

РАСЧЁТ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ

О.Г. Белоусов,

доцент кафедры ПТГАиС
ФГКОУ ВПО ВСИ МВД России,
канд. техн. наук, доцент

А.В. Белых,

преподаватель кафедры ПТГАиС

В работе рассматриваются вопросы точности измерений температуры нагретых поверхностей с помощью контактных методов с использованием термопар. Описываются технические и технологические приемы уменьшения случайных и систематических погрешностей измерительного комплекса, состоящего из хромель-копелевых термопар с медными теплоизолированными калориметрическими вставками, компенсационных проводов, подстроечными резисторами и светолучевых осциллографов типа Н – 117/1.

In work questions of accuracy of measurements of temperature of warm surfaces by means of contact methods with use of thermocouples are considered. Are described technical and processing methods of reduction of casual and regular errors of the measuring complex consisting from chromel-kopelevaja thermocouples with copper heat-insulated calorimetric inserts, compensatory wires, tuning resistors and light-beam oscillographs of type Н – 117/1.*

Для измерения температуры поверхности модели с помощью термопар, вмонтированных в медные калориметры, составляется измерительная цепь, состоящая из трех элементов: калориметра с термопарой, соединительных медных проводов и шлейфовых осциллографов типа Н-117/1 (рис. 1). Каждый из этих элементов оказывает определенное влияние на точность измерения температуры и, следовательно, на точность экспериментального определения коэффициента теплоотдачи.

Величина погрешности результатов экспериментального определения коэффициента теплоотдачи α в аэродинамических установках обусловлена следующими факторами:

искажением температурного поля модели из-за конструктивных и теплофизических особенностей калориметрического элемента;

* Belousov O., Belykh A. Calculation of the error of measurement of temperature

возможностью утечки тепла через стенки калориметра и по проводам термопар;

отсутствием достаточно надежной технологии препарирования термопар и методов их точного тарирования;

несовершенством системы сбора информации;

различного типа наводками электрического сигнала;

инерционностью измерительной системы.

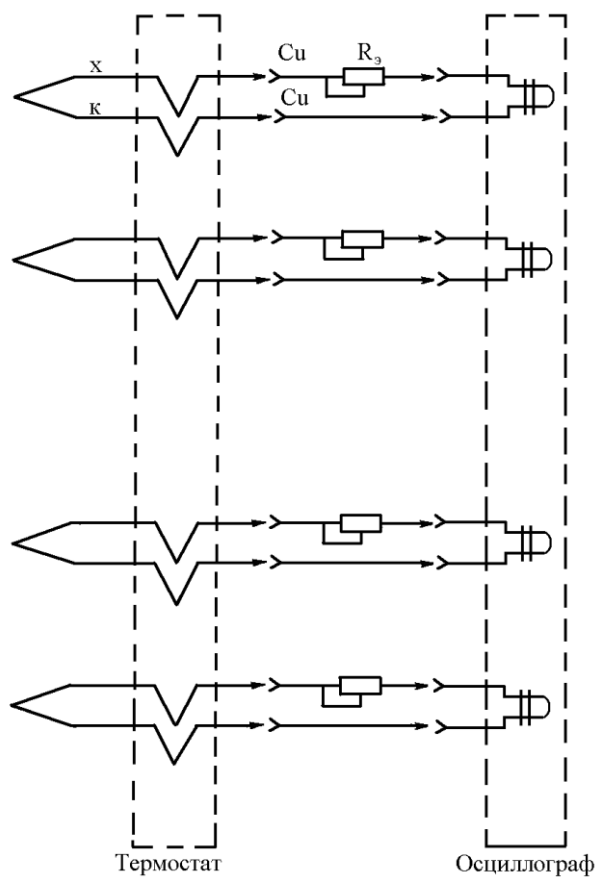


Рис. 1. Схема измерений температуры: Cu – медные соединительные провода;
 R_3 – подстроечный резистор.

Влияние соединительных проводов и измерительного прибора на точность измерения достаточно хорошо изучено и в данной работе не рассматривается.

Для уменьшения систематической погрешности измерений в настоящей работе были использованы технологические и конструктивные усовершенствования. Для изготовления хромель-копелевых термопар применялись термоэлектродные провода диаметром 0,0002 м. Концы электродов термопар были прокатаны до толщины 0,00005 м и сварены между собой контактной конденсаторной сваркой. После сварки диаметр спая не превышал 0,0025 м. Изготовленные таким образом термопары припаивались серебряным припоем к калориметру.

