

МЕТОД КОРРЕКТНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛОТНОСТИ ТЕПЛОВОГО ПОТОКА

В.Г. Авраменко, О.В. Лебедев, Е.В. Абрамова и О.Н. Будадин

Технологический институт энергетических исследований, диагностики и неразрушающего контроля "ВЕМО", Россия, г. Москва, 113162 Люсиновская ул., д. 62,

E-mail: oleg@shg.ru, budadin@tsinet.ru.

Одной из основных и наиболее трудных задач в тепловом неразрушающем контроле является определение величины плотности теплового потока, проходящего через поверхность исследуемого объекта. Например, именно на измерении этой величины основана методика определения приведенного сопротивления теплопередаче наружных ограждающих конструкций строительных сооружений^{1,2}. Существующей на данный момент методике измерения плотности теплового потока присущ ряд недостатков³, которые подробно обсуждаются в этой статье. В статье также предложен альтернативный способ определения плотности теплового потока.

В типичной для теплового неразрушающего контроля ситуации исследуемый образец окружен воздушной средой. В этом случае тепловой поток через его поверхность обусловлен двумя составляющими: лучистой и конвективной⁴ (рис. 1), вклады от которых в типичной ситуации примерно одинаковы.

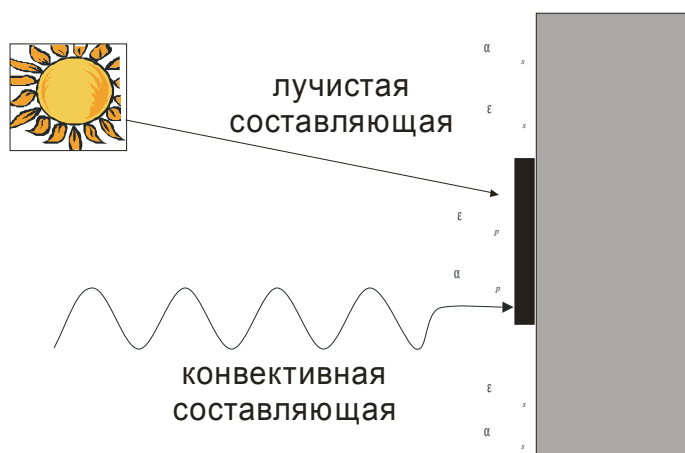


Рис. 1. Составляющие теплового потока.

Лучистая составляющая связана с тепловым излучением поверхности образца во внешнюю среду, а также поглощением этой поверхностью излучения от внешних объектов. Для корректного измерения этой составляющей необходимо использовать датчик, излучательные свойства поверхности которого совпадают с излучательными свойствами поверхности исследуемого образца, а это не всегда достижимо.

Конвективная составляющая обусловлена взаимодействием молекул воздуха и поверхности исследуемого материала, в результате которого молекулы материала отдают или приобретают часть кинетической энергии молекул воздуха. Конвективная составляющая пропорциональна разности температур воздуха и поверхности материала. Коэффициент пропорциональности называется коэффициентом теплоотдачи поверхности материала. Для измерения величины этой составляющей, в принципе, достаточно измерить градиент температуры в прилегающем к поверхности материала слое воздуха, и, зная коэффициент теплопроводности воздуха, можно вычислить искомую величину. Однако

прецизионные измерения градиента температуры в приповерхностном слое в реальных условиях существенно осложняются из-за наличия воздушных потоков в этом слое, нагрева элементов датчика тепловым излучением и рядом других факторов.

В результате, из-за сложности регистрации составляющих теплового потока по отдельности сейчас достаточно широкое распространение получили так называемые “датчики-таблетки”^{5,6}. Эти датчики имеют сравнительно небольшие размеры, они крепятся на поверхности исследуемого материала и позволяют с достаточно высокой точностью зарегистрировать интегральный тепловой поток, проходящий через их поверхность. Однако величина, регистрируемая данным типом датчиков, также существенно отличается от плотности теплового потока, проходящего через поверхность материала вдали от датчика.

