



*Results of mathematical modeling of heat exchange processes in transfer heating furnaces of continuous operation type of machine-building production are given.*

Д. В. МЕНДЕЛЕВ, И. А. ТРУСОВА, П. Э. РАТНИКОВ, БНТУ, М. Л. ГЕРМАН, БелГЭИ

УДК 669.04

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛООБМЕНА В НАГРЕВАТЕЛЬНОЙ ПЕЧИ С ГЛАДКИМ ПОДОМ

При математическом моделировании процессов теплообмена в нагревательных печах необходимо учитывать ряд параметров [1–12]: форму и размер нагреваемых заготовок, теплофизические свойства стали, размещение заготовок на поду, расположение и тип горелочных устройств, температурно-тепловой режим, вид теплообмена и т. д. В существующих в настоящее время высокотемпературных печах прокатного, кузнечного и штамповочного производств определяющим фактором передачи теплоты к нагреваемому материалу является создание условий радиационного теплообмена между источниками излучения и нагреваемым металлом, причем, как известно, радиационная составляющая теплового потока составляет 85–90%. Основным механизмом интенсификации радиационного теплообмена – повышение температуры источников излучения, степени черноты поверхностей, участвующих в теплообмене, и создание наиболее рациональной геометрии системы, в которой протекают теплообменные процессы. Источниками излучения в нагревательных печах служат боковые стены, под и свод печи, причем доля свода в радиационном теплообмене преобладающая (до 70%). Повышение температуры свода печи приводит к необходимости применения дорогостоящих высокотемпературных огнеупорных материалов, увеличению теплостойкости конструкции свода и, как следствие, значительному удорожанию печи. Следует также отметить, что при организации сводового отопления сжигание топлива происходит непосредственно на поверхности огнеупорного свода с вероятностью получения температур, близких к калориметрическим  $T_{cb} > 1800$  °С, что значительно снижает срок службы огнеупоров. Анализ технической литературы [12–22] и имеющегося производственного опыта показывает, что в по-

следнее время получают применение различные способы повышения конвективной составляющей теплообмена (в частности, за счет организации струйного конвективного теплообмена).

В настоящей работе приведены результаты математического моделирования процессов теплообмена в проходных нагревательных печах непрерывного типа действия машиностроительного производства.

Математическая модель учитывает теплообмен между дымовыми газами, футеровкой печи и нагреваемым металлом с учетом перечисленных выше параметров. Уравнение переноса энергии в нестационарном случае имеет вид

$$c_p^g \rho_g \frac{\partial T_g(r)}{\partial t} + \text{div}(c_p^g \rho_g v(r) T_g(r)) - \lambda_g \text{grad} T_g(r) = q_c(r) - \text{div} q_r(r), \quad (1)$$

где  $t$  – время;  $\rho_g$ ,  $c_p^g$ ,  $\lambda_g$  – соответственно плотность, кг/м<sup>3</sup>, теплоемкость, Дж/(кг·К) и эффективный (с учетом турбулентных пульсаций) коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К) печной среды (дымовых газов).

Для корректного определения поля температур в объеме печи из уравнения (1) необходимо знать распределение скоростей  $v(r)$ , объемную плотность тепловых (горение газа и окисление металла)  $q_c(r)$  и радиационных  $\text{div} q_r$  источников.

Турбулентное поле движения смеси молекулярных газов (распределение скоростей газов) можно рассчитать на основе осредненных во времени уравнений Навье-Стокса с использованием двухпараметрической  $k$ - $\varepsilon$ -модели турбулентности. Формально систему этих уравнений можно представить в виде обобщенного уравнения

$$\operatorname{div}(\rho_g \nu F(r) - \Gamma_F \operatorname{grad} F(r)) = S_F(r), \quad (2)$$

где  $F(r) = (v_x, v_y, v_z, k, \varepsilon, I)$  – обобщенная переменная;  $\Gamma_F$  – коэффициент диффузии величины  $F$ ;  $S_F$  – объемный источник  $F$ .

