

# Контроль. Диагностика

TESTING. DIAGNOSTICS



8(110) 2007  
август

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

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

Certified ISO 9001-2000 by

**BVQI**

Профессиональное оборудование  
для неразрушающего контроля



Ультразвуковые  
дефектоскопы  
для металлов  
и пластиков



Ультразвуковые  
толщиномеры  
и толщиномеры  
покрытий



Динамические и  
ультразвуковые  
твердомеры



Магнитные  
коэрцитиметры



Оптические и видео-  
эндоскопы



Вихретоковые  
дефектоскопы



Ферритометры и  
измерители  
электропроводности



Промышленные  
системы  
контроля

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

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

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

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

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

# Контроль. Диагностика



№ 8(110) август 2007

Главный редактор

В.В. КЛЮЕВ, акад. РАН

Заместители

главного редактора:

В.Г. ШЕВАЛДЫКИН

П.Е. КЛЕЙЗЕР

Редакционный совет:

В.Я. БЕЛОБРАГИН

О.Н. БУДАДИН

В.П. ВАВИЛОВ

Б.И. ГЕРАСИМОВ

В.А. ГОЛЕНКОВ

Э.С. ГОРКУНОВ

А.К. ДЕНЕЛЬ

А.Ю. ДЕТКОВ

Ю.Б. ДРОБОТ

И.Н. ЕРМОЛОВ

И.Н. ЖЕСТКОВА

С.П. ЗАРИЦКИЙ

Г.В. ЗУСМАН

А.В. КОВАЛЕВ

В.С. КОТЕЛЬНИКОВ

В.Р. КУЗЬМИН

В.Ф. МУЖИЦКИЙ

В.И. МУРАВЬЕВ

Е.Г. НАХАПЕТЯН

П.П. ПАРХОМЕНКО

К.В. ПОДМАСТЕРЬЕВ

О.Н. РУМЯНЦЕВА

Н.А. СЕМАШКО

Ю.С. СТЕПАНОВ

А.Г. СУСЛОВ

В.В. 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 издательство.  
Тел.: (495) 268 36 54; 268 69 19  
Факс: (495) 269 48 97; 268 85 26  
Http://www.Mashin.ru  
E-mail: td@mashin.ru

## СОДЕРЖАНИЕ

### ● КОНТРОЛЬ, ДИАГНОСТИКА ЗА РУБЕЖОМ

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

### ● ТЕОРИЯ, МЕТОДЫ, ПРИБОРЫ, ТЕХНОЛОГИИ

<b>Авраменко В.Г., Лебедев О.В., Будадин О.Н., Абрамова Е.В.</b> Использование метода эталонного слоя для определения сопротивления теплопередаче наружных ограждающих конструкций зданий . . . . .	6
<b>Баранов С.В., Будадин О.Н., Лебедев О.В., Слитков М.Н.</b> Тепловой контроль и диагностика технического состояния плоских нагревательных элементов при эксплуатации с оценкой остаточного ресурса . . . . .	15
<b>Авраменко В.Г., Лебедев О.В., Будадин О.Н., Абрамова Е.В.</b> Метод корректного определения плотности теплового потока . . . . .	23
<b>Крюков А.В., Закарюкин В.П., Степанов А.Д., Астахин С.М.</b> Тепловизионное диагностирование в системах тягового электроснабжения . . . . .	27
<b>Нагулин Н.Е., Нагулин С.Н.</b> Применение алгоритма итерационного поворота вектора для построения приемного тракта ультразвукового сканера . . . . .	31
<b>Завойчинский Б.И., Завойчинская Э.Б.</b> Методика оценки остаточного срока службы и периодичности проведения диагностики технического состояния трубопроводов (Часть 4) . . . . .	36
<b>Каргапольцев В.П., Симахин И.Я.</b> Энергосбережение с применением защитного мониторинга электродвигателей . . . . .	46
<b>Бочаров В.М., Головаш А.Н., Шахов В.Г.</b> Математические алгоритмы технического диагностирования . . . . .	48
<b>Ксенофонтов В.Е.</b> Разработка алгоритмов диагностирования навигационного комплекса летательного аппарата на основе его многоуровневой декомпозиции . . . . .	52
<b>Кольцов В.Н., Захаров М.А.</b> Диагностика силовых кабельных линий . . . . .	59
<b>Волков С.П., Никоненко В.А.</b> Метрологическое обеспечение неконтактных средств измерения температуры . . . . .	63
<b>Ковалевский В.В., Фролов А.В.</b> Оценка экологической безопасности автомобильных дизелей термохимически-резистивным методом . . . . .	71
<b>Павлов И.В., Гордиенко В.Е.</b> К вопросу совершенствования методов диагностики технического состояния конструкций . . . . .	73

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



нала правдоподобия позволяет найти искомое сопротивление теплопередаче исследуемого объекта.