“Датчик-таблетка” представляет собой тонкую пластинку из материала с известной теплопроводностью. Регистрируя разность температур на противоположных поверхностях этой пластинки, можно вычислить плотность теплового потока, проходящего через нее. Из-за малой толщины датчик обладает очень малым собственным сопротивлением теплопередаче и малой тепловой инерцией, что позволяет использовать стационарное приближение при вычислении плотности потока.

Рассмотрим подробнее, с чем связано появление ошибки определения плотности теплового потока. Для простоты рассмотрения будем считать, что тепловой поток через поверхность исследуемого объекта обусловлен лишь конвективной составляющей.

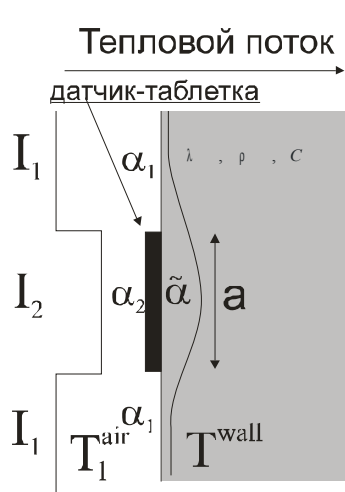


Рис.2. Определение плотности теплового потока с помощью “датчика-таблетки”.

Поместим датчик на поверхность объекта, имеющую коэффициент теплоотдачи α_1 (рис. 2). Пусть температура окружающего воздуха равна T^{air} , а стены – T^{wall} . Из-за малой тепловой инерции датчика, плотность теплового потока через его поверхность может быть найдена с помощью эффективного коэффициента теплоотдачи датчика α_2 , выражающегося через истинный коэффициент теплоотдачи поверхности датчика $\tilde{\alpha}$ и сопротивление теплопередаче датчика \tilde{R} следующей формулой:

$$\alpha_2 = \frac{\tilde{\alpha}}{1 + \tilde{R}\tilde{\alpha}} \quad (1)$$

Поток через поверхность материала при этом пропорционален разности температур воздуха и стены:

$$I = \alpha_i (T^{air} - T^{wall}) \quad (2)$$

Коэффициент теплоотдачи α_i равен α_1 вне датчика и α_2 в области крепления датчика.

Для простоты предположим, что датчик имеет достаточно малые размеры и, поэтому, искажение температурного поля не существенно по сравнению с разностью температур воздуха и стены. В этом случае, отношение истинной плотности потока I_1 (т.е. плотности потока в отсутствие датчика) к измеренному I_2 равно отношению коэффициентов теплоотдачи α_1 и α_2 :

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{\alpha_1}{\alpha_2} \quad (3)$$

Так как коэффициенты теплоотдачи могут отличаться в несколько раз, то также велика и ошибка определения истинной плотности потока.

Учет лучистой составляющей теплового потока только добавит ошибку, связанную с разницей излучательных способностей поверхности объекта и поверхности датчика. Тем не менее, корректное измерение истинной плотности теплового потока возможно, если несколько модифицировать процедуру измерения. Для осуществления этого необходимо предварительно получить ряд вспомогательных результатов.

Изучим более подробно изменение температурного поля, вызванное помещением датчика на поверхность исследуемого объекта.

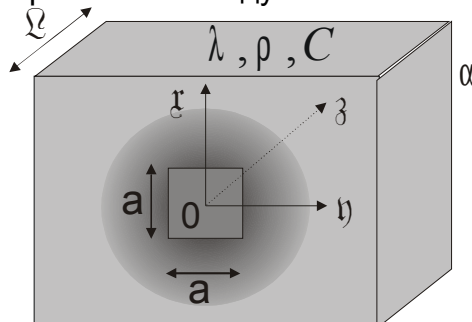


Рис.3. Возмущение температурного поля, вносимое датчиком.

Пусть объект представляет собой слой материала толщиной L (см. рис.3). Выберем систему координат так, как показано на рисунке. Слой бесконечен в плоскости XY . В этой плоскости датчик имеет форму квадрата со стороной a . Начало системы координат поместим на поверхности материала в центре датчика. Зададим также теплофизические характеристики материала: коэффициент теплопроводности λ , теплоемкость C , плотность ρ , а также коэффициент теплоотдачи α на дальней от нас поверхности.

