

УДК 620.179.13

Б.Н. БАЖЕНОВ<sup>1</sup>, С.И. МЕЛЬНИК<sup>2</sup>, А.Г. ЧУМАКОВ<sup>1</sup><sup>1</sup>ФГУП Московское машиностроительное производственное предприятие «Салют»<sup>2</sup>Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Украина

## МЕТОД ТЕПЛОВОГО КОНТРОЛЯ ЛОПАТОК ТУРБИН С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕПЛОВОЙ ВОЛНЫ

Дано теоретическое обоснование возможности применения метода тепловой волны для проведения теплового контроля лопаток турбин. Проанализировано влияние неоднородности излучающей способности поверхности на эффективность контроля. Предложен алгоритм фильтрации таких артефактов. Представлены результаты компьютерного моделирования процедуры контроля.

тепловой контроль, лопатки турбин, тепловая волна, дефекты, обратная задача

### Введение

Среди методов активного теплового контроля метод тепловой волны используется сравнительно редко. Это связано в первую очередь с тем, что без дополнительной обработки на термограмме поверхности внутренние теплофизические неоднородности не проявляются. Их влияние сводится лишь к незначительному изменению температурного градиента и сгущению изотерм [1]. Кроме того, артефакты, связанные с неоднородностью коэффициента излучения поверхности, зачастую существенно превышают уровень полезного сигнала. Ранее нами были разработаны теоретические основы метода и получены предварительные экспериментальные результаты [2]. Вместе с тем, низкая разрешающая способность тепловизора и недостаточная температурная чувствительность не позволили в полной мере использовать полученные результаты на практике. В последнее время появились высокочувствительные тепловизоры, которые могут обеспечить разрешающую способность до  $18\mu\text{m}$  и чувствительность – до  $0,002\text{K}$  [3]. Это позволяет рассчитывать на качественно новый уровень теплового контроля практически во всех существующих методах, включая и метод тепловой волны. Основы. Однако для этого могут потребоваться принципиально более точные

модели. Целью настоящей работы является построение такой модели для метода тепловой волны, иллюстрация эффективности расшифровки термограмм с помощью численного эксперимента и решение принципиальной проблемы фильтрации артефактов, связанных с неоднородностью коэффициента излучения.

### 1. Теплофизическая модель распределенных дефектов в лопатках

В настоящей работе мы ограничимся рассмотрением распределенных дефектов, основным признаком которых является отсутствие скачкообразного изменения теплофизических свойств. В дальнейшем эта модель может быть обобщена и на локальные дефекты.

Лопатку можно рассматривать как пластину переменной толщины  $h(x, y)$  с эффективным коэффициентом теплопроводности  $\lambda$  и температуропроводности  $a$  (наличие каналов и конструктивных пустот в лопатке учтено в зависимости  $h(x, y)$ ).

Математическое описание теплофизической модели базируется на трехмерном уравнении теплопроводности Фурье. Интегрируя уравнение теплопроводности по координате, перпендикулярной наблюдаемой поверхности, получим двумерное уравнение:

$$\nabla(\lambda h \nabla \tilde{T}) - (\alpha_1 + \alpha_2) \tilde{T} = c \rho h \frac{\partial \tilde{T}}{\partial t}, \quad (1)$$

где 
$$\tilde{T} = \frac{1}{h(x, y)} \int_{z \min(x, y)}^{z \max(x, y)} T(x, y, z) dz;$$
 а

$h(x, y) = z \max(x, y) - z \min(x, y)$  – локальное значение толщины стенки лопатки.  $c; \rho; \lambda$  – как обычно, теплофизические характеристики материала стенки (удельная теплоемкость, плотность и удельная теплопроводность), а  $\alpha_1; \alpha_2$  – эффективные коэффициенты теплоотдачи на внешней и внутренней поверхностях. Отсюда можно получить формулу для расчета относительного градиента толщины  $\nabla h / h$ .

$$\frac{\nabla h}{h} \nabla \tilde{T} = \frac{c \rho}{\lambda} \frac{\partial \tilde{T}}{\partial t} + \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{h} \tilde{T} - \nabla^2 \tilde{T}. \quad (2)$$