Математическую модель теплообмена между заготовками, дымовыми газами и элементами футеровки, включающую уравнения (1), (2), можно записать в трехмерной постановке нагрева заготовок с граничными условиями III рода:

$$\left\{ \begin{aligned} \rho_{li} c_{pli} \frac{\partial T_{li}}{\partial t} &= \rho_{li} c_{pli} U_{ns} \nabla T_{li} + \sum q_b, \\ \rho_{2j} c_{p2j} \frac{\partial T_{2j}}{\partial t} &= \nabla(\lambda_{2j} \nabla T_{2j}), \\ \rho_m c_{pm} \frac{\partial T_m}{\partial t} &= \nabla(\lambda_m \nabla T_m), \\ \rho_{li} (U_{ns} \nabla) U_{ns} &= \nabla[-p + (\eta_{li} + \eta_{liT}) \nabla U_{ns}], \\ \rho_{li} U_{ns} \nabla k &= \nabla[(\eta_{li} + \eta_{liT} / \sigma_k) \nabla k] + \eta_{liT} - \rho_{li} \varepsilon, \\ \rho_{li} U_{ns} \nabla \varepsilon &= \nabla[(\eta_{li} + \eta_{liT} / \sigma_\varepsilon) \nabla \varepsilon] + \\ &+ C_{\varepsilon_1} \varepsilon \eta_{liT} / k - C_{\varepsilon_2} \rho_{li} \varepsilon^2 / k, \quad \nabla U_{ns} = 0, \\ n(\lambda_{2j} \nabla T_{2j})|_{\text{заг.-д.г.}} &= \alpha_{ij} (T_{li} - T_{2j}) + \\ &+ \sum_{m=1}^l \sigma(\varphi_{mj} \varepsilon_m T_m^4 - \varphi_{jm} \varepsilon_{2j} T_{2j}^4), \\ n(\lambda_m \nabla T_m)|_{\text{фут.-д.г.}} &= \alpha_{im} (T_i - T_m) + \\ &+ \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq n}}^l \sigma(\varphi_{mn} \varepsilon_m T_m^4 - \varphi_{nm} \varepsilon_n T_n^4), \\ n(\lambda_m \nabla T_m)|_{\text{фут.-воздух}} &= \alpha_{vm} (T_m - T_v), \end{aligned} \right. \quad (3)$$

где  $t$  – независимая переменная (время);  $U_{ns} = \sqrt{u^2 + v^2 + \omega^2}$ ;  $u, v, \omega$  – декартовы проекции скорости дымовых газов в точке;  $\eta_{liT} = \rho_{li} C_\mu k^2 / \varepsilon$ ;  $p$  – давление дымовых газов в точке;  $\sum q_b$  – сумма объемных тепловых источников (теплота от горелок);  $\rho_{2j}, c_{p2j}, \lambda_{2j}, T_{2j}$  – плотность, удельная теплоемкость, коэффициент теплопроводности и температура  $j$ -й заготовки;  $\rho_{li}, c_{pli}, T_{li}, \eta_{li}$  – плотность, удельная теплоемкость, температура и динамическая вязкость дымовых газов в  $i$ -й зоне печи;  $\rho_m, c_{pm}, \lambda_m, T_m$  – плотность, удельная теплоемкость, коэффициент теплопроводности и температура  $m$ -го элемента футеровки;  $T_v$  – температура окружающей среды;  $\alpha_{im}, \alpha_{ij}, \alpha_{vm}$  – коэффициенты конвективного теплообмена между дымовыми газами и футеровкой, между дымовыми газами и заготовкой, между окружающим воздухом и наружной поверхностью футеровки;  $\varphi_{mj}, \varphi_{jm}, \varphi_{mn}, \varphi_{nm}$  –

угловые коэффициенты;  $\varepsilon_m, \varepsilon_n, \varepsilon_{2j}$  – степени черноты элементов футеровки печи и заготовок, участвующих в теплообмене;  $C_{\varepsilon_1}, C_{\varepsilon_2}, C_\mu, \sigma_k, \sigma_\varepsilon, k, \varepsilon$  – параметрические коэффициенты  $k$ - $\varepsilon$ -модели турбулентности.