Будем работать в предположении, что датчик обладает малой тепловой инерцией. Поэтому поток через него можно рассчитывать с помощью эффективного коэффициента теплоотдачи. Будем также считать, что искажение температурного поля, вносимое датчиком, мало по сравнению с разностью температур воздуха и ближней поверхности материала. В этом случае можно считать, что плотность теплового потока вне датчика равна искомой величине I_1 , а плотность потока через датчик равна измеряемой величине I_2 .

В результате, для нахождения искажения температурного поля δT необходимо решить стационарную задачу теплопроводности⁴:

$$\Delta \delta T = 0 \quad (4)$$

со специфическими граничными условиями второго рода на ближней границе:

$$-\lambda \left. \frac{\partial \delta T}{\partial z} \right|_{z=0} = \begin{cases} I_2 - I_1(x, y \in D) \\ 0(x, y \notin D) \end{cases} \quad (5)$$

и условиями третьего рода на дальней границе:

$$\lambda \left. \frac{\partial \delta T}{\partial z} \right|_{z=L} = -\alpha \delta T \quad (6)$$

Здесь Δ – оператор Лапласа, а D – это область поверхности материала непосредственно под датчиком.

Для решения этой задачи удобнее всего произвести Фурье преобразование по координатам x и y , вычислить амплитуды Фурье-гармоник и затем произвести обратное преобразование⁷.

В результате был получен следующий результат. Изменение температурного поля пропорционально коэффициенту, равному разности плотностей потоков, умноженной на размер датчика и поделенной на коэффициент теплопроводности материала, и пропорционально также некоторой функции $\tilde{K}(\tilde{\lambda}, \tilde{L}, \tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z})$:

$$\delta T(x, y, z) = (I_2 - I_1) \frac{a}{\lambda} \tilde{K}(\tilde{\lambda}, \tilde{L}, \tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z}) \quad (7)$$

Аргументами этой функции являются безразмерные величины:

$$\tilde{L}, \tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z} = \frac{\tilde{L}, \tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z}}{a}, \quad \tilde{\lambda} = \frac{\lambda}{a\alpha} \quad (8)$$

Функция $\tilde{K}(\tilde{\lambda}, \tilde{L}, \tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z})$ зависит лишь от формы датчика и не зависит от его размеров. Она имеет характерный масштаб порядка 1, и существенно отлична от нуля по различным координатам также на масштабе порядка 1. При толщинах L , на порядок больших размера датчика, функция $\tilde{K}(\tilde{\lambda}, \tilde{L}, \tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z})$ практически не зависит от величин λ и L . В типичных условиях абсолютная величина возмущения имеет порядок $0.1 \text{ } ^\circ\text{C}$ (эта величина мала по сравнению с характерной разностью температур воздуха и стены порядка 1°C , что оправдывает сделанное вначале предположение о малости искажения температурного поля).

На рис.4. представлено сечение функции $\tilde{K}(\tilde{\lambda}, \tilde{L}, \tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z})$ по оси \tilde{x} при различных \tilde{z} для датчика квадратной формы. Видно, что возмущение достаточно быстро убывает в толще слоя (т.е. при увеличении координаты \tilde{z}). Верхняя кривая соответствует искажению температуры на поверхности материала. Из графика видно, что искажение можно зарегистрировать лишь в непосредственной близости к датчику (т.е. на расстоянии порядка a от центра датчика; на расстоянии порядка $4-5a$ искажение практически отсутствует).

