

УДК 621.577

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОТДАЧИ ПРИ ОХЛАЖДЕНИИ СЕРЕБРЯНЫХ ТЕРМОЗОНДОВ С УЧЕТОМ ЭФФЕКТОВ ТЕМПЕРАТУРНО-ВРЕМЕННОЙ ЗАДЕРЖКИ

**Зотов Е.Н.**, канд. техн. наук, **Москаленко А.А.**, канд. техн. наук, **Разумцева О.В.**, **Проценко Л.Н.**

*Институт технической теплофизики НАН Украины, ул. Желябова, 2а, Киев, 03680, Украина*

Розглянуто і проаналізовано існуючі методи визначення характеристик нестационарного процесу тепловіддачі (температурне поле, коефіцієнт тепловіддачі, щільність теплового потоку, температура поверхні) при охолодженні срібних термозондів сферичної і циліндричної форми. Запропоновано нові аналітичні рішення з використанням спеціальної програми IQLab, які підвищують точність розрахунків при тестуванні охолоджуючої здатності різних рідин. Результати розрахунків порівнюються з експериментальними даними.

Рассмотрены и проанализированы существующие методы определения характеристик нестационарного процесса теплоотдачи (температурное поле, коэффициент теплоотдачи, плотность теплового потока, температура поверхности) при охлаждении серебряных термозондов сферической и цилиндрической формы. Предложены новые аналитические решения с использованием специальной программы IQLab, которые повышают точность расчетов при тестировании охлаждающих способностей различных жидкостей. Результаты расчетов сравниваются с экспериментальными данными.

Existing methods for determining the characteristics of the nonstationary heat transfer process (temperature field, heat transfer coefficient, heat flux density, surface temperature) are considered and analyzed when cooling silver spherical and cylindrical thermo-probes. New analytical solutions are proposed using a special program IQLab, which increase the accuracy of calculations when testing the cooling capacity of various liquids. The results of the calculations are compared with the experimental data.

Библ. 10, рис. 5.

**Ключевые слова:** определение охлаждающей способности жидкости, серебряный термозонд, решение прямой и обратной задачи теплопроводности.

$a$  — коэффициент температуропроводности,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;

$c_p$  — теплоемкость в  $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ ;

$r$  — радиус образца,  $\text{м}$ ;

$q$  — плотность теплового потока,  $\text{Вт}/\text{м}^2$ ;

$D, d$  — диаметр образца,  $\text{м}$ ;

$H$  — высота,  $\text{м}$ ;

$M$  — масса,  $\text{кг}$ ;

$T$  — температура,  $^\circ\text{C}$ ;

$S$  — площадь поверхности,  $\text{м}^2$ ;

$\alpha$  — коэффициент теплоотдачи,  $\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ ;

$\lambda$  — коэффициент теплопроводности,  $\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{Н})$ ;

$\rho$  — плотность в  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;

$\tau$  — время,  $\text{с}$ .

### Нижние индексы:

ж — жидкость;

п — поверхность;

ц — центр.

### Верхние индексы:

в — восстановленное;

оп — опытное;

р — расчетное.

ОЗТ — обратная задача теплопроводности.

Целью данной работы являлось совершенствование существующих методик оценки охлаждающих способностей жидкостей. Эта проблема актуальна для ряда отраслей промышленности, играет важную роль в металлургии и машиностроении, в частности, для технологий закалки стальных деталей, обеспечивающих высокую прочность и длительную эксплуатацию металла. Чем выше интенсивность охлаждения, тем больше в структуре металла образуется твердого мартенита. Второе условие оптимального режима охлаждения металла — умеренные скорости охлаждения в завершающей стадии закалки для недопущения возникновения внутренних напряжений в металле, приводящих к короблению

поверхности, деформации, образованию трещин и, даже, к разрушению изделия.

Для тестирования охлаждающих свойств жидкостей, применяемых при термообработке стальных изделий, разработаны национальные и международные стандарты, а также методики проведения измерений [1, 2]. В качестве образцов были использованы металлические термозонды сферической или цилиндрической формы, в геометрическом центре которых размещена термопара. Термозонды изготавливаются из серебра, жаропрочного хромо-никелевого сплава Инконель 600, стали X18N9T или из других сплавов, позволяющих многократно их нагревать и охлаждать в различных

охлаждающих средах, включая агрессивные, без существенного и необратимого изменения их теплофизических характеристик (коэффициента теплопроводности, удельной теплоемкости, плотности), а также без изменения качества поверхности термозонда.

