УДК 621.746. 27

С.В. Лукин, Н.И. Шестаков, Ю.В. Антонова, А.Л. Кузьминов

ИНЖЕНЕРНАЯ МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПОТЕРЬ ТЕПЛОТЫ ЧЕРЕЗ КОРПУС ТЕРМОСТАТА

В статье описана инженерная методика, позволяющая приближенно рассчитывать нестационарное температурное поле корпуса термостата, в который загружаются горячие слитки или слябы, выходящие из разливочного агрегата, а также определять потери физической теплоты через корпус термостата.

Термостат, температурное поле, потери теплоты.

The paper describes the method allowing to calculate approximately the non-stationary temperature field of the thermostat enclosure where the hot slabs and ingots after casting machine are placed, and to define the physical heat dissipation through the thermostat enclosure.

Thermostat, temperature field, heat dissipation.

В последнее время на металлургических заводах все шире начинают применять термостаты для сохранения физической теплоты слитков или слябов, выходящих из разливочного агрегата с достаточно высокой температурой (порядка 900 °С и выше на поверхности слитка). Теплопередача через стенки термостата происходит преимущественно в условиях нестационарного температурного поля стенки, поскольку материал стенок обладает большой тепловой инерцией. В настоящее время отсутствуют достаточно надежные инженерные методики расчета потерь теплоты в термостатах, что важно для определения теплосодержания в слитке перед загрузкой его в печь.

Для обеспечения хорошей тепловой изоляции корпуса термостата применяют теплоизоляционные огнеупорные материалы с малыми значениями коэффициентов теплопроводности λ и плотности ρ. Например, материал керамоволокно FIBERBLANKETS имеет $\lambda = 0{,}06$ Вт/(м · К) и $\rho = 16$ кг/м^3. Толщина тепловой изоляции составляет $\delta = 0{,}15 \div 0{,}2$ м. Снаружи теплоизоляционный материал обшивается стальным листом, термическим сопротивлением которого можно пренебречь по сравнению с термическим сопротивлением тепловой изоляции. Так, у тепловой изоляции толщиной $\delta = 0{,}15$ м при $\lambda = 0{,}06$ Вт/(м · К) термическое сопротивление $\delta/\lambda = 2{,}5$ (м^2 · К)/Вт, а у стального листа толщиной $\delta_с = 0{,}003$ м и $\lambda_с = 50$ Вт/(м · К) термическое сопротивление равно $6 \cdot 10^{-5}$ (м^2 · К)/Вт. Таким образом, в тепловом отношении стенку термостата можно рассматривать как однородную, обладающую свойствами тепловой изоляции.

На внутренней поверхности стенки идеального термостата после помещения в него горячего слитка практически сразу устанавливается температура $t_{терм}$, равная средней температуре поверхности металла $t_м$. В реальном термостате температура $t_{терм}$ будет несколько меньше $t_м$, но для инженерного расчета можно принять $t_{терм} \cong t_м$. После помещения слитка с горячим ядром в термостат температура поверхности $t_м$ сначала возрастает, затем начинает медленно уменьшаться со временем. За 1 ч. пребывания слитка в термостате температура $t_м$ может уменьшиться на несколько десятков градусов. Наружная поверхность корпуса термостата омывается воздухом с температурой $t_0 \approx 0$ °С и коэффициентом теплоотдачи к воздуху $\alpha \approx 10$ Вт/(м^2·К). Термическое сопротивление теплоотдачи от наружной поверхности $1/\alpha \approx 0{,}1$ м^2·К/Вт, что почти в 25 раз меньше термического сопротивления стенки термостата δ/λ. Если пренебречь термическим сопротивлением $1/\alpha$, то погрешность расчета тепловых потерь в стационарном случае не превысит 4 %, что допустимо для инженерной методики.

Таким образом, возникает следующая задача нестационарной теплопроводности. Однородная стенка, толщиной δ, с коэффициентами теплопроводности λ и температуро-проводности a в начальный момент времени $\tau = 0$ имеет во всех точках температуру t_0, равную температуре окружающей среды. Затем на одной поверхности стенки мгновенно устанавливается температура $t_{терм}$, на другой поверхности стенки температура продолжает оставаться равной t_0. Через какое-то время $\Delta\tau$ в стенке установится стационарный режим теплопередачи. Время $\Delta\tau$ можно оценить из условия: $a\Delta\tau/\delta^2 \approx 0{,}6$. Так, для керамоволокна FIBERBLANKETS при $\delta = 0{,}15$ м и $a = \lambda/(c\rho) = 3{,}9 \cdot 10^{-6}$ м^2/с время $\Delta\tau \approx 3460$ с ≈ 1 ч. Горячие слитки находятся в термостате от нескольких десятков минут до нескольких часов, поэтому значительную часть времени теплопередача через стенку термостата происходит в нестационарных условиях.

