

Контроль. Диагностика

TESTING. DIAGNOSTICS

6(108) 2007
ИЮНЬ

Вихретоковый дефектоскоп ВД-70



Вихретоковый дефектоскоп ВД-70 предназначен для:

- контроля продукции из ферромагнитных и немагнитных металлов и сплавов на наличие поверхностных дефектов типа трещин;
- определения местоположения дефектов;
- оценки глубины дефектов.

Сертификат об утверждении
типа средств измерений
RU.C.27.004.A №21361

Преобразователи вихретоковые
для дефектоскопа ВД-70

Комплект образцов
КСОП - 70



ЛУЧ



ПРИБОРЫ, АКСЕССУАРЫ, РАСХОДНЫЕ МАТЕРИАЛЫ
для неразрушающего контроля

НПК "Луч", Россия, Москва, Щёлковское шоссе, д. 2а
тел./факс (495) 729-5700 (многоканальный)
E-mail: luch@luch.ru Internet: www.luch.ru

Контроль. Диагностика



№ 6(108) июнь 2007

СОДЕРЖАНИЕ

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. СУХОРОУКОВ
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

● ИНФОРМАЦИЯ

Матвеев В.И. "Технологии безопасности 2007" 3

● КОНТРОЛЬ, ДИАГНОСТИКА ЗА РУБЕЖОМ

Ланге Ю.В. По страницам иностранных журналов 13

● ТЕОРИЯ, МЕТОДЫ, ПРИБОРЫ, ТЕХНОЛОГИИ

Лебедев О.В., Будадин О.Н., Баранов С.В., Авраменко В.Г. Тепловая
дефектометрия многослойных изделий на основе решения обратных задач
нестационарной теплопроводности 16

Будадин О.Н., Лебедев О.В., Авраменко В.Г., Киржанов Д.В., Ким-Серебряков Д.В.
Метод теплового контроля с использованием быстрого преобразования Фурье 23

Лебедев О.В., Будадин О.Н., Слитков М.Н., Авраменко В.Г., Русина Т.Ф. Нахож-
дение положения точки росы и плоскости промерзания в многослойных объектах
с учетом фазовых переходов жидкость – твердое тело 31

Завойчинский Б.И., Завойчинская Э.Б. Методика оценки остаточного срока службы
и периодичности проведения диагностики технического состояния трубопроводов
(Часть 3) 43

Чернышов А.В., Иванов Г.Н. Метод неразрушающего контроля теплофизических
свойств многослойных теплозащитных покрытий и изделий 50

Игнатъев А.Г., Фархшатов М.Н. Диагностирование остаточных напряжений в деталях,
восстановленных электроконтактной приваркой присадочных материалов 55

Басов Ф.А. Использование углеродных нитей в качестве чувствительных элементов
волоконных композиционных материалов 60

Хренников А.Ю., Сидоренко М.Г. Выявление дефектов высоковольтного
электрооборудования подстанций средствами инфракрасной техники 63

● ТЕХНИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ

Котик Ф.И., Ибрагимов С.Г. Ускоренный контроль электролитов, растворов,
расплавов и ингредиентов промышленных сточных вод (Продолжение) 69

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.



пространственной области с подобластями, имитирующими дефекты, в условиях нестационарного процесса теплопередачи. Решение обратной задачи основано на сравнении расчетных и экспериментальных данных. Вычисленные значения теплотехнических параметров ограждающей конструкции соответствуют минимальному расхождению экспериментальных и расчетных данных.

Достоверность и надежность эксплуатации методик подтверждена 4-летним опытом работы при обследовании более 500 строительных объектов. Разработанные математические методы и требования к аппаратному обеспечению реализованы в виде методик и аппаратно-программных комплексов, использующих стандартные измерительные и вычислительные средства.

ЛИТЕРАТУРА

1. Budadin O.N., Lebedev O.V., Abramova E.V., Rodin M.A. Thermal Nondestructive Testing of Buildings and Builted Constructions // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2003. Vol. 39. Iss. 5. P. 395–409.
2. Lebedev O., Kirzhanov D., Avramenko V., Budadin O. Thermal Nondestructive Testing of Buildings in Practice // Proc. of 16th WCNDT. 2004. № 609. P. 1–8.
3. Будадин О.Н., Лебедев О.В., Абрамова Е.В. и др. Практическая реализация теплового неразрушающего контроля зданий и строительных сооружений // Сб. докл. 4-го Всерос. с междунар. участием науч.-практ. семинара. СПб., 2004. С. 106–107.
4. Будадин О.Н., Абрамова Е.В., Родин М.А., Лебедев О.В. Тепловая дефектометрия зданий и строительных сооружений // Дефектоскопия. 2003. № 5. С. 77–94.
5. Будадин О.Н., Абрамова Е.В., Троицкий-Марков Т.Е., Лебедев О.В. Автоматизированный тепловой неразрушающий контроль и дефектометрия материалов, изделий и оборудования в промышленности // Энергослужба предприятий. 2003. № 2(4). С. 48–52.
6. Тепловой неразрушающий контроль многослойных изделий: положительное решение № 2004110611/28 (011496) от 11.02.2005 г. о выдаче патента на изобретение по заявке № 2004110611/04 от 08.04.2004 г.; заяв. 08.04.2004 г. 5 с.
7. Измерения в электромагнитных полях / Ю.К. Казаров, О.Н. Будадин, Т.Е. Троицкий-Марков, О.В. Лебедев. М.: ВИНТИ РАН, 2003. 196 с.
8. ГОСТ Р 51387. Энергосбережение. Нормативно-методическое обеспечение. Основные положения: принят и введен в действие Постановлением Госстандарта России от 30 ноября 1999 г., № 485-ст.
9. Московские городские строительные нормы 2.01–99. Энергосбережение в зданиях. М., 1999.
10. Об утверждении методики диагностики и энергетических обследований наружных ограждающих конструкций строительных сооружений тепловизионным бесконтактным методом: решение заседания пленума от 23 июля 2002 г., протокол № 5-2002.
11. Будадин О.Н., Абрамова Е.В., Слитков М.Н. Методика диагностики и энергетических обследований наружных ограждающих конструкций строительных сооружений тепловизионным бесконтактным методом: свидетельство об аттестации Госстандарта России № 09/442-2001 от 09.07.2001 г., 41 с.
12. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. 2-е изд. М.: Энергия, 1969. 440 с.

