

# Контроль. Диагностика

TESTING. DIAGNOSTICS



8(110) 2007  
август

**КРОПУС**<sup>®</sup>  
Научно-Производственный Центр

<http://www.kropus.ru>  
email: [sales@kropus.ru](mailto:sales@kropus.ru)

Certified ISO 9001-2000 by

**EVQi**

Профессиональное оборудование  
для неразрушающего контроля



Ультразвуковые  
дефектоскопы  
для металлов  
и пластиков



Ультразвуковые  
толщиномеры  
и толщиномеры  
покрытий



Динамические и  
ультразвуковые  
твердомеры



Магнитные  
коэрцитиметры



Оптические и видео-  
эндоскопы



Вихретоковые  
дефектоскопы

**3 года гарантии на  
все оборудование !!!**



Ферритометры и  
измерители  
электропроводности



Промышленные  
системы  
контроля

Производственно-технический центр: 142400, г. Ногинск, МО, ул. 200-летия города, 2

тел.: (495) 500-21-15, (49651) 5-50-56, факс (49651) 5-83-89

г. Москва: ул. Шарикоподшипниковская, 4, тел./факс: (495) 786-69-53, 786-69-54

г. Санкт-Петербург: ул. Магнитогорская, 51, тел./факс: (812) 923-77-45, 441-38-64



# Контроль. Диагностика



№ 8(110) август 2007

Главный редактор

В.В. КЛЮЕВ, акад. РАН

Заместители

главного редактора:

В.Г. ШЕВАЛДЫКИН

П.Е. КЛЕЙЗЕР

Редакционный совет:

В.Я. БЕЛОБРАГИН

О.Н. БУДАДИН

В.П. ВАВИЛОВ

Б.И. ГЕРАСИМОВ

В.А. ГОЛЕНКОВ

Э.С. ГОРКУНОВ

А.К. ДЕНЕЛЬ

А.Ю. ДЕТКОВ

Ю.Б. ДРОБОТ

И.Н. ЕРМОЛОВ

И.Н. ЖЕСТКОВА

С.П. ЗАРИЦКИЙ

Г.В. ЗУСМАН

А.В. КОВАЛЕВ

В.С. КОТЕЛЬНИКОВ

В.Р. КУЗЬМИН

В.Ф. МУЖИЦКИЙ

В.И. МУРАВЬЕВ

Е.Г. НАХАПЕТЯН

П.П. ПАРХОМЕНКО

К.В. ПОДМАСТЕРЬЕВ

О.Н. РУМЯНЦЕВА

Н.А. СЕМАШКО

Ю.С. СТЕПАНОВ

А.Г. СУСЛОВ

В.В. СУХОРУКОВ

С.А. ТИМАШЕВ

В.М. ТРУХАНОВ

В.Л. ЧАХЛОВ

Г.С. ШЕЛИХОВ

В.И. ЭТИНГОВ

Ответственные за подготовку

и выпуск номера:

П.Е. КЛЕЙЗЕР

С.В. СИДОРЕНКО

В.Г. ШЕВАЛДЫКИН

А.Г. ГАНЖЕНКО

Д.А. ЕЛИСЕЕВ

Журнал зарегистрирован

в Государственном Комитете

Российской Федерации по печати.

Свидетельство о регистрации

№ 016960 от 25.12.97

Журнал распространяется по

подписке, которую можно оформить

в любом почтовом отделении

(индекс по каталогу агентства

Роспечать – 47649,

по Объединенному каталогу

"Пресса России" – 29075,

по каталогу "Почта России" – 60260)

или непосредственно в издательстве.