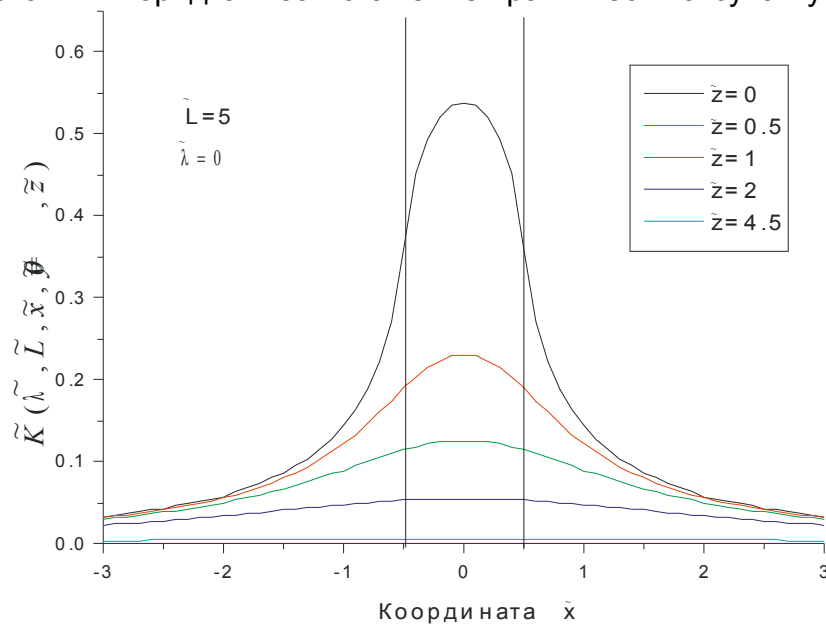


Рис.4. Сечение функции $\tilde{K}(\tilde{\lambda}, \tilde{L}, \tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z})$ по оси \tilde{x} при различных значения \tilde{z} .

Теперь применим полученные результаты к измерению истинной плотности потока. Будем считать, что присутствует как лучистая, так и конвективная составляющие теплового потока.

Для измерения истинной плотности теплового потока необходимо три одинаковых датчика теплового потока и измеритель разности температур воздуха и поверхности стены (рис.5). Первые два датчика необходимо расположить в непосредственной близости друг к другу, например, на представленном рис.5 они касаются друг друга. Третий датчик необходимо расположить на расстоянии $4-5$ размеров датчика от первых двух, чтобы на его показания первые два датчика не влияли. Измеритель разности температур необходимо расположить также на расстоянии $4-5$ размеров датчика от системы первых трех датчиков для того, чтобы он не влиял на показания датчиков потока.

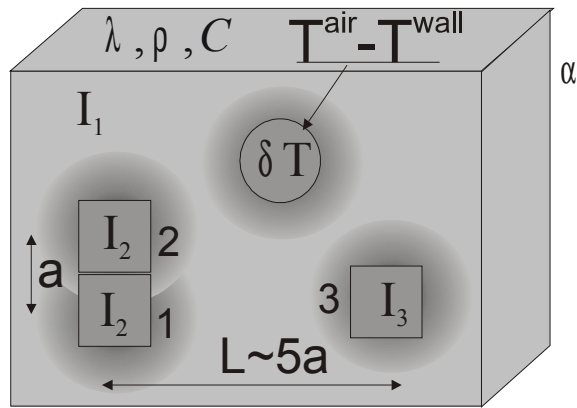


Рис. 5. Схема корректного измерения плотности потока

В результате, из-за взаимного влияния датчиков 1 и 2 их показания равны между собой и отличны от показаний датчика 3:

$$\delta I = I_2 - I_3 = (I_3 - I_1) \frac{a}{\lambda} K_{12} \quad (9)$$

$$K_{12} = \iint_S \tilde{K}(\tilde{\lambda}, \tilde{L}, \tilde{x} + 1, \tilde{y}, 0) d\tilde{x} d\tilde{y}$$

Здесь S – это чувствительная область датчика, в которой находятся спай термодпары.