С целью совершенствования и оптимизации существующих технологий термообработки исследуются закалочные среды с новыми охлаждающими свойствами, учитывающими химический состав металла, геометрию детали и требуемые механические свойства. В процессе этих разработок возникает задача определения характеристик теплообмена между термозондом и жидкостью, а именно: коэффициента теплоотдачи, плотности теплового потока как функций от времени и температуры поверхности термозонда.

В работе рассматриваются различные методы определения коэффициента теплоотдачи на поверхности серебряных термозондов сферической и цилиндрической формы, охлаждаемых в жидкостях с различной охлаждающей способностью.

В работах [1, 3, 4] используется методика определения коэффициента теплоотдачи  $\alpha$ , основанная на охлаждении в исследуемой среде стандартного образца в виде серебряного шара диаметром 20 мм и позволяющая в одном опыте получить зависимость  $\alpha(T_{\text{ц}})$  в диапазоне температур (850...100) °С. Вследствие малых размеров и высокой теплопроводности материала образец считается «тонким тепловым телом», т.е. температура поверхности  $T_{\text{п}}$  равна температуре центра образца  $T_{\text{ц}}$  и коэффициент теплоотдачи находится по формуле Ньютона:

$$\alpha(T_{\text{ц}}) = \frac{q}{T_{\text{ц}}(\tau) - T_{\text{ж}}}, \quad (1)$$

Плотность теплового потока  $q(T_{\text{ц}})$  на охлаждаемой поверхности находится по [3]:

$$q(T_{\text{ц}}) = \frac{M \cdot c_p(T_{\text{ц}})}{S} \cdot \frac{dT_{\text{ц}}(\tau)}{d\tau}, \quad (2)$$

где:  $M, S$  – масса и площадь поверхности шара, соответственно,  $T_{\text{ж}}$  – температура жидкости,  $c_p(T_{\text{ц}})$  – теплоемкость серебра при температуре  $T_{\text{ц}}(\tau)$ .

Производная  $\frac{dT_{\text{ц}}(\tau)}{d\tau}$ , в момент времени  $\tau$  находится путем кусочно-линейной интерполяции зависимости  $T_{\text{ц}}(\tau)$  т.е.  $\frac{dT_{\text{ц}}(\tau)}{d\tau} \cong \frac{\Delta T_{\text{ц}}(\tau)}{\Delta \tau}$ .

Рассмотренная методика позволяет получать данные о значениях  $\alpha(T_{\text{п}})$ , ( $T_{\text{п}} \cong T_{\text{ц}}$ ) с приемлемой точностью для таких жидкостей как минеральные и растительные масла с температурой  $T_{\text{ж}} \geq 20$  °С и других сред, для которых скорость охлаждения центра шарика не более 200 °С/с.

Но, для жидкостей с более высокими охлаждающими способностями, например, для воды с  $T_{\text{ж}} = 20$  °С, скорость охлаждения достигает значений более 700 °С/с при разности, согласно расчетом, значений темпе-

ратуры центра и поверхности шара 80 °С, а для водных растворов хлоридов скорость охлаждения достигает 2500 °С/с [1] при разности значений температуры центра и поверхности шара более 240 °С. Кроме того, изменение плотности теплового потока на поверхности шара не совпадает по времени с изменением производной температуры центра, поэтому определение  $q(\tau)$  по формуле (2) дает погрешность до 50 % и более. Для уменьшения погрешности необходимо определять температуру поверхности термозонда.

В работах [6,7] температуру поверхности определяют, используя решение задачи теплопроводности, когда шар радиусом  $R$  из материала с постоянными теплофизическими свойствами, охлаждается равномерно по всей поверхности, т.е. тепловой поток  $q_c(\tau) = \text{const}$ . Используя решение этой задачи [5] и интерполируя на участке  $\Delta \tau$  опытную зависимость  $T_{\text{п}}(\tau)$  линейной функцией, установлены зависимости между температурами центра  $T_{\text{ц}}$  и поверхности шара  $T_{\text{п}}$  [6,7]:

$$T_{\text{п}}(\tau) = T_{\text{ц}}(\tau) - 0,5 \frac{q(\tau) \cdot R}{\lambda}, \quad (3)$$

$$T_{\text{п}}(\tau) = T_{\text{ц}}(\tau + \Delta \tau), \quad \text{где} \quad (4)$$

$$\Delta \tau = \frac{R^2}{6\alpha},$$

$\alpha = \lambda/(\rho \cdot c)$  – коэффициент температуропроводности, м<sup>2</sup>/с;

$\rho, \lambda, c$  – соответственно, плотность в кг/м<sup>3</sup>, коэффициент теплопроводности в Вт/(м<sup>2</sup>·Н) и теплоемкость в Дж/(кг·К).