Тел.: (495) 268 36 54; 268 69 19

Факс: (495) 269 48 97; 268 85 26

Http://www.Mashin.ru

E-mail: td@mashin.ru

## СОДЕРЖАНИЕ

### ● КОНТРОЛЬ, ДИАГНОСТИКА ЗА РУБЕЖОМ

Ланге Ю.В. По страницам иностранных журналов . . . . . 3

### ● ТЕОРИЯ, МЕТОДЫ, ПРИБОРЫ, ТЕХНОЛОГИИ

Авраменко В.Г., Лебедев О.В., Будадин О.Н., Абрамова Е.В. Использование метода эталонного слоя для определения сопротивления теплопередаче наружных ограждающих конструкций зданий . . . . . 6

Баранов С.В., Будадин О.Н., Лебедев О.В., Слитков М.Н. Тепловой контроль и диагностика технического состояния плоских нагревательных элементов при эксплуатации с оценкой остаточного ресурса . . . . . 15

Авраменко В.Г., Лебедев О.В., Будадин О.Н., Абрамова Е.В. Метод корректного определения плотности теплового потока . . . . . 23

Крюков А.В., Закарюкин В.П., Степанов А.Д., Астахин С.М. Тепловизионное диагностирование в системах тягового электроснабжения . . . . . 27

Нагулин Н.Е., Нагулин С.Н. Применение алгоритма итерационного поворота вектора для построения приемного тракта ультразвукового сканера . . . . . 31

Завойчинский Б.И., Завойчинская Э.Б. Методика оценки остаточного срока службы и периодичности проведения диагностики технического состояния трубопроводов (Часть 4) . . . . . 36

Каргапольцев В.П., Симахин И.Я. Энергосбережение с применением защитного мониторинга электродвигателей . . . . . 46

Бочаров В.М., Головаш А.Н., Шахов В.Г. Математические алгоритмы технического диагностирования . . . . . 48

Ксенофонтов В.Е. Разработка алгоритмов диагностирования навигационного комплекса летательного аппарата на основе его многоуровневой декомпозиции . . . . . 52

Кольцов В.Н., Захаров М.А. Диагностика силовых кабельных линий . . . . . 59

Волков С.П., Никоненко В.А. Метрологическое обеспечение неконтактных средств измерения температуры . . . . . 63

Ковалевский В.В., Фролов А.В. Оценка экологической безопасности автомобильных дизелей термохимически-резистивным методом . . . . . 71

Павлов И.В., Гордиенко В.Е. К вопросу совершенствования методов диагностики технического состояния конструкций . . . . . 73

Журнал входит в перечень изданий, утвержденных ВАК РФ для публикации трудов соискателей ученых степеней.  
При перепечатке материалов ссылка на журнал "Контроль. Диагностика" обязательна.  
За содержание рекламных материалов ответственность несет рекламодатель.



В.Г. Авраменко, О.В. Лебедев, О.Н. Будагин, Е.В. Абрамова (Технологический институт энергетических исследований, диагностики и неразрушающего контроля "ВЕМО", Москва)

## Метод корректного определения плотности теплового потока

*Рассмотрены проблемы определения плотности теплового потока, присущие современным методам регистрации этой величины. Показано, что ошибка определения плотности теплового потока с использованием современных датчиков может достигать десятков процентов. Рассчитано возмущение температурного поля на поверхности исследуемого объекта при креплении к его поверхности датчика плотности теплового потока. Предложен способ, существенно снижающий ошибку определения плотности теплового потока.*

Одной из наиболее актуальных задач в тепловом неразрушающем контроле является экспериментальное 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].

В настоящее время для определения плотности теплового потока широкое распространение получили так называемые датчики-таблетки [3, 4, 5]. Эти датчики имеют сравнительно небольшие размеры, крепятся на поверхности исследуемого материала и позволяют с достаточно высокой точностью зарегистрировать интегральный тепловой поток, проходящий через их поверхность (рис. 1). 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 малым собственным сопротивлением теплопе-

