

4. Форсайт Д. А. Компьютерное зрение. Современный подход / Д. А. Форсайт, Ж. Понс. – М. : Издательский дом «Вильямс», 2004. – 928 с.

5. Шапиро Л. Компьютерное зрение. / Л. Шапиро, Дж. Стокман. – М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006. – 752 с.

6. Гонзалес Р. Цифровая обработка изображений в среде Matlab / Р. Гонзалес, Р. Вудс, С. Эддинс ; пер. с англ. В. В. Чепыжова. – М. : Техносфера, 2006. – 616 с.

7. Кудрина М. А. Использование преобразования Хафа для обнаружения прямых линий и окружностей на изображении / М. А. Кудрина // Известия Самарского научного центра РАН. – 2014. – № 4–2. – С. 476–478.

8. Сабельников П. Ю. Вычисление и использование моментов бинарных изображений при геометрическом сравнении объектов / П. Ю. Сабельников // Штучний інтелект. – 2013. – № 3. – С. 223–232.

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ЗАКАЛКИ ДЕТАЛИ В ТЕРМИЧЕСКОЙ ПЕЧИ

Разживин А. В., Белошапка Е. Д.

ДГМА, г. Краматорск

Проведение закалки в термической печи обеспечивает высокую степень закалки, позволяет внедрить полную механизацию и комплексную автоматизацию процесса, сокращает цикл закалки. Тепловой режим закалки является одним из основных параметров технологического процесса, т. к. в данный период закладываются основные физико-химические свойства закаляемой детали. Стабилизация теплового режима по зонам печи на уровне  $\pm 10$  °С является обязательным условием получения качественной продукции. Следовательно, необходима система управления температурным режимом закалки, которая будет поддерживать установленный директивный температурный график.

В связи со сложностью измерений показателей теплового состояния возникает необходимость в разработке математических моделей, которые достаточно полно описывают тепловые процессы при термической закалке деталей. Такие математические модели основываются на нелинейных дифференциальных уравнениях в частных производных, содержат граничные условия различного рода, а также условия для определения положения границы фазового перехода.

Анализ интегральных показателей энергетических процессов в газовой термической печи учет их пространственного распределения может быть сделан путем решения дифференциальных уравнений в частных производных. Такое решение позволяет описать тепловые процессы, распределенные во времени и пространстве [1, 2].

Используя уравнения теплового баланса и пренебрегая тепловым потоком, выделяемым в закаляющейся детали за счет химических реакций, можно записать:

$$c_o \cdot M_o \cdot \frac{\partial T_o}{\partial \tau} = c_c \cdot M_c \cdot \frac{\partial T_c}{\partial \tau} + \lambda_s \frac{P_c(\tau) - P_{mn}(\tau)}{\pi r_{ni}^2}, \quad (1)$$

где  $C_d, C_c$  – удельные теплоемкости массы детали и внутренней среды, соответственно;  $M_d, M_c$  – массы детали и внутренней среды, соответственно.

Анализ уравнения (1) показывает, что изменение температуры участвующих в теплообмене тел зависит от величины теплового потока, воздействующего в результате термического подогрева:

$$Q^*(t) = \lambda_{\text{пламя}} \frac{P_c(\tau) - P_{\text{ин}}(\tau)}{\pi r_{\text{пламя}}^2}. \quad (2)$$

При описании тепловых процессов, происходящих в термических установках, используют краевую задачу нестационарного теплообмена и моделирование трехмерного нестационарного распределения температуры в детали на основе интегрально-дифференциальных уравнений теплопроводности (уравнения Фурье) [2, 3].

$$\frac{\partial T_c}{\partial t} = a_1 \left( \frac{\partial^2 T_c}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_c}{\partial r} \right) + \delta(r - r_1) Q^*, \quad (3)$$

$$\frac{\partial T_d}{\partial t} = a_2 \left( \frac{\partial^2 T_d}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_d}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_d}{\partial x^2} \right) + \delta(x) [F(r, t)]. \quad (4)$$

где  $\delta(r - r_1)$ ,  $\delta(x)$  – дельта-функции по соответствующим координатам распространения тепла от горения ГВС;  $F(r, t) = \delta(r - r_1) Q^* + Q_1 [T_{\text{ин}}^*(r, t)]$  – параметр, характеризующий мощность источника тепла, передаваемого детали;  $a_2 = 1/c_d M_d$ ,  $a_1 = 1/c_n M_n$  – тепловые передаточные коэффициенты закаляющейся детали и внутренней среды, соответственно;  $C_d, C_c$  – удельная теплоемкость детали и внутренней среды;  $M_d, M_c$  – масса закаляющейся детали и внутривспечной среды.

В уравнения (3–4) приняты следующие допущения: об усреднении и равномерном распределении температуры закалки по зонам печи, цилиндрической форме печи. Такое предположение позволяет утверждать об усреднении температуры поверхностного слоя закаливаемой детали по слоям и равномерном ее распределении по всей длине печи.

Уравнение (3) описывает теплопроводность внутренней среды при наличии внутреннего источника тепла мощностью  $Q^*$ , излучаемой теплом от горения ГВС горячей непосредственно в внутри печного пространства. Уравнение (4) описывает теплопроводность (изменение температуры) в объекте закалки в процессе нагрева до температуры выдержки. Нагрев детали происходит путем непосредственного нагрева от горения ГВС и конвекционного теплообмена на поверхности внутривспечной среды и описывается мощностью источника тепла, входящим непосредственно в уравнение  $F(r, t)$ . На краях детали происходит конвекционный теплообмен с внутривспечной среды, температура которой измеряется встроенными термопарами.