О.Н. Будадин, О.В. Лебедев, В.Г. Авраменко, Д.В. Киржанов, Д.В. Ким-Серебряков
(Технологический институт энергетических исследований, диагностики и неразрушающего контроля "ВЕМО",
Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва)

Метод теплового контроля с использованием быстрого преобразования Фурье

Обеспечение надежности функционирования объектов различных отраслей промышленности требует наличия соответствующих методов и средств неразрушающего контроля и технической диагностики для определения их технического состояния. При этом повышение требований к достоверности результатов диагностики, и мировая практика это подтверждает, приводит к необходимости перехода от дефектоскопии объектов (обнаружения дефектов) к дефектометрии (определению характеристик дефектов), что дает возможность оценки остаточного ресурса.

Одним из интенсивно развивающихся методов благодаря своим эксплуатационным и техническим преимуществам является тепловой метод, основанный на анализе температурных полей объектов. Развитие этого метода в соответствии с острой потребностью промышленности с использованием современных достижений математики и компьютерной техники привело к созданию метода тепловой дефектометрии, основанного на решении обратной задачи нестационарной теплопроводности.

Данный метод реализован в ряде технологий, которые с успехом применяются в нескольких отраслях промышленности. Однако за время многолетнего применения метода был выявлен ряд недостатков, ограничивающий его использование:

- производительность контроля относительно невысока (например, время решения обратной задачи для крупногабаритных объектов на современных быстродействующих компьютерах с помощью специальных программ достигает нескольких часов);
- для ряда практических задач погрешность результатов контроля остается достаточно высокой;
- из-за продолжительности счета отсутствует возможность оценки величины вычисленной погрешности при наличии погрешности входных данных;
- для выполнения обследований необходим обслуживающий персонал высокой квалификации;
- реализации метода в специализированных микропроцессорных системах, встраиваемых в вычислители и измерительные приборы, препятствуют некоторые технические трудности.

Теоретические и экспериментальные исследования показали, что эти недостатки обусловлены причинами, связанными с особенностями математической модели метода:

- использованием конечно-разностных схем решения дифференциальных уравнений для решения прямой задачи теплопроводности;
- неоптимальностью метода численной минимизации функционала правдоподобия;
- недостаточной оптимизацией вычислительной процедуры, реализующей методику решения обратной задачи теплопроводности.

Целью работы является создание усовершенствованного метода тепловой дефектометрии, свободного от перечисленных недостатков, предназначенного для широкого применения для неразрушающего контроля и диагностики технического состояния объектов различных отраслей промышленности и способного решать практические задачи определения характеристик внутренних дефектов (нарушений сплошности) многослойных конструкций при наличии неопределенности входных данных.

Решение прямой задачи

Исключение данных недостатков возможно с помощью метода обратного дискретного преобразования Фурье для решения прямой и обратной задач теплопроводности.

Созданный метод тепловой дефектометрии основан на решении обратной задачи теплопроводности с

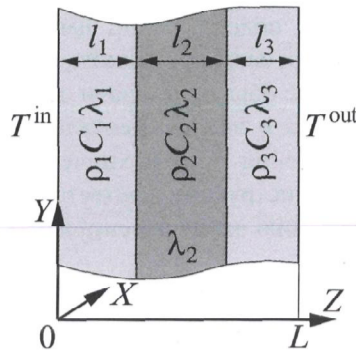


Рис. 1. Квазиодномерный многослойный объект

использованием "функционала правдоподобия" на базе преобразования Фурье.

Решение обратной задачи нестационарной теплопроводности в многослойном объекте заключается в определении теплофизических и геометрических параметров областей нарушений внутренней сплошности материалов – дефектов с учетом соответствующих граничных и начальных условий. В основе решения обратной задачи лежит многократное использование решений прямой задачи нестационарной теплопроводности – метод подбора квазирешений.

