

Н. Н. Огородников

УТОЧНЕННАЯ МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛООТДАЧИ НА ОСНОВЕ РЕГУЛЯРНОГО РЕЖИМА С ПОМОЩЬЮ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

Метод регулярного режима используется для экспериментального исследования теплоотдачи различных объектов в газовых средах. Методом определяется среднее значение коэффициента теплоотдачи на поверхности тела.

Металлическая модель, как правило, является тепловой системой с малым значением критерия Био ($Bi \leq 0,05$). Это качество представляет особую ценность, т. к. освобождает экспериментатора от сложной проблемы определения критерия неравномерности температурного поля — Ψ .

Следует иметь в виду, что метод регулярного режима строго обоснован для случая, когда физические характеристики материала λ , γ , C_p не зависят от температуры.

Поэтому одно из принципиальных требований, предъявляемых к методике эксперимента, сводится к тому, чтобы начальная разность температур модели и среды (начальный перегрев) была невелика ($\vartheta_0 \approx 10 \div 30^\circ\text{C}$). Это правило часто нарушается, и опыты проводятся в широком диапазоне температур ($\vartheta_0 = 100 \div 500$ и $> 500^\circ\text{C}$). В этих случаях при отображении процесса в полулогарифмических координатах график не получается линейным, и дефекты результата молчаливо приписываются теории регулярного режима.

Вместе с тем, постановка эксперимента в широком диапазоне температур нередко представляет самостоятельный интерес. Большей частью высокие начальные перегревы используются для получения крупномасштабной записи процесса охлаждения.

И в том и в другом случае указанные принципиальные трудности разрешаются при использовании уточненной теории регулярного режима, предлагаемой для случая металлических моделей с малыми значениями критерия Био ($Bi < 0,05$). Физические свой-

ства металлов в заметной степени изменяются с температурой (особенно, λ и C_p).

Температурная изменчивость λ и C_p для ряда материалов представлена в таблице 1 [1].

Таблица 1

Материал	Al	Fe	Ni	Sn	Pb	Ag	Zn	Cu
Температурный интервал $0 \div t^\circ\text{C}$	$0 \div 500$	$0 \div 500$	$0 - 350$	$0 \div 230$	$0 - 327$	$0 - 500$	$0 - 400$	$0 \div 500$
λ_t/λ_0	0,89	1,73	1,29	1,16	1,14	1,12	1,18	1,10
C_{pt}/C_{p0}	1,23	1,74	1,38	1,20	1,16	1,10	1,18	1,11

Для тепловых систем в условиях $Bi \rightarrow 0$ температурная зависимость $\lambda_t = \lambda(t)$ оказывает слабое влияние на процесс охлаждения или нагревания, а температурная зависимость теплоемкости $C_{pt} = C_p(t)$ оказывает прямо пропорциональное влияние.

Проведем приближенный анализ, положив в основу рассуждения структуру величины m — темпа охлаждения [2].

$$m = \psi \frac{F_1}{\gamma \cdot C_p \cdot V} \quad (1)$$

Полагая $\alpha = \text{const}$, определим относительное изменение m в процессе охлаждения для двух моментов времени:

$$\frac{m_2}{m_1} = \frac{\psi_2}{\psi_1} \cdot \frac{\frac{F_1}{C_{p2}}}{\frac{F_1}{C_{p1}}} \quad (2)$$

При малых значениях Bi для тел основных форм (пластина, цилиндр, шар) можно получить приближенные выражения величины ψ [2]:

$$\begin{aligned} \text{пластина } \psi &\approx 1 - \frac{Bi}{3}, \\ \text{цилиндр } \psi &\approx 1 - \frac{Bi}{4}, \\ \text{шар } \psi &\approx 1 - \frac{Bi}{5}. \end{aligned} \quad (3)$$

Полагая $Bi_1 = 0,05$ и $Bi_2 = 0,05 \cdot 1,75$ (за счет λ), получаем в самом неблагоприятном случае изменение ψ на величину не более 0,7%.

