

Контроль. Диагностика

TESTING. DIAGNOSTICS

6(108) 2007
ИЮНЬ

Вихретоковый дефектоскоп ВД-70



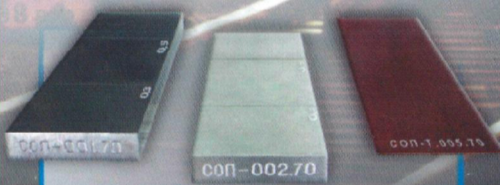
Вихретоковый дефектоскоп ВД-70 предназначен для:

- 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.27.001.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

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. НАХАПЕТАН
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

СОДЕРЖАНИЕ

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

Игнатьев 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.

О.В. Лебедев, О.Н. Будагин, С.В. Баранов, В.Г. Авраменко
(Технологический институт энергетических исследований,
диагностики и неразрушающего контроля "ВЕМО",
Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва)

Тепловая дефектометрия многослойных изделий

на основе решения обратных задач нестационарной теплопроводности

Тепловой метод [1], основанный на анализе температурных полей контролируемых объектов, является одним из наиболее развивающихся методов неразрушающего контроля благодаря его несомненным техническим преимуществам. Развитие этого метода привело к созданию метода тепловой дефектометрии [2], базирующегося на решении обратной задачи нестационарной теплопроводности [3, 4, 5, 6].

Данный метод реализован в технологиях, которые с успехом применяются в ряде отраслей промышленности [7]. Необходимость и актуальность данного метода подтверждена нормативными документами, например [8, 9]. В частности, в настоящее время много внимания уделяется решению проблем строительства и реконструкции зданий в целях обеспечения комфортного пребывания в них людей при эффективном использовании энергоносителей, где с успехом может применяться данный метод. Рассматриваемый метод определения приведенного сопротивления теплопередаче разработан в Технологическом институте "ВЕМО" [10, 11]. Метод успешно демонстрировался на крупнейших форумах, посвященных методам неразрушающего контроля, включая международные конференции [2].

Созданный метод называется методом расчета приведенного сопротивления теплопередаче многослойной ограждающей конструкции в реальных условиях эксплуатации многослойных конструкций методом решения обратной задачи теплопроводности, использующий функционал правдоподобия на основе конечно-разностной схемы, или сокращенно метод функционала правдоподобия на основе конечно-разностной схемы.

Описание метода

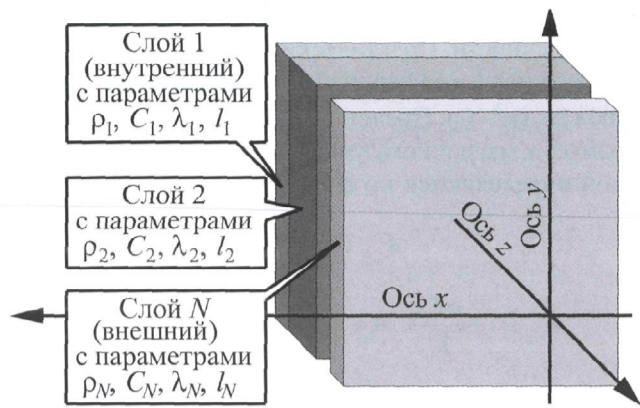
Метод функционала правдоподобия на основе конечно-разностной схемы предназначен для определения теплотехнических характеристик многослойных конструкций, в частности строительных сооружений, с оценкой энергоэффективности ограждающих кон-

струкций по результатам *теплого неразрушающего контроля* (ТНК). Решение обратной задачи нестационарной теплопроводности в многослойном объекте состоит в определении теплофизических характеристик слоев этого объекта по заданным временным зависимостям температур сред вблизи поверхностей объекта и температур самих поверхностей. В основе решения обратной задачи лежит многократное использование решений прямой задачи нестационарной теплопроводности.

Разработанный метод включает в себя обработку экспериментальных данных, полученных в ходе тепловых методов обследования, и реализацию математических алгоритмов ТНК. Анализ возможностей метода ТНК показал, что он с успехом может применяться не только для качественного анализа температурных полей, но и для количественного определения теплотехнических характеристик ограждающих конструкций при использовании специальных расчетных моделей, а именно значения сопротивления теплопередаче в реперных точках и приведенного сопротивления теплопередаче. Метод позволяет осуществлять высокопроизводительную бесконтактную диагностику с применением компьютерной техники для обработки результатов.