#### Заключение

Таким образом, разработан метод эталонного слоя, позволяющий определять теплофизические характеристики материалов наружных ограждающих конструкций зданий и строительных сооружений. Искомые характеристики исследуемого фрагмента ограждающих конструкций рассчитываются на основе процедуры минимизации функционала правдоподобия. Метод эталонного слоя существенно основывается на предположении об одномерном характере процесса теплопередачи внутри фрагмента, поэтому применим при условии, что линейные размеры эталонного слоя в плоскости, параллельной поверхности фрагмента, более чем в 4 раза превосходят толщину исследуемого фрагмента ограждающих конструкций. Использование частотного анализа функционала правдоподобия значительно уменьшает время расчетов и повышает достоверность определения сопротивления теплопередаче фрагмента. В статье предложена возможная конструкция эталонного слоя. Практическое использование метода эталонного слоя позволяет обеспечить высокую достоверность определения теплофизических характеристик материалов наружных ограждающих конструкций зданий и строительных сооружений.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Пат. 2151388. Способ неразрушающего контроля качества объекта / О.Н. Будадин, Т.Е. Троицкий-Марков, Е.В. Абрамова, В.И. Сучков.
2. Пат. 2162597. Устройство для неразрушающего контроля качества объекта / О.Н. Будадин, Т.Е. Троицкий-Марков, Е.В. Абрамова, В.И. Сучков.
3. Будадин О.Н., Потанов А.И., Колганов В.И. и др. Тепловой метод неразрушающего контроля изделий. М.: Наука, 2002. 476 с.
4. Будадин О.Н., Абрамова Е.В., Лебедев О.В., Родин М.А. Аппаратура теплового неразрушающего контроля и определения теплотехнических характеристик зданий и строительных сооружений // Строительные материалы, оборудование, технологии 21 века. 2002. № 9(44).
5. ГОСТ 25380-82. Здания и сооружения. Метод измерения плотности тепловых потоков, проходящих через ограждающие конструкции. Утв. и введ. пост. Гос. ком. СССР по делам строительства 14.07.1982. № 182. М., 1982.
6. Graaf F. van der. Heat Flux Sensors // A comprehensive series. Vol. 4. Ch. 8, Berlin: VCH Verlagsgesellschaft, 1989.
7. ГОСТ 26254-84. Здания и сооружения. Методы определения сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций. Введ. пост. Гос. ком. СССР по делам строительства 2.08.1984. № 127. М., 1985.
8. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. 2-е изд. М.: Энергия, 1977.
9. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. М.: Наука, 1977.
10. Бахвалов Н.С., Жидков Н.П., Кобельков Г.М. Численные методы. М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2002.

С.В. Баранов, О.Н. Будадин, О.В. Лебедев, М.Н. Слитков (Технологический институт энергетических исследований, диагностики и неразрушающего контроля "ВЕМО", Москва)

### Тепловой контроль и диагностика технического состояния плоских нагревательных элементов при эксплуатации с оценкой остаточного ресурса

Для поддержания оптимального температурного режима функционирования электронного оборудования и комфортных условий для человека в различных климатических условиях на ряде ответственных объектов широко применяются плоские нагревательные элементы (НЭСТ). По отношению к другим устройствам аналогичного назначения они имеют ряд преимуществ: малый объем при большой теплоотдаче, простота управления, низкие напряжения эксплуатации, простота технологии изготовления (относительно низкие цены) и т.п., что и определило их широкое применение.

В последние годы изношенность оборудования производства, снижение качества сырья и другие аналогичные причины приводят к снижению качества изготавливаемой продукции, в том числе и НЭСТ. Поэтому, несмотря на достаточно высокую эксплуатационную надежность, неоднократно имели место случаи выхода из строя (иногда и с возгоранием) плоских нагревательных элементов на различных ответственных объектах. Это создавало реальную угрозу безопасности как для обслуживающего персонала, так и для весьма сложного и дорогостоящего оборудования.

Таким образом, создание достоверного метода контроля НЭСТ как в стадии производства, так и в условиях их эксплуатации с определением технического состояния и оценкой остаточного ресурса является своевременной и актуальной задачей.

Как показали исследования, основным признаком дефектности (неудовлетворительного технического состояния) плоских нагревательных элементов (нагревателей) является критическое превышение температуры любого участка поверхности значения, задаваемого техническими условиями. Причиной этого является, как правило, изменение электрического сопротивления, обусловленное указанными причинами. Поэтому целесообразно создание технологии контроля качества и технического состояния НЭСТ, основанной на анализе температурных полей поверхности.

Тепловой (тепловизионный) метод контроля позволяет качественно определять текущее состояние теплового поля поверхности, но не решает главных задач диагностики технического состояния НЭСТ: идентификации дефектов, вызывающих локальные изменения температурного поля поверхности; оценки остаточного ресурса контролируемого НЭСТ – времени функционирования НЭСТ до выхода его из строя; оперативного управления и корректировки технологических параметров производства НЭСТ.

Принципиально качественный скачок развития диагностики объектов по температурным полям произошел в последнее десятилетие. Это связано, во-первых, с появлением современной портативной тепловизионной техники, а во-вторых, с созданием современного математического аппарата [1, 2], позволяющего решать обратные задачи нестационарной теплопередачи, что дало возможность перехода от дефектоскопии (обнаружения дефектов) к дефектометрии (распознаванию внутренних дефектов, определению их характеристик и оценке остаточного ресурса изделий).

Таким образом, появилась реальная возможность решения актуальных для практики задач диагностики технического состояния нагревательных элементов по анализу их температурных полей и оценки их остаточного ресурса:

- оперативный контроль технического состояния нагревательных элементов в условиях производства и эксплуатации, в том числе в условиях штатной нагрузки с оценкой их остаточного ресурса;

- определение причин нештатного функционирования нагревательных элементов, в том числе выявления дефектных участков (участков, не соответствующих нормативным документам), разработка рекомен-

даций для изменения технологии производства или эксплуатации.

Стеклопластиковый тонкослойный электронагреватель (рис. 1) изготовлен в виде получаемого прессованием трехслойного "сэндвича", внешними слоями которого являются электроизоляционные слои, а внутренним – электропроводящий слой.