Зависимость динамической вязкости и плотности дымовых газов от температуры в  $i$ -й зоне печи:

$$\eta_{li} = 0,272 T_i^{0,7265} \cdot 10^{-6} \text{ Пуаз}, \quad (4)$$

$$\rho_{li} = 439,98 \cdot T_i^{-1,0319} \text{ кг/м}^3.$$

При переходе от уравнений (1), (2) к системе уравнений (3) сделано упрощение, состоящее в исключении радиационной составляющей дымовых газов. При численном моделировании в расчетном программном пакете ComsolMultiphysics источник энергии задается в виде объемного теплового источника в каждой горелке ( $q_b$ ). Использовано известное упрощение, связанное с тем, что в печь через каждое сечение «горелка-печное пространство» поступают горячие продукты сгорания. На каждом сечении «горелка-печное пространство» задается скорость истечения продуктов сгорания, а температура регламентируется тепловым источником в горелке. При выполнении расчетов использовано также допущение, связанное с тем, что температура внутренней поверхности футеровки принимается практически равной температуре дымовых газов, т. е. футеровка печи, а конкретнее, термическое сопротивление кладки, выбрано таким образом, чтобы суммарная плотность теплового потока с ее внешней поверхности находилась на уровне  $200 \text{ Вт/м}^2$ . Выполненные расчеты подтвердили, что разницу между температурой дымовых газов и температурой внутренней поверхности футеровки можно оценить в диапазоне  $5\text{--}10 \text{ }^\circ\text{C}$ . Это позволяет учитывать угловые коэффициенты при излучении и переизлучении элементов конструкции футеровки и заготовок, участвующих в теплообмене, а саму среду дымовых газов принять полупрозрачной. При этом для значений коэффициентов суммарной теплоотдачи между указанными элементами (футеровка-дымовые газы; заготовки-дымовые газы) учитывается только конвективная составляющая, которая зависит от поля скоростей дымовых газов, взаимного расположения рассматриваемых элементов и т. д.

Следует также отметить, что поле температур всегда зависит от поля скоростей. В отношении же поля скоростей можно выделить такие течения, в которых тепловое воздействие весьма мало по сравнению с воздействием внешнего побудителя движения. Поэтому в условиях вынужденной кон-

векции часто пренебрегают влиянием поля температур на поле скоростей и учитывают только обратное действие. Этот прием имеет важное методологическое значение, так как упрощает исследование теплообмена в ряде практически важных задач с дозвуковыми скоростями.

Таким образом, при решении системы уравнений (3) на первом этапе осуществляют подбор значений полей скоростей и давлений по зонам печи, а на втором – расчет температурного поля заготовок. Решение поставленной математической модели (3), (4) проводят методом конечных элементов.

Ниже в качестве примера приведены результаты численного моделирования тепловой работы типовой нагревательной печи № 40 ОАО «МАЗ» с гладким подом. На печи установлены газомазутные комбинированные горелки с акустическим излучателем КГМГ-А2 номинальной тепловой мощностью 310 кВт и коэффициентом рабочего регулирования 4,6. Как показали расчеты, тепловая мощность печи составляет 67,3% от номинальной.

При моделировании предполагалась замена действующих горелок (устаревшей конструкции) на скоростные короткофакельные горелки ВИС 140,

имеющие следующие основные характеристики: диапазон регулирования тепловой мощности – 32–320 кВт; скорость истечения дымовых газов – 125 м/с; тип керамической насадки В085; тип горелки *R*; диаметр выходного сечения горелки – 142 мм; подводимое давление воздуха – 32 мбар и природного газа – 23 мбар. Замена горелочных устройств предполагает увеличение конвективной составляющей при теплообмене на поверхности заготовок. Перераспределение тепловых мощностей горелочных устройств осуществляли с учетом предельно допустимых плотностей тепловых потоков на металл. Допустимые плотности тепловых потоков на металл имеют значения, при которых температурные напряжения, возникающие в заготовках, не превышают предела прочности для марки стали этих заготовок. Термические напряжения оценивали по формулам, приведенным в монографии [23]. На рис. 1 показана расчетная схема рассматриваемой печи.

На рис. 2 приведены конечно-элементная сетка и численное решение задачи газодинамики в рабочем пространстве рассматриваемой печи с указанием тока дымовых газов.