Решение прямой задачи нестационарной теплопроводности

Решается одномерная прямая задача нестационарной теплопроводности. Приведенные выкладки применимы для описания как многослойных, так и однослойных объектов, поэтому в дальнейшем будет идти речь о многослойных объектах. Рассмотрим многослойный объект, изображенный на рис. 1. Ориентируем ось z перпендикулярно границам между слоями объекта (а для однослойного объекта – его поверхности), а оси x и y – параллельно ей. Поместим точку отсчета $(0, 0, 0)$ на одну из поверхностей многослойной конструкции. Будем называть эту поверхность внутренней. Направим ось z к противоположной стороне



Многослойный объект, в котором решение одномерной задачи теплопроводности считается справедливым

конструкции, которую будем называть внешней. Обозначим величины, относящиеся к внутренней стороне конструкции, индексом "in", а к внешней – индексом "ex".

Исследования показывают, что для справедливости одномерного приближения необходимо, чтобы характерный масштаб объекта в плоскости (x, y) значительно (более чем в 10 раз) превышал характерный масштаб объекта вдоль оси z. Температуры поверхностей объекта меняются со временем заданным образом.

Обозначим $T(z, t)$ зависимость температуры от координаты z и времени t . Уравнение теплопроводности имеет вид (1). Значения $C(z)$, $\rho(z)$ и $\lambda(z)$ представляют собой значения теплофизических характеристик: удельной теплоемкости, плотности и коэффициента теплопроводности материалов слоев. Они считаются постоянными внутри каждого из слоев и независимыми от температуры, а следовательно, задаются кусочно-постоянными функциями координаты z . Будем обозначать эти функции на соответствующих участках C_n , ρ_n и λ_n :

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

Уравнение (1) используется с граничными условиями первого рода на поверхностях стены:

$$T(0, t) \equiv T^{\text{in}}(t), \quad T(L, t) \equiv T^{\text{ex}}(t), \quad L \equiv \sum_{n=1}^N l_n. \quad (2)$$

Если число слоев больше одного, на границах слоев структуры применяются стандартные в теплофизике условия непрерывности значений температуры и теплового потока на границе слоев:

$$T(z_{n'} - 0, t) = T(z_{n'} + 0, t); \quad (3)$$

$$\left(\lambda(z) \frac{\partial T(z, t)}{\partial z} \right) \Big|_{z_{n'} - 0} = \left(\lambda(z) \frac{\partial T(z, t)}{\partial z} \right) \Big|_{z_{n'} + 0}, \quad (4)$$

где $z_{n'} = \sum_{n=1}^{n'} l_n$; l_n – толщина слоя n ; $n' = 1 \dots (n-1)$.

Для решения задачи теплопроводности задается начальное распределение температуры внутри слоев структуры. Задание распределения температуры в начальный момент времени соответствует стационарному температурному режиму с температурами на внутренней и внешней границах объекта $T^{\text{inwall}}(0)$ и $T^{\text{exwall}}(0)$.

Пусть рассматриваемый объект содержит N 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. Нумерация слоев ведется с внутренней поверхности. Известны температурные истории на поверхностях объекта, т.е. последовательности значений температур $T^{\text{in,exwall}}(\vartheta_\zeta)$ в моменты времени ϑ_ζ (всего Z значений).

Для решения задачи теплопроводности внутри многослойного объекта используется распространенная разновидность сеточных методов решения дифференциальных уравнений в частных производных, а именно схема Кранка–Николсона второго порядка точности с постоянным шагом сетки. Обозначим шаг интегрирования по координате ξ , а по времени – τ .

Для решения прямой задачи совершается переход от временной сетки задания температурной истории ϑ_ζ , $\zeta = 1 \dots Z$ к временной сетке t_k , $k = 1 \dots K$, $K = \text{round}\left(\frac{\mathfrak{R}}{\tau}\right) + 1$, где \mathfrak{R} – продолжительность температурной истории. Функция $\text{round}(\dots)$ выделяет целую часть своего аргумента. Для получения значений температур в моменты времени t_k применяется процедура кубической сплайн-интерполяции.

Также для решения прямой задачи используется временная сетка, задаваемая следующим образом.

Каждый слой n разбивается на $\text{round}\left(\frac{l_n}{\xi}\right)$ участков.

После этого значения толщин слоев считаются равными $\text{round}\left(\frac{l_n}{\xi}\right)\xi$. Пространственная сетка привязывается к границам этих интервалов и узлы сетки нумеруются с внутренней поверхности объекта. Номера узлов, соответствующих границам слоев, обозначаются

$$m[n], m[n] = \text{round}\left(\frac{l_n}{\xi}\right) + m[n - 1], \quad m[1] = \text{round}\left(\frac{l_1}{\xi}\right) + 1.$$

На первом этапе вычисляется распределение температуры в объекте в начальный момент времени. Считается, что это распределение соответствует стационарному распределению с тепловым потоком

$$I_0 = \frac{\tilde{T}_1^{\text{in|wall}} - \tilde{T}_1^{\text{ex|wall}}}{R_{\text{loc}}}. \quad (5)$$

Смысл этого приближения будет пояснен ниже.