Для решения прямой задачи нестационарной теплопроводности рассмотрим квазиодномерный многослойный объект (рис. 1). Квазиодномерность объекта означает, что характерный пространственный масштаб неоднородности в плоскости XU значительно (более чем в 10 раз) превышает толщину объекта L . Температуры поверхностей объекта меняются со временем заданным образом. Решение прямой задачи теплопроводности заключается в расчете зависимости тепловых потоков через поверхности объекта от времени по известным граничным условиям на границах объекта.

Квазиодномерность объекта позволяет использовать одномерное нестационарное уравнение теплопроводности для расчета распределения температуры внутри объекта при сохранении достаточной степени общности математического моделирования

$$C(z)\rho(z)\frac{\partial T(z, t)}{\partial t} = \lambda(z)\frac{\partial^2 T(z, t)}{\partial z^2} \quad (1)$$

с граничными условиями первого рода на поверхностях стены

$$T(z, t)|_{z=0} = T_1(t), \quad T(z, t)|_{z=L} = T_2(t), \quad (2)$$

где $C(z)$, $\rho(z)$ и $\lambda(z)$ представляют собой кусочно-постоянные значения теплофизических характеристик области функции координаты.



На границах слоев структуры применяют стандартные в теории теплопередачи условия непрерывности значений температуры и плотности теплового потока на границе слоев:

$$T(z, t)|_{z_b-0} = T(z, t)|_{z_b+0};$$

$$\left(\lambda(z) \frac{\partial T(z, t)}{\partial z} \right) \Big|_{z_b-0} = \left(\lambda(z) \frac{\partial T(z, t)}{\partial z} \right) \Big|_{z_b+0}, \quad (3)$$

где z_b — координата границы рассматриваемого слоя.

Для решения задачи теплопроводности задается начальное распределение температуры внутри слоев структуры. Заданное распределение температуры в начальный момент времени соответствует стационарному температурному режиму с температурами на границах объекта, равными соответственно $T^{in}(t=0)$ и $T^{out}(t=0)$.

Рассматриваемый объект содержит N_l слоев, теплофизические параметры которых (коэффициент теплопроводности λ_n , плотность ρ_n , удельная теплоемкость C_n и толщина L_n) известны. Одна из поверхностей объекта считается внутренней, другая — внешней. Слои нумеруются от внутренней поверхности. Известными также являются температурные истории на поверхностях объекта, т.е. последовательности значений температур поверхностей в моменты времени t_n (всего N_l значений).

В рамках описываемого метода предполагается, что температуры поверхностей задаются в последовательные моменты времени, интервал между которыми одинаков и равен некоторой величине dt . Если это условие не выполняется, то предварительно проводится интерполяция температурных историй на временную сетку $t_n = (n-1)dt$ (считается, что измерения начались в момент времени $t=0$).

Стационарное распределение температуры достигается при поддержании температуры поверхностей

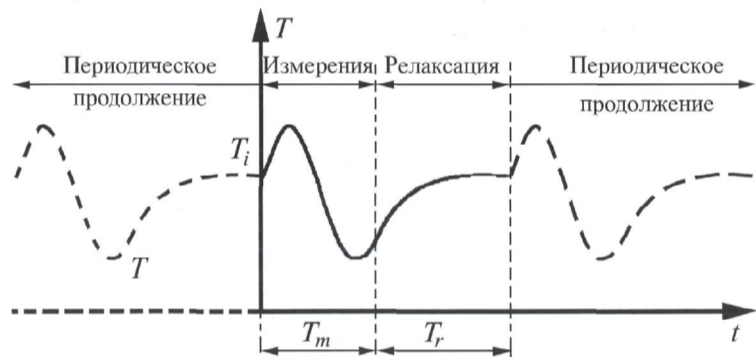


Рис. 2. Периодическое продолжение изменения температуры окружающей среды внешней поверхности

объекта постоянной в течение достаточно продолжительного времени, большего характерного времени его тепловой инерции — времени релаксации (рис. 2).

Продолжительность времени измерений обозначим T_m , а релаксационного периода — T_r .

Пусть функция, определяющая поведение температуры воздуха на интервале $[T_m, T_m + T_r]$ (релаксационная функция), определяется следующим выражением:

$$T^{(in, out)}(t_n) = T^{(in, out)} +$$

$$+ (T^{(in, out)}(0) - T^{(in, out)}(T_m)) \times$$

$$\times \left(1 - \exp\left(-\frac{5(t_n - T_m - T_r)}{T_r} \right) \right), \quad (4)$$

здесь $n = (N_l + 1) \dots \left(N_l + 1 + \text{round}\left(\frac{T_r}{dt} \right) \right)$, где функция $\text{round}(\dots)$ является целой частью числа.

Таким образом, прямая задача теплопроводности решается на интервале $[0, T_m + T_r]$, а затем из рассчитанных значений плотности теплового потока выбираются те, которые рассчитаны на интервале $[0, T_m]$.

Определим температурную историю обследуемого объекта как совокупность необходимых для вычислений зависимостей температуры от времени. Температурная история может включать в себя одну или несколько таких зависимостей. При практических обследованиях эти зависимости составляют с помощью автоматических самописцев температуры. Будем считать, что все самописцы, применяемые для измерений, начали и закончили работу в одни и те же моменты времени. В этом случае температурная история будет представлять собой несколько функций, заданных таблично на одном и том же интервале. Будем считать, что координатные сетки этих функций совпадают.