Для расчета истинного значения плотности теплового потока необходимо провести следующие измерения:

1. Измерить в последовательные моменты времени t_i значения плотности теплового потока через второй и третий датчики, $\{I_2\}_i$ и $\{I_3\}_i$ соответственно, а также разности температур $\{\delta T\}_i$. Затем с помощью процедуры интерполяции необходимо рассчитать зависимости от времени плотности потока через третий датчик $I_3(t)$, разности плотностей потока через третий и второй датчики $\delta I(t) = I_2(t) - I_3(t)$, а также эффективного коэффициента теплоотдачи датчиков $\alpha(t)$, определяемого следующей формулой:

$$\alpha(t) = \frac{\partial I_3(t)}{\partial \delta T(t)} \quad (10)$$

2. Рассчитать усредненные по времени величины по следующей формуле:

$$\bar{F}(t) = \frac{1}{T_{av}} \int_{t - \frac{T_{av}}{2}}^{t + \frac{T_{av}}{2}} F(t) dt \quad (11)$$

Здесь $F(t)$ -это любая из следующих функций: $I_3(t)$, $\delta I(t)$ или $\alpha(t)$. Усреднение по некоторому интервалу времени T_{av} необходимо в случае, если измерения проводятся в условиях существенно нестационарного температурного режима.

3. Определить истинную плотность потока $I_1(t)$ по следующей формуле:

$$\bar{I}_1(t) = \bar{I}_3(t) + \delta \bar{I}(t) \frac{\lambda}{\bar{\alpha}(t) a K_{12}} \quad (12)$$

Остановимся более подробно на выборе величины интервала усреднения T_{av} . Усреднение необходимо для того, чтобы и в нестационарном случае можно было применять формулы, полученные для стационарного режима. Очевидно, что без ущерба точности можно учитывать лишь те температурные процессы, характерное время изменения которых больше характерного времени установления температурного баланса между датчиками 1 и 2, равного:

$$T_0 = \frac{a^2 \rho C}{\lambda} \quad (13)$$

Такие процессы можно считать квазистационарными. Более быстро меняющиеся процессы необходимо исключить из расчета. Это достигается за счет усреднения всех участвующих в расчете величин по временному интервалу T_{av} , много большему T_0 . В типичной ситуации T_0 имеет значение порядка 100сек, а T_{av} , соответственно, порядка 1000 сек.

Рассмотрим также применение так называемого самокалибрующегося датчика для измерения плотности теплового потока.

Самокалибрующийся (СК) датчик теплового потока разработан фирмой TNO(Нидерланды)⁸. Отличие данного типа датчика от обычного заключается в наличии дополнительной платы с нагревательным элементом, прикрепленной непосредственно к плате датчика. Принципиальная схема датчика представлена на рис. 6.

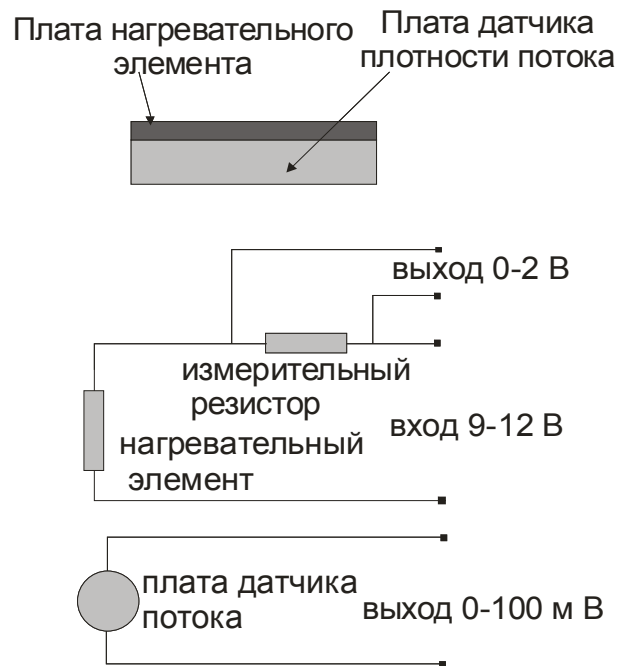


Рис 6. Принципиальная схема самокалибрующегося датчика

Здесь присутствует обычная плата датчика потока, регистрирующая плотность теплового потока. Имеется также и нагревательный элемент, при пропускании тока через который меняется плотность теплового потока, проходящего через датчик. Измерительный резистор необходим для регистрации мощности, выделяемой на нагревательном элементе.

Для регистрации истинной плотности потока необходимо использовать схему измерения, аналогичную показанной на предыдущем рисунке, в которой отсутствует датчик, измеряющий разность температур воздуха и поверхности стены, а первый датчик заменен на само калибрующийся датчик (рис. 7).