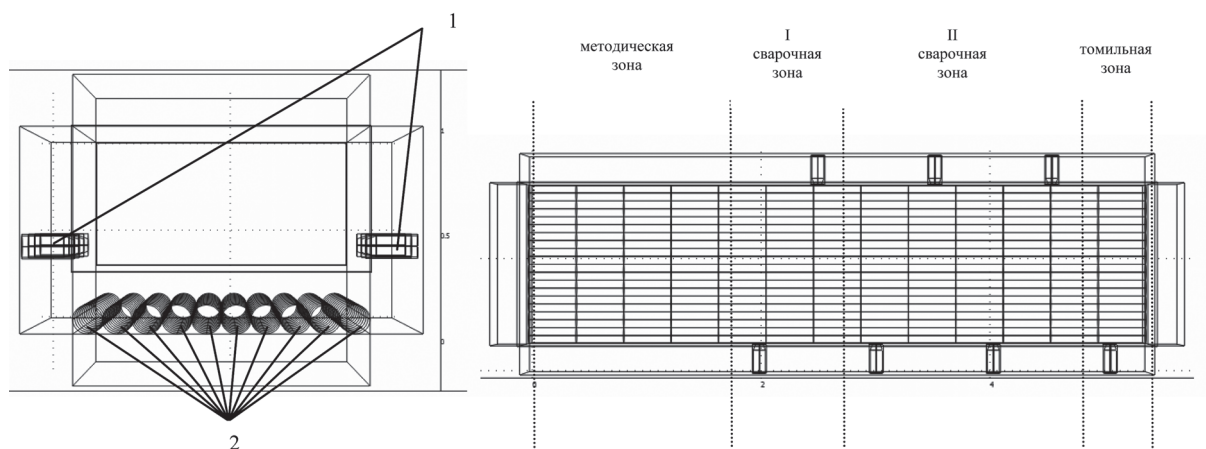


Рис. 1. Схема расчета печи № 40 ОАО «МАЗ»: 1 – горелки; 2 – заготовки

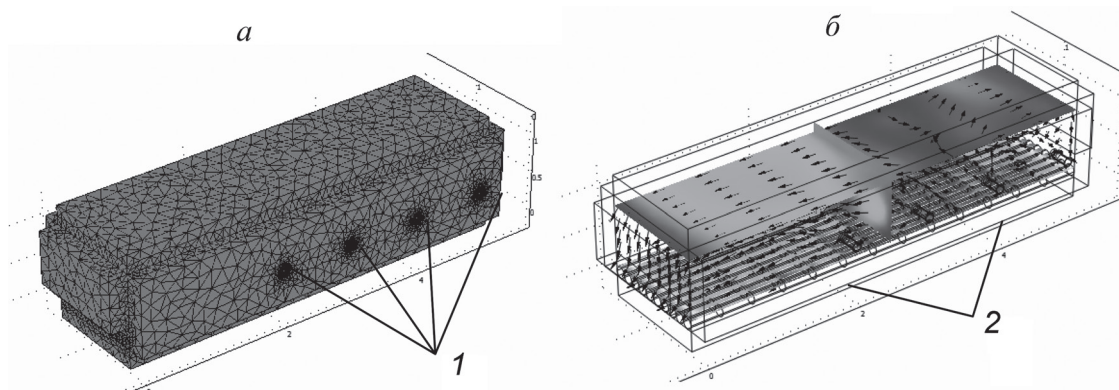


Рис. 2. Численное решение задачи газодинамики в рабочем пространстве печи № 40 ОАО «МАЗ»: а – конечно-элементная сетка; б – распределение скоростей дымовых газов в выбранных сечениях, м/с; 1 – горелки; 2 – заготовки

Рациональное распределение тепловой мощности горелочных устройств по зонам печи (I сварочная – две горелки: 280–280 кВт; II сварочная – четыре горелки: 175–175–175–175 кВт; томильная – одна горелка: 140 кВт) от суммарной тепловой мощности печи приведено в таблице.

**Рациональное распределение тепловой мощности горелочных устройств по зонам, %, от суммарной тепловой мощности печи № 40 ОАО «МАЗ»**

Вариант	I сварочная зона	II сварочная зона	Томильная зона
Предлагаемый	40	50	10
Существующий	30	55	15

Анализ результатов расчетов показал, что замена горелочных устройств и перераспределение их тепловой мощности по длине рабочей зоны конкретной печи практически не дает существенных результатов. Удельный расход условного топлива сокращается всего лишь на 2,5 кг у. т./т при существующем расходе 310 кг у. т./т.

Более существенных результатов (увеличения и равномерного распределения конвективной составляющей на поверхности заготовок) можно достичь при изменении конструкции пода печи (например, на конструкцию ручьевого типа) и увеличении расстояния между осями заготовок.