Температуру поверхности  $T_{\text{п}}(\tau)$  можно найти по формуле (3) или (4).

Для определения среднего значения  $q$  на участке  $\Delta \tau$  традиционно используется выражение (2) [3,4]. Однако, как показал анализ температурных полей серебряного шара, рассчитанных при задании на поверхности шара теплового потока  $q(\tau)$ , полученных в опытах [6, 7], изменение граничных условий на поверхности шара приводит к соответствующим изменениям  $T_{\text{п}}(\tau)$  с некоторым запаздыванием  $\Delta \tau$ , которое определяется размерами шара и коэффициентом температуропроводности.

Для серебряного шара диаметром 20 мм в диапазоне температур от 100 °С до 850 °С  $\Delta \tau$  изменяется от 0,1 с до 0,12 с. Плотность теплового потока на поверхности шара в момент времени  $\tau$  находится по значениям производной температуры центра в момент времени  $\tau + \Delta \tau$ , а именно:

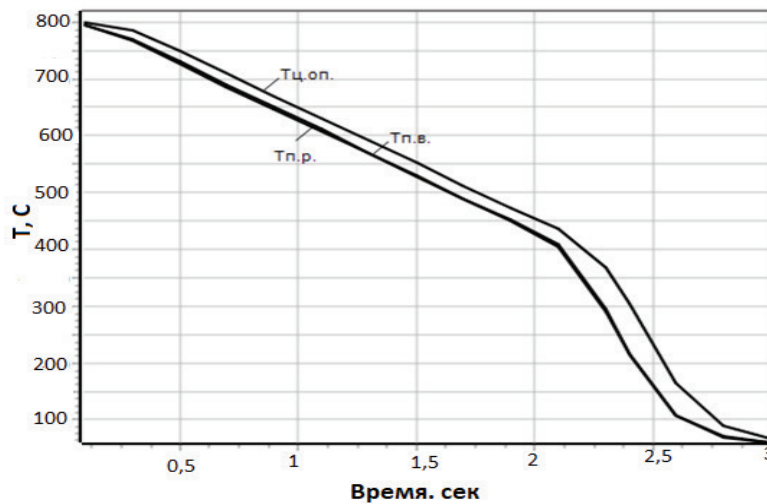
$$q(\tau) = \frac{M \cdot c_p(T_{\text{ц}}(\tau + \Delta \tau))}{S} \cdot \frac{dT(\tau + \Delta \tau)}{d\tau}. \quad (5)$$

Методическая погрешность восстановления температуры поверхности  $T_{\text{п}}(\tau)$  и плотности теплового потока  $q(\tau)$  на поверхности охлаждаемого в жидкости серебряного шара по формулам (3, 4, 5) определялась следующим образом. С помощью программы IQLab [8, 9, 10] путем решения обратной задачи теплопроводности по значениям измеренной в опыте температуры центра  $T_{\text{ц}}^{\text{он}}(\tau)$  шара рассчитывалась температура поверхности

$T_{\text{ц}}^{\text{р}}(\tau)$ , тепловой поток  $q^{\text{р}}(\tau)$  на поверхности, и температурное поле шара. При этом, значения опытной и расчетной температуры центра отличались на величину  $\Delta T_{\text{ц}}(\tau) = |T_{\text{ц}}^{\text{оп}}(\tau) - T_{\text{ц}}^{\text{р}}(\tau)| < 0,7^{\circ}\text{C}$  при скорости изменения температуры  $dT_{\text{ц}}(\tau)/d\tau < 200^{\circ}\text{C}/\text{сек}$ , при скорости в диапазоне  $200^{\circ}\text{C}/\text{сек} < dT_{\text{ц}}(\tau)/d\tau < 800^{\circ}\text{C}/\text{сек}$  погрешность

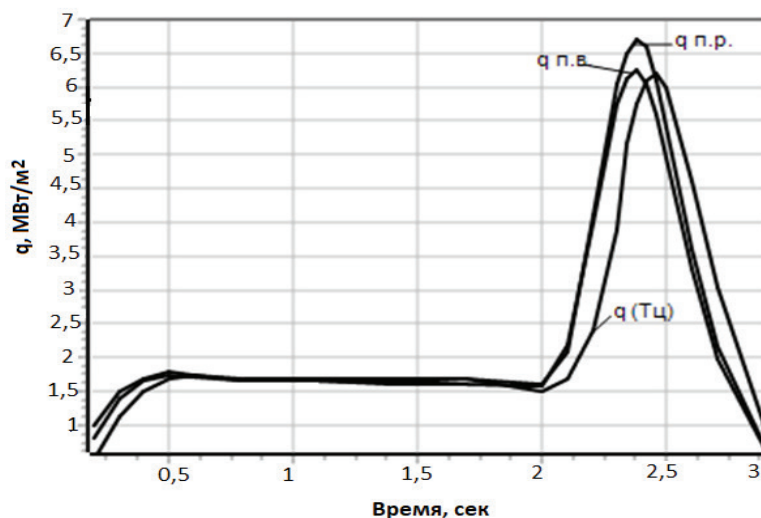
была  $\Delta T_{\text{ц}}(\tau) < 3^{\circ}\text{C}$ .

