

ISSN 1729-9209

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ОБОРУДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ

XXI ВЕКА



CONSTRUCTION MATERIALS, EQUIPMENT, TECHNOLOGIES OF THE XXI CENTURY

10 (81), 2005



Современная теория и технология теплового неразрушающего контроля

О.Н. БУДАДИН, доктор техн. наук;
Т.Е. ТРОИЦКИЙ-МАРКОВ, чл.-корр. Российской академии космонавтики
Технологический институт энергетических обследований, диагностики и неразрушающего контроля «ВЕМО» (г. Москва);

В.В. ВАВИЛОВ, доктор техн. наук, профессор
Томский политехнический институт;
М.Н. СЛИТКОВ, канд. техн. наук
ОАО «ЦНИИ специального машиностроения» (г. Хотьково Московской обл.)

Описывается тепловой метод неразрушающего контроля (ТНК), обеспечивающий определение характеристик внутренних нарушений сплошности (дефектов) – метод тепловой дефектометрии. Рассматриваются общие вопросы постановки и решения прямой и обратной задачи ТНК. Производится статистическая оценка достоверности методики ТНК и даны примеры применения метода контроля на практике.

В настоящее время актуальной является задача определения качества и оперативная достоверная диагностика технического состояния материалов и конструкций изделий, в т.ч. в реальных условиях их эксплуатации. Тепловой неразрушающий контроль в силу своей специфики (бесконтактности, возможности контроля объектов в процессе их испытаний и штатной эксплуатации, высокой информативности и т.п.) позволяет эффективно решать эту задачу. Качественно новые возможности теплового контроля связаны с переходом от тепловой дефектоскопии (обнаружения внутренних дефектов) к тепловой дефектометрии (определению численных характеристик внутренних нарушений сплошности) и далее к оценке остаточного ресурса объектов.

Количественный анализ температурных полей с определением характеристик исследуемого объекта (геометрических, теплотехнических, теплофизических) [1–6] строится на расчетных моделях, связанных с решением обратной задачи теплопроводности. Она формулируется в виде задачи на экстремум «функционала правдоподобия».

Постановка и решение прямой и обратной задачи теплового неразрушающего контроля

Решение обратной задачи в общем виде опирается на решение прямой задачи в следующем смысле: необходимо так подобрать параметры исследуемого объекта, чтобы его посчитанная реакция (некоторая функция времени $U(\tau)$) оказалась по возможности более близка к измеренной реакции $U_0(\tau)$. Близость понимается в смысле близости

в функциональном пространстве (пространстве функций, удовлетворяющих некоторым условиям гладкости). Эту близость можно измерять с помощью разных метрик, мы же будем пользоваться среднеквадратичной (1) по причине простоты последней:

$$\Phi[U] = \int_0^t (U_0(\tau) - U(\tau))^2 d\tau. \quad (1)$$

Доказано [4] существование и единственность решения обратных задач (быть может, в ограниченной области пространства параметров), т.е. обеспечено наличие экстремума (1).

В функционале (1) выделим зависимость от параметров для реакции $U_0(\tau)$, тем самым превратив его в функцию, минимум которой в пространстве этих параметров необходимо определить. Функционал (1) приведем к виду (Θ – набор параметров):

$$\Phi(\Theta) = \int_0^t (U_0(\tau) - U(\tau, \Theta))^2 d\tau. \quad (2)$$

Для решения обратных задач будем использовать метод движения по градиенту [16]:

$$\frac{d\Theta_i}{d\tau} = - \frac{\partial \Phi(\Theta)}{\partial \Theta_i}, \quad (3)$$

где набор координат Θ – совокупность параметров (теплофизических характеристик, см. ниже); τ – некоторый параметр, играющий роль времени. Для практического использования (3) необходимо численно определять все производные (как частные, так и полные), поскольку (3) фактически задает нам итерационную процедуру поиска минимума.

Система по принятой в теории колебаний классификации [9] является автономной диссипативной динамической системой, заданной потоком. Если решение (1) существует, то система (3) обязана обладать неподвижной «притягивающей» особой точкой. Таким образом, можно разложить правую часть (3) до первого по отклонению члена вблизи неподвижной точки:

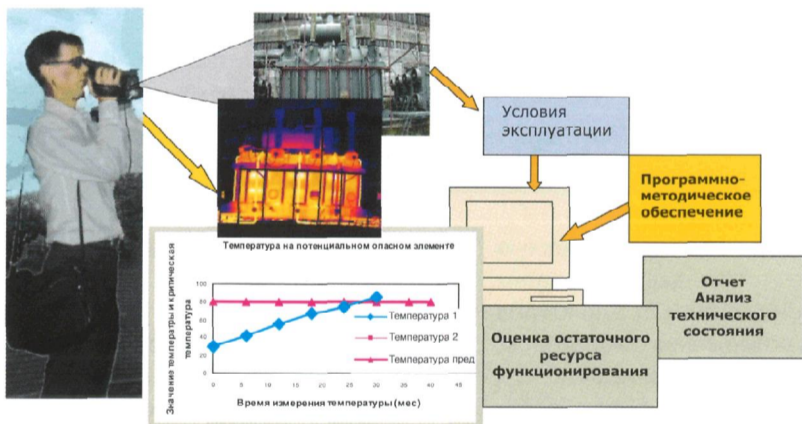
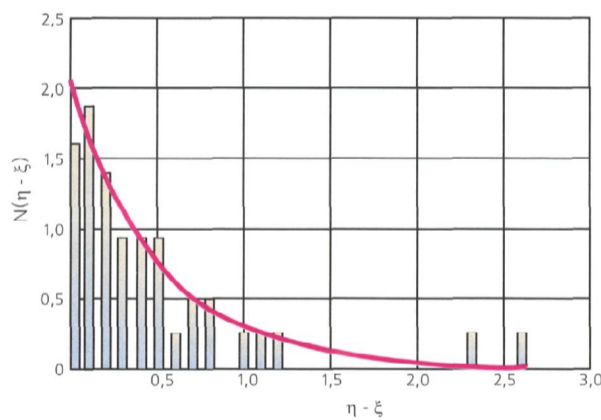
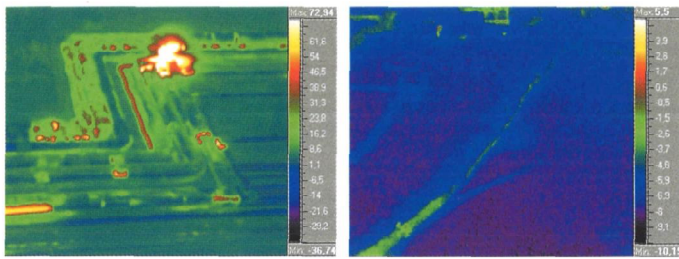


Схема теплового контроля потенциально опасного объекта



Гистограмма отстроек измеренных сопротивлений теплопередаче ($\eta - \xi$) от заявленных



Диагностика технического состояния, локализация и распознавание дефектов подземных теплотрасс в осенне-зимний период в процессе их эксплуатации

$$\frac{d\Theta_i}{dt} = -\frac{\partial^2 \Phi(\Theta^0)}{\partial \Theta_i \partial \Theta_j} (\Theta_j - \Theta_j^0) \quad (4)$$

Выделим из всего множества переменных Θ те, явная зависимость от которых известна, и обозначим их через Φ , прочие переменные – через Ψ . Таким образом, $\Phi(\Theta)$ перейдет в $\Phi(\Phi, \Psi)$. Частные производные $\Phi(\Phi, \Psi)$ по переменным Φ нетрудно посчитать аналитически, потребовав (в силу поиска экстремума) их обнуления. Для динамической системы (3) это соответствует выражению:

$$\frac{d\Phi_i}{dt} = -\frac{\partial \Phi(\Phi, \Psi)}{\partial \Phi_i} = 0 \quad (5)$$

Тем самым эффективно понижена размерность исходной системы на то количество переменных, аналитическая зависимость от которых нам теперь известна. На языке вариационного исчисления это означает то, что при переходе от (3) к (5), на исходную систему наложен ряд связей, которые формально обеспечили бесконечно быстрое движение по направлениям, задаваемым бесконечно малыми приращениями параметров, зависимость от которых известна (аналогично известному классу задач теоретической механики о свободном движении, стесненном голономными связями).

Как известно, постановка прямой задачи теплопроводности основывается на законе сохранения энергии, записанном в виде уравнения непрерывности [10]:

$$\frac{\partial Q(r, t)}{\partial t} + \text{div} J(r, t) = 0, \quad (6)$$

где $Q(r, t)$ и $J(r, t)$ – соответственно объемная плотность тепловой энергии и плотность теплового потока, определяемые:

$$Q(r, t) = \rho(r) \cdot C_p(r) \cdot T(r, t) \quad J(r, t) = -\lambda(r) \frac{\partial T(r, t)}{\partial r}, \quad (7)$$

здесь $T(r, t)$ – температура; $\rho(r)$ – плотность среды; $C_p(r)$ – ее удельная теплоемкость, $\lambda(r)$ – теплопроводность. Три последние величины и относятся к теплофизическим (локальным) характеристикам, на практике же в основном определяют теплопроводность. Часто эти характеристики являются кусочно-постоянными функциями координат.