Обозначим T_{ij} температуру в момент времени i в узле j слоя n пространственной сетки. В начальный момент времени температура в граничных точках $m[n]$, $n = 1 \dots (N-1)$ равна

$$T_{1,m[n]} = \tilde{T}_1^{\text{in|wall}} + I_0 \left(\frac{1}{\alpha^{\text{in}}} + \sum_{i=1}^{n-1} \frac{l_i}{\lambda_i} \right). \quad (6)$$

Температура в остальных точках i каждого из слоев n определяется по линейному закону:

$$T_{1,i} = T_{1,m[n]} + \frac{i-m[n]}{m[n+1]-m[n]} (T_{1,m[n+1]} - T_{1,m[n]}), \quad (7)$$

$i = 1 \dots m[n].$

На первом шаге интегрирования используется неявная схема первого порядка точности по времени. Уравнению (1) соответствует разностная схема

$$C_n \rho_n \frac{T_{2,j} - T_{1,j}}{\tau} = \frac{\lambda_n}{2\xi^2} (T_{2,j-1} + T_{2,j+1} - 2T_{2,j} + T_{1,j-1} + T_{1,j+1} - 2T_{1,j}). \quad (8)$$

Уравнение (8) используется вместе с граничными условиями на поверхности объекта:

$$\alpha^{\text{in}} (\tilde{T}_2^{\text{in|wall}} - T_{2,1}) = \lambda_1 \frac{T_{2,1} - T_{2,2}}{\xi}, \quad (9)$$

$$\alpha^{\text{ex}} (\tilde{T}_2^{\text{ex|wall}} - T_{2,m[N]}) = \lambda_N \frac{T_{2,m[N]} - T_{2,m[N]-1}}{\xi}$$

и границах слоев

$$\frac{\lambda_n}{\xi} (T_{2,m[n+1]} - T_{2,m[n+1]-1}) = \frac{\lambda_{n+1}}{\xi} (T_{2,m[n+1]+1} - T_{2,m[n+1]}). \quad (10)$$

В целях универсализации алгоритма для вычисления величин тепловых потоков используются граничные условия третьего рода, для перехода от которых к граничным условиям первого рода (2) значения коэф-

фициентов теплоотдачи в формулах (9) устремляются к бесконечности. Практические расчеты следует вести со значениями коэффициентов теплоотдачи порядка 50 000 Вт/(м²·°С). Представленная система уравнений сводится к матричному уравнению, матрицы A и F которой определяются по формулам (11)–(16):

$$A_{n,m} T_{2,m} = F_n; \quad (11)$$

$$A_{1,1} = 1 + \frac{\alpha^{\text{in}} \xi}{\lambda_1}; A_{1,2} = -1; A_{m[N],m[N]-1} = -1; \quad (12)$$

$$A_{m[N],m[N]} = 1 + \frac{\alpha^{\text{ex}} \xi}{\lambda_N};$$

$$A_{m[n],m[n]} = 1; A_{m[n],m[n]-1} = -\frac{\lambda_{n-1}}{\lambda_{n-1} + \lambda_n}; \quad (13)$$

$$A_{m[n],m[n]+1} = -\frac{\lambda_n}{\lambda_{n-1} + \lambda_n}; n = 2 \dots (N-1);$$

$$A_{n,n-1} = 1; A_{n,n} = -2 \left(1 + \frac{C_n \rho_n \xi^2}{\lambda_n \tau} \right); \quad (14)$$

$$A_{n,n+1} = 1; n \neq m_k;$$

$$F_1 = \frac{\alpha^{\text{in}} \xi}{\lambda_1} \tilde{T}_2^{\text{in|wall}}; F_{m[N]} = \frac{\alpha^{\text{ex}} \xi}{\lambda_N} \tilde{T}_2^{\text{ex|wall}}; F_{m[n]} = 0; \quad (15)$$

$$F_n = T_{1,n-1} + T_{1,n+1} - 2T_{1,n} \left(1 + \frac{C_n \rho_n \xi^2}{\lambda_n \tau} \right); n \neq m_k. \quad (16)$$