Методическая погрешность находилась следующим образом: по расчетной температуре центра  $T_{\text{ц}}^{\text{р}}(\tau)$  определялись по формулам (3, 4, 5) значения температуры поверхности и плотности теплового потока и сравнивались с расчетными значениями  $T_{\text{ц}}^{\text{р}}(\tau)$  и  $q_{\text{ц}}^{\text{р}}(\tau)$ .



**Рис. 1.** Температура центра  $T_{\text{ц}}^{\text{оп}}(\tau)$ , измеренная в ходе опыта, расчетная температура поверхности  $T_{\text{н}}^{\text{р}}(\tau)$  и восстановленная температура поверхности  $T_{\text{н}}^{\text{в}}$  при охлаждении серебряного шара диаметром 20 мм в воде с температурой  $T_{\text{ж}} = 20^{\circ}\text{C}$ .

Затем значения плотности теплового потока  $q(\tau)$  восстанавливались по температуре центра  $T_{\text{ц}}^{\text{р}}(\tau)$  и сравнивались с  $q^{\text{р}}(\tau)$ :



**Рис. 2.** Тепловой поток на поверхности  $q(\tau)$  серебряного шара диаметром 20 мм при его охлаждении в воде с температурой  $T_{\text{ж}} = 20^{\circ}\text{C}$ .

В результате исследования установлено, что для функции  $q(\tau)$  на поверхности серебряного шара, охлаждаемого в воде и водных растворах солей ( $\text{CaCl}_2$ ,  $\text{NaCl}$ ,

$\text{Na}_2\text{CO}_3$ , бишофит и др.) при температуре жидкости  $T_{\text{ж}} = 20^{\circ}\text{C} \div 100^{\circ}\text{C}$  методическая погрешность определения  $q(\tau)$  по формуле (5) находится в пределах 1 % ... 3 % на монотонных участках, достигает значе-

ния 10 % на границах режимов кипения и достигает 15 %... 20% в области максимальных значений  $(dT_{\text{ц}})/dt$  (см. рис. 1). При определении  $q(\tau)$  по температуре  $T_{\text{ц}}^{\text{п}}(\tau)$  по методике [3] погрешность достигает более 50 %.

Абсолютная методическая погрешность  $T_{\text{ц}}^{\text{п}}(\tau) = |T_{\text{ц}}^{\text{п}}(\tau) - T_{\text{ц}}^{\text{б}}(\tau)|$  достигает максимальных значений при пузырьковом режиме кипения жидкости в области, где  $|dq(\tau)/d\tau| = \max$ . Так для стандартного шара диаметром  $d = 20$  мм, охлаждаемого в воде ( $T_{\text{ж}} = 20$  °С), погрешность  $\Delta T_{\text{ц}}^{\text{п}}(\tau) \approx (8 \div 12)$  °С при перепаде температуры между центром и поверхностью около 100 °С, а в водном 15 % растворе NaCl  $\Delta T_{\text{ц}}^{\text{п}}(\tau) \approx 30$  °С при перепаде температуры между центром и поверхностью более 200 °С.

На рисунках 1, 2 показаны графики температуры поверхности  $T_{\text{ц}}^{\text{б}}(\tau)$  и плотности теплового потока  $q_{\text{ц}}^{\text{б}}(\tau)$  на поверхности серебряного шара, охлаждаемого в воде ( $T_{\text{ж}} = 20$  °С), значения которых рассчитаны по формулам (3, 4, 5). Результаты сравнения расчетных значений температуры  $T_{\text{ц}}^{\text{п}}(\tau)$  и  $q_{\text{ц}}^{\text{п}}(\tau)$  с восстановленными  $T_{\text{ц}}^{\text{б}}(\tau)$  и  $q_{\text{ц}}^{\text{б}}(\tau)$  подтверждают достаточную для использования точность методики.