Из последнего уравнения видно, в частности, что в отсутствие градиента толщины правая часть (2) должна обращаться в ноль. Это и позволяет использовать ее как индикатор наличия внутренних неоднородностей. Фактически, значение левой части (2) определяется проекцией вектора  $\nabla h / h$  на направление движения тепловой волны:

$$\frac{\nabla h}{h} \nabla \tilde{T} = \frac{1}{h} \left( \frac{\partial h}{\partial x} \cdot \frac{\partial \tilde{T}}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial y} \cdot \frac{\partial \tilde{T}}{\partial y} \right). \quad (3)$$

Отсюда следует, что для получения более полной информации о профиле поверхности необходимы результаты, по крайней мере, двух экспериментов с прохождением тепловой волны в различных (желательно перпендикулярных) направлениях.

Одним из факторов, искажающим результат восстановления профиля, можно считать наличие слагаемого  $\frac{\alpha_1 + \alpha_2}{h} \tilde{T}$  с неизвестным заранее значением

$h$ . Однако оценка, сделанная на основании реальных экспериментов, показывает, что в силу малого значения критерия  $Bi \approx 10^{-4}$  им можно пренебречь. Для больших значений теплоотдачи его можно приблизительно учесть, подставив номинальное значение толщины пластины в рассматриваемой точке, заданное априорно.

## 2. Результаты численного эксперимента

Для иллюстрации эффективности предлагаемой методики выявления неоднородностей нами был проведен численный эксперимент по прохождению тепловой волны в однородной пластине с внесенными дефектами. Был использован пакет для моделирования физических процессов «FEMLAB-3». При вычислении относительного градиента толщины, как видно из (2), (3), в знаменателе итогового выражения стоит, фактически, модуль градиента температуры. Для иллюстрации эффективности метода мы ограничились его вычислением. Как видно из рис. 1 – 4, даже только его вычисление позволяет выявить дефекты и их форму в идеализированной модели в отсутствии шумов. При этом точность и разрешающая способность современных тепловизоров, указанная выше, более чем на порядок превосходит требуемые значения.

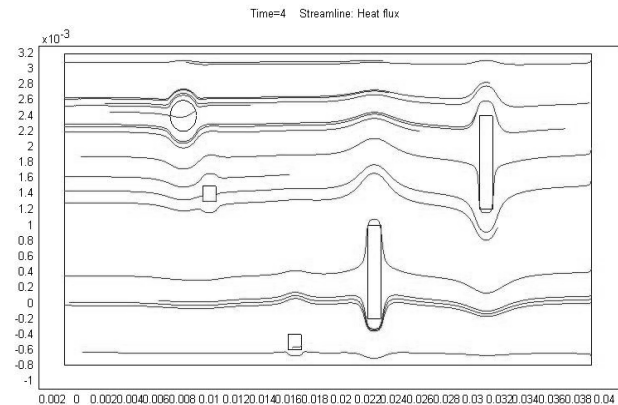


Рис. 1. Линии тока тепла аналогичны линиям тока жидкости, обтекающей дефекты

## 3. Алгоритм фильтрации артефактов, связанных с неоднородностью коэффициента излучения

Основным источником погрешностей, как в методе тепловой волны, так и в других тепловизионных методах контроля, является неоднородность излучающей способности поверхности объекта.

Так как она даже в случае специальной подготовки поверхности может составлять 1 – 2%, а без нее – до 10%, то артефакты, возникающие за счет

этого, часто превышают эффект от истинных неоднородностей.

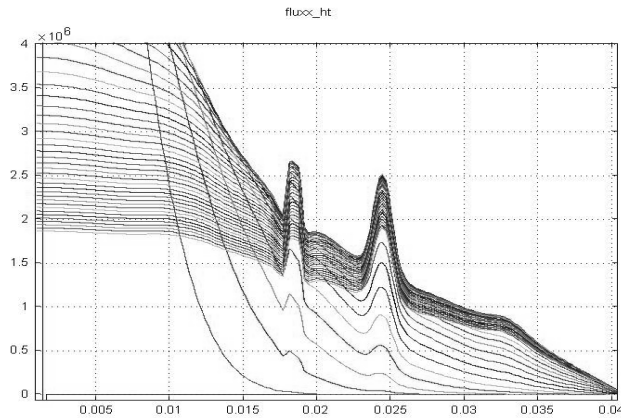


Рис. 2. Градиент температурного поля на поверхности лопатки может служить надежным критерием искажения линий тока над дефектами. Следует отметить резкую границу наступления регулярного режима, когда волна доходит до дефекта и значение градиента меняется незначительно