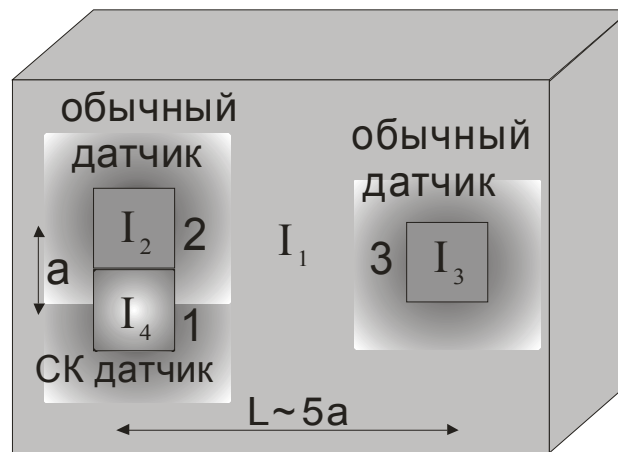


Рис 7. Измерение плотности потока с помощью само калибрующегося датчика.

Как и раньше, показания датчика 2 отличаются от показаний датчика 3 из-за влияния само калибрующегося датчика 1. Показания датчика 2 и 3 совпадут только в случае, если плотность потока через датчик 1 будет равна плотности потока вдали от датчиков, т.е. истинной плотности потока I_1 .

Следовательно, для измерения истинной плотности потока необходимо варьировать плотность потока через датчик 1 (I_4), добиваясь совпадения показаний датчиков 2 и 3 ($I_2 = I_3$). Соответствующий поток через датчик 1 и будет равен истинной плотности потока ($I_1 = I_4$).

В приведенных исследованиях мы полагали, что образец бесконечен в плоскости XY. Однако это требование не является необходимым. Достаточно, чтобы размеры образца в этой плоскости более чем на порядок превосходили размеры датчика.

Все формулы остаются в силе и в случае исследования многослойных объектов. Для того чтобы приведенные формулы не претерпели изменений, необходимо, чтобы толщина граничного слоя этого образца также более чем на порядок превосходила размеры датчика.

Таким образом, можно сказать, что, во-первых, стандартный метод измерения теплового потока с помощью “датчиков-таблеток” приводит к существенной ошибке. Во-вторых, для корректного определения величины плотности теплового потока необходимо использовать три одинаковых датчика потока, расположенных на поверхности исследуемого материала определенным образом. И, в-третьих, для определения плотности теплового потока можно использовать также само калибрующийся датчик теплового потока.

- ¹ Будадин О.Н., Троицкий-Марков Т.Е., Абрамова Е.В., Сучков В.И. Патент на изобретение № 2151388. Способ неразрушающего контроля качества объекта.
- ² Будадин О.Н., Троицкий-Марков Т.Е., Абрамова Е.В., Сучков В.И. Патент на изобретение № 2162597. Устройство для неразрушающего контроля качества объекта.
- ³ ГОСТ 25380-82 Здания и сооружения. Метод измерения плотности тепловых потоков, проходящих через ограждающие конструкции. Утвержден и введен в действие постановлением Государственного комитета СССР по делам строительства от 14 июня 1982 г. № 182.
- ⁴ Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. Изд. 2-е. – М.: Энергия, 1977.
- ⁵ Будадин О.Н., Абрамова Е.В., Лебедев О.В., Родин М.А. Аппаратура теплового неразрушающего контроля и определения теплотехнических характеристик зданий и строительных сооружений – Строительные материалы, оборудование, технологии 21 века - №9(44), 2002г.
- ⁶ Прибор ИТП-МГ4 “Поток”, разработчик СКБ “Стройприбор”, паспорт на прибор ИТП-МГ4 “Поток”
- ⁷ Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики.- М.: Наука, 1977.
- ⁸ Graaf F. van der. Heat Flux Sensors – A comprehensive series, Volume 4, Chapter 8, VCH Verlagsgesellschaft, Germany, 1989.