

The mathematical model of heat exchange in chamber heating furnace is developed and solved.

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

УДК 669.04

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕПЛОБМЕНА В КАМЕРНОЙ НАГРЕВАТЕЛЬНОЙ ПЕЧИ

При разработке и последующем решении математической модели теплообмена в камерной нагревательной печи необходимо учитывать ряд параметров: форму, размер и количество заготовок, их химический состав; способ размещения заготовок на поду относительно друг друга, стен печи, а также относительно горелочных устройств; форму нагревательной камеры; способ нагрева заготовок, вид теплообмена и т. д.

Например, 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 радиационная составляющая теплового потока может достигать до 90% [1–7]. При этом основным механизмом интенсификации радиационного теплообмена является повышение температуры источников излучения, увеличение степени черноты поверхностей, участвующих в теплообмене, и создание наиболее рациональной геометрии системы, в которой протекают теплообменные процессы.

Источниками излучения в нагревательных печах являются 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, повышению теплостойкости конструкции свода и, как следствие, значительному удорожанию печи. Также следует отметить, что при организации сводового отопления (установка горелок на свод) вследствие конструктивных особенностей горелок сжигание топлива происходит непосредственно на поверхности огнеупорного свода с вероятностью получения температур, близких к калометрическим $T_{св} > 1800$ °С, что значительно снижает срок службы огнеупоров.

Таким образом, 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, а степень черноты поверхностей теплообмена близка к единице, степень черноты продуктов сгорания топлива в существующих конструкциях относительно низкая [8].

В то же время анализ технической литературы [9–23] и имеющегося производственного опыта показывает, что в последнее время ведущими фирмами в области строительства металлургических печей исследуются и находят практическое применение различные способы интенсификации тепловой работы печей путем повышения конвективной составляющей теплообмена (в частности, за счет организации струйного конвективного теплообмена).

Применение скоростных горелок в установках интенсивного конвективного нагрева и необходимость их разработки и совершенствования выдвигают на передний план вопросы моделирования работы горелок.

Математическая модель теплообмена в камерной нагревательной печи сводится к математической формулировке задачи сопряженного теплообмена между дымовыми газами, футеровкой печи и нагреваемым металлом с учетом перечисленных выше параметров.

Процесс теплообмена в рабочем пространстве высокотемпературной установки между дымовыми газами и тепловоспринимающими поверхностями описывается уравнением переноса энергии, которое в нестационарном случае имеет вид [24]

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

Здесь t – время; ρ_g , c_p^g и λ_g – соответственно плотность, кг/м³, теплоемкость, Дж/(кг·К), и эффективный (с учетом турбулентных пульсаций) коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К) печной среды (дымовых газов). Все коэффициенты уравнения (1) зависят от координаты r и температуры T_g . Для корректного определения поля температур в объеме печи из уравнения (1) необходимо знать распределение скоростей $\vartheta(\mathbf{r})$, объемную плотность тепловых (горение газа и окисление металла) $q_c(\mathbf{r})$ 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 [25] с использованием двухпараметрической k - ε -модели турбулентности [26]. Формально систему этих уравнений можно представить в виде обобщенного уравнения

$$\text{div}(\rho_g \vartheta F(\mathbf{r}) - \Gamma_F \text{grad} F(\mathbf{r})) = S_F(\mathbf{r}), \quad (2)$$

где $F(\mathbf{r}) = (\vartheta_x, \vartheta_y, \vartheta_z, k, \varepsilon, 1)$ – обобщенная переменная; Γ_F – коэффициент диффузии величины F ; S_F – объемный источник F .

При математическом моделировании теплообмена в камерной нагревательной печи все численные характеристики изучаемого процесса можно разбить на два класса: не изменяющиеся в ходе процесса (константы) и соответственно меняющие свое значение (переменные). В свою очередь в каждом из этих классов можно выделить два подкласса: численные характеристики, которые могут быть измерены лабораторными методами в ходе эксперимента (измеряемые константы и переменные), и характеристики, которые либо вообще не могут быть измерены на современном уровне развития науки, либо их измерение чрезвычайно трудоемко и дорого (не измеряемые константы и переменные).

На первом этапе построения математической модели любого процесса необходимо выбрать общую структуру модели и класс уравнений, которыми предполагается описать наблюдаемый процесс, т. е. решить так называемую задачу структурной идентификации. Что касается выбора структуры модели, то ее сложность определяется конечными целями исследования, теоретическими соображениями о механизме процессов и не в последнюю очередь возможностями измерений в ходе эксперимента и возможностями математического обеспечения обработки результатов.

Когда структура модели и класс уравнений определены, то необходимо найти числовые значения констант, вошедших в уравнения математической модели.

На этом этапе построения математической модели возникает задача параметрической идентификации или нахождения числовых значений неизменяемых констант по имеющимся экспериментальным данным, т. е. по значениям измеряемых переменных (откликам).