Такая методика изготовления и установки термопар не приводит, как будет показано ниже, к сколько-нибудь существенным утечкам тепла по проводам термопары и практически не влияет на распределение температуры внутри калориметрического датчика. Искажение температурного поля калориметра, вызванное присутствием термопары и зависящее от отношения толщины калориметра к радиусу проводов термопары, составляет доли процента и в настоящих тепловых исследованиях не учитывалась.

Вследствие эффектов Пельтье и Томсона термопара поглощает тепло от нагретой медной цилиндрической вставки и отдает его холодному спаю и окружающей среде, т.е. работает как тепловой насос. Количество тепла, поглощаемое термопарой, пропорционально силе термотока. При измерении термо-э.д.с. этот ток мал, и эффекты Пельтье, Томсона и Джоуля не оказывают заметного влияния на точность измерения.

При изменении напряженности электростатического поля от $2 \cdot 10^5$ до $5 \cdot 10^5$ В/м погрешность изменялась от 0,2 до 0,65% (при температуре 100°C). Поскольку в большинстве случаев при измерении температуры напряженность электрического поля значительно меньше, погрешность его воздействия незначительна и нами не учитывалась.

В [6] рассмотрено влияние магнитного поля. Для всех исследованных термопарных проволок, за исключением алюмелевой, наводки были незначительны – не больше $0,1 \text{ мкВ}^\circ\text{C}$ при индукции 0,9 Тл. Для алюмелевой проволоки наводки составили $1 \text{ мкВ}^\circ\text{C}$. При меньших значениях магнитной индукции, которые характерны для большинства случаев, наводки и, следовательно, погрешности измерения значительно меньше. Термоэлектроды использованных термопар были обмотаны кремнеземной нитью, а затем пропитаны электроизоляционным лаком, т.е. термоэлектроды были экранированы, что исключало электрические и магнитные наводки.

Наибольшее влияние при измерении термотока оказывают погрешности, связанные с изменением сопротивления цепи термопары, так как измерительные приборы (шлейфовые осциллографы) в этом случае имеют небольшое внутренне сопротивление. Однако, составленная измерительная цепь с подстроечным резистором позволила пренебречь погрешностью, обусловленной изменением сопротивления цепи термопары. Величина погрешности, которая возникает при различии термо-э.д.с. термоэлектродов термопары и компенсационных (удлинительных) проводов, составляет доли процента при использовании в качестве приборов, регистрирующих термо-э.д.с., шлейфовых осциллографов и не учитывалась при определении погрешности измерений.

Применение двухэлектродных термопар со спаем для измерения температуры поверхности обуславливает погрешности, связанные с градиентом температуры по длине спая; они зависят от теплооттока по термоэлектродам термопары.

Рассмотрим цилиндрический медный калориметр (рис. 2), охлаждаемый сверху тепловым потоком $q(\tau) = \alpha(T_w(\tau) - T_e)$ за счет вынужденной конвекции. С нижней стороны калориметр охлаждается за счет естественной конвективной теплоотдачи в окружающую среду с постоянной температурой и теплового потока по термоэлектродам термопары $q_3(r)$, величина которого постоянна, поскольку теплопроводность хромель-копелевой термопары на порядок меньше теплопроводности медной цилиндрической вставки калориметра. Боковая поверхность медной цилиндрической вставки термоизолирована. Эффективность применяемой термоизоляции характеризуется так называемым охлаждающим эффектом, для оценки которого используют коэффициент

$$K_{эф} = \frac{\epsilon_{\kappa}}{\epsilon_{из}} = 50$$

где ϵ_{κ} , $\epsilon_{из}$ – соответственно коэффициенты тепловой активности медной вставки и стеклотекстолитовой теплоизоляции; $\epsilon = \sqrt{c \cdot \rho \cdot \lambda}$. При $K_{эф} \geq 30$ утечки тепла в термоизоляцию составляют доли процента [1], следовательно, принимаем $\alpha_R = 0$.