Уравнение (11) решается методом обратной прогонки. Для решения вводятся вспомогательные векторы:

$$a_n = -\frac{1}{A_{n,n+1}} \left(A_{n,n} + \frac{A_{n,n-1}}{a_{n-1}} \right), a_1 = -\frac{A_{1,1}}{A_{1,2}}; \quad (17)$$

$$b_n = \frac{1}{A_{n,n+1}} \left(F_n + \frac{A_{n,n-1} b_{n-1}}{a_{n-1}} \right), b_1 = \frac{F_1}{A_{1,2}}. \quad (18)$$

При этом решение определяется соотношением

$$T_{2,n} = \frac{T_{2,n+1} - b_n}{a_n}, T_{2,m[N]} = F_{m[N]} a_{m[N]-1} + \frac{b_{m[N]-1} A_{m[N],m[N]-1}}{A_{m[N],m[N]} a_{m[N]-1} + A_{m[N],m[N]-1}}. \quad (19)$$

Значение температуры в остальные $(K-2)$ моменты времени рассчитывается с помощью неявной чис-



ленной схемы второго порядка точности по времени. Вместо формулы (8) в ней используется разностное соотношение

$$C_n \rho_n \frac{T_{k,j} - T_{k-2,j}}{2\tau} = \frac{\lambda_n}{2\xi^2} (T_{k,j-1} + T_{k,j+1} - 2T_{k,j} + T_{k-1,j-1} + T_{k-1,j+1} - 2T_{k-1,j}). \quad (20)$$

Уравнение (20) изменяется с граничными условиями на поверхности объекта

$$\alpha^{in} (\tilde{T}_k^{in|wall} - T_{k,1}) = \lambda_1 \frac{T_{k,1} - T_{k,2}}{\xi}, \quad (21)$$

$$\alpha^{ex} (\tilde{T}_k^{ex|wall} - T_{k,m[N]}) = \lambda_N \frac{T_{k,m[N]} - T_{k,m[N]-1}}{\xi}$$

и граничными условиями на границах слоев

$$\frac{\lambda_n}{\xi} (T_{k,m[n+1]} - T_{k,m[n+1]-1}) = \frac{\lambda_{n+1}}{\xi} (T_{k,m[n+1]+1} - T_{k,m[n+1]}). \quad (22)$$

Система уравнений (20)–(22) сводится к матричному уравнению

$$A_{n,m} T_{k,m} = F_n. \quad (23)$$

Компоненты A_{nm} и F_n определяются из уравнений (24)–(28):

$$A_{1,1} = 1 + \frac{\alpha^{in} \xi}{\lambda_1}, \quad A_{1,2} = -1, \quad (24)$$

$$A_{m[N],m[N]-1} = -1, \quad A_{m[N],m[N]} = 1 + \frac{\alpha^{ex} \xi}{\lambda_N};$$

$$A_{m[n],m[n]} = 1, \quad A_{m[n],m[n]-1} = -\frac{\lambda_{n-1}}{\lambda_{n-1} + \lambda_n}, \quad (25)$$

$$A_{m[n],m[n]+1} = -\frac{\lambda_n}{\lambda_{n-1} + \lambda_n}, \quad n = 2 \dots (N-1);$$

$$A_{n,n-1} = 1, \quad A_{n,n} = -\left(2 + \frac{C_n \rho_n \xi^2}{\lambda_n \tau}\right), \quad (26)$$

$$A_{n,n+1} = 1, \quad n \neq m_k;$$

$$F_1 = \frac{\alpha^{in} \xi}{\lambda_1} \tilde{T}_k^{in|wall}, \quad F_{m[N]} = \frac{\alpha^{ex} \xi}{\lambda_N} \tilde{T}_k^{ex|wall}, \quad F_{m[n]} = 0; \quad (27)$$

$$F_n = T_{k-1,n-1} + T_{k-1,n+1} - 2T_{k-1,n} - \frac{C_n \rho_n \xi^2}{\lambda_n \tau} T_{k-2,n}, \quad n \neq m_k. \quad (28)$$

Уравнение (20) также решается методом обратной прогонки. Значения тепловых потоков через поверхности объекта вычисляются по формулам:

$$I_k^{in} = \lambda_1 \frac{T_{k,1} - T_{k,2}}{\xi}, \quad I_k^{ex} = \lambda_N \frac{T_{k,m[N]-1} - T_{k,m[N]}}{\xi}. \quad (29)$$

Для уменьшения влияния шумов входных данных, а именно температурных историй, рассчитанные значения тепловых потоков подвергаются процедуре усреднения. Для некоторого вектора $F(t_q)$ с числом элементов Q процедура усреднения с индексом усреднения Q_{av} , $Q_{av} < \frac{Q}{2}$ описывается формулой

$$\bar{F}(t_q) = \begin{cases} \frac{1}{Q_{av} + q + 1} \sum_{i=1}^{q+Q_{av}} F(t_i), & 1 \leq q < Q_{av}; \\ \frac{1}{2Q_{av} + 1} \sum_{i=q-Q_{av}}^{q+Q_{av}} F(t_i), & Q_{av} \leq q \leq (Q - Q_{av}); \\ \frac{1}{Q_{av} + Q - q + 1} \sum_{i=q-Q_{av}}^Q F(t_i), & (Q - Q_{av}) < q \leq Q. \end{cases} \quad (30)$$

Результатом процедуры усреднения является вектор $\bar{F}(t_q)$.