Математическую модель (1),(2) можно упростить, записав в двумерной постановке, и представить с учетом представления выражений, констант и переменных для расчетного пакета FemLab Comsol Multiphysics [27,28]:

$$\left\{ \begin{array}{l} -\frac{\partial}{\partial x} \left(\eta_1 \frac{\partial u}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\eta_1 \frac{\partial u}{\partial x} \right) = -\rho_1 u \frac{\partial u}{\partial x} - \rho_1 v \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial p}{\partial x}, \\ -\frac{\partial}{\partial x} \left(\eta_1 \frac{\partial v}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\eta_1 \frac{\partial v}{\partial y} \right) = -\rho_1 u \frac{\partial v}{\partial x} - \rho_1 v \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{\partial p}{\partial y}, \\ \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0, \\ \nabla(-k_1 \nabla T_1) = Q - \rho_1 C_{p1} u_r \nabla T_1, \\ \delta_{ts} \rho_2 C_{p2} \frac{\partial T_2}{\partial t} + n(k_1 \nabla T_1 - k_2 \nabla T_2) = q_0 + h(T_A - T_2) + \sigma(T_A^4 - T_2^4), \end{array} \right. \quad (3)$$

t – независимая переменная (время); $\vec{a} = (u, v, \eta_1, \rho_1, k_1, C_{p1}, T_1, \rho_2, C_{p2}, k_2, T_A, \sigma, h, D_B, h_B, d_B, T_B, x_B, x_F, y_F)^T$ – вектор параметров и констант модели; u, v – скорости дымовых газов по оси x и y ; x_B – расстояние между заготовками в печи размером по ширине x_F ; d_B – диаметр заготовок; D_B – диаметр сопла горелки (или сумма диаметров сопел); y_F – высота камеры сгорания; h_B – высота, на которой находятся горелки; T_B – температура дымовых газов на выходе из сопла горелки; ρ_2, C_{p2}, k_2 – теплотехнические показатели заготовок; $\eta_1 = 0,0424$ (сПуаз), $\rho_1 = 0,87 \left(\frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \right)$, $k_1 = 0,1 \left(\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}} \right)$, $C_{p1} = 1544 \left(\frac{\text{Дж}}{\text{м}^3 \cdot \text{К}} \right)$ – механические и теплотехнические показатели дымовых газов; $\vec{y}(t) = (\nabla T_{21}(t), \dots, \nabla T_{2m}(t))^T$ – вектор откликов модели (распределение температуры по сечению заготовки).

В ходе эксперимента $[0, T_E]$ определяются значения откликов в некоторые моменты времени $\{t_0, \dots, t_s\}$, т. е. составляется матрица наблюдений:

$$W = \begin{bmatrix} y_{11} & \dots & y_{1s} \\ \dots & \dots & \dots \\ y_{m1} & \dots & y_{ms} \end{bmatrix}$$

В дальнейшем проводятся серии многовариантных расчетов для определения таких числовых значений параметров a (составление множества матриц наблюдения), при которых проведенный расчет нагрева заготовок в расчетном пакете и какой-нибудь известный проведенный эксперимент будут иметь схожие значения откликов, а в пределе – лучшие.

При достижении последнего это будет означать, что на нагрев заготовок будет затрачено меньшее количество топлива, поскольку время нагрева будет меньше, либо температурное распределение по сечению заготовки будет лучшим (меньший температурный перепад между минимумом и максимумом), либо и то и другое одновременно.