При исследовании охлаждающих свойств жидкостей с помощью серебряного цилиндрического зонда можно восстановить температуру, используя изложенный выше подход. Рассмотрим охлаждение неограниченного цилиндра радиусом  $R$  равномерно по всей его поверхности с постоянным тепловым потоком  $q_{\text{ц}} = \text{const}$  с начальной постоянной температурой  $T_0$ . Решение такой задачи теплопроводности имеет следующий вид [5]:

$$T_0 - T(r, \tau) = \frac{q_{\text{ц}} \cdot R}{\lambda} \left[ 2Fo - \frac{1}{4} \left( 1 - 2 \frac{r^2}{R^2} \right) \right] - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{\mu_n^2 I_0(\mu_n)} \cdot I_0 \left( \mu_n \frac{r}{R} \right) \cdot \exp(-\mu_n^2 \cdot Fo), \quad (6)$$

где:  $Fo = \alpha\tau/R^2$  – число Фурье;  $\tau$  – время, с;  $r$  – радиальная координата цилиндра, м;  $a = \lambda/(\rho \cdot c)$  – коэффициент температуропроводности, м<sup>2</sup>/с;  $\rho$ ,  $\lambda$ ,  $c$  – соответственно, плотность в кг/м<sup>3</sup>; коэффициент теплопроводности в Вт/(мН) и теплоемкость в Дж/(кг°К);  $I_0(\mu_n)$  – функция Бесселя первого рода нулевого порядка;  $\mu_n$  – корни характеристического уравнения  $I_0(\mu_n) = 0$ .

Ряд в решении (6) быстро сходится, поэтому, начиная с  $Fo > 0,2$ , этим рядом можно пренебречь и тогда температура  $T(r, \tau)$  в любой точке цилиндра будет линейной функцией времени, а распределение температуры по радиусу  $r$  – параболическим (квазистационарный режим):

$$T_0 - T(r, \tau) = \frac{q_{\text{ц}} R}{\lambda} \left[ 2 \frac{\alpha\tau}{R^2} - \frac{1}{4} \cdot \left( 1 - 2 \frac{r^2}{R^2} \right) \right], \quad (7)$$

$$T_{\text{ц}}(R, \tau) = T_{\text{ц}}(0, \tau) - \frac{1}{2} \cdot \frac{q_{\text{ц}} R}{\lambda}, \quad (8)$$

$$T_{\text{ц}}(\tau) = T_{\text{ц}}(\tau + \Delta\tau), \quad (9)$$

$$\text{где: } \Delta\tau = \frac{1}{4} \cdot \frac{R^2}{a}. \quad (10)$$

Время запаздывания изменения температуры центра цилиндра  $T_{\text{ц}}$  по сравнению с температурой поверхности цилиндра  $T_{\text{ц}}^{\text{б}}$  было получено из выражения (7) при условии равенства  $T_{\text{ц}} = T_{\text{ц}}^{\text{б}}$ .

Таким образом тепловой поток на поверхности цилиндра можно определить по формуле:

$$q_{\text{ц}}(\tau) = \frac{mc_p(T(\tau + \Delta\tau))}{S_{\text{бп}}} \cdot \frac{dT_{\text{ц}}(\tau + \Delta\tau)}{d\tau}. \quad (11)$$

Используя значения  $q_{\text{ц}}^{\text{б}}(\tau)$ , найденное по формуле (11) и температуру поверхности  $T_{\text{ц}}^{\text{б}}$ , найденную по формуле (8) или (9), находим по формуле (1) коэффициент теплоотдачи  $\alpha(T_{\text{ц}}^{\text{б}})$ .

Исследование методической погрешности определения плотности теплового потока  $q_{\text{ц}}^{\text{б}}(\tau)$  на боковой поверхности цилиндра и температуры поверхности  $T_{\text{ц}}^{\text{б}}$  проводили путем решения одномерной обратной задачи теплопроводности (ОЗТ) с помощью программы IqLab [8, 9, 10]. В результате решения ОЗТ по измеренной в опыте температуре центра  $T_{\text{ц}}^{\text{он}}(\tau)$  цилиндра находилась температура поверхности  $T_{\text{ц}}^{\text{п}}(\tau)$  и затем по решению прямой задачи теплопроводности рассчитывалось температурное поле как функция от времени  $\tau$  и радиуса  $r$ , а также плотность теплового потока  $q_{\text{ц}}^{\text{п}}(\tau)$  на боковой поверхности цилиндра. Точность решения ОЗТ оценивалась разностью значений расчетной и опытной температуры центра цилиндра:  $\Delta T_{\text{ц}} = \max |T_{\text{ц}}^{\text{он}}(\tau) - T_{\text{ц}}^{\text{п}}(\tau)|$  и зависела от скорости охлаждения центра цилиндра  $dT_{\text{ц}}^{\text{он}}(\tau)/d\tau$ . Так при охлаждении цилиндра в минеральных и органических маслах скорость изменения температуры центра цилиндра не превосходит 250 °С/сек, а расчетная и опытная температуры отличаются менее чем на 2 °С. В растворах солей (CaCl<sub>2</sub>, NaCl и др.) с температурой  $T_{\text{ж}} = 30$  °С ÷ 80 °С максимальная скорость охлаждения цилиндра достигает приблизительно 450 °С/сек, а разность между расчетной и опытной температурой не более 5 °С.