Решение обратной задачи нестационарной теплопроводности

Для решения обратной задачи нестационарной теплопроводности в исследуемом объекте используются измеренные температурные истории – температуры наружного воздуха $T^{ex|wall}(\vartheta_\zeta)$, наружной поверхности $T^{ex|wall}(\vartheta_\zeta)$, внутренней поверхности $T^{in|wall}(\vartheta_\zeta)$ и внутреннего воздуха $T^{in|air}(\vartheta_\zeta)$, $\zeta = 1 \dots Z$. Экспериментальные данные подвергаются процедуре усреднения по правилу (30). Как и в случае тепловых потоков, сглаживание проводится для уменьшения влияния шумов входных данных. После усреднения осуществляется переход с временной сетки ϑ_ζ , $\zeta = 1 \dots Z$, на временную сетку t_k , $k = 1 \dots K$, с помощью кубической сплайн-интерполяции.

Зададим набор теплофизических параметров слоев объекта $\{\Theta\}$ и вычислим плотности тепловых потоков через внешнюю $I^{ex}(t_k, \{\Theta\})$ и внутреннюю $I^{in}(t_k, \{\Theta\})$ поверхности по формулам (29). Вычислим температурные истории внутреннего $\tilde{T}^{in|air}(t_k, \{\Theta\})$ и внешнего $\tilde{T}^{ex|air}(t_k, \{\Theta\})$ воздуха по соотношениям

$$\begin{aligned} \tilde{T}^{in|air}(t_k, \{\Theta\}, a^{in}) &= \\ &= T^{in|wall}(t_k) + \frac{I^{in}(t_k, \{\Theta\}, \alpha^{in})}{\alpha^{in}}; \end{aligned} \quad (31)$$

$$\begin{aligned} \tilde{T}^{\text{ex|air}}(t_k, \{\Theta\}, \alpha^{\text{ex}}) = \\ = T^{\text{ex|wall}}(t_k) - \frac{I^{\text{ex}}(t_k, \{\Theta\}, \alpha^{\text{ex}})}{\alpha^{\text{ex}}}. \end{aligned} \quad (32)$$

При истинных значениях теплофизических характеристик слоев объекта измеренные и рассчитанные температурные истории максимально близки. Кривые должны быть близки также на любом интервале температурной истории. За степень близости кривых удобно принять норму квадратичной невязки этих кривых.

При проведении расчетов температурные истории разбиваются на интервалы времени продолжительностью δ . Пусть γ – число интервалов. Обозначим $\Xi[j]$ значения индекса k , которые соответствуют границам интервалов, тогда интервал j будет обозначаться $[t_{\Xi[j]}, t_{\Xi[j+1]})$. Вводятся следующие функционалы:

$$\begin{aligned} D_j^{\text{in}}(\{\Theta\}, \alpha^{\text{in}}) = \\ = \frac{\tau}{\delta} \sum_{k=\Xi[j]}^{\Xi[j+1]} (\tilde{T}^{\text{in|air}}(t_k, \alpha^{\text{in}}, \{\Theta\}) - T^{\text{in|air}}(t_k))^2; \end{aligned} \quad (33)$$

$$\begin{aligned} D_j^{\text{ex}}(\{\Theta\}, \alpha^{\text{ex}}) = \\ = \frac{\tau}{\delta} \sum_{k=\Xi[j]}^{\Xi[j+1]} (\tilde{T}^{\text{ex|air}}(t_k, \alpha^{\text{ex}}, \{\Theta\}) - T^{\text{ex|air}}(t_k))^2. \end{aligned} \quad (34)$$

Функционалы (33) называются функционалами правдоподобия и позволяют определить истинное значение каждого из параметров $\{\Theta\}$. При подстановке в них истинных значений параметров $\{\Theta\}$ функционалы (33) имеют минимум. Вследствие влияния параметров, не учитываемых при измерениях, минимумы различных функционалов (33) отличаются. Истинные значения параметров следует искать как математическое ожидание всей выборки реализуемых минимумов.