Запишем начальные условия для уравнений (3) и (4):

$$T_c(r, 0) = T_\delta(x, r, 0) = T_0, \quad (5)$$

где  $T_0$  – начальная температура детали и внутрипечной среды.

При решении уравнений (3) введем допущения, что внутрипечная среда является теплоизолированным по поверхности внутрипечная среда–деталь, теплоотдача проходит только по поверхности радиусом  $R$ , а теплообмен между внутрипечной средой и деталью учтем при решении уравнения (4).

Граничные условия для уравнения (3):

$$T_{c1}(0, t) < \infty; \quad \frac{\partial T_c}{\partial r} = -\alpha_1 T_c \Big|_{r=R}. \quad (6)$$

Граничные условия для уравнения (4):

$$\frac{\partial T_\delta}{\partial x} = -\alpha_3 T_\delta \Big|_{x=l}; \quad \frac{\partial T_\delta}{\partial r} = -\alpha_2 T_\delta \Big|_{r=R}; \quad \frac{\partial T_\delta}{\partial x} = \frac{\partial T_c}{\partial x} \Big|_{x=0}. \quad (7)$$

Рассмотрим решение уравнения (3) и (4) с начальными (5) и граничными (6) условиями.

Аналитическое решение распределения температурного поля в внутрипечной среде:

$$T_c(r, t) = \sum_{n=1}^{\infty} 2T_0 \frac{\mu_n^2 J_1(\mu_n)}{[\mu_n^2 + (\alpha_1 R)^2] J_0^2(\mu_n)} e^{-\left(\frac{\alpha_1 \mu_n}{R}\right)^2 t} + \frac{2Q^* r_1}{a_1^2} \frac{J_0\left(\frac{\mu_n}{R} r_1\right)}{[\mu_n^2 + (\alpha_1 R)^2] J_0^2(\mu_n)} (1 - e^{-\left(\frac{\alpha_1 \mu_n}{R}\right)^2 t}) J_0\left(\frac{\mu_n}{R} r\right). \quad (8)$$

Аналитическое решение распределения температурного поля на поверхности детали:

$$T_\delta(x, r, t) = \sum_{k=1}^{\infty} \left( \sum_{i=1}^{\infty} Q_{ki}(t) J_0\left(\frac{\chi_i}{R} r\right) \right) \cos \frac{p_k}{h} x. \quad (9)$$

Полученные динамические модели (8) и (9) являются нелинейными, и отражают специфическую реакцию многих термических установок. Специфическая реакция проявляется в наличии двух составляющих, одна из которых соответствует относительно быстрой реакции поверхностных слоев (внутренней среды), а вторая – более медленному распределению тепла в детали.

По результатам теоретических исследований процесса теплообмена в замкнутом пространстве печи получены поверхности изменения температуры в процессе нагрева детали. При решении системы уравнений использован МПП MatLab и встроенная функция PDE. Результаты моделирования приведены на рис. 1.

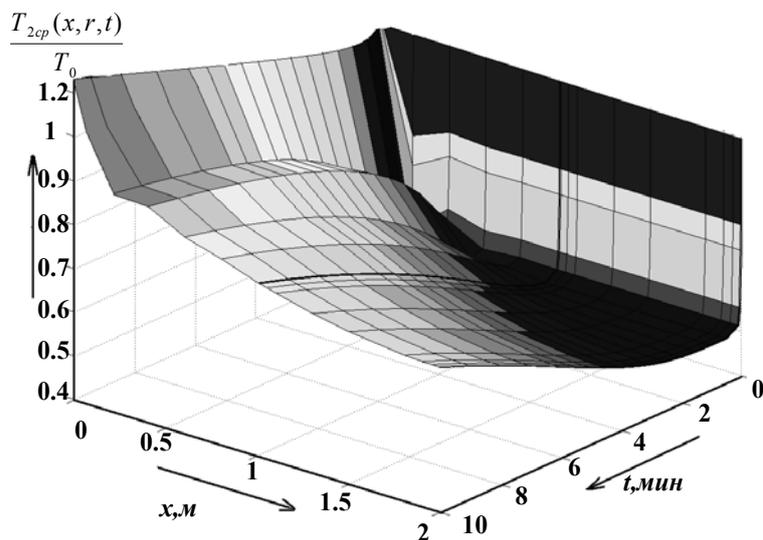


Рисунок 1 – Распределение температуры по глубине  
внутрипечной среды при  $R = \frac{2}{3} R_{\text{внутрипечная-среда}}$

## ВЫВОДЫ

Получена математическая модель тепловых параметров закалки технологического комплекса, которая учитывает изменяющиеся в процессе закалки тепловые, технологические параметры.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Егоров А. И. Основы теории управления / А. И. Егоров. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 504 с.
2. Дьяконов В. П. MATLAB 6/6.1/6.5 + Simulink 4/5. Основы применения. Полное руководство пользователя / В. П. Дьяков. – М. : Солон-Пресс, 2002. – 800 с.
3. Краснокутская И. Н. Анализ направлений энергосбережения в нагревательных и термических камерных печах / И. Н. Краснокутская, В. Г. Рыжков // *Металлург.* – 2008. – № 12.

## АНАЛИЗ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ ДУГОВОЙ ПЛАВКЕ МЕТАЛЛА

**Разживин А. В., Храмов С. О.**

*ДГМА, г. Краматорск*

Наиболее важным элементом в электрическом контуре дуговой сталеплавильной печи (ДСП) является электрическая дуга, определяющая работу печи и характер процессов в электрическом контуре. Следовательно, актуально автоматическое регулирование параметров электрической дуги. Основным параметром электрической дуги является ее мощность, которая непосредственно влияет на скорость нагрева жидкого металла [1]. Обычно регулирование мощности осуществляется путем переключения ступеней напряжения на печном трансформаторе.