Таким образом, решая прямое уравнение теплопроводности (6), подставляя решение в (2), и подбирая параметры в соответствии с вышеизложенным, определяются параметры, реализующие экстремум (1).

Для упрощения математического описания без сокращения общности результатов примем, что дефект описывается одним параметром λ . Для этого случая показано, что задача тепловой дефектометрии приводится к виду:

$$\Phi[T_n(\lambda, \alpha_0, t)] = \int_0^t (T_n(\lambda, \alpha_0, \tau) - T_a(\tau))^2 d\tau. \quad (8)$$

При возможности аналитического решения задачи определения $T_n(\lambda, \alpha_0, t)$ (прямой задачи теплопроводности) функционал (8) пре-

вращается в функцию относительно теплофизических параметров (2). Искомые характеристики определяются нахождением глобального минимума.

Проведя несложные математические преобразования, можно записать:

$$\Phi[T_n(t)] \equiv \Phi(\alpha_0, \lambda) = \frac{1}{\alpha_0^2} \int_0^t J_n^2(\lambda, \tau) d\tau + \frac{2}{\alpha_0} \int_0^t J_n(\lambda, \tau) (T_0(\tau) - T_a(\tau)) d\tau + \int_0^t (T_0(\tau) - T_a(\tau))^2 d\tau. \quad (9)$$

Экстремум (9) по искомой переменной (фактически этот экстремум условный) определяется путем приравнивая частной производной по соответствующему аргументу нулю с учетом (5). Например, по переменной α_0 :

$$\alpha_0(\lambda) = -\frac{\int_0^t J_n^2(\lambda, \tau) d\tau}{\int_0^t J_n(\lambda, \tau) (T_0(\tau) - T_a(\tau)) d\tau}. \quad (10)$$

Таким образом, задача свелась к нахождению минимума функции $\Phi(\lambda, \alpha_0(\lambda))$. Минимум этой функции (уже безусловный) определяется простым перебором: решая прямую задачу теплопроводности для достаточно большого набора λ , выделяют глобальный минимум.

Таким образом, описанный выше алгоритм позволяет определять численные значения областей внутренних нарушений сплошности на основе решения обратной задачи ТНК.

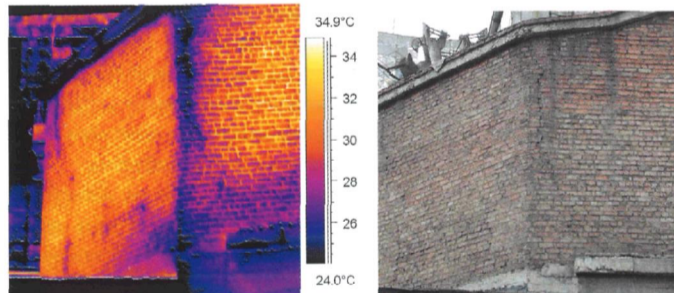
Оценка достоверности результатов теплового неразрушающего контроля

Принципиально важной задачей при серийном обследовании большого количества различных по конструкции объектов в реальных условиях их эксплуатации является оперативная оценка достоверности контроля.

Обычно для решения этой проблемы применяются лабораторные исследования с использованием специальных камер. Например, фрагмент исследуемого образца устанавливается на границе холодного и теплого отсеков термокамеры и создаются необходимые заранее определенные температурные режимы. Далее оценивается достоверность результатов. При всех очевидных преимуществах этот подход обладает существенными недостатками (низкой производительностью, достоверностью и т.п.), не позволяющими широко использовать его на практике.

Рассмотрим решение данной задачи путем аналитического (в частности, статистического) рассмотрения погрешностей при использовании экспериментальных данных.

Исследования проводились на примере одного из параметров, описывающих интегральную (по толщине) характеристику теплозащиты объекта контроля – сопротивление теплопередаче. Не нарушая общности исследований это позволило значительно повысить наглядность получаемых результатов при существенном упрощении математического аппарата.



Присос воздуха через трещины в кирпичной кладке. Имеет место разрушение теплоизоляции внутри газохода



Определение сопротивления теплопередаче стен и светопрозрачных конструкций

Сопротивление теплопередаче k -го типа образца в любой точке поверхности рассчитывается в соответствии с разработанным выше методом тепловой дефектометрии. Интегральная характеристика всей конструкции, например, приведенное сопротивление теплопередаче в целом зависит лишь от удельного веса разных участков и формулу для его определения можно представить в виде:

$$R^{-1} = \sum_{i=1}^n R_i^{-1} w_i \quad \sum_{i=1}^n w_i = 1, \quad (11)$$

где суммирование идет по типам материалов, w – удельные веса; n – общее число типов материалов. Последнее выражение (11) – условие нормировки.