Для применимости быстрого преобразования Фурье необходимо, чтобы число точек всей температурной истории (т.е. количество значений температуры на интервале $[0, T_m + T_r]$) было нечетным. В случае невыполнения этого требования температурная история удлиняется и в каждую температурную историю добавляется по одному значению в момент времени $T_m + T_r + dt$, равному $T^{in}(0)$ для температурной истории на внутренней поверхности объекта и $T^{out}(0)$ — для температурной истории на внешней поверхности. Полное число значений температурной истории (на расширенном временном интервале $[0, T_m + T_r]$) обозначим N .

Для определения величины теплового потока через поверхности объекта необходимо раз-

ложить температурную историю поверхностей стены в ряд Фурье. Но так как входная информация дискретна, воспользуемся алгоритмом дискретного преобразования Фурье, согласно которому температура в момент времени t_j рассчитывается по формуле

$$T_j^{(in, out)} = \sum_{k=1}^N X_k^{(in, out)} e^{-i(t_j - t_1)\omega_k}, \quad (5)$$

при этом амплитуда гармоник Фурье равна

$$X_n^{(in, out)} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N T_k^{(in, out)} \exp\left(\frac{2i\pi(n-1)(k-1)}{N}\right). \quad (6)$$

Здесь $\omega_k = \frac{2\pi(k-1)}{T}$ для $k \leq \frac{N}{2}$, где полный период температурной истории $T = t_N - t_1 + \Delta t$ и $\omega_k = -\omega_{N-k+2}$ для $k > \frac{N}{2}$.

Такое преобразование связано с тем, что в дискретном преобразовании Фурье гармоники k и $k - N$ эквивалентны, так как $\exp(i\omega_k \Delta t) = 1$, а корректное разложение Фурье вещественной функции должно иметь как положительные, так и отрицательные гармоники. Для того чтобы не происходило искусственного увеличения частоты на $\frac{2\pi}{\Delta t}$, проводится калибровка номеров гармоник.

Из выражения (5) следует, что для решения задачи теплопроводности необходимо найти тепловой отклик многослойного объекта на суперпозицию гармонических сигналов. Представим температуру внутри объекта в виде ряда Фурье:

$$T(z, t)|_{t=t_j} = \sum_{k=1}^N T_k(z) e^{-i(t_j - t_1)\omega_k}, \quad (7)$$

где частоты ω_k определяются теми же выражениями, что и частоты в соотношении (5). Из зависимости (7) следует, что плотность теплового потока через поверхности объекта также представимы в виде ряда Фурье:

$$I_j^{(in, out)} \equiv I^{(in, out)}(t_j) = \sum_{k=1}^N Y_k^{(in, out)} e^{-i(t_j - t_1)\omega_k}. \quad (8)$$

Подставляя разложение (7) в уравнение теплопроводности, получаем уравнение амплитуды Фурье-гармоник внутри n -го слоя:

$$\frac{\partial^2 T_k}{\partial z^2} + \frac{i\omega C_n \rho_n}{\lambda_n} T_k = 0. \quad (9)$$

Условие непрерывности (3) на границах слоев n и $n + 1$ приобретает следующий вид:

$$T_j(z_b - 0) = T_j(z_b + 0); \quad (10)$$

$$\lambda_n \frac{\partial T_j}{\partial z} \Big|_{z_b - 0} = \lambda_{n+1} \frac{\partial T_j}{\partial z} \Big|_{z_b + 0}, \quad (11)$$

где z_b — координата границы слоев n и $n + 1$.

Условия на границах объекта для различных гармоник n представляют собой

$$T_j|_{z=0} = T_j^{in}, \quad T_j|_{z=L} = T_j^{out}. \quad (12)$$

В силу линейности задачи нестационарной теплопроводности Фурье-амплитуды гармоник плотностей тепловых потоков и температур на границах многослойного объекта связаны соотношением

$$Y_k^{in} = \chi_{11k} X_k^{in} + \chi_{12k} X_k^{out}; \quad (13)$$

$$Y_k^{out} = \chi_{21k} X_k^{in} + \chi_{22k} X_k^{out}. \quad (14)$$

Величина χ_{ijk} называется тензором тепловой восприимчивости объекта.

Для однослойного объекта величины C , ρ и λ внутри слоя являются постоянными, поэтому решение (9) имеет следующий вид:

$$T_0 = A_0 z + B_0; \quad (15)$$

$$T_n = A_n \exp(k_n z) + B_n \exp(-k_n z), \quad n > 0; \quad (16)$$

$$k_n = \frac{1-i}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{\omega C \rho}{\lambda}}. \quad (17)$$

Из выражений (15)–(16) и граничных условий (12) следует, что Фурье-амплитуды гармоник плотностей тепловых потоков и температур на границах многослойного объекта связаны соотношениями (13) и (14), при этом компоненты тензора тепловой восприимчивости определяются следующими соотношениями:

$$\chi_{11n} = \frac{\lambda}{L} \frac{k_n L}{\text{th}(k_n L)}, \quad \chi_{12n} = -\frac{\lambda}{L} \frac{k_n L}{\text{sh}(k_n L)}, \quad (18)$$

$$\chi_{21} = -\chi_{12}, \quad \chi_{22} = -\chi_{11};$$

$$k_n = \frac{i-1}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{\omega_n \rho C}{\lambda}}. \quad (19)$$