Математически задачу теплопроводности в стенке термостата запишем так:

$$\begin{aligned} &t(x,0) = t_0,\ 0 < x < \delta; \\ &t(0,\tau) = t_0,\ 0 < \tau; \\ &t(\delta,\tau) = t_{терм},\ 0 < \tau; \\ &\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \cdot \frac{\partial^2 t}{\partial x^2},\ 0 < \tau;\ 0 < x < \delta, \end{aligned} \qquad (1)$$

где $t(x,\tau)$ – нестационарное температурное поле стенки термостата; x – координата, направленная перпендикулярно стенке с началом на наружной поверхности; τ – время. Температуру $t_{терм}$ можно принять постоянной, равной средней температуре поверхности металла за время пребывания в термостате.

Вводя переменную $\theta(x,\tau) = t(x,\tau) - t_0$, и решая систему уравнений (1) классическим методом разделения переменных, можно получить решение, приведенное, например, в [1]:

$$\theta(x,\tau) = \theta_0 \cdot \frac{x}{\delta} - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2\theta_0 \cdot (-1)^{n+1}}{n \cdot \pi} \sin\left(n \cdot \pi \frac{x}{\delta}\right) \cdot e^{-n^2\pi^2 \mathrm{Fo}}, \quad (2)$$

где $\theta_0 = t_{терм} - t_0$, $\mathrm{Fo} = a \cdot \tau/\delta^2$ – число Фурье.

Плотность теплового потока, отводимого от внутренней поверхности стенки термостата, которая и обуславливает потери теплоты в термостате, определятся так:

$$q(\tau) = \lambda \cdot \left.\frac{\partial\theta(x,\tau)}{\partial x}\right|_{x=\delta}, \quad (3)$$

где λ – коэффициент теплопроводности тепловой изоляции.

С учетом (2) и (3) получаем:

$$q(\tau) = q_0\left(1 + 2 \cdot \sum_{n=1}^{\infty} e^{-n^2\pi^2 \mathrm{Fo}}\right), \quad (4)$$

где $q_0 = \lambda \cdot \theta_0/\delta$ – плотность теплового потока при стационарном режиме.

Количество теплоты, отведенное через 1 м^2 внутренней поверхности термостата за время от 0 до текущего τ определяется выражением:

$$Q_\tau = \int_0^\tau q(\tau)d\tau = q_0 \frac{\delta^2}{a}\left(\mathrm{Fo} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{(\pi n)^2} \cdot \left(1 - e^{-n^2\pi^2 \mathrm{Fo}}\right)\right),$$

$$Q_\tau = Q_0 \cdot \left(\mathrm{Fo} + D(\mathrm{Fo})\right), \quad (5)$$

где $Q_0 = q_0 \cdot \delta^2/a = c \cdot \rho \cdot \delta \cdot \theta_0$; c – массовая теплоемкость материала тепловой изоляции; $D(\mathrm{Fo})$ – функция только числа Фурье:

$$D(\mathrm{Fo}) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{(\pi n)^2} \cdot \left(1 - e^{-n^2\pi^2 \mathrm{Fo}}\right). \quad (6)$$

При Fo = 0, как следует из (6), величина $D = 0$, как и должно быть. При $Fo > 0$ ряд в (6) является достаточно быстро сходящимся.

На рис. 1 показана графическая зависимость $D(Fo)$. Из рис. 1 видно, что в начальные моменты времени при малых Fo величина D резко возрастает с ростом Fo, затем начинает стремиться к значению 1/3. Начиная с $Fo > 0{,}6$ можно полагать $D \approx 0{,}33$.

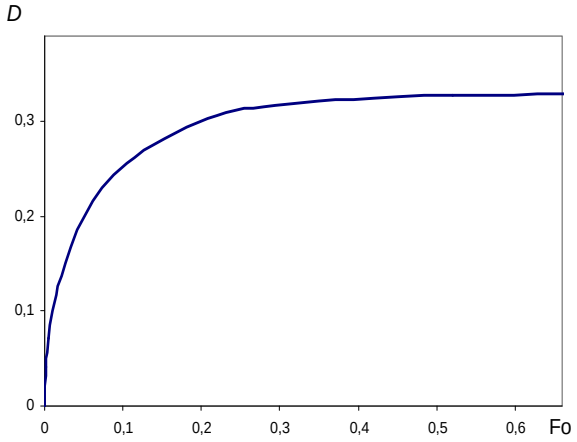


Рис. 1. Зависимость $D(Fo)$

Рассмотрим пример. Пусть в термостат с внутренними размерами 2,7×1,26×1,175 м загружается слиток, извлеченный из изложницы. Средняя температура поверхности слитка за время пребывания в термостате $t_м$ = 900 °С. Температура внутренней поверхности корпуса термостата $t_{терм} \approx t_м$ = 900 °С. Температура наружного воздуха t_0 = 0 °С. Температурный напор $\theta_0 = t_{терм} - t_0$ = 900 °С. Толщина тепловой изоляции корпуса термостата составляет δ = = 0,15 м, плотность материала изоляции ρ = 16 кг/м^3, теплопроводность – λ = 0,06 Вт/(м·К), теплоемкость – c = 960 Дж/(кг·К), температуропроводность – $a = 3{,}9 \cdot 10^{-6}$ м^2/с. Время нахождения слитка в термостате τ = 30 мин. = 1800 с. Требуется определить суммарные потери теплоты через корпус термостата.