Электропроводящий слой представляет собой полимерную композицию, состоящую из стеклоткани, пропитанной связующим с электропроводящими добавками, например мелкодисперсной угольной сажей. Подвод питания к греющему слою осуществляется специальными медными токоведущими шинами. Концентрация графита, плотность, температура пропитки и т.п. определяются требованием получения необходимого электрического сопротивления  $R$  для выделения соответствующего количества энергии. Основной характеристикой, определяющей параметры температурного поля, является плотность и распределение по площади электрического сопротивления греющего слоя. Таким образом, можно определить дефект греющего слоя как участок с координатами контура  $S(x, y)$ , имеющий электрическое сопротивление  $R_d$ , отличное от номинального  $R_{ном}$ . На надежность НЭСТ наиболее сильно влияют дефектные участки с пониженным сопротивлением  $R_d < R_{ном}$ , так как на них происходит наиболее сильное выделение энергии:

$$q_{wi} = \lim_{\Delta F \rightarrow 0} \frac{\Delta P}{\Delta S},$$

где  $\Delta P$  – выделяемая мощность,  $\Delta S$  – элементарная площадь.

Это ведет к прогару стеклопластикового слоя, выходу НЭСТ из строя и, если не принять соответствующих мер, к возгоранию НЭСТ.

Результаты исследований позволили сформулировать требования к тепловой дефектометрии НЭСТ. Основная задача – идентифицировать дефекты, вызывающие температурные аномалии, и определить их характеристики, для чего необходимо с минимальной погрешностью установить теплофизические характеристики объекта и коэффициенты теплоотдачи  $\alpha_i$  на его поверхностях. Дефектометрия в общем случае ос-

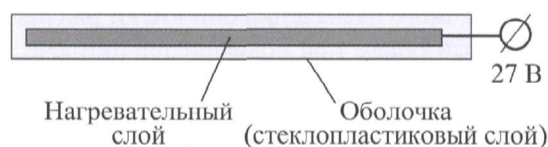


Рис. 1. Типовой эскиз НЭСТ



нована на решении обратной задачи в многослойной области, которая сводится к минимизации функционала, где под  $R$  понимается электрическое сопротивление:

$$(R, \alpha) = \min \sum_i^{i_{\max}} \{T_n [S_d(x, y)] - T_r(\alpha_i, R_i(x, y), x, y)\}^2,$$

где  $\alpha_i = \alpha_{\min} \dots \alpha_{\max}$ ,  $R_i(x, y) = R(x, y)_{\min} \dots R(x, y)_{\max}$ ,  $T_r(x, y)$  – расчетное модельное значение температурного поля при различных  $R(x, y)$  и  $\alpha$ ;  $T_r(x, y) = T_{\text{out}}(x, y) + U^2(t_i)/(R(x, y)\alpha S_d(x, y))$ ;  $T_n(S_d(x, y))$  – измеренное значение температурного поля при напряжении питания  $U(t_i)$ ;  $T_{\text{out}}(x, y)$  – температура окружающей среды.

Для повышения достоверности решения обратной задачи за многослойный объект принимается совокупность материалов границ замкнутого объема, в котором функционирует НЭСТ, воздушной прослойки и непосредственно слоев нагревательного элемента. Из общего сопротивления теплопередаче многослойного объекта вычленяется сопротивление теплопередаче НЭСТ и определяется распределение электрического сопротивления по его поверхности.

В рамках описываемого алгоритма предполагается, что температуры поверхностей  $T_{(\text{in}, \text{out})}^{\text{surf}}$  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  $t = 0$ ; всего  $N$  измерений). Для исключения изменений температуры, характерный период которых равен  $\delta\tau$ , проводится быстрое Фурье-преобразование:

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

Затем зануляются все гармоники  $X_n$  с номерами

$$n = (k+1) \dots N+1-k, \quad k = 1 + \text{round}\left(\frac{Ndt}{\delta\tau}\right). \quad (2)$$

На конечном этапе проводится обратное Фурье-преобразование:

$$\begin{aligned} \bar{T}_{(\text{in}, \text{out})}^{\text{surf}}(t_n) = \\ = \text{Re} \left[ \sum_{k=1}^N \tilde{X}_{(\text{in}, \text{out})k}^{\text{surf}} \exp\left(-\frac{2i\pi(n-1)(k-1)}{N}\right) \right], \end{aligned} \quad (3)$$

где функция  $\text{Re}(\dots)$  выделяет вещественную часть числа. Аналогично преобразуются температурные серии внутренней и внешней воздушной среды.

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 и вводятся рассчитанные температурные серии внутренней  $\tilde{T}_{\text{in}}^{\text{air}}$  и внешней воздушной среды  $\tilde{T}_{\text{out}}^{\text{air}}$ , определяемые следующими соотношениями:

$$\tilde{T}_{\text{in}}^{\text{air}}(t_i, \{\Theta_j\}, \alpha_{\text{in}}) = T_{\text{in}}^{\text{surf}}(t_i) + I^{(\text{in})}(t_i, \{\Theta_j\})/\alpha_{\text{in}}; \quad (4)$$

$$\tilde{T}_{\text{out}}^{\text{air}}(t_i, \{\Theta_j\}, \alpha_{\text{out}}) = T_{\text{out}}^{\text{surf}}(t_i) - I^{(\text{out})}(t_i, \{\Theta_j\})/\alpha_{\text{out}}. \quad (5)$$

При истинных значениях теплофизических характеристик слоев объекта измеренные и рассчитанные температурные серии максимально близки. Причем кривые должны быть близки также на любом подынтервале температурной серии. Степень близости кривых удобно рассчитывать в смысле нормы среднеквадратичной невязки.

Пусть вся температурная история разбита на  $N_i$  подынтервалов. Границы  $i$ -го временного подынтервала обозначим  $\tau_i \dots \tau_{i+1}$ . Введем следующие функционалы:

$$\begin{aligned} D_i^{(\text{in}, \text{out})}(\{\Theta_j\}, \alpha_{\text{in}, \text{out}}) = \\ = \frac{\Delta t}{\tau_{i+1} - \tau_i} \sum_{\tau_i}^{\tau_{i+1}} (\tilde{T}_{\text{in}, \text{out}}^{\text{air}}(t_i, \alpha_{\text{in}, \text{out}}, \{\Theta_j\}) - T_{\text{in}, \text{out}}^{\text{air}}(t_i))^2. \end{aligned} \quad (6)$$

$D_i^{(\text{in}, \text{out})}(\{\Theta_j\}, \alpha^{(\text{in}, \text{out})})$  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 находят как математическое ожидание всей выборки реализуемых минимумов.

