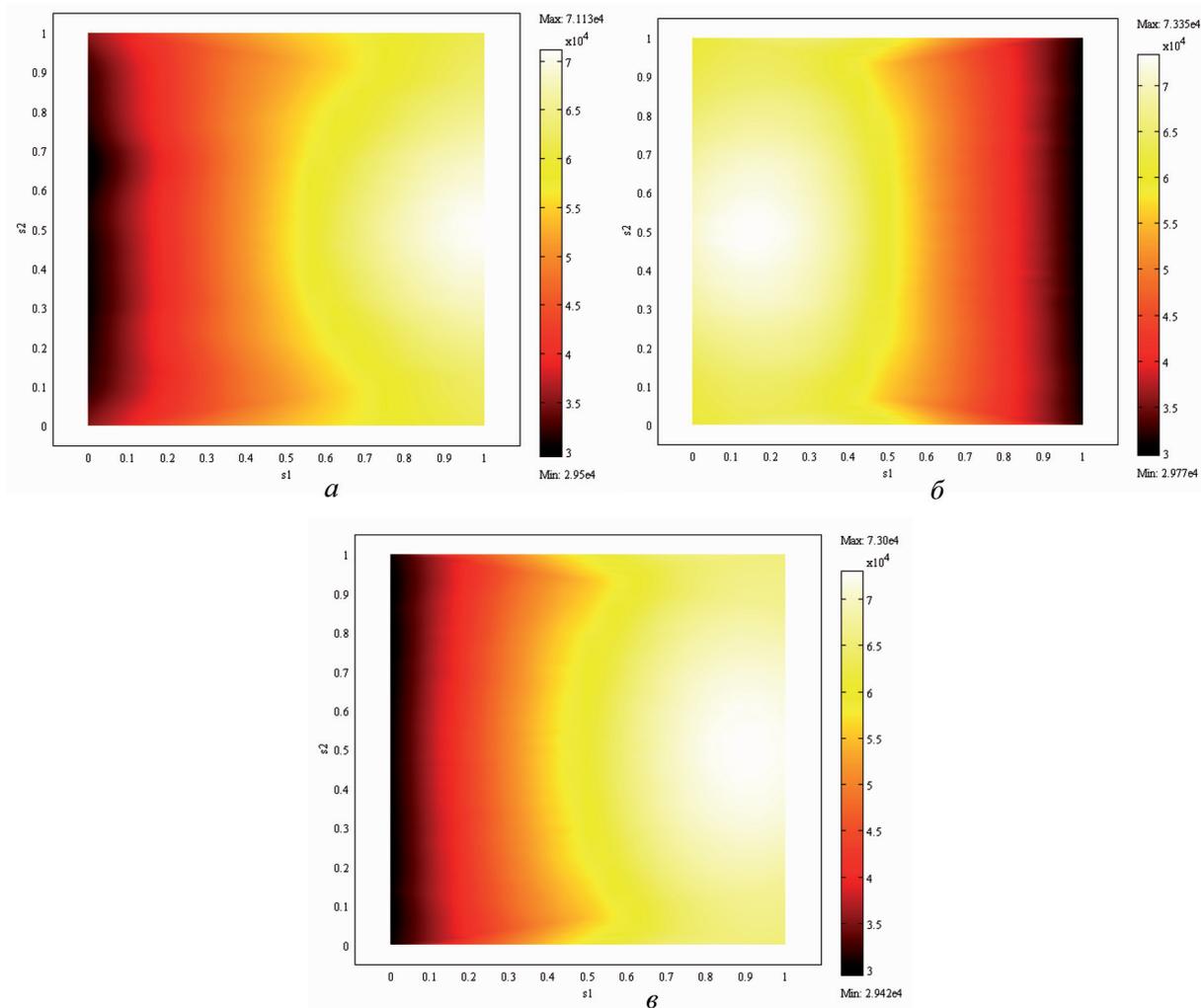


Рис. 6. Тепловые потоки на расчетные поверхности, Вт (согласно рис. 7) в момент времени 750 с: а – первая поверхность; б – вторая поверхность; в – третья поверхность

Для всего времени нагрева (3660 с) для двух горелок расход природного газа составит:

$$V_{\text{сум}} = 2 \cdot 5,97 \cdot 10^{-4} \cdot 3660 = 4,37 \text{ м}^3.$$

В дальнейшем выполнена оценка теплотехнических показателей работы данной печи при различных вариантах установки боковых горелок. Базовым расчетом при численном моделировании являлся эксперимент с предварительно прогретой печью, работой двух боковых короткофакельных горелок, которые осуществляли нагрев трех цилиндрических стальных заготовок общей массой 300 кг по режиму закалки.