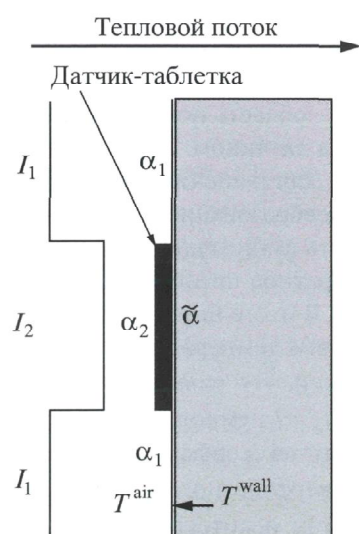


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментального определения плотности теплового потока с помощью датчика-таблетки

редаче и малой тепловой инерцией, что позволяет использовать стационарное приближение при вычислении плотности потока.

Тем не менее величина, регистрируемая данным типом датчиков, существенно отличается от плотности теплового потока, проходящего через поверхность материала вне области крепления датчика, т.е. истинной плотности теплового потока. Рассмотрим подробнее, с чем связано появление ошибки определения плотности теплового потока. Для простоты будем считать, что тепловой поток через поверхность исследуемого объекта обусловлен лишь конвективной составляющей [6].

Поместим датчик на поверхность объекта, имеющую коэффициент теплоотдачи  $\alpha_1$  (см. рис. 1). Пусть температура окружающего воздуха равна  $T^{\text{air}}$ , а объекта —  $T^{\text{wall}}$ . Из-за малой тепловой инерции датчика плотность теплового потока через его поверхность может быть найдена с помощью эффективного коэффициента теплоотдачи датчика  $\alpha_2$ , выражающегося через истинный коэффициент теплоотдачи поверхности датчика  $\tilde{\alpha}$  и сопротивление теплопередаче датчика  $\tilde{R}$  следующей формулой:

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

Плотность теплового потока через поверхность материала при этом пропорциональна разности температур воздуха и объекта:

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

Коэффициент теплоотдачи  $\alpha_i$  равен  $\alpha_1$  вне датчика и  $\alpha_2$  в области крепления датчика.

Предположим, что датчик имеет достаточно малые размеры и поэтому искажение температурного поля несущественно по сравнению с разностью температур воздуха и поверхности объекта. В этом случае отноше-

ние истинной плотности теплового потока  $I_1$  (т.е. плотности потока в отсутствие датчика) к измеренному  $I_2$  равно отношению коэффициентов теплоотдачи  $\alpha_1$  к  $\alpha_2$ :

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

Так как коэффициенты теплоотдачи могут отличаться в несколько раз, то ошибка определения истинной плотности потока может составлять сотни процентов. Учет лучистой составляющей теплового потока приведет к появлению дополнительной ошибки, связанной с разницей излучательных способностей поверхности объекта и поверхности датчика.

Поэтому актуальной является разработка метода корректного определения плотности теплового потока, проходящего через поверхность исследуемого объекта. Этот метод должен быть применим как для стационарных, так и для нестационарных тепловых процессов. Для практического применения важно рассчитать ошибку вычисления плотности теплового потока, а также указать пределы применимости метода.

Для корректного определения этой величины необходимо несколько модифицировать стандартную процедуру измерения.

Предварительно получим ряд вспомогательных результатов. Рассмотрим более подробно возмущение температурного поля, вызванное помещением датчика на поверхность исследуемого объекта.

Пусть объект имеет толщину  $L$ . Выберем систему координат так, как показано на рис. 2. Начало системы координат поместим на поверхности исследуемого объекта в центре области крепления датчика. Пусть объект бесконечен в плоскости  $XU$ . В этой плоскости датчик имеет форму квадрата со стороной  $a$ . Зададим также теплофизические характеристики материала: коэффициент теплопроводности  $\lambda$ , теплоемкость  $C$ , плотность  $\rho$ , а также коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  на дальней поверхности (т.е. поверхности, противоположной той, на которой закреплен датчик).