Относительное изменение поверхности может быть определено по соотношению:

$$\frac{F_2}{F_1} = (1 + \beta \cdot t)^2 \approx 1 + 2\beta \cdot t, \quad (4)$$

где β — средний коэффициент линейного расширения, $1/^\circ\text{C}$. Для указанных материалов в принятых условиях изменение F может составлять $\sim 0,5 \div 2,0\%$. Совместное изменение произведения $\psi \cdot F$ не превышает $1 \div 2,5\%$. Пренебрегая указанной погрешностью, для металлических моделей при малых значениях Bi можно с достаточной точностью принять:

$$\frac{m_2}{m_1} = \frac{C_{p1}}{C_{p2}}, \quad (5)$$

т. е. текущее значение темпа охлаждения в процессе изменяется обратно пропорционально значению истинной теплоемкости материала. В более общем виде последнее условие можно записать в форме:

$$m \cdot C_p = \text{const}. \quad (6)$$

Выражение (6) может рассматриваться как общее свойство процессов охлаждения (или нагревания) для тепловых систем типа металлических моделей ($Bi \leq 0,05$). Для экспериментального исследования, с учетом выражения (6), можно получать соотношение, удобное для определения коэффициента теплоотдачи на основе записи кривых процессов охлаждения в широком диапазоне температур. Для большей точности результатов одновременно учесть и тепловое расширение.

Дифференциальное уравнение нестационарного теплообмена в условиях внешней задачи имеет вид:

$$\frac{dt}{d\tau} + m(t - t_c) = 0, \quad (7)$$

где t и t_c — температуры модели и среды, $^\circ\text{C}$;

m — темп охлаждения ($\psi \approx 1$), $1/\text{час}$.

τ — время, час.

Температурные зависимости теплоемкости и линейного расширения материала модели запишем в форме:

$$C_{p1} = C_{p0}(1 + at + bt^2) = C_{p0} \cdot \epsilon_{cp};$$

$$l_1 = l_0(1 + ct + bt^2) = l_0 \cdot \epsilon_2. \quad (8)$$

Вводя (8) в состав (7), можно исходное уравнение переписать в форме:

$$\frac{dt}{d\tau} = - \frac{\alpha \cdot F_0}{G \cdot C_{p0}} \cdot \frac{t - t_0}{\epsilon_1}, \quad (9)$$

где F_0 — поверхность модели при 0°C , м^2 ;

G — вес, кг;

C_{p0} — теплоемкость при 0°C , $\text{ккал/кг}^\circ\text{C}$;

α — суммарный коэффициент теплоотдачи за счет кон-

вективного и радиационного теплообмена, ккал/м². час.°С.;

$\frac{\epsilon_{св}}{\epsilon_t^2}$ — комбинация температурных множителей теплоемкости и линейного расширения.

Последнее выражение может быть высчитано на основе надежных справочных данных при различных температурах и аппроксимировано двух- или трехчленной зависимостью вида

$$\epsilon_t = \frac{\epsilon_{ср}}{\epsilon_t^2} = 1 + a't + b't^2. \quad (10)$$

Величина ϵ_t может быть наименована температурной функцией материала модели.

Переходя к избыточным температурам $\vartheta = t - t_c$ (с учетом $t_c = \text{const}$) и производя преобразования с учетом (10), получим решение уравнения (9) в следующем виде:

$$\ln \vartheta + A\vartheta + B\vartheta^2 = -m_0\tau + \text{const}, \quad (11)$$

где приняты условные обозначения:

$m_0 = \frac{\alpha F_0}{G \cdot C_{р0} \cdot \epsilon_{tc}}$ — условный темп охлаждения, 1/час;

$$A = \frac{a' + 2b' \cdot t_c}{\epsilon_{tc}}; \quad B = \frac{b'}{2 \cdot t_c};$$

$\epsilon_{tc} = 1 + a't_c + b't_c^2$ — значение температурной функции материала при температуре охлаждающей среды — t_c .

Обозначая левую часть выражения (11) — $\Phi(\vartheta)$ следует, что в координатах $\Phi(\vartheta) \div \tau$ процесс охлаждения отображается линейным графиком с тангенсом угла наклона, равным m_0 .

В отличие от классической теории регулярного режима для линеаризации процесса охлаждения необходимо использование более сложной функции — $\Phi(\vartheta)$ учитывающей зависимость физических характеристик материала от температуры, проявляющуюся при постановке опыта в широком диапазоне температур охлаждения.

Особое достоинство выражения (11) состоит в том, что влияние внутренних и внешних факторов на развитие процесса разделено. Если в указанных координатах график получается нелинейным, то его искривление уверенно может быть приписано только изменению коэффициента теплоотдачи — α , так как влияние остальных факторов исключено.