### Литература

1. Кутателадзе С. С. Основы теории теплообмена / С. С. Кутателадзе. 5-е изд., перераб. и доп. М.: Атомиздат, 1979.
2. Стальной слиток. В 3-х т. Т. 3. Нагрев / В. И. Тимошпольский, Ю. А. Самойлович, И. А. Трусова и др. Мн.: Белорусская наука, 2001.
3. Антонов В. И. Математическая модель процесса нагрева слитков под ковку в пламенных камерных печах / В. И. Антонов // Изв. вузов. Черная металлургия. 1979. № 1. С. 131–134.
4. Бердышев В. Ф. К вопросу адаптации математической модели нагрева металла и тепловой работы методической печи / В. Ф. Бердышев, Р. Э. Найденов, К. С. Шагохин // Изв. вузов. Черная металлургия. 1996. № 1. С. 73–74.
5. Srisertpol J. Estimation of the mathematical model of the reheating furnace walking hearth type in heating curve up process / J. Srisertpol etc. // International journal of mathematical models and methods in applied sciences, 2011. Issue 1. Vol. 5. P. 167–174.
6. Purushothaman R. Evaluation and improvement of heat treat furnace model: dis. ... PhD: manufacturing engineering / R. Purushothaman. Worcester, 2008.
7. Гончаров А. Л. Использование математической модели пламенной печи для разработки АСУТП нагрева металла / А. Л. Гончаров, В. Т. Лисиенко, И. М. Резник // Изв. вузов. Черная металлургия. 1991. № 4. С. 77–81.
8. Ревун М. П. Теоретические основы и методы интенсификации теплообменных процессов в металлургических нагревательных печах: дис. ... д-ра техн. наук: Запорожье, 1983.
9. Парамонов А. М. Научные основы повышения эффективности работы печных агрегатов: дис. ... д-ра техн. наук. Омск, 2007.
10. Денисов М. А. Разработка и применение методов теплофизического исследования резервов ресурсосбережения в процессах нагрева металла: дис. ... д-ра техн. наук. Екатеринбург, 2005.
11. Федяев А. А. Разработка и научное обоснование теплотехнических приемов и технических решений для повышения энергоэффективности теплотехнологического оборудования: дис. ... д-ра техн. наук. М., 2008.
12. Краснокутский П. Г. Исследование и разработка печей скоростного струйного нагрева заготовок на сплошном керамическом поду: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 1978.
13. Шувалов Ю. В. Совершенствование устройств струйного нагрева и охлаждения металла в протяжных печах: дис. ... канд. техн. наук. М., 1984.
14. Зубкова М. М. Исследование и разработка режимов нагрева в скоростных конвективных печах: дис. ... канд. техн. наук. М., 1984.
15. Власова И. Н. Разработка и совершенствование систем отопления и конструкций печей скоростного конвективного нагрева металла: дис. ... канд. техн. наук. М., 1983.
16. Осташев С. И. Интенсификация конвективного теплообмена в промышленных циклонных секционных нагревательных устройствах: дис. ... д-ра техн. наук. Архангельск, 2009.
17. Шперный А. В. Исследование и разработка печей струйного типа для низкотемпературного нагрева металла: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Днепропетровск, 1994.
18. Пилипенко Р. А. Разработка и исследование эффективных теплотехнологических агрегатов с рециркуляцией греющих газов: дис. ... канд. техн. наук. Киев, 1985.
19. Саплин А. В. Имитационная модель секционной печи скоростного газового нагрева трубных заготовок / А. В. Саплин [и др.] // Изв. вузов. Черная металлургия, 1997. № 2. С. 52–56.
20. Энно И. К. Анализ особенностей скоростного струйного нагрева заготовок в кузнечных печах / И. К. Энно, В. В. Курносов // Кузнечно-штамповочное производство. 1990. № 10. С. 26–25.
21. Прибытков И. А. Радиционно-струйный нагрев металла / И. А. Прибытков // Автоматизированный печной агрегат-основа энергосберегающих технологий металлургии XXI века: материалы междунар. науч.-практ. конф. М., 15–17 ноября 2000 г. С. 250–251.
22. Исследование процессов высокоэнергетического струйного конвективного и радиационного нагрева термически массивных изделий с целью разработки оптимальных теплотехнологий. Минск, 2010.
23. Тайц Н. Ю. Технология нагрева стали. / Н. Ю. Тайц. М.: Металлургия, 1962.