Не для всех параметров $\{\Theta\}$ требуется выполнять численный поиск минимума. Для параметров α^{in} и α^{ex} возможно аналитическое решение задачи

$$\left. \frac{\partial D^{\text{in}}(\{\Theta\}, \alpha^{\text{in}})}{\partial \alpha^{\text{in}}} \right|_{\min} = 0, \quad \left. \frac{\partial D^{\text{ex}}(\{\Theta\}, \alpha^{\text{ex}})}{\partial \alpha^{\text{ex}}} \right|_{\min} = 0. \quad (35)$$

Процедуры аналитического нахождения значений α^{in} и α^{ex} аналогичны, поэтому ниже приведен алгоритм вычисления α^{in} . После подстановки (31) в (33) функционал правдоподобия преобразуется к виду

$$D^{\text{in}}(\{\Theta\}, \alpha^{\text{in}}) = S_1 - 2 \frac{S_2(\{\Theta\})}{\alpha^{\text{in}}} + \frac{S_3(\{\Theta\})}{(\alpha^{\text{in}})^2}, \quad (36)$$

где

$$S_1(\{\Theta\}) = \frac{\tau}{\delta} \sum_k (\tilde{T}^{\text{in|air}}(t_k, \{\Theta\}) - T^{\text{in|wall}}(t_k))^2; \quad (37)$$

$$S_2(\{\Theta\}) = \frac{\tau}{\delta} \sum_k (\tilde{T}^{\text{in|air}}(t_k, \{\Theta\}) - T^{\text{in|wall}}(t_k)) I^{\text{in}}(t_k, \{\Theta\}); \quad (38)$$

$$S_3(\{\Theta\}) = \frac{\tau}{\delta} \sum_k (I^{\text{in}}(t_k, \{\Theta\}))^2. \quad (39)$$

Вычисление производных (35) дает следующее выражение для коэффициента теплоотдачи, реализующего минимум

$$\alpha^{\text{in}} = \frac{S_3(\{\Theta\})}{S_2(\{\Theta\})}. \quad (40)$$

В результате функционал правдоподобия сводится к функции

$$D^{\text{in}}(\{\Theta\}) = S_1 - \frac{(S_2(\{\Theta\}))^2}{S_3(\{\Theta\})}, \quad (41)$$

зависящей только от теплофизических характеристик слоев многослойной конструкции. Зависимость от параметров α^{in} и α^{ex} отсутствует.

Если значение коэффициента теплоотдачи известно, то выражение для функционала правдоподобия определяется формулой (36), где вместо параметра α^{in} используется известное фиксированное значение. В качестве фиксированных значений можно применять рекомендации СНиП или значения, рассчитанные по формулам (48)–(49).

Нахождение минимума функционала сразу по всей совокупности параметров $\{\Theta\}$ представляет собой необоснованно сложную задачу из-за чрезмерно высоких вычислительных затрат. Поэтому из всей совокупности параметров выбирается один, который наиболее существенно влияет на теплотехнические характеристики стены. Значения остальных параметров полагаются равными значениям, заявленным в проекте объекта. Таким наиболее существенным параметром является коэффициент теплопроводности слоя утеплителя. В результате функционал правдоподобия $D^{\text{in}}(\{\Theta\})$ или $D^{\text{ex}}(\{\Theta\})$ становится функцией лишь одной переменной $D^{\text{in}}(\lambda)$ или $D^{\text{ex}}(\lambda)$. Минимум этой функции находится численно.

Значения коэффициента теплопроводности слоя утеплителя, найденные в результате минимизации функционала правдоподобия, используются для определения коэффициентов теплоотдачи поверхностей объекта по формуле (40). Аналогично рассчитываются



функционалы правдоподобия на внешней поверхности объекта.

На различных интервалах температурной истории минимумы могут различаться из-за шума датчиков температуры и влияния различных неучтенных факторов (например, влага, нарушение условий конвективного теплообмена на границах объекта). Вследствие этих же причин на некоторых интервалах минимумы могут вообще отсутствовать. Функционалы правдоподобия, имеющие неудовлетворительные параметры (слишком малую кривизну, физически некорректные значения) не следует принимать в рассмотрение. Назовем остальные функционалы правдоподобия удовлетворительными.