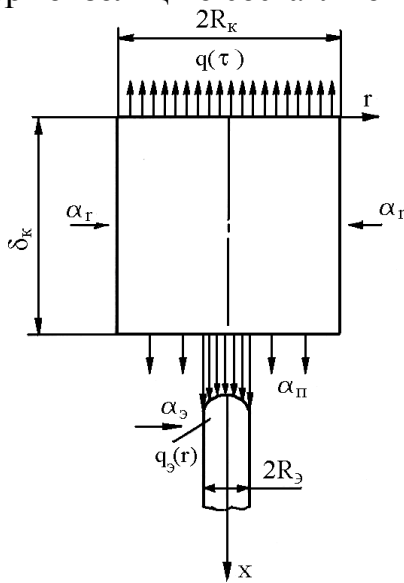


Рис. 2. Распределение тепловых потоков для охлаждаемого цилиндрического

калориметра с термопарой (второй термоэлектрод и термоизоляция калориметра и термоэлектродов термопары не показаны) Скорости теплообмена, возникающие при естественной (свободной) конвекции, сравнительно малы, так что при совместном действии свободной и вынужденной конвекции последняя и определяет картину теплообмена, так как в одной и той же среде теплообмен при вынужденной конвекции протекает значительно интенсивнее, чем при свободной. Учитывая это и то, что теплоотдача в условиях естественной конвекции не влияет на погрешность измерения, принимаем $\alpha_{II} = 0$.

Теплоотток по термоэлектродам термопары и связанную вместе с ним погрешность измерения температуры определим из выражения [2]:

$$\bar{Q} = 2.2 \frac{f_3}{F_k} \sqrt{\frac{(\lambda \cdot c \cdot \rho)_3}{(\lambda \cdot c \cdot \rho)_k}} \sqrt{F_0},$$

где $\bar{Q} = \frac{Q_3}{Q}$ - относительная величина утечки тепла из калориметра по проводам термопары;

Q_3 - количества тепла, уходящего в единицу времени из калориметра по двум термоэлектродам термопары;

$Q = q(r) \cdot F_k$ - количество тепла, уходящего в пограничный слой из калориметра в единицу времени;

F_k - площадь внешней поверхности калориметра, охлаждаемая тепловым потоком $q(r)$;

f_3 - площадь поперечного сечения термоэлектрода;

$(\lambda, c, \rho)_3, u(\lambda, c, \rho)_k$ - коэффициент теплопроводности, удельная теплоемкость и плотность материалов термоэлектродов и калориметра соответственно;

$F_0 = \left(\frac{\lambda}{\rho \cdot c \cdot \delta^2} \right)_k \cdot \tau$ - критерий Фурье (здесь δ - толщина калориметра, τ - время опыта).

В настоящих исследованиях величина \bar{Q} не превышала 0,01, что на порядок меньше обычно принимаемой величины утечек тепла по проводам термопары [2] и в расчетах не учитывалась.

Таким образом, применяемые конструкция калориметра, материалы термоизоляции калориметра и термоэлектродов, регистрирующая аппаратура, схема измерений с подстроечным резистором позволили минимизировать методическую (статическую) погрешность измерения температуры, которая не зависит от класса точности измерительного комплекта, а определяется условиями измерения температуры.

Конечность теплопроводности спая термопары приводит к тому, что при измерении меняющихся во времени температур, помимо статической, возникает динамическая погрешность термопары, равная разности мгновенных значений неискаженной температуры и температуры, регистрируемой термопарой.

Динамическая погрешность термопары определяется ее тепловой инерцией, то есть отставанием измеренной температуры от неискаженной температуры медной цилиндрической вставки калориметра. Существует контактная инерционность, обусловленная искажением температурного поля вставки, вызванного теплооттоком по термоэлектродам термопары (ее учитывать не будем, так как выше было показано, что $\bar{Q} = 1\%$), и инерционность спая, обусловленная градиентом температуры по длине спая термопары.

Хромель-копелевые термопары относятся к малоинерционным стандартным термопарам. Благодаря хорошему контакту спая термопары с медной вставкой данная конструкция калориметра при больших α обладает сравнительно малой инерционностью. Предварительно оценив по методу эффективной длины В.С. Авдуевского величину коэффициента теплоотдачи α

для заданных условий (например для $T_0 = 243\text{K}$, $M_e = 1,55$, $R_w = 0,40\text{ м}$, $\alpha \approx 900\text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{град})$), по формуле [3]

$$\varepsilon = \frac{c_k \cdot \rho_k \cdot V_k}{\alpha \cdot F_k} = \frac{c_k \cdot \rho_k \cdot \delta_k}{\alpha} = 11,5\text{с},$$