Граница, разделяющая поверхность объекта и воздуха, также рассматривается как приграничный слой



со следующими значениями компонент тензора восприимчивости:

$$\chi_{11n} = \alpha, \chi_{12n} = -\alpha, \chi_{21n} = \alpha, \chi_{22n} = -\alpha, \quad (20)$$

где α – коэффициент теплоотдачи на поверхности объекта. Справедливость этих выражений следует из соотношения между тепловым потоком через границу воздух–поверхность (воздух – слева, объект – справа) $I(t)$ с разностью температур с разных сторон поверхности $\Delta T(t) = T^{\text{air}}(t) - T^{\text{wall}}(t)$:

$$I(t) = \alpha \Delta T(t). \quad (21)$$

Если объект является составным, т.е. двухслойным с значениями восприимчивостей $\chi_{ijk}^{(1)}$ и $\chi_{ijk}^{(2)}$, при этом слой 1 находится слева, а непосредственно к его правой границе прикреплен слой 2, то из условий непрерывности температуры (10) и (11) следует, что значения компонент тензора восприимчивости составного объекта $\chi_{ijk}^{(12)}$ определяются следующими соотношениями:

$$\begin{aligned} \chi_{11k}^{(12)} &= \frac{\chi_{11k}^{(1)}(\chi_{22k}^{(1)} - \chi_{11k}^{(2)}) - \chi_{12k}^{(1)}\chi_{21k}^{(1)}}{\chi_{22k}^{(1)} - \chi_{11k}^{(2)}}, \\ \chi_{12k}^{(12)} &= \frac{\chi_{12k}^{(1)}\chi_{21k}^{(2)}}{\chi_{22k}^{(1)} - \chi_{11k}^{(2)}}, \\ \chi_{21k}^{(12)} &= -\frac{\chi_{21k}^{(1)}\chi_{21k}^{(2)}}{\chi_{22k}^{(1)} - \chi_{11k}^{(2)}}, \quad \chi_{22k}^{(12)} = \frac{\chi_{22k}^{(2)}(\chi_{22k}^{(1)} - \chi_{11k}^{(2)}) + \chi_{12k}^{(2)}\chi_{21k}^{(2)}}{\chi_{22k}^{(1)} - \chi_{11k}^{(2)}}. \end{aligned} \quad (22)$$

Любой многослойный объект можно представить в виде суперпозиции однородных слоев и приграничных слоев. Восприимчивость всего объекта рассчитывается по (18). Затем рассчитанные значения тензора восприимчивости подставляются в соотношения (13) и (14), а далее с помощью соотношения (8) по известным значениям амплитуд Фурье-гармоник плотности теплового потока рассчитываются значения плотности теплового потока через поверхности объекта на полной временной сетке. На конечном этапе решения прямой задачи теплопроводности из полного набора рассчитанных значений плотности теплового потока выбираются лишь те, которые рассчитаны на временном интервале $[0...T_m]$.

Решение обратной задачи нестационарной теплопроводности

Первым этапом решения обратной задачи нестационарной теплопроводности в исследуемом объекте в целях уменьшения эффективной амплитуды шума

датчиков температуры процедуре усреднения (сглаживания) подвергаются заданные температурные серии (наружного воздуха $T_{\text{out}}^{\text{air}}(t_n)$, наружной поверхности $T_{\text{out}}^{\text{wall}}(t_n)$, внутренней поверхности $T_{\text{in}}^{\text{wall}}(t_n)$ и внутреннего воздуха $T_{\text{in}}^{\text{air}}(t_n)$).

Пусть температурные серии поверхностей содержат N значений. В рамках описываемого алгоритма предполагается, что температуры поверхностей задаются в последовательные моменты времени, интервал между которыми одинаков и равен некоторой величине dt . Если это условие не выполняется, то предварительно проводят интерполяцию температурных историй на временную сетку $t_n = (n-1)dt$ (считается, что измерения начались в момент времени $t=0$). Для исключения изменений температуры, характерный период которых равен $\delta\tau$, проводится быстрое преобразование Фурье:

$$X_{(\text{in, out})n}^{\text{wall}} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N T_{(\text{in, out})}^{\text{wall}}(t_k) \exp\left(\frac{2i\pi(n-1)(k-1)}{N}\right). \quad (23)$$

Затем приравняются нулю все гармоники X_n с номерами

$$n = (k+1) \dots N+1-k, \quad k = 1 + \text{round}\left(\frac{Ndt}{\delta\tau}\right). \quad (24)$$

На конечном этапе проводится обратное Фурье-преобразование

$$\bar{T}_{(\text{in, out})}^{\text{wall}}(t_n) = \text{Re} \left[\sum_{k=1}^N \tilde{X}_{(\text{in, out})k}^{\text{wall}} \exp\left(-\frac{2i\pi(n-1)(k-1)}{N}\right) \right], \quad (25)$$

где функция $\text{Re}(\dots)$ выделяет вещественную часть числа. Аналогично преобразуются температурные серии внутреннего и внешнего воздуха.