Однако на практике наблюдаются отклонения (при использовании заявленных значений параметров). Более того, как показывает опыт, сопротивление теплопередаче R_k становится функцией положения на образце. Это происходит вследствие изменений в технологии производства, разных режимов эксплуатации и т.п. В то же время, на процесс измерения оказывает воздействие множество факторов, регулярный учет которых практически невозможен (например, порывы ветра, изменение влажности и т.п.). Таким образом, причины отличия проектного значения приведенного сопротивления от реального (где по причинам, указанным выше, необходимо ввести соответствующие поправки) и возникновения погрешностей при измерении носят слабо контролируемый и трудно-обозримый характер.

В силу этого введем предположение, что обе процедуры – измерения сопротивлений и заявления их проектных значений – имеют случайные характеристики.

Таким образом, оправданным является вероятностная интерпретация обеих указанных процедур. Рассмотрим следующую вероятностную модель. Пусть случайная величина ξ – измеренное значение сопротивления теплопередаче (11), η – та же величина, заявленная проектной организацией. Отметим, что эти величины можно считать состоящими из двух компонент: R_0^r – истинное значение сопротивления и флуктуационные компоненты (т.е. собственно те добавки, которые обеспечивают случайность). Выделение флуктуационных компонент (считающихся независимыми от истинного сопротивления R_0^r) вызвано необходимостью учета статистики ошибок вне зависимости от особенностей конкретного объекта.

Таким образом, примем, что статистика ошибок не зависит от объекта, т.е. их наличие является свойством именно методик измерения и проектирования. Будем считать, что функция распределения (плотность вероятности) результатов измерения равна $P(\xi)$, плотность же вероятности для значения приведенного сопротивления, заявляемого проектной организацией, обозначим через $Q(\eta)$.

Плотность вероятности получения при измерении результата ξ и, одновременно, для проектной организации заявления приведенного сопротивления η , выражается через плотность совместной вероятности $W(\xi, \eta)$ (т.н. теорема умножения вероятностей) [14]:

$$W(\xi, \eta) = W(\xi|\eta)Q(\eta), \quad (12)$$

где введена плотность условной вероятности $W(\xi|\eta)$ – плотность вероятности получить в результате измерения ξ при условии, что заявленное приведенное сопротивление η . Легко видеть, что связь между $P(\xi)$ и $W(\xi, \eta)$ (а в силу (12) и $Q(\eta)$) следующая:

$$P(\xi) = \int W(\xi, \eta) d\eta = \int W(\xi|\eta)Q(\eta) d\eta, \quad (13)$$

здесь интегрирование ведется по допустимым значениям соответствующих аргументов. Случайные величины ξ и η не независимы, это будет показано ниже. Функции распределения (12) и (13) нормированы на единицу.

Построим гистограмму отстроек измеренных сопротивлений от заявленных, т.е. $\eta - \xi$, тем самым исключается трудность в отношении различий истинных сопротивлений R_0^r для разных объектов – они сократятся при вычитании (рис. 1).

Далее отметим, что гистограмма на рис. 1 приближает вид плотности условной вероятности $W(\xi|\eta)$. Предполагая, что флуктуации не зависят от истинного значения R_0^r , объявляется, что не существует выделенных значений сопротивлений, и условная вероятность может зависеть лишь от разности $(\eta - \xi)$. С другой стороны, это требование (независимости характера флуктуаций от объекта), фактически, означает то, что результат усреднения по ансамблю объектов не отличается от усреднения по многократным проведенным измерениям на одном объекте. Тем самым, по анализу данных о ряде объектов можно судить о методике измерения в целом. Далее, сама процедура измерений обеспечивает получение именно $W(\xi|\eta)$. Ведь перед проведением теплового контроля имеется информация о сопротивлении, заявленном в проекте на контролируемый объект, т.е. о « η ».

Аппроксимируем гистограмму экспоненциальным распределением:

$$W(\xi|\eta) = \frac{1}{u} \exp\left(-\frac{\eta - \xi}{u}\right) \Theta(\eta - \xi), \quad (14)$$

где u – характерный масштаб спада (декремент), $\Theta(x)$ – ступенчатая функция Хевисайда (1 при $x > 0$ и 0 при прочих значениях аргумента).