находим величину тепловой инерции ε для калориметра, установленного непосредственно перед углублением на поверхности исследуемой модели и вычисляем τ_y – время установления показаний калориметра, отсчитываемое от момента наступления регулярного теплового режима. При $\tau_y = 3\varepsilon$ температура калориметра отличается от температуры среды всего на 5% [3]. Опыты показывают, что стационарный режим по температуре торможения в форкамере газодинамического стенда устанавливается примерно на 10с от момента пуска стенда, тогда минимально необходимое время работы стенда (время одной продувки) τ_{np} будет равно

$$\tau_{np} = 3\varepsilon + 10\text{с} \approx 45\text{с}.$$

Величина коэффициента теплоотдачи α в отрывной зоне изменяется в широком диапазоне, пределы которого заранее не известны. Поэтому предположим, что величина α в отрывной зоне изменяется в пределах $0,5 \leq \alpha/\alpha_{omp} \leq 4$ и определим предполагаемый диапазон изменения показателей тепловой инерции калориметров, установленных в отрывной зоне – $23\text{с} \leq \varepsilon \leq 2,8\text{с}$. А для точного измерения температуры поверхности калориметры должны обладать минимальной тепловой инерцией – 20...25с.

Аналитический расчет динамики процессов изменения температуры хотя и возможен, но весьма сложен и требует больших вычислений. При расположении спая термопары цилиндрической полости внутри медной вставки простое аналитическое решение для оценки погрешности измерения температуры не найдено. Знак и числовое значение температурной погрешности зависят от соотношения между теплофизическими свойствами термопары и вставки калориметра, диаметра спая, глубины его залегания, а так же от характера теплового воздействия на исследуемую поверхность.

Ранее было отмечено, что в применяемой конструкции калориметра термопара практически не искажает температурное поле цилиндрической вставки. Следовательно, погрешность измерения температуры будет определяться глубиной залегания спая термопары и характером теплового воздействия на исследуемую поверхность. Так как термопара со спаем измеряет температуру в месте разветвления термоэлектродов, то схему калориметра можно представить в следующем виде (рис. 3), заменив термопару со спаем одноэлектродной термопарой состоящей из копелевого (более теплопроводного) термоэлектрода, что существенно упрощает исследование нестационарных погрешностей измерения.

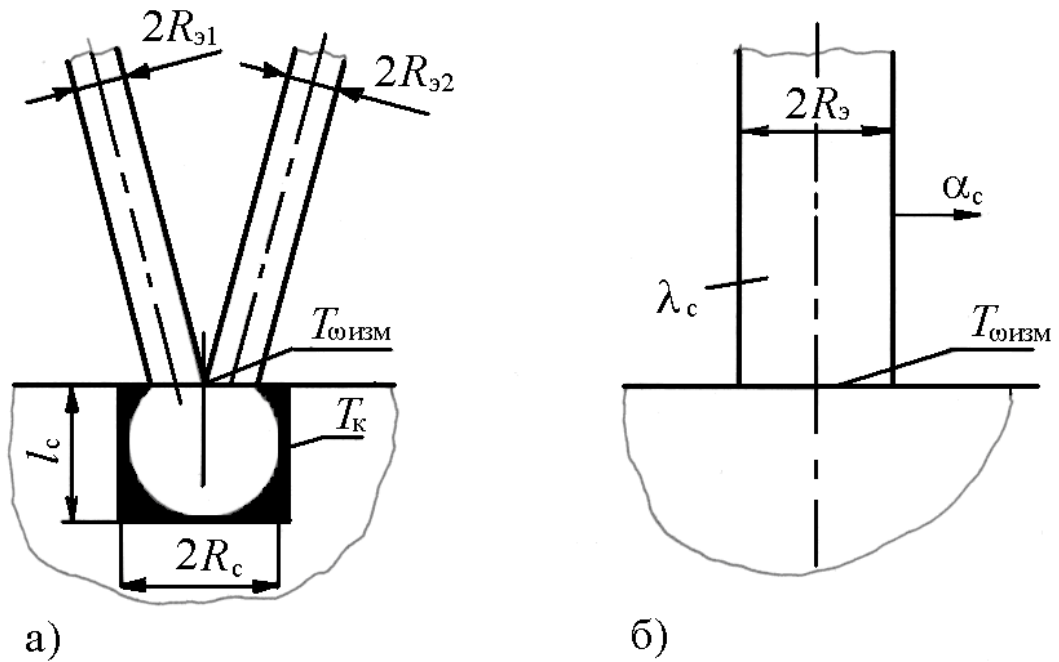


Рис. 3. Расчетная схема двухэлектродной термопары со спаем

Для стационарных условий ($T_e = \text{const}$) распределение температур по толщине медной вставки калориметра будет следующим [3]:

$$v(x, \tau) = T(x, \tau) - T_e = q(\tau) \left[\frac{1}{\alpha} + \frac{\delta_k - x}{\lambda_k} \right],$$

$$(0 \leq x \leq \delta_k),$$

здесь α – коэффициент теплоотдачи;

δ_k – толщина калориметра;

λ_k – коэффициент теплопроводности материала калориметра;

x – текущая координата;

$T(x, \tau)$ – температура;

$v(x, \tau)$ – избыточная температура.

Согласно принятой расчетной схеме $x = \delta_k$ и тогда

$$v(\delta_k, \tau) = T(\delta_k, \tau) - T_e = \frac{q(\tau)}{\alpha}.$$

При расположении термоприемника со стороны, противоположной охлаждению, взаимосвязь между измеренной $T_T(\tau)$ и истинной $T_\omega(\tau)$ температурами в изображениях записывается в следующем виде [3]:

$$\frac{t_T(P)}{t_\omega(P)} = v \frac{1 + \varepsilon \cdot P}{1 + \varepsilon' \cdot P},$$

$$\text{где } v = 1 + \frac{1}{2} \xi; \quad \varepsilon = \frac{1}{m} + \frac{1}{n}; \quad \varepsilon' = \frac{1}{M}; \quad \xi = \frac{\alpha \cdot l_c}{\lambda_c}; \quad m = \frac{\alpha}{(c \cdot \rho \cdot \delta)_k}; \quad n = \frac{1 + \frac{1}{2} \xi}{\frac{1}{6} \cdot \frac{l_c^2}{a_c} \left(1 + \frac{1}{4} \xi \right)};$$

$$M = \frac{1}{(c \cdot \rho \cdot \delta)_k \cdot R} \cdot \frac{\xi}{1 + x + \left(1 + \frac{1}{2}x\right)\xi}; \quad x = \frac{(c \cdot \rho \cdot l)_c}{(c \cdot \rho \cdot \delta)_k}; \quad R = \frac{l_c}{\lambda_c}.$$

Индекс «к» относится к материалу и свойствам вставки калориметра, а индекс «с» - к копелевому термоэлектроду термопары.

Произведя все необходимые вычисления и преобразования и, учитывая, что изображением относительной измеренной температуры

$$\theta_T(\tau) = \frac{T_T(\tau) - T_e}{T_{Тнна} - T_e} = e^{-m\tau}$$

является выражение вида $\frac{1}{P + m}$, получаем следующее выражение для определения истинной температуры поверхности калориметра, рассчитываемой по соответствующим значениям измеренной температуры:

$$\theta_\omega(\tau) = \frac{\varepsilon'}{\varepsilon \cdot V} e^{-m\tau} [1 + (M - m)\tau]$$

Как показывают расчеты $m \approx M$, что означает, что используемая хромель-копелевая термопара по своим свойствам близка к свойствам медной цилиндрической вставки калориметра. А как показано в [3], во всех случаях измерений абсолютная величина погрешности будет тем меньше, чем меньше теплоемкость термопары и чем меньше ее «внутренняя» постоянная времени $\varepsilon_s = l_c^2 / 2a_c$, (здесь l_c - длина спая, a_c - его температуропроводность), которая характеризует быстроту перестройки температурного поля внутри термопары.

Комплекс величин

$$\tau_s = \frac{C_c^2}{b_k^2} = \frac{(c^2 \cdot \rho^2 \cdot l^2)_c}{(c \cdot \rho \cdot \lambda)_k},$$

имеющий размерность времени, является параметром, характеризующим динамические свойства системы термопара - медная цилиндрическая вставка. Чем меньше значение τ_s , тем ближе показания термопары к истинным.

Рассчитанные значения $\varepsilon_s = 10^{-7} c$ и $\tau_s = 2 \cdot 10^{-9} c$ показывают, что выбранные характеристики термопары и вставки калориметра обеспечивают измерения практически истинной температуры поверхности.