Произведя математические преобразования, запишем выражение для функционала правдоподобия (для краткости не указывается индекс  $i$ ):

$$D^{(\text{in})}(\{\Theta_j\}, \alpha^{(\text{in})}) = S_1 - 2 \frac{S_2(\{\Theta_j\})}{\alpha^{(\text{in})}} + \frac{S_3(\{\Theta_j\})}{(\alpha^{(\text{in})})^2}; \quad (7)$$

$$S_1 = \frac{\Delta t}{\tau_{i+1} - \tau_i} \sum_{\tau_i}^{\tau_{i+1}} (T_{in}^{air}(t_i) - T_{in}^{surf}(t_i))^2;$$

$$S_2(\{\Theta_j\}) = \frac{\Delta t}{\tau_{i+1} - \tau_i} \sum_{\tau_i}^{\tau_{i+1}} (T_{in}^{air}(t_i) - T_{in}^{surf}(t_i)) I^{(in)}(t_i, \{\Theta_j\});$$

$$S_3(\{\Theta_j\}) = \frac{\Delta t}{\tau_{i+1} - \tau_i} \sum_{i=1}^{N^*} I^{(in)}(t_i, \{\Theta_j\}).$$

Выражение для коэффициента теплоотдачи, реализующего минимум:

$$\alpha^{(in)} = \frac{S_3(\{\Theta_j\})}{S_2(\{\Theta_j\})}. \quad (8)$$

В результате функционал правдоподобия (1) сводится к функции, зависящей только от теплофизических характеристик слоев:

$$D^{(in)}(\{\Theta_j\}) = S_1 - \frac{S_2^2(\{\Theta_j\})}{S_3(\{\Theta_j\})}. \quad (9)$$

Аналогичное выражение справедливо и для внешней поверхности.

Рассмотрим влияние ошибок входных данных (результатов измерений и исходных данных для расчетов) на результаты решения обратной задачи. Данная проблема особенно актуальна при проведении работ в полевых условиях, где случайные погрешности измерений могут быть достаточно большими.

Решение обратной задачи в рамках описываемого алгоритма можно описать следующей формулой:

$$R_0 = R(\{\Theta_j\}, T_{in}^{air}(\{t_n\}), T_{in}^{surf}(\{t_n\}), T_{out}^{surf}(\{t_n\}), T_{out}^{air}(\{t_n\})), \quad (10)$$

где  $\{\Theta_j\}$  – совокупность теплофизических характеристик слоев объекта за исключением величины коэффициента теплопроводности НЭСТ;  $R(\dots)$  – некоторая сложная функция.

Из (10) следует, что в величину погрешности вносятся вклад ошибки трех типов:

- ошибки, связанные с погрешностью задания всех геометрических и теплофизических параметров слоев объекта, за исключением параметров НЭСТ;
- ошибки, вызванные шумами аппаратуры;
- ошибки, обусловленные факторами, неучтенными используемой моделью в квазиодномерном объекте.

Выражение (10) представляет собой функцию набора случайных величин, так как каждый из аргумен-

тов этой функции является измеряемой величиной, а поэтому задается с некоторой погрешностью. Согласно теории статистики, дисперсия функции (10) определяется следующим соотношением:

$$\Delta^2 R_0 = \Delta_x^2 R_0 + \sum_j \left| \frac{\partial R}{\partial \Theta_j} \Delta \Theta_j \right|^2 + \Delta_s^2 R_0 + \Delta_n^2 R_0. \quad (11)$$

Здесь  $\Delta_x^2 R_0$  – составляющая дисперсии, связанная с влиянием неучитываемых факторов;  $\Delta_s^2 R_0$  – составляющая дисперсии, связанная с систематической погрешностью аппаратуры;  $\Delta_n^2 R_0$  – составляющая дисперсии, связанная с шумами аппаратуры.

Для расчета погрешности, связанной с аппаратурой, получено явное выражение величин плотностей тепловых потоков через значения температур на поверхностях объекта:

$$I_n^{(in, out)} = I^{(in)}(t_n) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N K_{n-k}^{11} T_k^{(in)} + K_{n-k}^{12} T_k^{(out)}; \quad (12)$$

$$I_n^{(out)} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N K_{n-k}^{21} T_k^{(in)} + K_{n-k}^{22} T_k^{(out)}, \quad (13)$$

где  $T_k^{(in, out)}$  – температура внутренней (внешней) поверхности объекта в некоторый момент времени. Функция отклика  $K_{n-k}^{ij}$  определяется следующим соотношением:

$$K_{n-k}^{ij} = \sum_{m=1}^N \chi_m^{ij} F_m \exp\left(-\frac{2\pi i(n-k)(m-1)}{N}\right), \quad (14)$$

где функция  $F_m$  выполняет сглаживание температурной истории, а коэффициенты  $\chi_m^{ij}$  характеризуют тепловой отклик объекта на гармоническое изменение температуры его поверхности.

Найдем погрешность определения искомой величины с помощью функционала правдоподобия, рассчитанного для внутренней поверхности объекта на интервале температурной истории  $[t_{n_1}, \dots, t_{n_2}]$ .