Введем следующие предположения относительно функции распределения $\Theta(\eta)$. Пусть она будет аналогична по виду $W(\xi|\eta)$. Таким образом, $Q(\eta)$ запишется в виде:

$$Q(\eta) = \frac{1}{v} \exp\left(-\frac{\eta - R}{v}\right) \Theta(\eta - R), \quad (15)$$

где v – характерный масштаб спада.

Пусть вероятность значения сопротивления, лежащего в сегменте $[R_0^r - R\delta, R_0^r + R\delta]$, равна ϵ , где δ – допустимое относительное отклонение. Тогда, интегрируя (15) по указанному сегменту, можно в явном виде получить v :

$$v = -\frac{\delta R}{\ln(1 - \epsilon)}. \quad (16)$$

Таким образом, вычисляя интеграл (13) с учетом (14) и (15), нетрудно получить явный вид функции распределения для результатов измерения $P(\xi)$:

$$P(\xi) = \begin{cases} \frac{\exp\left(\frac{R - \xi}{v}\right)}{u + v}, & \xi > R \\ \frac{\exp\left(\frac{\xi - R}{u}\right)}{u + v}, & \xi \leq R. \end{cases} \quad (17)$$

Далее получим средние значения и дисперсии плотностей вероятностей (17) и (16). Для заявленных проектных значений сопротивлений для среднего и значений дисперсии соответственно из (15) имеем:

$$\langle \eta \rangle = R + v \quad \sigma^2(\eta) = v^2. \quad (18)$$

Для значений сопротивлений, полученных в результате измерений, среднее и дисперсия из (17) запишется в виде:

$$\langle \xi \rangle = R + v - u \quad \sigma^2(\xi) = u^2 + v^2. \quad (19)$$

Выражения (18) и (19) позволяют нам оценить достоверность

методики ТНК конструкций с помощью подсчета относительной погрешности:

$$E = \frac{|v - u|}{R}. \quad (20)$$

Таким образом, предложенный метод позволяет оперативно оценивать достоверность результатов теплового неразрушающего контроля элементов строительных конструкций в реальных условиях их эксплуатации. Созданный метод тепловой дефектометрии позволил значительно расширить область применения теплового неразрушающего контроля конструкций различных отраслей промышленности.

Библиографический список:

1. Будадин О.Н., Потапов А.И., Колганов В.И. и др. *Тепловой неразрушающий контроль изделий*. – М.: Наука, 2002, 476 с.
2. Будадин О.Н., Рапопорт Д.А. *Метод тепловой дефектометрии // Дефектоскопия*, 1984 № 10.
3. Вавилов В.П. *Информативность тепловых полей в задачах активного контроля качества // Дефектоскопия*, 1987, № 3, с. 67–77.
4. Лебедев О.В., Будадин О.Н., Абрамова Е.В. *Разработка и исследование обратной задачи теплового неразрушающего контроля. 3-я Международная конференция «Компьютерные методы и обратные задачи в неразрушающем контроле и диагностике»*, г. Москва, 2002 г.
5. Будадин О.Н., Куц Д.В., Рапопорт Д.А. *Обратная задача автоматизированного теплового контроля // Дефектоскопия*, 1988, № 5, с. 64–68.
6. Казаров Ю.К., Будадин О.Н., Троицкий-Марков Т.Е., Лебедев О.В. *Измерения в электромагнитных полях*. – М.: ВИНТИ РАН, 2003. – 196 с.
7. Budadin O., Lebedev O. *Solution of inverse problem of nonstationary heat conductivity equation*. – 16th World Conference on Nondestructive Testing, Montreal Canada. August 30-September 3, 2004.
8. Бахвалов Н.С., Жидков Н.П., Кобельков Г.М. *Численные методы*. – М.: Лаборатория базовых знаний, 2002.
9. Андронов А.А., Витт А.А., Хайкин С.Э. *Теория колебаний*. – М.: Физматлит, 1959 г.
10. Тихонов А.Н., Самарский А.А. *Уравнения математической физики*. – М.: Наука, 1977.
11. Патент № 2162597. Россия. *Тепловой неразрушающий контроль изделий. Устройство 1* / Будадин О.Н., Потапов А.И., Колганов В.И. и др. – М.: Наука, 2002, 476 с.
12. Патент № 2171469. Россия. *Способ неразрушающего контроля качества объекта и устройство для его осуществления* / Будадин О.Н., Колганов В.И. № 2000127890/28. Заявл. 10.11.2000. Оpubл. 27.07.2001. Бюлл. № 21.
13. 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 XXI века* – № 9, 2002. – с. 21–23.
14. Гнеденко Б.В. *Курс теории вероятностей*. М.: Физматлит, 1961.