Величина коэффициента теплоотдачи определяется из выражения

$$\alpha = m \left(\frac{c \cdot \rho \cdot V}{F} \right)_k,$$

тогда расчетное уравнение для определения максимальной относительной ошибки определения α запишется в следующем виде:

$$\frac{\delta\alpha_1}{\alpha_1} = \frac{\delta m_1}{m_1} + \frac{\delta c_k}{c_k} + \frac{\delta \rho_k}{\rho_k} + \frac{\delta V_k}{V_k} + \frac{\delta F_k}{F_k}$$

Индекс «1» означает здесь, что определяется погрешность, обусловленная несовершенством применяемой измерительной системы. Рассмотрим слагаемые в правой части последнего уравнения.

Для определения относительной ошибки $\delta\alpha_1 / \alpha_1$ последовательно вычислялись следующие величины:

1. Относительная погрешность определения i -го значения температуры поверхности $T_{Ti}(\tau)$ при считывании с осциллограммы будет определяться из выражения

$$\frac{\delta T_{Ti}}{T_i} = \frac{\delta h_i}{|h_i|} + \frac{\delta k}{k}, m.k.T_{Ti} = h_i \cdot k,$$

здесь h_i – отклонение луча осциллографа в i -ый момент времени, δh_i – абсолютная погрешность измерения i -го отклонения луча, равная 10^{-6} мм, так как для измерения h_i используется измерительный микроскоп ИМЦ-150; k и δk – соответственно тарировочный коэффициент и абсолютная погрешность его определения. Тарировочный коэффициент определяется из выражения

$$k = \left. \frac{T}{h} \right|_{T=100^\circ C},$$

тогда относительная погрешность $\delta k / k$ будет определяться по формуле

$$\frac{\delta k}{k} = \sqrt{\left(\frac{\delta T}{T}\right)^2 + \left(\frac{\delta h}{h}\right)^2} = 0.001$$

так как погрешности независимы и случайны, следовательно

$$\frac{\delta T_{T2}}{T_2} = \frac{\delta h_1}{|h_1|} + \frac{\delta k}{k} = 0.001$$

и аналогично

$$\frac{\delta T_{T2}}{T_2} = 0.001$$

2. Относительная погрешность определения избыточной температуры ν

$$\frac{\delta \nu_i}{\nu_i} = \sqrt{\left(\frac{\delta T_{Ti}}{T_{Ti}}\right)^2 + \left(\frac{\delta T_e}{T_e}\right)^2}$$

Равновесная температура газа T_e определяется из экспериментальной зависимости $T_T(\tau)=f(\tau)$ для каждой контрольной точки поверхности и учитывая, что при $\tau=3\varepsilon$ $T_T(\tau)=0,95T_e$, принимаем относительную погрешность определения температуры T_e равной 5%. Тогда

$$\frac{\delta \nu_1}{\nu_1} = \sqrt{\left(\frac{\delta T_{T1}}{T_{T1}}\right)^2 + \left(\frac{\delta T_e}{T_e}\right)^2} = 0.05$$

$$\frac{\delta \nu_2}{\nu_2} = 0.05.$$

3. Относительная погрешность нахождения логарифма избыточной температуры - $\delta \ln \nu / \ln \nu$.

Если величина ν_i определена с погрешностью $\delta \nu_i$ и используется для вычисления функции $\ln \nu_i$, то погрешность $\delta \ln \nu_i$ равна [4]

$$\delta \ln \nu_i = \left| \frac{d \ln \nu_i}{d \nu_i} \right| \delta \nu_i = \frac{\delta \nu_i}{\nu_i}.$$

4. Относительная погрешность определения темпа охлаждения - $\delta m_1 / m_1$.