Далее задается некоторый набор значений теплофизических параметров слоев объекта $\{\Theta_j\}$ и рассчитываются плотности тепловых потоков через внешнюю $I^{\text{out}}(t_n, \{\Theta_j\})$ и внутреннюю $I^{\text{in}}(t_n, \{\Theta_j\})$ поверхности описанным способом, а также вводятся рассчитанные температурные серии внутреннего $\tilde{T}_{\text{in}}^{\text{air}}$ и внешнего $\tilde{T}_{\text{out}}^{\text{air}}$ воздуха, определяемые следующими соотношениями:

$$\tilde{T}_l^{\text{air}}(t_i, \{\Theta_j\}, \alpha^l) = T_l^{\text{wall}}(t_i) + \frac{I^l(t_i, \{\Theta_j\})}{\alpha_l}; \quad (26)$$

$$\tilde{T}_r^{\text{air}}(t_i, \{\Theta_j\}) = T_r^{\text{wall}}(t_i) + \frac{I^r(t_i, \{\Theta_j\}, \alpha^r)}{\alpha_r}. \quad (27)$$

При истинных значениях теплофизических характеристик слоев объекта измеренные и рассчитанные температурные серии максимально близки. Причем кривые должны быть близки также на любом интервале полной температурной серии. Степень близости кривых рассчитывается как норма среднеквадратичной невязки.

Для проведения расчетов разобьем полную исходную температурную историю на интервалы времени с фиксированной продолжительностью Δ . Обозначим каждый из интервалов $[\tau_i, \tau_{i+1}]$. Пусть их число равно N_c . Вводятся следующие функционалы:

$$D_i^{l,r}(\{\Theta_j\}, \alpha_i) = \frac{Dt}{\tau_{i+1} - \tau_i} \sum_{t_i}^{\tau_{i+1}} (T_{l,r}(t_i, \alpha_{l,r}, \{\Theta_j\}) - T_{l,r}(t_i))^2. \quad (28)$$

Функционалы $D_i^{\text{in,out}}(\{\Theta_j\}, \alpha^{\text{in,out}})$ называются функционалами правдоподобия из-за того, что при подстановке в них истинных значений параметров $\{\Theta_j\}$ их значения минимальны. Вследствие влияния шумов минимумы различных функционалов правдоподобия могут не совпадать. При этом истинные значения параметров находятся как математическое ожидание всей выборки реализуемых минимумов.

Значения коэффициента теплоотдачи $\alpha_i^{\text{in,out}}$, реализующего минимум функционала правдоподобия $D_i^{\text{in,out}}(\{\Theta_j\}, \alpha^{\text{in,out}})$ на внутренней поверхности объекта, определяется из соотношения

$$\left. \frac{\partial D_i^l(\{\Theta_j\}, \alpha_i)}{\partial \alpha_i} \right|_{\min} = 0. \quad (29)$$

После подстановки (26) и (27) в (28) выражение для функционала правдоподобия приобретает следующий вид (для краткости не указывается индекс i у функционала правдоподобия):

$$D^l(\{\Theta_j\}, \alpha^l) = I_1 - 2 \frac{I_2(\{\Theta_j\})}{\alpha^l} + \frac{I_3(\{\Theta_j\})}{(\alpha^l)^2}; \quad (30)$$

$$S_1 = \frac{\Delta t}{\tau_{i+1} - \tau_i} \sum_{t_i}^{\tau_{i+1}} (T_c^{\text{air}}(t_i) - T_m^{\text{wall}}(t_i))^2; \quad (31)$$

$$S_2(\{\Theta_j\}) = \frac{\Delta t}{\tau_{i+1} - \tau_i} \sum_{t_i}^{\tau_{i+1}} (T_c^{\text{air}}(t_i) - T(t_i)) I(\lambda, t_i); \quad (32)$$

$$S_3(\{\Theta_j\}) = \frac{\Delta t}{\tau_{i+1} - \tau_i} \sum_{t_i}^{\tau_{i+1}} I^l(t_i, \{\Theta_j\}), \quad (33)$$

где T_c – расчетное время измерения.

Вычисление производной (29) дает следующее выражение для коэффициента теплоотдачи, реализующего минимум:

$$\alpha^l = \frac{I_3(\{\Theta_j\})}{I_2(\{\Theta_j\})}. \quad (34)$$

В результате функционал правдоподобия сводится к функции, зависящей только от теплофизических характеристик слоев:

$$D^{\text{in}}(\{\Theta_j\}) = S_1 - \frac{S_2^2(\{\Theta_j\})}{S_3(\{\Theta_j\})}. \quad (35)$$