Для холодных растворов солей ( $T_{\text{ж}} < 15$  °С) максимальная скорость охлаждения центра достигает 1300 °С/сек, а расчетное и опытное значения температуры центра отличаются не более чем на 15 °С. При этом перепад температуры между центром и поверхностью цилиндра около 150 °С.

Таким образом, используя значения расчетных функций  $T_{\text{ц}}^{\text{п}}(\tau)$ ,  $T_{\text{ц}}^{\text{б}}(\tau)$ ,  $q_{\text{ц}}^{\text{п}}(\tau)$  по формулам (8, 9, 11) и по значениям  $T_{\text{ц}}^{\text{п}}(\tau)$  восстанавливаем температуру поверхности  $T_{\text{ц}}^{\text{б}}(\tau)$ , плотность теплового потока  $q_{\text{ц}}^{\text{б}}(\tau)$ . Сравнивая восстановленные значения искомым величин с их расчетными значениями находим методическую погрешность.

При исследовании методической погрешности рассматриваемого способа установлено, что восстановление температуры поверхности по формуле (9) имеет меньшую методическую погрешность по сравнению с результатами, полученными по формуле (8). Для определения плотности теплового потока при скорости изменения температуры центра  $(dT_{\text{ц}}(\tau))/d\tau > 200$  °С по

формуле (11) следует использовать время запаздывания  $\Delta\tau = 1 R^2/7a$ , что является усреднением скорости  $dT_{\text{ц}}(r,\tau)/d\tau$  вдоль радиуса цилиндра, что снижает методическую ошибку.

На рис. 3, 4, 5 показаны значения точных и восстановленных плотностей теплового потока и коэффициентов теплоотдачи  $\alpha$  при охлаждении серебряного цилиндра диаметром  $D = 16$  мм и высотой  $H = 48$  мм в водном 12 % растворе NaCl при температуре  $11$  °С и минеральном масле с температурой  $60$  °С.

#### Выводы.

1. К достоинствам изложенной выше методики определения температуры поверхности и плотности теплового потока на поверхности серебряных образцов цилиндрической формы и шара, охлаждаемых в жидкостях с широким спектром охлаждающих свойств следует отнести:

– простота организации эксперимента на термозондах с

одной центральной термопарой (без необходимости установки дополнительных термопар в других сечениях);

– ключевым элементом разработанной методики следует считать использование времени запаздывания температуры центра зонда относительно температуры поверхности. В результате методическая погрешность при расчете определяемых величин уменьшается в  $3 \dots 5$  раз;

– по сравнению с методикой, используемой в работах [3, 4], погрешность восстановления температуры поверхности, плотности теплового потока и коэффициента теплоотдачи для жидкостей с высокой скоростью охлаждения уменьшается в  $5 \dots 10$  раз.

2. Результаты работы показали перспективность использования разработанной методики для решения актуальной задачи расчета характеристик процесса нестационарного охлаждения стандартных цилиндрических термозондов диаметром от  $12$  до  $50$  мм, изготовленных

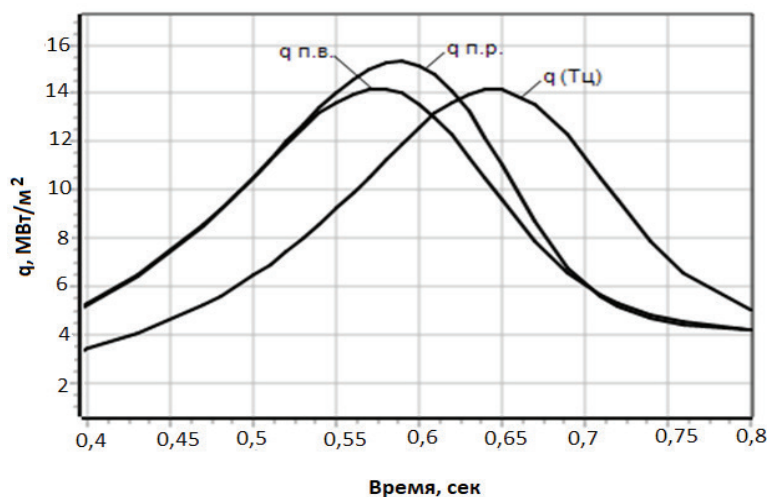


Рис. 3. Тепловой поток на поверхности серебряного цилиндра  $D = 16$  мм,  $H = 48$  мм при охлаждении в водном 12 % растворе NaCl с температурой  $T_{\text{жс}} = 11$  °С.