Обозначим через $\{\lambda_j^{in}\}$ значения коэффициента теплопроводности утеплителя, найденные с помощью функционалов правдоподобия $D_j^{in}(\lambda)$, $j=1...r$. Аналогично обозначим $\{\lambda_j^{ex}\}$ значения коэффициента теплопроводности, определенные с помощью $D_j^{ex}(\lambda)$. Множеству значений $\{\lambda_j^{in}\}$ соответствует множество значений $\{\alpha_j^{in}\}$, а множеству $\{\lambda_j^{ex}\}$ — множество $\{\alpha_j^{ex}\}$. Обозначим Ξ^{in} множество индексов j , соответствующее удовлетворительным функционалам правдоподобия $D_j^{in}(\lambda)$, аналогичный смысл имеет обозначение Ξ^{ex} .

Не все минимумы равнозначны. Коэффициент теплопроводности удастся вычислить более точно, если кривизна минимума максимальна. Действительно, если минимум выражен слабо, то небольшой шум датчиков может сильно сдвинуть положение минимума, даже если его форма визуально изменяется незначительно. Такой эффект может привести и к исчезновению минимума. Поэтому ярко выраженные минимумы являются более предпочтительными. Кривизна характеризуется значением второй производной в минимуме. Чем больше вторая производная, тем более предпочтителен минимум.

Для нахождения истинных значений параметров необходимо вычислить математическое ожидание для выборок соответствующих параметров. Целесообразно искать математическое ожидание требуемых величин с весами, равными вторым производным минимумов функционалов правдоподобия. Обозначим $\hat{\alpha}^{in}$ и $\hat{\alpha}^{ex}$ математические ожидания коэффициентов теплоотдачи на поверхностях объекта α^{in} и α^{ex} , а $\hat{\lambda}$ — математическое ожидание коэффициента теплопроводности исследуемого слоя λ . Обозначим математическое ожидание сопротивления теплопередаче в реперной

зоне \hat{R}^{loc} . Запись $R^{loc}(\lambda_j^{in}, \hat{\alpha}^{in}, \hat{\alpha}^{ex})$ подразумевает, что локальное значение сопротивления теплопередаче в данной реперной зоне вычисляется с использованием проектных значений теплотехнических и геометрических параметров стены (кроме коэффициента теплопроводности исследуемого слоя), рассчитанных значений коэффициента теплопроводности исследуемого слоя и математических ожиданий коэффициентов теплоотдачи. Введенные математические ожидания вычисляются по формулам:

$$\alpha^{in} = \frac{\sum_{j \in \Xi^{in}} k_j^{in} \alpha_j^{in}}{\sum_{j \in \Xi^{in}} k_j^{in}}, \quad \alpha^{ex} = \frac{\sum_{j \in \Xi^{ex}} k_j^{ex} \alpha_j^{ex}}{\sum_{j \in \Xi^{ex}} k_j^{ex}}, \quad (42)$$

$$\lambda = \frac{\sum_{j \in \Xi^{in}} k_j^{in} \lambda_j^{in} + \sum_{j \in \Xi^{ex}} k_j^{ex} \lambda_j^{ex}}{\sum_{j \in \Xi^{in}} k_j^{in} + \sum_{j \in \Xi^{ex}} k_j^{ex}};$$

$$\hat{R}^{loc} = \frac{\sum_{j \in \Xi^{in}} k_j^{in} R^{loc}(\lambda_j^{in}, \hat{\alpha}^{in}, \hat{\alpha}^{ex}) + \sum_{j \in \Xi^{ex}} k_j^{ex} R^{loc}(\lambda_j^{ex}, \hat{\alpha}^{in}, \hat{\alpha}^{ex})}{\sum_{j \in \Xi^{in}} k_j^{in} + \sum_{j \in \Xi^{ex}} k_j^{ex}}, \quad (43)$$

используемые в этих формулах весовые значения определяются как

$$k_j^{ex} = \left. \frac{\partial D_j^{ex}(\lambda)}{\partial \lambda} \right|_{\lambda=\lambda_j^{ex}}, \quad k_j^{in} = \left. \frac{\partial D_j^{in}(\lambda)}{\partial \lambda} \right|_{\lambda=\lambda_j^{in}}. \quad (44)$$