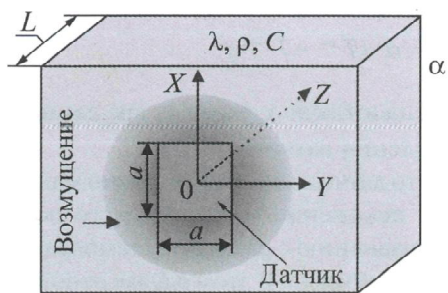


Рис. 2. Возмущение температурного поля, вносимое датчиком

Допустим, датчик обладает малой тепловой инерцией, поэтому плотность теплового потока, проходящего через его поверхности, можно рассчитывать с помощью эффективного коэффициента теплоотдачи. Будем также считать, что возмущение температурного поля, вносимое датчиком, мало по сравнению с разностью температур воздуха и ближней поверхности объекта (т.е. поверхности, на которой закреплен датчик). В этом случае можно считать, что плотность теплового потока вне датчика равна искомой величине  $I_1$ , а плотность теплового потока через датчик равна измеряемой величине  $I_2$ . Для нахождения температурного поля в объекте необходимо задать также температуру воздуха вблизи дальней поверхности объекта  $T_0$ . Кроме того, будем считать, что реализуется стационарный процесс теплопередачи, и плотности тепловых потоков  $I_1$  и  $I_2$  не меняются со временем. Обобщение результатов на случай нестационарного процесса теплопередачи будет приведено ниже.

В результате для расчета возмущения температурного поля  $\delta T$  необходимо решить стационарную задачу теплопроводности [6]:

$$\nabla^2 \delta T = 0 \quad (4)$$

со специфическими граничными условиями второго рода на ближней границе

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

и граничными условиями третьего рода на дальней границе

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

Здесь  $\nabla^2 \equiv \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$  — оператор Лапласа;

$D$  — область поверхности материала непосредственно под датчиком.

Для решения этой задачи удобнее всего провести преобразование Фурье по координатам  $x$  и  $y$ , вычислить амплитуды Фурье-гармоник и затем выполнить обратное преобразование Фурье [7].

В итоге был получен следующий результат. Изменение температурного поля пропорционально коэффициенту, равному разности плотностей потоков  $\Delta = I_2 - I_1$ , умноженной на размер датчика  $a$  и поделенной на коэффициент теплопроводности материала поверхностного слоя объекта  $\lambda$ , 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 функции  $\tilde{K}(\tilde{\lambda}, \tilde{L}, \tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z})$  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 практически не зависит от его размеров. Она зависит от размеров датчика  $a$  неявно — через параметры  $\tilde{\lambda}$  и  $\tilde{L}$ . Функция  $\tilde{K}(\tilde{\lambda}, \tilde{L}, \tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z})$  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  $\tilde{\lambda}$  и  $\tilde{L}$ . 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 поверхности объекта (около  $1 \text{ }^\circ\text{C}$ ), что оправдывает сделанное вначале предположение о малости искажения температурного поля).

На рис. 3 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 температурного поля на поверхности объекта. Из графика видно, что искажение можно зарегистрировать лишь в непосредственной близости к датчику (т.е. на расстоянии порядка  $a$  от центра датчика; на

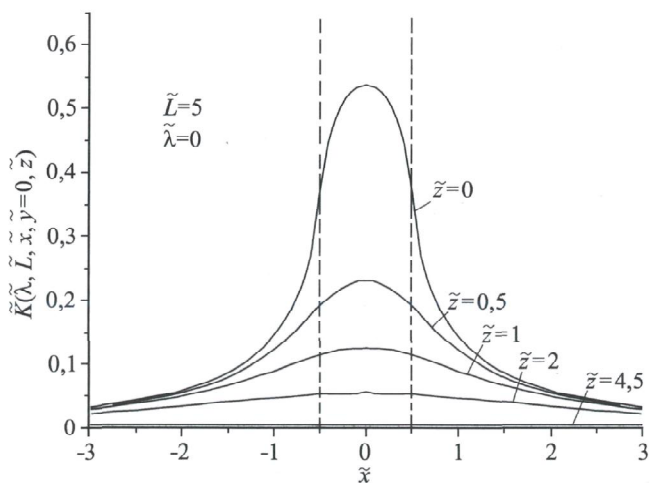
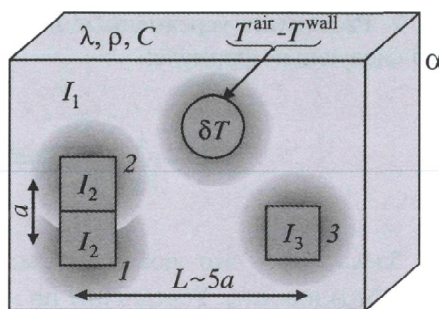