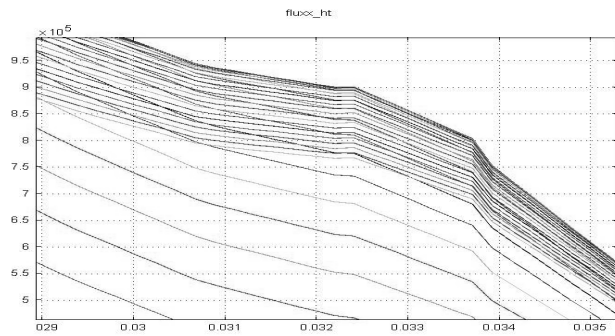


Рис. 3. Даже для удаленных от поверхности дефектов значения градиента все еще достаточны для его надежного обнаружения. При этом над острыми границами дефекта наблюдается излом линий градиента, что позволяет точнее определять их границы

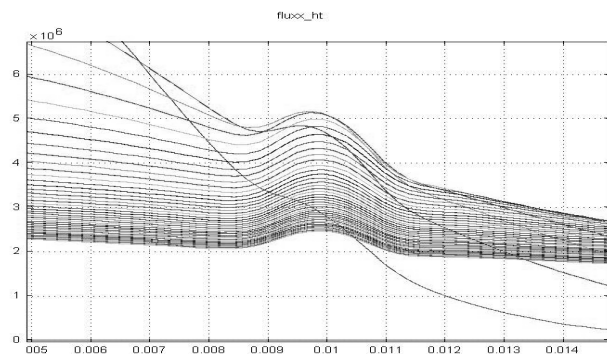


Рис. 4. Форма профиля градиента над дефектом с гладкими краями

В рассматриваемом диапазоне температур (30 – 60 K) можно считать коэффициент черноты постоянным и записать истинную температуру поверхно-

сти (и практически равную ей усредненную по толщине температуру) как

$$\tilde{T} - T_0 = k(x, y) \cdot (T_m - T_0), \quad (4)$$

где  $T_m$  – результат измерения температуры, записанный на термограмме, а  $T_0$  – температура окружающей среды.

С учетом сделанных приближений и оценок окончательно получим:

$$\frac{\nabla h}{h} \cdot \nabla(kT_m) = \frac{c\rho}{\lambda} \frac{\partial}{\partial t}(kT_m) - \nabla^2(kT_m). \quad (5)$$

Как видно из (5), задача определения распределения  $h(x, y)$  на основании измеренного  $T_m(x, y, t)$  осложняется тем, что распределение  $k(x, y)$  также не известно. Можно заметить, однако, что все, входящие в уравнение (5) коэффициенты, от времени не зависят. Его можно записать в виде:

$$\left( \frac{\nabla h}{h} \cdot \frac{\nabla k}{k} + \frac{\nabla^2 k}{k} \right) + \left( \frac{\nabla h}{h} + 2 \frac{\nabla k}{k} \right) \frac{\nabla T_m}{T_m} = \left( \frac{c\rho}{\lambda} \right) \frac{\partial}{\partial t} \frac{T_m}{T_m} - \frac{\nabla^2 T_m}{T_m}. \quad (6)$$

Из этого уравнения следует, что две временные зависимости  $\frac{\nabla T_m}{T_m}(t)$  и  $\left( \frac{c\rho}{\lambda} \right) \frac{\partial}{\partial t} \frac{T_m}{T_m} - \frac{\nabla^2 T_m}{T_m}$ , каждая из которых может быть вычислена на основании измеряемых данных  $T_m(x, y, t)$ , связаны линейно в каждом пикселе термограммы:

$$\left( \frac{c\rho}{\lambda} \right) \frac{\partial}{\partial t} \frac{T_m}{T_m} - \frac{\nabla^2 T_m}{T_m} = A(x, y) + \vec{B}(x, y) \frac{\nabla T_m}{T_m}. \quad (7)$$