По очевидным формулам (45)–(47) вычисляется дисперсия найденных параметров:

$$\sigma_{\alpha^{in}} = \sqrt{\frac{\sum_{j \in \Xi^{in}} k_j^{in} (\alpha_j^{in} - \hat{\alpha}^{in})^2}{\sum_{j \in \Xi^{in}} k_j^{in}}}, \quad (45)$$

$$\sigma_{\alpha^{ex}} = \sqrt{\frac{\sum_{j \in \Xi^{ex}} k_j^{ex} (\alpha_j^{ex} - \hat{\alpha}^{ex})^2}{\sum_{j \in \Xi^{ex}} k_j^{ex}}};$$

$$\sigma_{\lambda} = \sqrt{\frac{\sum_{j \in \Xi^{in}} k_j^{in} (\lambda_j^{in} - \hat{\lambda})^2 + \sum_{j \in \Xi^{ex}} k_j^{ex} (\lambda_j^{ex} - \hat{\lambda})^2}{\sum_{j \in \Xi^{in}} k_j^{in} + \sum_{j \in \Xi^{ex}} k_j^{ex}}}; \quad (46)$$

$$\sigma_{R^{loc}} = \sqrt{\frac{\sum_{j \in \Xi^{in}} k_j^{in} (R^{loc}(\lambda_j^{in}, \hat{\alpha}^{in}, \hat{\alpha}^{ex}) - \hat{R}^{loc})^2 + \sum_{j \in \Xi^{ex}} k_j^{ex} (R^{loc}(\lambda_j^{ex}, \hat{\alpha}^{in}, \hat{\alpha}^{ex}) - \hat{R}^{loc})^2}{\sum_{j \in \Xi^{in}} k_j^{in} + \sum_{j \in \Xi^{ex}} k_j^{ex}}}. \quad (47)$$

Если на одной из поверхностей функционал правдоподобия не имел удовлетворительных параметров ни на одном из участков, значение коэффициента теплоотдачи на этой поверхности следует считать равным значению, стандартному для данного типа поверхности и вычисляемому по формулам (48) – (49) [12].

В них используются табличные значения: коэффициента теплопроводности λ_a ; коэффициента кинематической вязкости ν_a и числа Прандтля Pr для воздуха; v – скорость воздуха; L – 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 соответственно:

$$\alpha^{ex} = 0,037 \frac{\lambda_a}{L} \left(\frac{vL}{\nu_a} \right)^{0,8} Pr^{0,43} + 5,67\varepsilon \frac{\left(\frac{T_{wall} + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{air} + 273}{100} \right)^4}{T_{wall} - T_{air}}; \quad (48)$$

$$\alpha^{in} = 0,73 \frac{\lambda_a}{H} \left(\frac{9,81H^3 (T_{wall} - T_{air}) Pr}{273\nu_a^2} \right)^{0,25} + 5,67\varepsilon \frac{\left(\frac{T_{wall} + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{air} + 273}{100} \right)^4}{T_{wall} - T_{air}}. \quad (49)$$

Использование решения обратной задачи

Выяснение действительных значений локального сопротивления теплопередаче ограждающей конструкции в одной или нескольких ее точках открывает возможности для вычисления приведенного сопротивления теплопередаче этой конструкции. Вычисление R^{iv} возможно при наличии дополнительных экспериментальных данных.

Практика проведения ТНК строительных сооружений показывает, что для этого достаточно термограммы ограждающей конструкции, данных для калибровки термограммы и температур внешнего и

внутреннего воздуха вблизи реперной точки и внешней поверхности реперной точки на момент проведения тепловизионного обследования.

Ограничения метода

При обработке температурной истории реперной зоны выбранный математический аппарат использует некоторые приближения.

Во-первых, в процессе ТНК объекта внутри ограждающих конструкций реализуется одномерный процесс теплопередачи. Выполнение этого допущения достигается выбором реперной точки в зоне однородного распределения температурного поля на поверхности наружных ограждающих конструкций.

В момент начала измерений внутри ограждающих конструкций реализуется стационарный процесс теплопередачи. Это условие выполняется выбором продолжительности температурной истории. Если ее продолжительность превышает несколько суток, отличие начального распределения температуры от стационарного практически не сказывается на положении минимумов функционала правдоподобия.

Наконец, требуется, чтобы на поверхностях объекта реализовывался конвективный процесс теплоотдачи. Процесс теплообмена на поверхностях (особенно внешней поверхности) не всегда может рассматриваться как конвективный. Особенно ярко это проявляется при наличии внешних источников тепла, таких как солнце. На этих участках температурной истории процесс теплообмена не описывается используемой в программе физико-математической моделью, их следует исключить из вычислений.

Выводы

Таким образом, создан метод расчета сопротивления теплопередаче многослойной ограждающей конструкции в реальных условиях эксплуатации многослойных конструкций методом решения обратной задачи теплопроводности, использующий функционал правдоподобия на основе конечно-разностной схемы. Метод позволяет оперативно и достоверно определять теплотехнические характеристики многослойных конструкций, при его реализации применяются современные математические методы обработки данных, которые сокращают время проведения обследования, например, строительных конструкций с 14 (по ГОСТ 31166–2003) до 5 рабочих дней. В его основе лежит решение обратной задачи ТНК в многослойной



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.