Ниже приведены численные расчеты моделирования тепловой работы печи при различной установке боковых горелок. Выбранные контрольные точки имеют следующие координаты: (0,45;0,335;0,15), (0,45;0,5;0,15).

1. Базовый вариант. Относительная высота установки боковых горелок 0,5/0,7.

Результирующие тепловые потоки и температуры в контрольных точках приведены на рис. 7, 8.

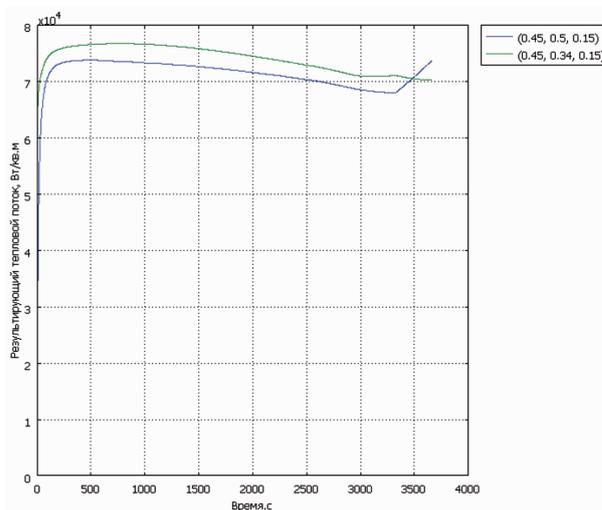


Рис. 7. Результирующий тепловой поток на металл

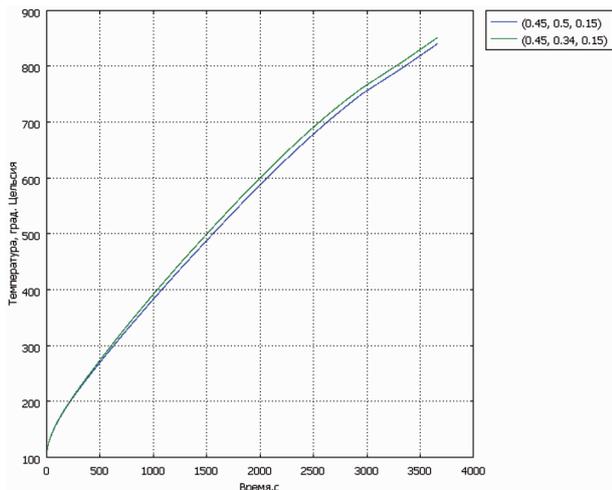


Рис. 8. Динамика нагрева заготовок

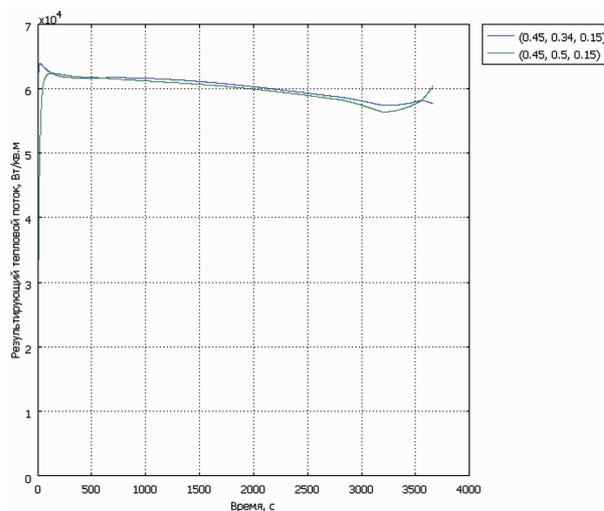


Рис. 11. Результирующий тепловой поток на металл

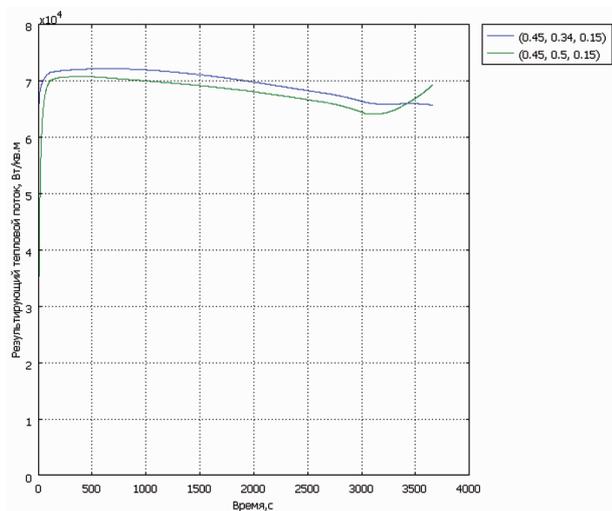


Рис. 9. Результирующий тепловой поток на металл

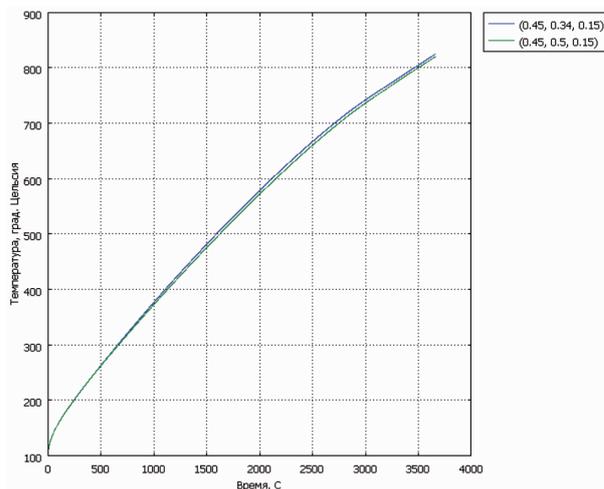


Рис. 12. Динамика нагрева заготовок

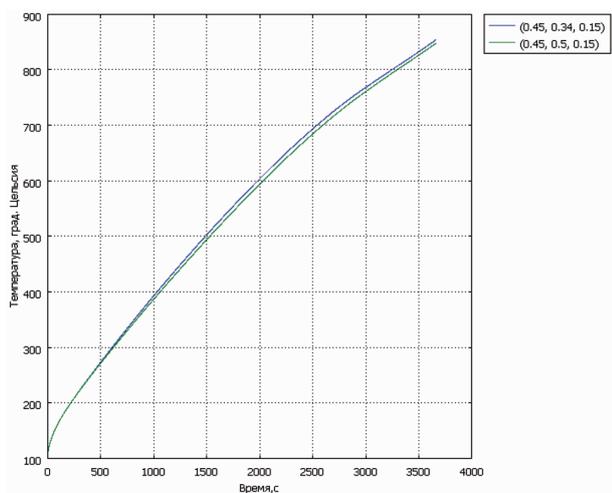


Рис. 10. Динамика нагрева заготовок

2. Относительная высота установки боковых горелок 0,4/0,7.

Результирующие тепловые потоки и температуры в контрольных точках приведены на рис. 9, 10.

3. Относительная высота установки боковых горелок 0,3/0,7.

Результирующие тепловые потоки и температуры в контрольных точках приведены на рис. 11, 12.

Таким образом, как показывают расчеты, определение рационального места установки боковых горелок дает повышение коэффициента полезного действия печи на 1,5 % при сохранении подаваемой в печь тепловой мощности и в пределах допустимых подающих потоков на заготовки данного типа, размера и марки стали.

Литература

1. Гринчук П. С., Ознобишин А. Н., Торопов В. В., Якутович Н. В. Нагрев металла в газопламенных печах. Математическое моделирование и экспериментальное исследование // VI Минский междунар. форум по тепломассообмену. 2008. С. 310–314.