Величина α определяется по величине условного темпа охлаждения — m_0 :

$$\alpha = C \cdot \epsilon_{tc} \cdot m_0. \quad (12)$$

где $C = \frac{C_{р0} \cdot G}{F_0}$ — константа калориметра, ккал/м².°С

В условиях внешней задачи тепловая система обладает свойством авторегулярности, поэтому в случае искривленного графика

($\alpha = Var$) величина m_0 может определяться по отдельным участкам:

$$[m_0 = \frac{d [\Phi(\vartheta)]}{d\tau}] \quad (13)$$

Высказанные теоретические соображения хорошо подтверждаются экспериментально. Опыты проводились в условиях вынужденной и естественной конвекции.

В первом случае исследовалась теплоотдача проволок в высокоскоростных воздушных потоках ($w = 80 \div 260$ м/сек; $M = 0,25 \div 0,77$) [3].

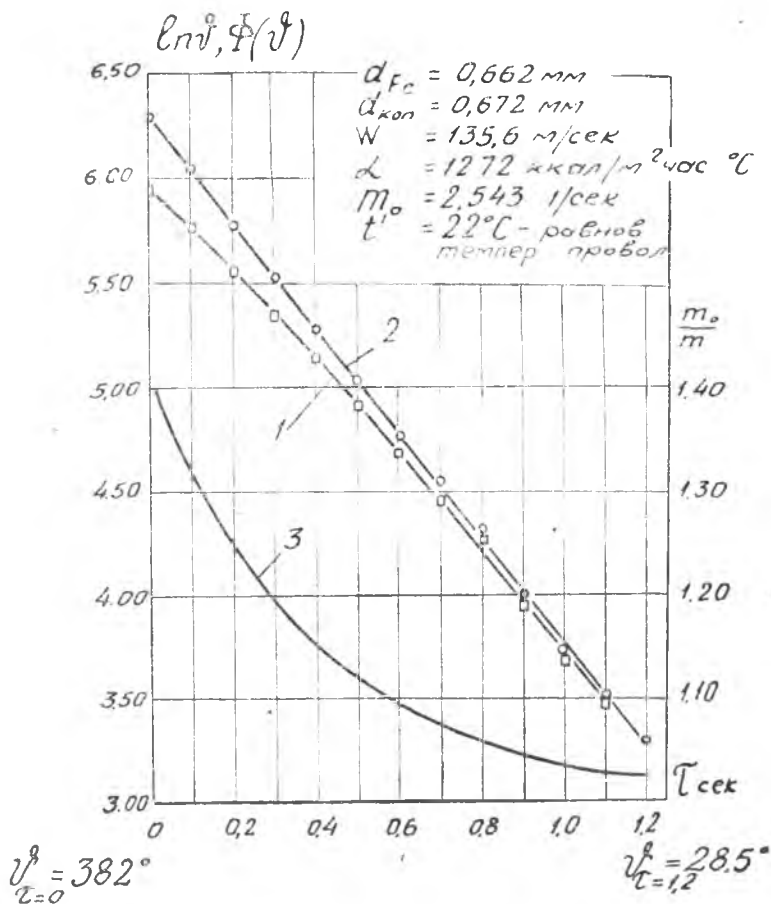
В качестве калориметрической системы использовались железокопелевые термопары, сваренные крестообразно электроконденсаторной сваркой под углом 90° без нарушения цилиндричности проволок. Температурные функции железа и копеля имеют близко совпадающие значения. Диаметры термоэлектродов назначались из условия одинаковости их темпов охлаждения. Нагретые термопары охлаждались в потоке. Процесс записывался на шлейфном осциллографе, ширина бумаги 200 мм. Температура нагрева составляла $t = 380 - 410^\circ\text{C}$. Избыточная температура изменялась в пределах $\vartheta = 406 \div 49^\circ\text{C}$. Для сравнения, процесс охлаждения отображался в координатах $\Phi(\vartheta) \div \tau$ и $\ln \vartheta \div \tau$. Типичная картина представлена на фиг. 1.

Из сравнения кривых хорошо видно, что в координатах $\ln(\vartheta) \div \tau$ график (1) получается криволинейным на всем своем протяжении. В координатах $\Phi(\vartheta) \div \tau$ график (2) является строго линейным. В области низких температур оба графика стягиваются в одну линию. Визуально не очень сильное искривление графика (1) в действительности связано с большим изменением текущего значения действительного темпа охлаждения — m . На графике 3 отображено изменение отношения $m_0 : m$ в течении процесса охлаждения. Как видно, изменение m достигает 40%. Искривление графика и, соответственно, изменение текущего значения m не зависит от α и целиком обусловлено только изменением α от температуры. Глазомерное «осреднение» графика (1) по закону прямой линии имело бы своим следствием определение коэффициента теплоотдачи с погрешностью $(15 \div 20)\%$.

