

Шестакова Елена Александровна

кандидат технических наук, доцент
Череповецкий государственный университет
Shestakova Elena Alexandrovna

Антонова Юлия Валерьевна

кандидат технических наук, доцент
Череповецкий государственный университет
Antonova Yulia Valerievna

Никонова Елена Леонидовна

кандидат технических наук, доцент
Череповецкий государственный университет
Nikonova Elena Leonidovna

Шестаков Николай Иванович

доктор технических наук, профессор
Череповецкий государственный университет
Shestakov Nikolay Ivanovich

Петрова Галина Михайловна

кандидат технических наук, доцент
Череповецкий государственный университет
Petrova Galina Mikhailovna

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОСОПРОТИВЛЕНИЯ КАНАЛЬНОГО ПОДА
МЕТОДИЧЕСКОЙ НАГРЕВАТЕЛЬНОЙ ПЕЧИ
STUDY OF THERMAL RESISTANCE OF THE CHANNEL HEAD
OF A CONTINUOUS HEATING FURNACE**

Аннотация. На основе математического моделирования исследовано влияние конструктивных характеристик канального пода методической нагревательной печи толкательного типа на величину термического сопротивления.

Abstract. The article is devoted to mathematical modeling of the temperature field of a channel pod. On the basis of mathematical modeling, the influence of the design characteristics of the channel hearth of a pusher-type methodical heating furnace on the value of thermal resistance is investigated.

Ключевые слова: Печь, температура, термическое сопротивление, математическая модель.

Keywords: Furnace, temperature, thermal resistance, mathematical model.

Температурное поле в заготовке, покрытой нарастающим слоем окалины, опишется уравнением [1,2]:

$$c_j(T)\rho_j(T)v\frac{\partial T}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x}\left[\lambda_j(T)\frac{\partial T}{\partial x}\right] + \frac{\partial}{\partial z}\left[\lambda_j(T)\frac{\partial T}{\partial z}\right], i=0,2, \quad (1)$$

где c – теплоемкость; ρ – плотность; λ – коэффициент теплопроводности; T – температура; v – скорость перемещения заготовки в печи; x, y, z – текущий координаты. Индекс 0 относится к окалине, 2 – к металлу заготовки [2,3].

Для различных частей заготовки эти уравнения запишутся в виде:

$$r_0\rho_0v\frac{dh_0}{dy} = \lambda_0\frac{\partial T_0}{\partial x}\Big|_{x=h_0-0} - \lambda_2\frac{\partial T_2}{\partial x}\Big|_{x=h_0+0} = \lambda_2\frac{\partial T}{\partial x}\Big|_{x=h_2-h_0-0} - \lambda\frac{\partial T}{\partial x}\Big|_{x=h_2-h_0+0}, \quad (2)$$



где r – удельная теплота окалинообразования; h_2 – толщина заготовки; h_0 – толщина слоя окалины.

По закону Вагнера [1]:

$$\nu \frac{d(h_0)^2}{dy} = K_0 \exp \left[\frac{-\alpha}{\gamma y + \beta} \right], \quad (3)$$

где K_0, α, γ – эмпирические коэффициенты; β – масштаб связи температурных шкал, $\beta = 273 K$.

На основе обработки результатов натуральных замеров установлено:

$$\alpha = 18000 K^{-1}, \gamma = 60 K / м, K_0 = 7,926 \cdot 10^{-2} \nu.$$

Температурное поле пода печи описывается уравнением Лапласа:

$$\nabla^2 T_i(x, z) = 0, \quad i = 3, 4, 6, \dots \quad (4)$$

Здесь индекс i относится к соответствующему слою пода.

В соответствии с уравнением теплового баланса:

$$\frac{dT_5}{dy} = \frac{S}{RC_5 \rho_5 G_5} [T_{4r}(y) - T_{3r}(y)], \quad (5)$$

где R – термическое сопротивление пода; S – шаг расположения каналов; G – расход газов. Индекс 5 относится к дымовому газу в канале.

Начальные условия для заготовки запишутся в виде:

$$T_i(x, 0, z) = T_H, \quad i = 0, 2, \quad (6)$$

где T_H – температура загрузки заготовки.

Граничные условия можно представить уравнением:

$$-\lambda_0(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial x} /_{x=0} = q_{1-0} [T_1(y, z), T_0(x=0, y, z)]; \quad (7)$$

$$\lambda_0(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial x} /_{x=h_2+2h_0} = q_{0-5} [T_5(y), T_0(x=h_2+2h_0, y, z)], \quad (8)$$

где q_{1-0}, q_{0-5} – плотность теплового потока на верхней и нижней поверхности окалины. Индекс 1 относится к рабочему пространству печи.