Если значение коэффициента теплоотдачи известно, то выражение для функционала правдоподобия определяется формулой (30), где вместо коэффициента теплоотдачи используется известное фиксированное значение. В качестве фиксированных значений могут быть использованы либо значения коэффициента теплоотдачи, либо значения, рассчитанные по формулам (36) и (37). Нахождение минимума функционала сразу по всей совокупности параметров $\{\Theta_j\}$ представляет собой сложную задачу из-за чрезмерно высоких вычислительных затрат. Поэтому из всей совокупности параметров выбирается один или несколько, который наиболее существенно влияет на информативный параметр для исследуемого объекта. Значения остальных параметров полагаются априори известными. Например, наиболее существенным параметром, влияющим на эффективность теплоизоляции строительной конструкции, является коэффициент теплопроводности слоя утеплителя λ . В результате функционал правдоподобия при контроле строительной конструкции становится функцией лишь одной переменной $D^{\text{in}}(\{\Theta_j\}) \Rightarrow D^{\text{in}}(\lambda)$, и его минимум находится численно:

$$\alpha_{\text{out}} = 0,037 \frac{\lambda_a}{L_b} \left(\frac{v_a L_b}{v_a} \right)^{0,8} \text{Pr}_a^{0,43} + \frac{5,67\varepsilon}{T_{\text{wall}} - T_{\text{air}}} \left[\left(\frac{T_{\text{wall}} + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{air}} + 273}{100} \right)^4 \right]; \quad (36)$$

$$\alpha_{\text{in}} = 0,73 \frac{\lambda_a}{H} \left(\frac{9,81 H^3 (T_{\text{wall}} - T_{\text{air}}) \text{Pr}}{273 v_a^2} \right)^{0,25} + \frac{5,67\varepsilon}{T_{\text{wall}} - T_{\text{air}}} \left[\left(\frac{T_{\text{wall}} + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{air}} + 273}{100} \right)^4 \right]; \quad (37)$$



где v_a – скорость воздуха; λ_a, ν_a, Pr – коэффициент теплопроводности, коэффициент кинематической вязкости и число Прандтля для воздуха (табличные значения); L_b – ширина стены; H – высота стены (внутри комнаты); ε – степень черноты поверхности стены; T_{wall}, T_{air} – средние за период измерений температуры поверхности стены и воздуха.

Найденные в результате процедуры минимизации характеристики областей нарушений сплошности используются для нахождения коэффициентов теплоотдачи поверхностей объекта по формуле (34). Аналогично рассчитываются функционалы правдоподобия на внешней поверхности объекта.

Минимумы функционалов правдоподобия на различных интервалах температурной истории могут иметь различные положения из-за различных факторов, например вследствие шумов датчиков температуры, влаги в материале стены, нарушения условий конвективного обмена. Иногда влияние этих и, возможно, других неучтенных факторов приводит к тому, что функционал правдоподобия имеет минимум, соответствующий физически недопустимым параметрам задачи. В этом случае его значение не должно использоваться при дальнейших вычислениях.

Обозначим коэффициенты теплопроводности области нарушения сплошности, вычисленные в результате минимизации функционалов правдоподобия $\lambda_j^{in, out}$. Разные значения индекса j соответствуют независимым процедурам вычисления коэффициента по экспериментальным данным. Индексы "in" и "out" соответствуют функционалам правдоподобия, построенным с использованием данных, полученных на внутренней и внешней поверхностях объекта.

Допустим, что в результате минимизации функционалов правдоподобия получен набор значений $\{\alpha_j^{in}\}, \{\lambda_j^{in}\}$ и $\{\alpha_j^{out}\}, \{\lambda_j^{out}\}$. Не все минимумы равнозначны. Характеристики дефектов, например коэффициент теплопроводности, удастся вычислить более точно, если кривизна минимума максимальна. Действительно, если минимум выражен слабо (малая кривизна), то небольшой шум датчиков, немного изменяя форму функционала правдоподобия, может сильно сдвинуть положение минимума или вообще привести к тому, что минимум исчезнет. Поэтому ярко выраженные минимумы являются более предпочтительными. Кривизна характеризуется значением второй производной в минимуме. Чем больше вторая произ-

водная, тем предпочтительнее минимум. Следовательно, для определения истинных значений параметров необходимо найти математическое ожидание для выборок соответствующих параметров, причем элементы выборок должны давать вклад, пропорциональный вторым производным функционала правдоподобия в соответствующих минимумах:

$$\alpha^{in} = \frac{\sum_i k_i^{in} \alpha_i^{in}}{\sum_i k_i^{in}}, \quad \alpha^{out} = \frac{\sum_i k_i^{out} \alpha_i^{out}}{\sum_i k_i^{out}}; \quad (38)$$

$$\lambda = \frac{\sum_i k_i^{in} \lambda_i^{in} + \sum_i k_i^{out} \lambda_i^{out}}{\sum_i k_i^{in} + \sum_i k_i^{out}}; \quad (39)$$

$$R_0 = \frac{\sum_i k_i^{in} R_0(\lambda_i^{in}, \alpha^{in}, \alpha^{out}) + \sum_i k_i^{out} R_0(\lambda_i^{out}, \alpha^{in}, \alpha^{out})}{\sum_i k_i^{in} + \sum_i k_i^{out}}; \quad (40)$$

$$k_i^{in, out} = \left. \frac{\partial^2 D^{in, out}(\lambda)}{\partial \lambda^2} \right|_{\min}; \quad (41)$$

$$R_0(\lambda, \alpha^{in}, \alpha^{out}) = \frac{1}{\alpha^{in}} + \frac{1}{\alpha^{out}} + \sum_{n=1}^{N_i} \frac{I_n}{\lambda_n}. \quad (42)$$