При подстановке (12) и (13) в (7) получаем:

$$\begin{aligned} S_1 &= \bar{S}_1 + 2\Gamma(\xi_{in}^{air} - \xi_{in}^{surf}) + (\xi_{in}^{air} - \xi_{in}^{surf})^2; \\ \Gamma &= \frac{\sum_{n=n_1}^{n_2} (T_{in}^{air}(t_n) - T_{in}^{surf}(t_n))}{n_2 - n_1 + 1}; \\ S_2 &= \bar{S}_2 + \Omega(\xi_{in}^{air} - \xi_{in}^{surf}) + \Gamma \frac{\xi_{in}^{surf} - \xi_{out}^{surf}}{R} + \\ &+ \frac{(\xi_{in}^{surf} - \xi_{out}^{surf})(\xi_{in}^{air} - \xi_{out}^{surf})}{R}; \\ \Omega &= \frac{\sum_{n=n_1}^{n_2} I_n^{(in)}}{n_2 - n_1 + 1}; R = \sum_{n=1}^{N_1} \frac{L_n}{\lambda_n}; \\ S_3 &= \bar{S}_3 + 2\Omega \frac{\xi_{in}^{surf} - \xi_{out}^{surf}}{R} + \frac{(\xi_{in}^{surf} - \xi_{out}^{surf})^2}{R^2}. \end{aligned} \quad (15)$$



Величины  $\bar{S}_j$  представляют собой истинные значения интегралов, т.е. значения, рассчитанные в отсутствие систематической ошибки ( $\xi_{in, out}^{surf}$  и  $\xi_{in, out}^{air}$ ).

С учетом упрощений функционал правдоподобия можно представить как

$$D^{in}(\lambda) = \bar{S}_1 - \frac{\bar{S}_2^2}{\bar{S}_3} + F_1(\lambda)(\xi_{in}^{air} - \xi_{in}^{surf}) + F_2(\lambda)(\xi_{in}^{air} - \xi_{in}^{surf})^2; \\ F_1(\lambda) = 2\Gamma - 2\frac{\bar{S}_2(\lambda)\Omega(\lambda)}{\bar{S}_3(\lambda)}; F_2(\lambda) = 1 - \frac{\Omega^2(\lambda)}{\bar{S}_3(\lambda)}. \quad (16)$$

После подстановки (15) в (8) выражение расчета погрешности принимает вид

$$\delta\alpha = \frac{\bar{S}_3}{\bar{S}_2 + \Omega(\xi_{in}^{air} - \xi_{in}^{surf})} \frac{\bar{S}_3}{\bar{S}_2} + \frac{\bar{S}_3' \bar{S}_2 - \bar{S}_2' \bar{S}_3}{\bar{S}_2^2} \delta\lambda_m. \quad (17)$$

Определим погрешность, связанную с шумами аппаратуры.

При наличии только случайных погрешностей измерений температуры выражения для интегралов, входящих в (7), приобретают следующий вид:

$$S_1 = \bar{S}_1 + \frac{2}{\Delta N} \sum_{n=n_1}^{n_2} (\xi_{in}^{air}(t_n) - \xi_{in}^{surf}(t_n)) \Delta T_n + \frac{1}{\Delta N} \sum_{n=n_1}^{n_2} (\xi_{in}^{air}(t_n) - \xi_{in}^{surf}(t_n))^2; \\ \Delta N = n_2 - n_1 + 1; \Delta T_n = T_{in}^{air}(t_n) - T_{in}^{surf}(t_n); \\ S_2 = \bar{S}_2 + \frac{1}{\Delta N} \sum_{n=n_1}^{n_2} (\xi_{in}^{air}(t_n) - \xi_{in}^{surf}(t_n)) I_n^{(in)} + \frac{1}{N\Delta N} \sum_{n=n_1}^{n_2} \sum_{k=1}^N (K_{n-k}^{11} \xi_{in}^{surf}(t_k) + K_{n-k}^{12} \xi_{out}^{surf}(t_k)) \Delta T_n + \\ + \frac{1}{N\Delta N} \sum_{n=n_1}^{n_2} \sum_{k=1}^N (K_{n-k}^{11} \xi_{in}^{surf}(t_k) + K_{n-k}^{12} \xi_{out}^{surf}(t_k)) (\xi_{in}^{air}(t_n) - \xi_{in}^{surf}(t_n)); \\ S_3 = \bar{S}_3 + \frac{2}{N\Delta N} \sum_{n=n_1}^{n_2} \sum_{k=1}^N I_n^{(in)} (K_{n-k}^{11} \xi_{in}^{surf}(t_k) + K_{n-k}^{12} \xi_{out}^{surf}(t_k)) + \frac{1}{N^2 \Delta N} \sum_{n=n_1}^{n_2} \left( \sum_{k=1}^N K_{n-k}^{11} \xi_{in}^{surf}(t_k) + K_{n-k}^{12} \xi_{out}^{surf}(t_k) \right)^2. \quad (18)$$

После введения обозначений  $v_{1n} = \xi_{in}^{air}(t_n)$  и  $v_{2n} = \xi_{in}^{surf}(t_n)$  и несложных математических преобразований выражения (18) можно записать так:

$$S_1 = \bar{S}_1 + \frac{2}{\Delta N} \sum_{n=n_1}^{n_2} (v_{1n} - v_{2n}) \Delta T_n + \frac{1}{\Delta N} \sum_{n=n_1}^{n_2} (v_{1n} - v_{2n})^2; \\ S_2 = \bar{S}_2 + \frac{1}{\Delta N} \sum_{n=n_1}^{n_2} (v_{1n} - v_{2n}) I_n^{(in)} + \frac{1}{N\Delta N} \sum_{n=n_1}^{n_2} \sum_{k=1}^N K_{n-k}^{11} v_{2k} \Delta T_n + \frac{1}{N\Delta N} \sum_{n=n_1}^{n_2} \sum_{k=1}^N (v_{1n} - v_{2n}) K_{n-k+1}^{11} v_{2k}; \\ S_3 = \bar{S}_3 + \frac{2}{N\Delta N} \sum_{n=n_1}^{n_2} \sum_{k=1}^N I_n^{(in)} K_{n-k}^{11} v_{2k} + \frac{1}{N^2 \Delta N} \sum_{n=n_1}^{n_2} \sum_{k,m=1}^N K_{n-k}^{11} K_{n-m}^{11} v_{2k} v_{2m}. \quad (19)$$