Литература

1. Bergman T. L., Viskanta R. Radiation heat transfer in manufacturing and material processing // Proc. First Int. Symp. on Radiation Transfer, Kasadasi, Turkey. 1995. P. 13–39.
2. Anderson R. L. Review of temperature measurements in the semiconductor industry // SPIE. 1990. Vol. 1392. P. 437–451.
3. Тимошпольский В. И., Герман М. Л., Гринчук П. С., Кабишов С. М. Математическое моделирование сопряженного теплообмена в нагревательных печах с подвижным подом // ИФЖ. 2006. Т. 79. № 3. С. 3–11.
4. Герман М. Л., Бородуля В. А., Ноготов Е. Ф. Тепловой расчет топочной камеры жаротрубного котла с тупиковой топкой // ИФЖ. 2000. Т. 73. № 6. С. 1191–1201.
5. Стальной слиток. В 3-х т. Т. 3. Нагрев / В. И. Тимошпольский, Ю. А. Самойлович, И. А. Трусова и др.; Под общ. ред. В. И. Тимошпольского, Ю. А. Самойловича. Мн.: Белорусская наука, 2001.
6. Металлургические печи. Теория и расчеты: Учеб. В 2-х т. Т.1 / В. И. Губинский, В. И. Тимошпольский, В. М. Ольшанский, Б. С. Матрюков и др.; под общ. ред. В. И. Тимошпольского, В. И. Губинского. Мн.: Белорусская наука, 2007.
7. Тимошпольский В. И., Постольник Ю. С., Ратников П. Э., Кондрашева О. А. Математическое моделирование нелинейных процессов нагрева (противоточный теплообмен) в металлургии и машиностроении // ИФЖ. 2008. Т. 81. № 1. С. 108–116.
8. Прибытков И. А., Кобахидзе В. В., Кривандин В. А. О задаче внешнего теплообмена при радиационно-струйном нагреве металла // Изв. высш. учеб. завед. Черная металлургия. 1998. № 7. С. 62–65.
9. Асцатуров В. Н. Интенсификация тепловой работы нагревательных печей // Материалы 2-й Междунар. науч.-практ. конф. «Автоматизированные печные агрегаты и энергосберегающие технологии в металлургии». М., 3–5 декабря, 2002. М.: Изд-во «Учеба» МИСиС. 2002. С. 36–40.
10. Копытов В. Ф. Новые методы газового нагрева. М.: Metallurgizdat, 1962.
11. Бергауз А. Л., Ротенберг М. А. Рекуперативная печь скоростного конвективного нагрева // Экономичные методы нагрева в кузнечно-штамповочном производстве. М.: Знание РСФСР, 1980. С. 127–129.
12. Опыт эксплуатации газовой автоматизированной печи скоростного конвективного нагрева / М. А. Ротенберг, М. М. Зубкова, П. С. Берковская, И. А. Дубовской // Кузнечно-штамповочное производство. 1978. № 3. С. 36–38.
13. Бергауз А. Л., Ротенберг М. А. Газовые печи скоростного конвективного нагрева // Использование газа в народном хозяйстве. М.: ВНИИЭгазпром, 1978.
14. Экспериментальное и теоретическое исследование скоростного струйно-факельного нагрева / Г. К. Маликов, В. Г. Лисенко, К. Ю. Маликов, Д. Л. Лобанов // Изв. высш. учеб. завед. Черная металлургия. 1998. № 5. С. 68–71.
15. Скворцов А. А., Краснокутский П. Г., Смольков А. Н. Исследование режимов струйного нагрева заготовок из высокопрочного чугуна // Изв. высш. учеб. завед. Черная металлургия. 1989. № 11. С. 125–128.

16. Скоростные горелки: разработка и эксплуатация / А. Л. Бергауз, И. Н. Власова, С. А. Локшин, М. А. Ротенберг // Газовая промышленность. 1980. № 3. С. 55–57.
17. Ротенберг М. А., Слободянский А. Х., Зубкова М. М. Автоматизированная газовая нагревательная печь скоростного нагрева металла // Повышение эффективности использования топлива в нагревательных и термических печах машиностроения: Тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. семинара. М.: ВНИПИТеплопроект. 1980. С. 45–46.
18. Асцатуров В. Н., Берковская П. С., Краснокутский П. Г. Исследование нагрева металла атакующими струями при разработке многорядных печей // Тр. ВНИПИТеплопроект: печи и сушила в машиностроительной промышленности. 1978. Вып. 45. С. 3–10.
19. Установка для скоростного струйного нагрева длиномерных заготовок / В. Н. Асцатуров, П. С. Берковская, А. В. Яшкин и др. // Тр. ВНИПИТеплопроект: Конструкции и строительство тепловых агрегатов. 1980. Вып. 52. С. 68–71.
20. Скоростной струйный нагрев металла / В. Н. Асцатуров, П. Г. Краснокутский, П. С. Берковская. Киев: Техника, 1984.
21. Скоростной нагрев стальных заготовок в струйной печи / Ф. Р. Шкляр, Г. К. Маликов, В. П. Фотин и др. // Сб. науч. тр.: Metallургическая теплотехника. Свердловск, 1978. № 6. С. 61–65.
22. Струйный газовый нагрев и охлаждение листового проката / В. А. Леонтьев, Г. К. Маликов, Н. А. Зубкова и др. // Сталь. 1981. № 2. С. 83–85.
23. Тимошпольский В. И., Постольник Ю. С., Трусова И. А., Ратников П. Э., Кондрашева О. А. Прямочный конвективный нагрев металла // Республ. межвед. сб. науч. тр. Мн., 2008. Вып. 31. Metallургия. С. 3–12.
24. Теплопередача: Учеб. для вузов / Под ред. В. П. Исаченко, В. А. Осипова, А. С. Сукомела. 4-е изд., перераб и доп. М., 1981.
25. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа. М.: Наука, 1973.
26. Блох А. Г., Журавлев Ю. А., Рыжков Л. Н. Теплообмен излучением. Справ. М., 1991.
27. Егоров В. И. Применение ЭВМ для решения задач теплопроводности: Учеб. пособ. СПб: СПб ГУ ИТМО, 2006.
28. Ртищева А. С. Теоретические основы гидравлики и теплотехники: Учеб. пособ. Ульяновск: УлГТУ, 2007.