Вторая группа опытов проводилась в условиях естественной конвекции. В качестве альфакалориметра использовался медный шар ($d = 70, 14$ мм, $G = 1610 \pm 1$ гр, пикелирован и полирован). В данном случае коэффициент теплоотдачи является функцией избыточной температуры, поэтому процесс охлаждения в координатах $\Phi(\vartheta) \div \tau$ в диапазоне $\vartheta = 230 \div 50^\circ\text{C}$ представляется вогнутым криволинейным графиком. Не ставя перед собой задачи определить из одного опыта серию значений α , опыты проводились в разное время при различных барометрических давлениях и температурах атмосферного воздуха. Каждый опыт проводился при ок-

лаждении шара на $20 \pm 30^\circ\text{C}$ от величины начального нагрева. Начальный нагрев изменялся от ≈ 80 до $\approx 250^\circ\text{C}$.

Результаты опытов обрабатывались по вышеуказанной методике с применением функции $\Phi\vartheta$. При охлаждении в пределах $\Delta\vartheta = 20 - 30^\circ$ все графики являются четко линейными. Для определения конвективного коэффициента теплоотдачи вводилась поправка на лучеиспускание, принимая собственную степень черноты шара $\Sigma_1 = 0,065 = \text{const}$. В диапазоне экспериментов величина α изменялась на $\approx 30\%$. Экспериментально найденные значения α сравнивались с расчетными значениями на основе данных М. А. Михеева [4, стр. 731].



Фиг. 1. Сравнительное отображение процесса охлаждения ЖК термомпары в координатах $\Phi(\vartheta) \div \tau$ и $\ln(\vartheta) \div \tau$:

1 — $\ln \vartheta$; 2 — $\Phi(\vartheta)$; 3 — $\frac{m_0}{m}$ — относительное изменение действительного темпа охлаждения.

$$Nu_m = 0,54 [G_r \cdot P_r]_m^{0,25}. \quad (14)$$

Для расчета принималась средняя температура шара на участке охлаждения.

Расхождение экспериментальных и расчетных результатов во всех опытах (свыше 40) составляло $(0,1 \div 1,2) \%$. При игнорировании зависимостью свойств меди от температуры (на основе отображения процесса в координатах $\ln \theta \div \tau$) погрешность в определении α достигает $\approx 5 \%$.

Для практического использования в интервале $0 \div 400^\circ\text{C}$ могут быть рекомендованы следующие значения температурной функции — ϵ_t :

$$\text{железо} — \epsilon_t = 1 + 7,21 \cdot 10^{-4} \cdot t + 0,763 \cdot 10^{-6} \cdot t^2;$$

$$\text{медь} — \epsilon_t = 1 + 1,88 \cdot 10^{-4} \cdot t.$$

Погрешности интерполяционных формул по отношению к исходным данным [1] не превышает $0,2 \%$.

ВЫВОДЫ

1. В условиях $\alpha = \text{const}$ искривление графиков процессов охлаждения в координатах $\ln \theta \div \tau$ обусловлено, главным образом, температурной зависимостью теплоемкости материала модели. Нелинейность графика значительно осложняет определение α .

2. Линеаризация процесса охлаждения в широком диапазоне температур возможна только при отображении его в координатах $\Phi(\nu) \div \tau$.

Теоретические выводы хорошо подтверждаются опытом. На основе линейных графиков заметно возрастает точность определения α .

3. При использовании функции $\Phi(\theta)$ искривление графика может быть вызвано только изменением полного коэффициента теплоотдачи.

4. В качестве материала моделей рекомендуется использование химически чистых элементов как наиболее надежно изученных по температурному ходу теплоемкости. Не рекомендуется использование материалов с фазовыми превращениями в диапазоне температур опыта — (Ni , $t_{\text{max}} = 350^\circ\text{C}$; Fe и его сплавы, $t_{\text{max}} = 750^\circ\text{C}$).

ЛИТЕРАТУРА

1. Теплофизические свойства вещества. Справочник под редакцией Н. Б. Варгафтика. Энергониздат, 1956.
2. Г. М. Кондратьев. Регулярный тепловой режим, Техтеоретиздат, 1954.
3. Н. Н. Огородников. Кандидатская диссертация «Измерение переменных температур в газовых потоках методом двух термопар», КуАИ, 1962.
4. М. А. Михеев. Основы теплопередачи, Энергониздат, 1956.