Рис. 3. График функции  $\tilde{K}(\tilde{\lambda}, \tilde{L}, \tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z})$  при  $\tilde{y} = 0$  и различных значениях  $\tilde{z}$

Рис. 4. Принципиальная схема измерения истинной плотности теплового потока



расстоянии порядка  $(4...5)a$  искажение практически отсутствует).

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 требуются три одинаковых датчика теплового потока и датчик, измеряющий разность температур воздуха и поверхности объекта (рис. 4). Первые два датчика располагают в непосредственной близости друг к другу, например на схеме, представленной на рис. 4, они касаются друг друга. Третий датчик помещают на расстоянии  $(4...5)a$  от первых двух, чтобы на его показания первые два датчика не влияли. Датчик разности температур следует поместить также на расстоянии  $(4...5)a$  от системы первых трех датчиков для того, чтобы он не влиял на показания датчиков теплового потока.

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

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

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

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  $\{I_{2i}\}$  и  $\{I_{3i}\}$ , соответственно, а также разности температур  $\{\delta T_i\}$ . Затем с помощью процедуры интерполяции рассчитать зависимости от времени плотности потока через третий датчик  $I_3(t)$ , разности плотностей потока через второй и третий датчики  $\delta I(t) = I_2(t) - I_3(t)$ , а также эффективного коэффициента теплоотдачи датчиков  $\alpha_2(t)$ , определяемого формулой

$$\alpha_2(t) = \frac{dI_3(t)}{d\delta T(t)}. \quad (10)$$

2. Рассчитать усредненные по времени величины по следующей формуле:

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

Здесь  $F(t)$  — это любая из следующих функций:  $I_3(t)$ ,  $\delta I(t)$  или  $\alpha(t)$ . Усреднение по некоторому интервалу времени  $\tau_{av}$  необходимо, если измерения проводятся в условиях существенной нестационарности процесса теплопередачи.

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  $\tau_{av}$ . 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

$$\tau_0 = \frac{a^2 \rho C}{\lambda}. \quad (13)$$

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  $\tau_{av}$ , много большему  $\tau_0$ . В ти-