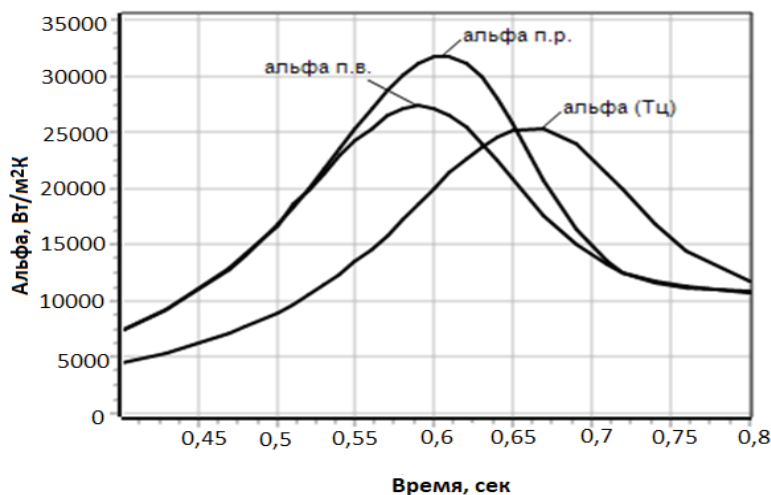


Рис. 4. Коэффициент теплоотдачи (альфа) на поверхности серебряного цилиндра  $D = 16$  мм,  $H = 48$  мм при его охлаждении в водном 12 % растворе NaCl с температурой  $T_{\text{жс}} = 11$  °С.

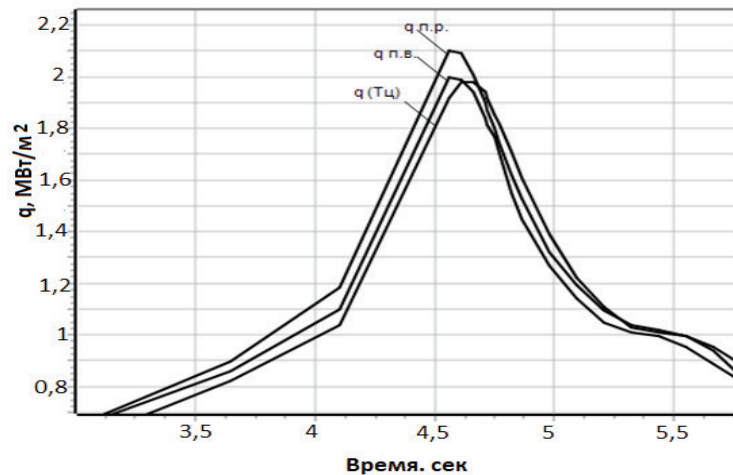


Рис. 5. Тепловой поток на поверхности серебряного цилиндра  $D = 16$  мм,  $H = 48$  мм при его охлаждении в масле И-20А при  $T_{жс} = 60$  °С.

из жаропрочных сплавов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Петраш Л.В. Закалочные среды высокой охлаждающей способности. *Металловедение и обработка металлов*, 1958, №3, с. 56-61.
2. ISO 9950:1995: Industrial Quenching Oils Determination of Cooling Characteristics—Nickel-Alloy Probe Test Method, International Standard, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland. — 1995.
3. Петраш Л.В. Закалочные среды. М., Машгиз, 1959, 112с.
4. Кобаско Н.И., Москаленко А.А., Тоттен Дж.Е., Вебстер Г.М. Определение второй критической плотности теплового потока на основе испытания эталонных образцов. *Промышленная теплотехника*, 1995, т.17, с. 83-87.
5. Лыков А.В. Теория теплопроводности. М., Высшая школа, 1967, 599 с.
6. Зотов Е.Н., Москаленко А.А., Проценко Л.Н., Разумцева О.В. Способ определения коэффициента теплоотдачи при кипении жидкости на охлаждаемой поверхности. Декларационный патент на изобретение, G01N25/18, 17.05.2004. Бюл.№5.
7. Зотов Е.Н., Москаленко А.А., Проценко Л.Н., Разумцева О.В. Методика определения коэффициента теплоотдачи охлаждающих сред в условиях нестационарного теплообмена. *Промышленная теплотехника*, 2004, т.25, №4, с.315-317.
8. Добrivечер В.В., Зотов Е.Н., Кобаско Н.И., Моргунок В.С., Сергеев Ю.В. Программный комплекс «IQLab», коммерчески распространяемый ТОВ «Интенсивные технологии ЛТД» (iqlab@itl/kyiv.ua).
9. Зотов Е.Н., Москаленко А.А., Добrivечер В.В., Кобаско Н.И., Дейнеко Л.Н. Использование программы IQLab для выбора оптимальных режимов процесса термообработки стальных изделий. *Международная конференция ОТТОМ-6*, Харьков, 2005, с. 105 – 115.
10. Круковский П.Г. Обратные задачи тепломассопереноса (Общий инженерный подход). Киев: Ин-т технической теплофизики, 1998, 224с.