Дальнейшие математические преобразования позволяют получить следующую формулу расчета погрешности:

$$\delta\alpha = \frac{\bar{S}_3' \bar{S}_2 - \bar{S}_2' \bar{S}_3}{\bar{S}_2^2} \delta\lambda_m - v_1^2 \left[ \frac{1}{\bar{S}_2} \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \chi_n^{(11)} F_n \frac{1}{\Delta N} \sum_{n=n_1}^{n_2} \Delta T_n + \frac{\bar{S}_3}{\bar{S}_2^2} \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |\chi_n^{(11)} F_n|^2 \right], \quad (20)$$

где  $S_2$  и  $S_3$  обозначают производные этих величин по  $\lambda_m$ .

Таким образом, разработан метод определения технического состояния НЭСТ в условиях их эксплуатации.

Предлагаемый метод позволил создать методику оценки остаточного ресурса НЭСТ. Она заключается в следующем.

С помощью тепловизионной системы проводят замеры температурных полей НЭСТ в моменты времени  $t_0, t_1, t_2, \dots, t_n$ .

$t_i = t_0 + \Delta t_{min} i; i = 0, 1, 2, \dots, n; t_0$  – начальный момент измерения температурного поля.

При этом интервал времени  $\Delta t_k$  на  $k$ -м элементе (потенциально критически опасном дефекте) и минимальный интервал времени  $\Delta t_{min}$  определяют по  $p$  критически опасным дефектам как результат решения системы уравнений:

$$\Delta t_{min} = \begin{cases} \Delta t_k = \{T \max k(t_i + \Delta t) - T \max k(t_i) \geq \Delta T_{dev}(\chi\sigma)\}, \\ \min\{\Delta t_k\}, k = 1, 2, \dots, p, \end{cases}$$

где  $p$  – количество одновременно обследуемых дефектов;  $T \max k$  – максимальная температура на  $k$ -м обследуемом дефекте;  $\Delta T_{dev}$  – погрешность измерения температуры техническими средствами (тепловизионной системой);  $\sigma$  – коэффициент, определяемый случайными шумами и помехами при проведении измерений (как правило,  $\sigma = 1...3$ ), см. [1].

Далее приводят измеренные температуры  $T_{\max}(t_i)$  к единым условиям измерений электрических режимов работы и параметров окружающей среды, например, следующим образом:

$$T_{\max}(t_i) = T_{\max}(t_i) + (T_{\text{air}}(t_i) - T_{\text{air}}(t_i)) + (1/S_{\text{surf}})(q_1/\alpha_1 - q(t_i)/\alpha(t_i)),$$

где  $T_{\text{air}}(t_i)$  — температура окружающей среды в момент измерения;  $S_{\text{surf}}$  — эффективная площадь поверхности НЭСТ;  $q = U^2/R$ ;  $U$  — напряжение нагрузки в момент измерения температуры;  $R$  — электрическое сопротивление НЭСТ;  $\alpha$  — коэффициент теплоотдачи поверхности НЭСТ в момент измерения.

Описанным методом определяют электрическое сопротивление соответствующего участка  $R_{\max}(t_i)$  и коэффициент теплоотдачи  $\alpha$ .

Экстраполируют зависимость  $T_{\max}(t_i)$  по времени  $t$  и по выполнению условия  $R_{\max}(t_i) \geq R_{\text{крит}}$  определяют остаточный ресурс — время до выхода элемента из строя  $t_{\max}$ .

Экстраполяция осуществляется, например, одним из статистических методов построения преобразования и оценки парных зависимостей по экспериментальным данным или методами построения многомерных эмпирических зависимостей, например [3]. Промежуток времени экстраполяции должен превышать предполагаемое время остаточного ресурса. Момент времени  $t_{\max}$ , т.е. когда выполнено условие  $T_{\max}(t_i) = T_{\text{крит}}$ , и будет временем остаточного ресурса, т.е. временем работоспособности НЭСТ. После его истечения с большой вероятностью исследуемый НЭСТ подлежит замене.

На рис. 2 в качестве примера приведены зависимости, иллюстрирующие разработанный метод оценки остаточного ресурса НЭСТ.

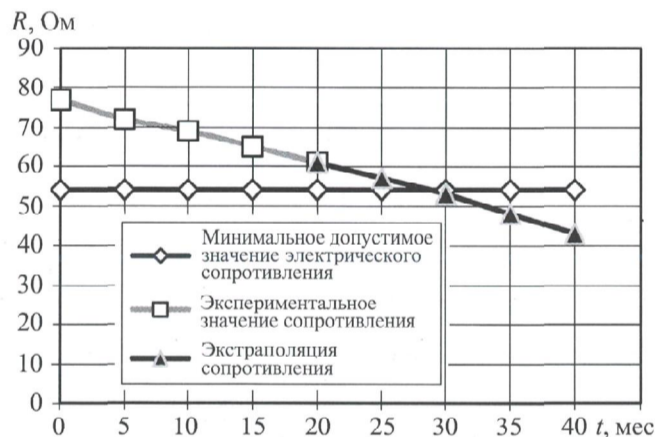


Рис. 2. Оценка остаточного ресурса НЭСТ

Рассмотрим результаты экспериментальных исследований описанного метода обнаружения и идентификации дефектов — локального изменения электрического сопротивления греющего слоя.