Темп охлаждения m_1 определяется из выражения

$$m_1 = \frac{\ln \nu_1 - \ln \nu_2}{\Delta \tau} = \frac{\Delta \ln \nu}{\Delta \tau},$$

тогда расчетное выражение для определения относительной ошибки нахождения m_1 запишется в следующем виде:

$$\frac{\delta m_1}{m_1} = \sqrt{\left(\frac{\delta(\Delta \ln v)}{\Delta \ln v}\right)^2 + \left(\frac{\delta(\Delta \tau)}{\Delta \tau}\right)^2},$$

здесь $\delta(\Delta \ln v) = \delta \ln v_1 + \delta \ln v_2 = 0,10$

$$\Delta \ln v = \ln v_1 + \ln v_2 = 0,715.$$

Погрешность $\delta(\Delta \tau)/\Delta \tau$ согласно паспортным данным осциллографа Н-117/1 составляет 10^{-4} с и не дает заметного вклада в суммарную погрешность определения темпа охлаждения m_1 и его можно пренебречь, тогда

$$\frac{\delta m_1}{m_1} = \frac{\delta(\Delta \ln v)}{\Delta \ln v} \approx 14\%.$$

5. В формуле для определения α участвуют значения c_k и ρ_k , взятые из таблиц. Согласно [1], их погрешности принимаются равными половине последнего разряда:

$$\delta c_k = 0.0005, \quad \frac{\delta c_k}{c_k} = \frac{0.0005}{0.091} = 0.0055;$$

$$\delta \rho_k = 0.05, \quad \frac{\delta \rho_k}{\rho_k} = \frac{0.05}{8.9} = 0.0056.$$

Для определения размеров медной цилиндрической вставки использовался микрометр с точностью измерения $\pm 0,01$ мм, тогда

$$\frac{\delta V_k}{V_k} = 2 \frac{\delta R}{R} + \frac{\delta(\delta_k)}{\delta_k} = 0.0016,$$

$$\frac{\delta F_k}{F_k} = 2 \frac{\delta R}{R} = 0.0013.$$

Таким образом, все слагаемые в правой части уравнения определены и максимальная относительная ошибка определения α , обусловленная несовершенством измерительных приборов и вычислений будет равна

$$\frac{\delta \alpha_1}{\alpha_1} = 0.15.$$

Максимальная погрешность определения коэффициента теплоотдачи α , обусловленная несовершенством конструкции применяемого калориметра, то есть неточностью измерения температуры, будет равна

$$\frac{\delta \alpha_2}{\alpha_2} = \frac{\delta m_2}{m_2} + \frac{\delta c_k}{c_k} + \frac{\delta \rho_k}{\rho_k} + \frac{\delta V_k}{V_k} + \frac{\delta F_k}{F_k}.$$

Здесь величина m_2 определяется по истинной температуре, рассчитываемой по соответствующим значениям измеренной, а величина абсолютной погрешности $\delta m_2 = m_2 - m_1$.

Тогда:

$$\frac{\delta \alpha_2}{\alpha_2} = 0.063.$$

Погрешность $\delta \alpha_1/\alpha_1$ и $\delta \alpha_2/\alpha_2$ независимы и случайны, следовательно суммарная максимальная погрешность определения α будет равна их квадратичной сумме, то есть

$$\frac{\delta\alpha}{\alpha} = \sqrt{\left(\frac{\delta\alpha_1}{\alpha_1}\right)^2 + \left(\frac{\delta\alpha_2}{\alpha_2}\right)^2} = 0.16 = 16\% .$$

Таким образом, предельная относительная погрешность единичного определения коэффициента теплоотдачи α методом регулярного теплового режима при изложенных подходах не превышает 16%. В [5] отмечается, что предельная относительная погрешность метода регулярного теплового режима обычно не превышает 25%, что вполне достаточно для практических целей.

ПРИМЕЧАНИЯ

1. Гордов А.Н. Точность контактных методов измерения температуры./ А.Н. Гордов, Я.В. Малков, Н.Н. Эргардт и др. – М.: Изд – во стандартов, 1986. – 231с.
2. Беспалов А.М. О поправке к измеренным значениям коэффициента теплоотдачи, учитывающей потери тепла на нагревание проводов термопары. – Труды ЦАГИ, вып.1332, 1971, с. 16 – 21.
3. Ярышев Н.А. Теоретические основы измерения нестационарных температур. – Л.: Энергия, 1976. – 299с.
4. Тейлор Дж. Введение в теорию ошибок. Пер. с англ. – М.: Мир, 1985. 272с.
5. Локай В.И. Теплопередача в охлаждаемых деталях газотурбинных двигателей летательных аппаратов./В.И. Локай, М.Н. Бодунов, В.В. Жуйков, А.В. Щукин. – М.: Машиностроение, 1985. – 216с.
6. Лоско К., Мете Г. Погрешности термопар при измерении температуры в магнитных полях. – В кн.: Измерение температур в объектах новой техники. М.: Мир, 1985, с.29-36.