**DETERMINATION OF THE COEFFICIENT OF HEAT TRANSFER DURING COOLING OF SILVER THERMO PROBES, TAKING INTO ACCOUNT THE EFFECTS OF TEMPERATURE-TIME DELAY**

**Zotov E.N., Moskalenko A.A., Rasumtseva O.V., Protsenko L.M.**

Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine,  
2a, Zhelyabova str., Kyiv, 03680, Ukraine

The purpose of this work was to improve existing methods for assessing the cooling capacities of liquids. This problem is relevant for a number of industries, plays an important role in metallurgy and machine building, in particular, for the hardening of steel parts, which ensure high strength and long-term operation of the metal.

To improve existing heat treatment technologies, laboratory tests are conducted to test the cooling capacity of new quenching media using known standard techniques. The experimental results on the kinetics of the temperature of the cooled metallic probe can also be used to calculate the characteristics of the nonstationary heat transfer from metal to liquid.

The paper considers various methods for determining the heat transfer coefficient on the surface of silver spherical and cylindrical thermosondes cooled in liquids with different cooling capacities.

A method is proposed, the key element of which in determining the characteristics of heat exchange is the use of the delay time for the temperature of the probe center relative to the surface temperature. As a result, the methodical error in calculating the determined values decreases by a factor of 3-5, and the error in recovering the surface temperature, the heat flux density, and the heat transfer coefficient for liquids with a high cooling rate decreases by a factor of 5-10.

The results of the work showed the promise of using the developed methodology for solving the actual problem of calculating the characteristics of the process of non-stationary cooling of standard cylindrical thermosondes with diameters from 12 to 50 mm, made of heat-resistant alloys.

References 10, figures 5.

**Key words:** determination of the cooling capacity of a liquid, silver thermo-probe, solution of the direct and inverse heat conduction problem

1. *Petrash L.V.* Quenching media of high cooling capacity. Metal Science and Metalworking, 1958, No. 3, p. 56-61 (Rus).

2. *ISO 9950: 1995: Industrial Quenching Oils Determination of Cooling Characteristics-Nickel-Alloy Probe Test Method*, International Standard, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland. –1995.

3. *Petrash L.V.* Quenching media. M., Mashgiz, 1959, 112s (Rus).

4. *Kobasko N.I., Moskalenko A.A., Totten J.E., Webster G.M.* Determination of the second critical heat flux density based on the test of reference samples. Industrial heat engineering, 1995, v.17, p. 83-87 (Rus).

5. *Lykov A.V.* Theory of heat conductivity. M., Higher School, 1967, 599 p. (Rus).

6. *Zotov E.N., Moskalenko A.A., Protsenko L.N., Razumtseva O.V.* Method for determining the heat transfer coefficient when the liquid is boiling on a cooled surface. Declaration patent for invention, G01N25 / 18, 17.05.2004. Bul.№5, (Rus).

7. *Zotov E.N., Moskalenko A.A., Protsenko L.N., Razumtseva O.V.* Method of determination of the heat transfer coefficient of cooling media under conditions of non-stationary heat exchange. Industrial heat engineering, 2004, v.25, №4, p.315-317, (Rus).

8. *Dobrivecher V.V., Zotov E.N., Kobasko N.I., Morgunyk V.S., Sergeev Yu.V.* The software complex "IQLab", commercially distributed by "Intensive Technologies LTD" (iqlab@itl/kyiv.ua), (Rus).

9. *Zotov E.N., Moskalenko A.A., Dobrivecher V.V., Kobasko N.I., Deineko L.N.* Using the IQLab program to select the optimal modes of the heat treatment process for steel products. International Conference OTTOM-6, Kharkov, 2005, p. 105 – 115, (Rus).

10. *Krukovsky P.G.* Inverse problems of heat and mass transfer (General engineering approach). Kiev: Institute of Engineering Thermophysics, 1998, 224p, (Rus).

Получено 16.11.2017  
Received 16.11.2017