**Программа экспериментальных исследований** заключалась в следующем:

- проводили измерения значений электрического сопротивления по поверхности греющего слоя;
- с помощью тепловизионной системы и вспомогательной аппаратуры регистрировали температурное поле и другие характеристики поверхности при заданных значениях напряжения питания;
- на основе результатов измерений определяли распределение электрического сопротивления и погрешность его значений;
- сравнивая измеренные и рассчитанные значения электрического сопротивления, определяли погрешность разработанного метода.

Экспериментальные исследования проводили на рабочей поверхности греющего слоя НЭСТ.

Для анализа результатов исследований использовали методику, описанную в [1].

Некоторые результаты исследований в виде графиков приведены на рис. 3–7.

Рассчитанный коэффициент корреляции между температурным полем поверхности НЭСТ и распределением электрического сопротивления [3] не ниже 0,83, что позволяет тесноту связи считать хорошей и

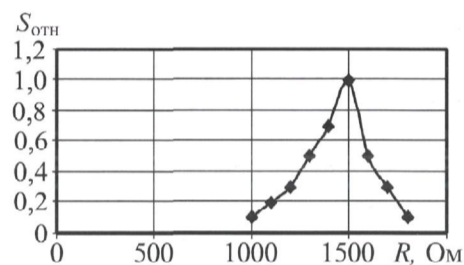


Рис. 3. Экспериментальное распределение электрического сопротивления по площади аномальных участков греющей поверхности

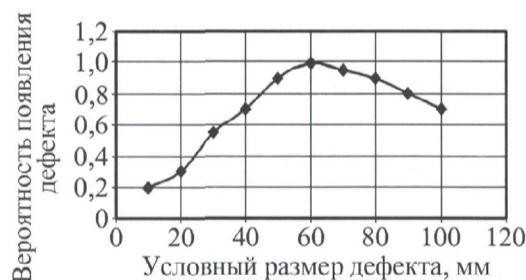


Рис. 4. Экспериментальное распределение площади дефектов греющей поверхности



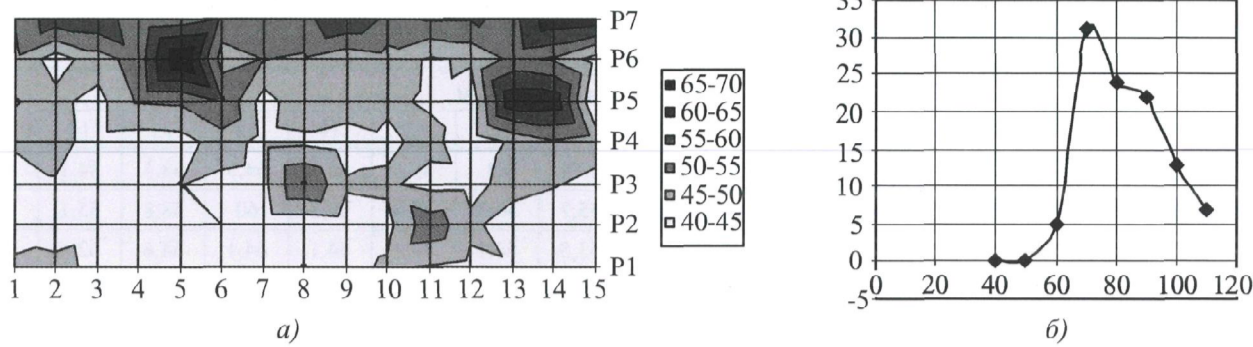


Рис. 5. Распределение электрического сопротивления по площади поверхности греющего слоя:  
а – распределение по площади; б – гистограмма

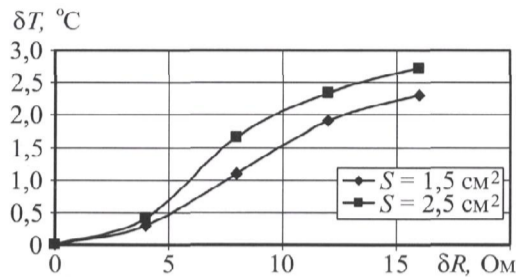


Рис. 6. Зависимость изменения температуры на поверхности НЭСТ от сопротивления греющего слоя и площади дефектного участка

подтверждает достоверность измерений и результатов экспериментов.

В табл. 1, 2 приведены распределения значений электрического сопротивления по поверхности НЭСТ – измеренного (табл. 1) и рассчитанного согласно описанному методу (табл. 2). Корреляция между ними не менее 0,91.

Определены значения погрешности электрического сопротивления на различных участках НЭСТ:

а) погрешность определения электрического сопротивления предложенным методом не превышает

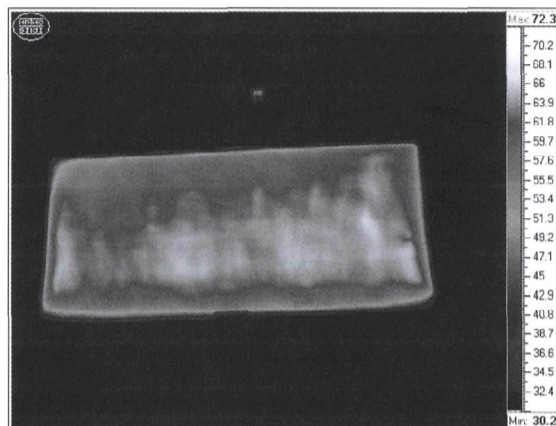


Рис. 7. Термограмма поверхности НЭСТ

10 %, что вполне приемлемо для исследований в полевых условиях;

б) ошибка погрешности реальной и определенной предложенными методами не превышает 14 %, что делает возможным применять разработанный метод для определения погрешности измерений.