Аналогично рассчитывается дисперсия найденных параметров:

$$\Delta \alpha^{in} = \sqrt{\frac{\sum_i k_i^{in} (\alpha_i^{in} - \alpha^{in})^2}{\sum_i k_i^{in}}}; \quad (43)$$

$$\Delta \alpha^{out} = \sqrt{\frac{\sum_i k_i^{out} (\alpha_i^{out} - \alpha^{out})^2}{\sum_i k_i^{out}}};$$

$$\Delta \lambda = \sqrt{\frac{\sum_i k_i^{in} (\lambda_i^{in} - \lambda^{in})^2 + \sum_i k_i^{out} (\lambda_i^{out} - \lambda^{out})^2}{\sum_i k_i^{in} + \sum_i k_i^{out}}}; \quad (44)$$

$$\Delta R_0 = \sqrt{\frac{\sum_i k_i^{in} (R_0(\lambda_i^{in}, \alpha^{in}, \alpha^{out}) - R_0)^2 + \sum_i k_i^{out} (R_0(\lambda_i^{out}, \alpha^{in}, \alpha^{out}) - R_0)^2}{\sum_i k_i^{in} + \sum_i k_i^{out}}}. \quad (45)$$

Проведем сравнение разработанного метода тепловой дефектометрии с известным методом (по возможности, в том числе определению погрешности, по результатам решения и т.п.). Итоговые результаты

Результаты сравнения методов определения теплотехнических параметров ограждающих конструкций

Параметр сравнения	Расчет сопротивления теплопередаче ограждающей конструкции с использованием	
	конечно-разностных схем	преобразования Фурье
Среднее время решения обратной задачи теплопроводности для типичной 3–4-слойной стены	Около 20 мин	Менее 1 мин
Время расчета термического сопротивления типичной 3–4-слойной стены	Около 3 ч	Менее 10 мин
Определяемые величины	Коэффициент теплопроводности исследуемого слоя, коэффициенты теплоотдачи	Коэффициент теплопроводности исследуемого слоя, коэффициенты теплоотдачи
Вычисление методической погрешности	Да	Да
Учет погрешности датчиков температуры	Затруднен ввиду большого времени расчета погрешности	Да
Учет погрешности задания теплотехнических параметров слоев ограждающей конструкции	Затруднен ввиду большого времени расчета погрешности	Да
Учет погрешности задания толщины слоев	Затруднен ввиду большого времени счета	Да
Время вычисления методической погрешности	Около 1 ч	Около 1 мин
Вычисление полной погрешности	Затруднительно ввиду большого времени расчета погрешности	Да
Время вычисления полной погрешности	Время вычисления может достигать десятков дней	Около 5 мин

экспериментальных исследований приведены в таблице.

Выводы

1. Разработан метод тепловой дефектометрии на базе решения прямой и обратной задач теплопроводности в нестационарной постановке многослойных объектов для входных данных в виде температурных серий, основанный на методе преобразования Фурье.

Применение метода позволило:

- сократить время обработки данных по сравнению с существующим методом, основанным на конечно-разностной схеме, в 20...100 раз;
- повысить точность результатов в 1,5...2 раза. Как показали исследования, погрешность расчета сопротивления теплопередаче не превышает 4...13 %.

2. В методе определения погрешности входных данных для решения обратной задачи впервые реализована возможность определять на практике при проведении тепловой дефектометрии различных объектов реальную погрешность получаемых результатов в зависимости от погрешности входных данных.

3. Полученные новые качества метода решения обратной задачи позволили значительно расширить область применения метода тепловой дефектометрии

путем обеспечения контроля большого количества объектов, в том числе потенциально опасных практически, в реальном времени их эксплуатации.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Энергосбережение** в зданиях: Московские городские строительные нормы 2.01–99. М., 1999.
2. **ГОСТ Р 51387**. Энергосбережение. Нормативно-методическое обеспечение. Основные положения. Введ. 30 ноября 1999 г., № 485-ст. М.: Госстандарт России, 1999.
3. **Lebedev O., Kirzhanov D., Avramenko V., Budadin O.** Thermal Nondestructive Testing of Buildings in Practice // Proc. of 16-th WCNDT. 2004. № 609. P. 1–8.
4. **Будадин О.Н., Абрамова Е.В., Слитков М.Н.** Методика диагностики и энергетических обследований наружных ограждающих конструкций строительных сооружений тепловизионным бесконтактным методом: Свидетельство об аттестации Госстандарта России № 09/442–2001 от 09.07.2001 г. М.: Госстандарт России, 2001. 41 с.
5. **Будадин О.Н., Абрамова Е.В., Круторогов О.С. и др.** Методика диагностики и энергетических обследований наружных ограждающих конструкций строительных сооружений тепловизионным бесконтактным методом (летний вариант): Свидетельство об аттестации Госстандарта России № 02/442–2002 от 09.08.2002 г. М.: Госстандарт России, 2002. 41 с.