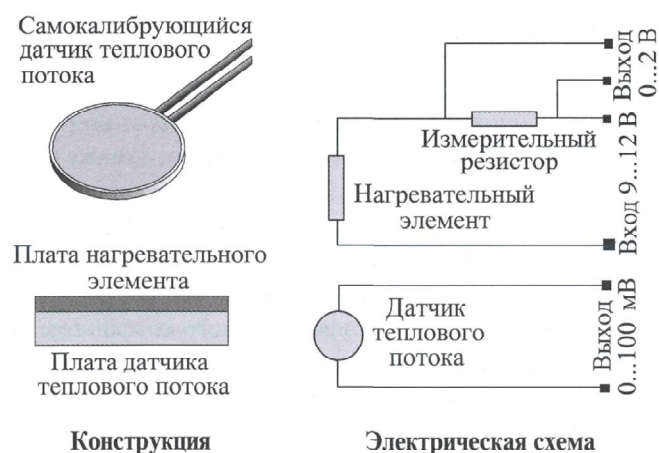


Рис. 5. Принципиальная схема СК-датчика

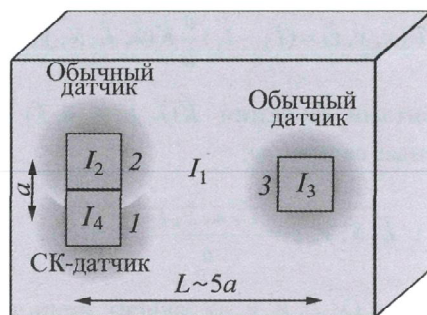


Рис. 6. Принципиальная схема измерения истинной плотности теплового потока с помощью СК-датчика

пичной ситуации  $\tau_0$  имеет значение порядка 100 с, а  $\tau_{av}$  соответственно порядка 1000 с.

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

СК-датчик теплового потока разработан фирмой TNO (Нидерланды) [8]. В отличие от обычного датчика в данном типе предусмотрена дополнительная плата с нагревательным элементом, прикрепленная непосредственно к плате датчика теплового потока. Принципиальная схема СК-датчика представлена на рис. 5.

В СК-датчике имеется плата датчика потока, регистрирующая плотность теплового потока, а также нагревательный элемент, при пропускании тока через который меняется плотность теплового потока, проходящего через датчик. Измерительный резистор необходим для определения мощности, выделяемой на нагревательном элементе.

Для регистрации истинной плотности теплового потока необходимо использовать схему измерения, аналогичную показанной на рис. 4, в которой отсутствует датчик, измеряющий разность температур воздуха и поверхности объекта, а первый датчик заменен на СК-датчик (рис. 6).

Показания датчика 2 отличаются от показаний датчика 3 из-за влияния СК датчика 1. Показания датчиков 2 и 3 совпадут только в том случае, если плотность потока через датчик 1 будет равна плотности потока вне датчика 1, т.е. истинной плотности потока  $I_1$ .

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

В приведенных исследованиях предполагалось, что объект бесконечен в плоскости XY. Однако это





требование не является необходимым. Достаточно, чтобы однородность теплофизических свойств объекта сохранялась на масштабах, более чем на порядок превосходящих линейные размеры датчика.

Все формулы остаются в силе и в случае исследования многослойных объектов. Для того чтобы приведенные формулы не претерпели изменений, толщина граничного слоя исследуемого объекта также более чем на порядок должна превосходить размеры датчика.

#### Заключение

Таким образом, показано, что широко используемый в настоящее время метод измерения теплового потока с помощью датчиков-таблеток приводит к существенной ошибке. Альтернативный метод измерения плотности теплового потока снижает ошибку измерения до значений меньше 10 %. Для корректного определения величины плотности теплового потока три одинаковых датчика теплового потока необходимо расположить на поверхности исследуемого объекта описанным способом. Также для определения плотности теплового потока можно использовать самокалибрующийся датчик теплового потока.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Пат. 2151388. Способ неразрушающего контроля качества объекта / О.Н. Будадин, Т.Е. Троицкий-Марков, Е.В. Абрамова, В.И. Сучков.
2. Пат. 2162597. Устройство для неразрушающего контроля качества объекта / О.Н. Будадин, Т.Е. Троицкий-Марков, Е.В. Абрамова, В.И. Сучков.
3. ГОСТ 25380–82. Здания и сооружения. Метод измерения плотности тепловых потоков, проходящих через ограждающие конструкции. Утв. и введ. пост. Гос. ком. СССР по делам строительства 14.06.1982. № 182.
4. 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. 2002. № 9 (44).
5. Прибор ИТП-МГ4 "Поток" паспорт / разработчик СКБ "Стройприбор".
6. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. 2-е изд. М.: Энергия, 1977.
7. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. М.: Наука, 1977.
8. Graaf F. van der. Heat Flux Sensors // A comprehensive series. Vol. 4. Ch. 8. Berlin: VCH Verlagsgesellschaft, 1989.