На базе теоретических и экспериментальных исследований для оперативной диагностики техниче-

1. Результаты измерений электрического сопротивления по поверхности НЭСТ

№ строк	Результаты замеров, Ом														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	50,3	50,3	50,4	50	52	55,1	50,6	50,6	51,3	50,6	52,6	51,3	52	55,7	51,5
2	53,1	51,5	46,5	45,1	42,6	44,5	50	47,5	45,4	45	46,6	48,5	59,1	59,4	40,5
3	44	48,3	45,9	47,6	41,8	43	43,6	45,1	49,2	41,8	46,4	43,4	42,9	42,5	42,4
4	41,6	48,2	38,1	40,6	40,1	40,4	39,6	39,6	50,2	39,9	40,3	42,8	40,1	40,3	38,2
5	41,7	47,4	55,5	50,9	39	39,9	42,4	40,5	48,8	44,4	42,4	43,7	40,4	43	42,8
6	37,7	48,2	45,4	42,3	40,8	43,3	44,2	41,3	41,4	41,5	42,8	42,9	42,2	40,5	42,6
7	41,2	45,5	46	44,6	48,2	52,7	47,7	48,4	51,4	54,2	63,3	45,1	49,4	48,3	45

## 2. Результаты определения электрического сопротивления по поверхности НЭСТ в соответствии с разработанным методом

№ строк	Результаты замеров, Ом														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	51,1	59,4	82,5	62,8	67,1	62,1	63,4	63,4	63	65,1	60,4	64,5	68,5	84,1	58,6
2	52,8	58,5	55,4	58,6	53,4	54	54,4	55,7	56,3	53,4	56,8	60	58,8	55,1	49
3	53,4	49	54,4	51,2	54	51,9	54	53,5	54,1	54,1	54,1	64,1	54,6	62,4	49,2
4	45,5	52,2	50	53,1	49,9	49,8	48,4	48,3	50,1	52,4	51,1	50,5	50	50,2	47,2
5	40,3	47,5	48,6	53,3	47,1	48,4	48,8	49	49,3	51,1	47,1	55,6	54,4	54,1	47,2
6	40,3	47,5	50,5	50,5	52,8	44,2	48,4	58,3	50,4	54,2	50,7	49,2	58,8	52,7	56,2
7	45,5	59,6	55	57	58	55,4	55,5	70,9	58,4	56,9	56,5	55	81,3	56,2	56,7

ского состояния НЭСТ разработаны программно-аппаратные средства и технология теплового контроля, включающая в себя регистрацию температурного поля поверхности нагревателя, измерение дополнительных данных о температурном поле (тепловой поток, условия эксплуатации и т.п.) и компьютерную обработку данных по специальной программе.

Функциональная схема тепловой дефектометрии нагревателей и программно-аппаратных средств приведена на рис. 8.

### Выводы

1. Разработан метод теплового контроля технического состояния плоских нагревательных элементов с оценкой их остаточного ресурса, основанный на решении обратной некорректной задачи нестационарной теплопроводности.

2. На базе этого метода созданы технология и программно-аппаратные средства теплового контроля НЭСТ. Экспериментальные исследования предлагаемых технических и программных средств показали возможность его применения на практике в полевых условиях эксплуатации.

### ЛИТЕРАТУРА

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., Лебедев О.В., Абрамова Е.В. и др. Разработка метода тепловой дефектометрии на основе решения обратных задач нестационарной теплопроводности // 17-я Рос. науч.-техн. конф. Екатеринбург, 2005.
3. Львовский Е.Н. Статистические методы построения эмпирических формул. М.: Высш. шк., 1988. 239 с.

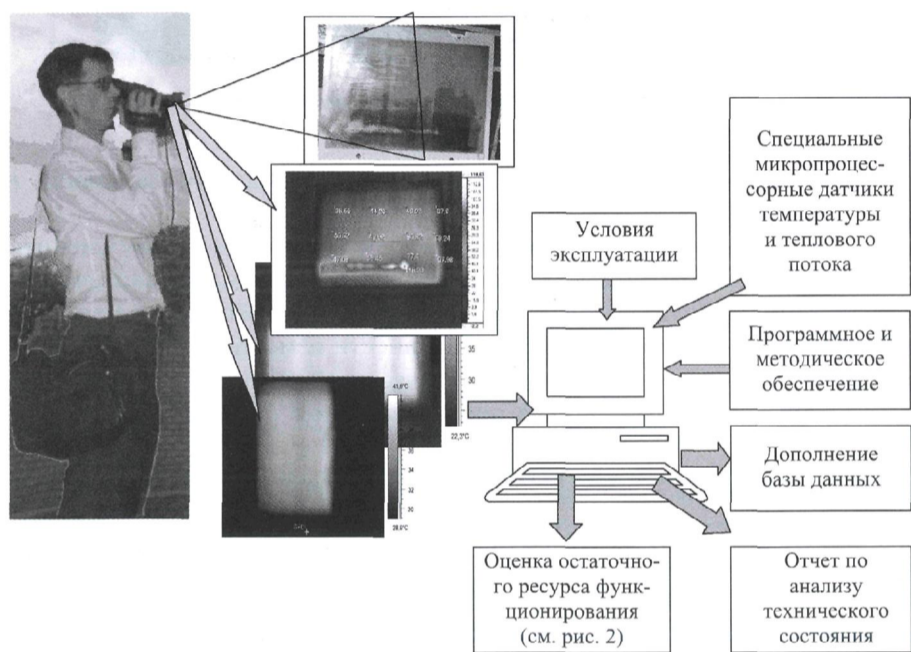


Рис. 8. Общая схема теплового контроля нагревателей в полевых условиях