Предположим, для определенности, что направление тепловой волны совпадает с осью  $x$ . Тогда получим

$$\left( \frac{c\rho}{\lambda} \right) \frac{\partial}{\partial t} \frac{T_m}{T_m} - \frac{\nabla^2 T_m}{T_m} = A(x, y) + B_x(x, y) \frac{\partial T_m / \partial x}{T_m}. \quad (8)$$

Минимизируя СКО по всем кадрам термофильма для каждого пикселя термограммы, мы можем определить коэффициенты  $A(x, y)$  и  $B_x(x, y)$  линейной зависимости с достаточной точностью. Так как в уравнение (6) входит скалярное произведение век-

торов  $\frac{\nabla h}{h}$  и  $\frac{\nabla k}{k}$ , то для их определения недостаточно данных о прохождении волны в одном направлении. Тем не менее, даже в этом случае удается отфильтровать артефакты при обработке термофильма. Для этого достаточно оставить только те результаты расшифровки, для которых  $A(x, y) = 0$ , так как в противном случае можно связать их с неоднородностью коэффициента черноты ( $\nabla k/k \neq 0$ ). Если при этом и  $B_x(x, y) = 0$ , то и  $\nabla h/h = 0$ . А если нет, то получим окончательную формулу:

$$\frac{\partial h / \partial x}{h} = \frac{\left(\frac{c\rho}{\lambda}\right) \partial / \partial t T_m - \nabla^2 T_m}{\partial T_m / \partial x}. \quad (9)$$

В случае, когда имеются данные о прохождении волны в двух направлениях, мы можем определить дополнительно  $B_y(x, y)$ , и, соответственно  $\frac{\partial h / \partial y}{h}$ .

На этом этапе обработки данных термофильма мы видим, что использование временного критерия позволяет отфильтровать артефакты, связанные с неоднородностью излучающей способности поверхности. Точность этого алгоритма зависит, прежде всего, от точности определения коэффициентов линейной аппроксимации  $A(x, y); B(x, y)$  в каждом из пикселей термограммы. А это, в свою очередь, связано с режимом нагрева лопатки и параметров съемки фильма. В общем случае возникает задача оптимизации этих параметров с целью повышения точности метода.

На следующем этапе обработки появляется возможность восстановить профиль внутренней стенки лопатки  $h(x, y)$ , используя данные о  $\nabla h/h(x, y)$  и один из стандартных интегральных методов.

### Заключение

В результате проведенного теоретического и численного анализа установлено, что:

– при проведении теплового контроля лопаток по методике тепловой волны возможно выявление как

приповерхностных, так и глубоко расположенных дефектов в результате применения специальных алгоритмов обработки термофильма;

– чувствительность и разрешающая способность современных тепловизоров достаточна и по крайней мере на порядок превышает уровень сигнала, соответствующего реальным параметрам процедуры контроля;

– основным фактором, не позволяющим применять ранее разработанные алгоритмы расшифровки, является неоднородность коэффициента излучения поверхности лопатки;

– разработан алгоритм, который позволяет за счет учета динамики прохождения тепловой волны отфильтровывать артефакты на термограммах;

– в связи с этим возникает дополнительное требование к быстродействию тепловизора, которое также может быть выполнено на современном оборудовании.

### Литература

1. Стороженко В.А., Вавилов В.П., Волчек А.Д. Неразрушающий контроль качества промышленной продукции активным тепловым методом. – К.: Техніка, 1988. – 127 с.
2. Контроль качества охлаждаемых лопаток турбин методом тепловой волны / С.И. Мельник, Б.Н. Баженов, В.А. Стороженко, А.Г. Чумаков // Авиационно-космическая техника и технология: Сб. научн. тр. – Х.: ХАИ. – 2002. – Вып. 30 Двигатели и энергоустановки. – С. 141-144.
3. Поставка и обслуживание промышленного оборудования: Сайт [Электрон. ресурс]. – Режим доступа: <http://www.pergam.ru/teplo/pergam/p640>.

*Поступила в редакцию 5.05.2007*

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. Л.М. Любчик, Национальный технический университет «ХПИ», Харьков.