Величина q_{0-5} рассчитывается на основе решения уравнений (4) и (5). Система дифференциальных уравнений (1) – (5) с условиями (6) – (8) может быть решена численно.

Получим решение уравнения Лапласа при граничных условиях [2] численными методами. Тогда расчетная зависимость [2] примет вид:

$$R = \frac{T_3 - T_2}{\frac{\lambda}{L} \int_0^L \frac{\partial T}{\partial x} /_{x=0} dz}$$

Введем обозначение:

$$A = R \cdot \lambda,$$

где A – условная длина участка термосопротивления, м.

Рабочая формула для обработки результатов численного решения запишется в форме:

$$A = L(T_3 - T_2) / \left[\int_0^L \frac{\partial T}{\partial x} /_{x=0} dz \right],$$

а величина термического сопротивления в соответствии найдется их соотношения $R = A/\lambda$.

Система дифференциальных уравнений (1) – (5) с условиями однозначности (6) – (8) решается численными методами.



Температурное поле канального пода в его поперечном сечении при квазистационарном режиме печи описывается уравнением Лапласа (4).

Граничные условия для (4) в данном случае имеют вид:

$$T(H, z) = T_1, T(0, z) = T_2, T(x_k, z_k) = T_3; \quad (9)$$

$$\frac{\partial T(x, 0)}{\partial z} = \frac{\partial T(x, L)}{\partial z} = 0, \quad (10)$$

где H – полная высота пода печи (рисунок 1); x_k, z_k – координаты расположения поверхности каналов; L – половина шага расположения каналов.

В записи граничных условий первого рода (9) принято допущение о неизменности температуры по периметру поверхности теплообмена. Граничные условия второго рода (10) следуют из условий симметрии рассматриваемой фигуры.

Расчетная схема приведена на рисунке 1.

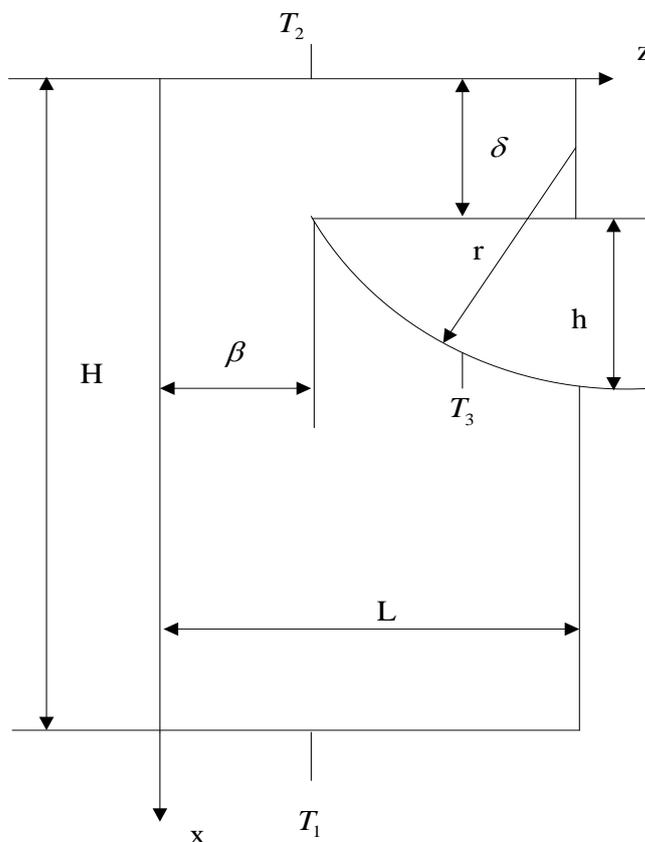


Рисунок 1 – Расчетная схема

Задача заключается в отыскании функции:

$$R = f(\lambda, \delta, r, h, L);$$

где R – термическое сопротивление пода; λ – коэффициент теплопроводности материала.

На рисунке 2 показано влияние размеров каналов r и глубины их заложения δ на величину параметра A . Из рассмотрения кривых следует, что при небольшой глубине заложения каналов и шага их расположения мало зависит от радиуса канала в случае $r > 0,04$ м. Однако с уменьшением радиуса канала за пределы 0,01 м термическое сопротивление пода резко возрастает и при $r \rightarrow 0$ величина $A \rightarrow \infty$. При значительной глубине заложения каналов ($\delta > 0,3$ м) термическое сопротивление пода существенно зависит от радиуса каналов во всем исследованном диапазоне.