Определяем величину $Q_0 = c \cdot \rho \cdot \delta \cdot \theta_0$ = $= 960 \cdot 16 \cdot 0{,}15 \cdot 900 = 2{,}073$ МДж/м^2. Число Фурье равно $Fo = a \cdot \tau/\delta^2 = 3{,}9 \cdot 10^{-6} \cdot 1800/0{,}15^2 = 0{,}312$. По графику на рис. 1 определяем величину $D = 0{,}32$. По формуле (5) определяем потери теплоты через 1 м^2 внутренней поверхности термостата:

$$Q_\tau = Q_0 \cdot \left(\mathrm{Fo} + D(\mathrm{Fo})\right) = 2{,}073 \cdot (0{,}312 + 0{,}32) =$$

$$= 1{,}31 \text{ МДж/м}^2.$$

В данном случае величина Q_τ почти в два раза превышает потери теплоты за то же время, только при стационарном режиме теплопередачи через стенку термостата, что объясняется тем, что в нестационарном режиме часть потерь теплоты расходуется на разогрев корпуса термостата.

Суммарные потери теплоты через всю внутреннюю поверхность термостата равны:

$$Q_{пот} = Q_\tau \cdot F = 1{,}31 \cdot 16{,}1 = 21{,}1 \text{ МДж},$$

где F = 16,1 м^2 – площадь внутренней поверхности термостата в данном случае.

Действительные потери теплоты через корпус термостата будут на несколько процентов меньше,

чем рассчитанные по данной методике, поскольку в реальном термостате температура его внутренней поверхности $t_{терм}$ на несколько градусов меньше средней температуры поверхности металла $t_м$, т.е. будет меньше температурный напор θ_0, и, кроме того, в данной методике пренебрегается внешним сопротивлением теплоотдачи $1/\alpha$, которое приводит к снижению плотности теплового потока через стенку термостата q в стационарном режиме согласно выражению:

$$q_0 = \frac{\theta_0}{1/\alpha + \delta/\lambda}. \qquad (7)$$

Чтобы не пренебрегать величиной $1/\alpha$, величину Q_0 в (5) можно рассчитывать так:

$$Q_0 = q_0 \cdot \delta^2/a,$$

где q_0 определяется выражением (7).

Обычно материал основания термостата по своим свойствам (λ, a, δ) отличается от верхней и боковых стенок термостата, поэтому расчет потерь теплоты через основание следует проводить отдельно по той же методике.

После того, как слиток извлекают из термостата, начинается нестационарный процесс охлаждения корпуса термостата. Допустим, к моменту извлечения слитка в стенке термостата успевает установиться стационарное температурное поле. У разгруженного термостата с закрытой крышкой на внутренней поверхности стенки устанавливаются адиабатные условия. Процесс охлаждения корпуса термостата в данном случае можно приближенно описать следующей системой уравнений:

$$\begin{aligned}
&\theta(x,0) = \theta_0 \frac{x}{\delta}, \ 0 < x < \delta; \\
&\theta(0,\tau) = 0, \ 0 < \tau; \\
&\left.\frac{\partial\theta(x,0)}{\partial x}\right|_{x=\delta} = 0, \ 0 < \tau; \\
&\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \cdot \frac{\partial^2 t}{\partial x^2}, \ 0 < \tau; \ 0 < x < \delta,
\end{aligned} \qquad (7)$$

где момент времени $\tau = 0$ соответствует моменту извлечения слитка из термостата.

В [1] приведено решение задачи, описываемой системой уравнений (7):

$$\theta(x,\tau) = \theta_0 \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{8}{(2n-1)^2 \cdot \pi^2} \times \cos\left((2n-1)\cdot\frac{\pi}{2}\left(1-\frac{x}{\delta}\right)\right) \cdot e^{-(2n-1)^2 \frac{\pi^2}{4}\cdot Fo}. \qquad (8)$$

Температурное поле, описываемое выражением (8), стремится к стационарному значению $\theta = 0$ ($t = t_0$), однако стационарный режим в случае охлаждения стенки термостата наступает при значительно больших числах *Fo*, чем при разогреве термостата. Из выражения (8) следует, стенка термостата охлаждается практически до температуры окружающей среды при $Fo \geq 2$, тогда как при разогреве стенки стационарный режим теплопередачи, как следует из (2), устанавливается практически при $Fo \geq 0{,}6$. Например, при $\delta = 0{,}15$ м и $a = 3{,}9 \cdot 10^{-6}$ м^2/с значению $Fo = 2$ соответствует момент времени $\tau \approx 3{,}2$ ч., что обычно гораздо меньше времени пребывания термостата в разгруженном состоянии.

При напряженном использовании термостатов на металлургических заводах стационарный режим в корпусе термостата практически не наступает, и в этом случае для точного расчета тепловых потерь через корпус термостата необходимо использовать численные методы расчета теплопередачи. Если термостат все время находится в работе, то потери теплоты через его стенки определяются выражением (7), соответствующим стационарному режиму работы термостата.

Литература

1. *Пехович, А.И.* Расчет теплового режима твердых тел / А.И. Пехович, В.М. Жидких. – Л., 1976.