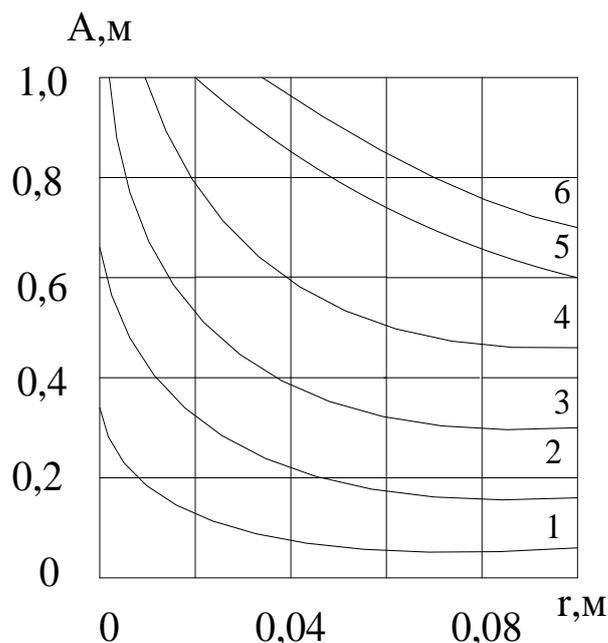


Рисунок 2 – Влияние радиуса канала на величину термического сопротивления пода при высоте каналов $0,25r$ и шаге их расположения $0,2m$:
 $1 - \delta = 0,05; 2 - 0,15; 3 - 0,25; 4 - 0,35; 5 - 0,45; 6 - 0,50m$

Влияние шага расположения каналов при различной их форме (соотношение h и r) на величину параметра A отражено на рисунке 3.

Шаг расположения каналов оказывает значительное влияние на величину термосопротивления пода при любом соотношении параметров r и h . От формы каналов термическое сопротивление пода зависит незначительно.

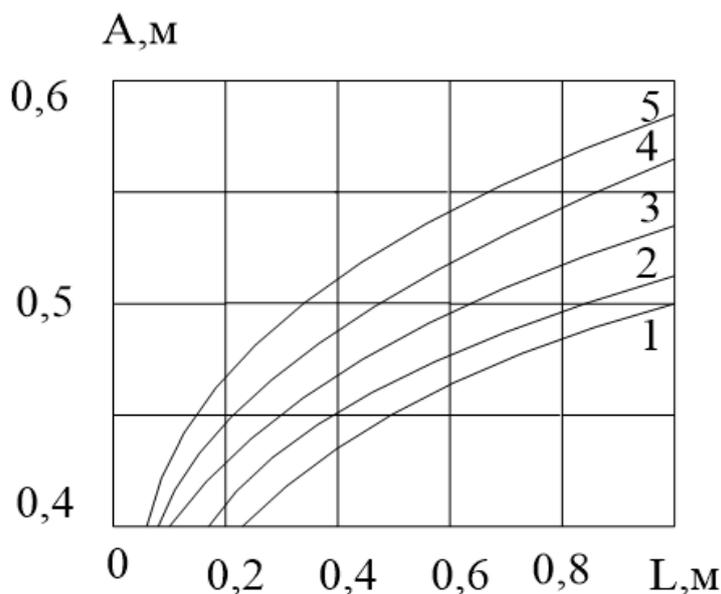


Рисунок 3 – Влияние радиуса канала на величину термического сопротивления пода при глубине заложения каналов $0,25m$ и их радиусе $0,08m$:
 $1 - h = 0,25; 2 - 0,5; 3 - 1,0; 4 - 1,5; 5 - 2r$; (круглый канал).

Наибольшее термическое сопротивление имеет под с круглыми каналами ($h = 2r$). При сегментной форме термосопротивление пода уменьшается. При $h < 0,5$ оно не изменяется

Список литературы:

1. Шестаков Н.И., Летавин М.И., Фоменко А.И. Инженерная методика расчета термосопротивления канального пода методической нагревательной печи толкательного типа// Вестник ЧГУ. – 2011. – №4. Т.3. – С. 28-31.
2. Шестаков Н.И., Журавлева Ю.М., Никонова Е.Л. Исследование теплообмена при изготовлении ролика в процессе плазменной наплавки// Современные задачи научной работы. Перспективы внедрения инновационных решений// Сборник статей по итогам Международной научно – практической конференции. Агентство международных исследований. Магнитогорск: 2022. С.72-77.
3. Шестаков Н.И., Лопатина Н.К, Фоменко А.И. Математическое моделирование теплообмена при изготовлении бандажированных роликов машин непрерывного литья заготовок/ Вестник ЧГУ. – 2012. – №2. – Т.1. – С.31-34

