

# Контроль. Диагностика

TESTING. DIAGNOSTICS

5<sup>(107)</sup> 2007  
май



**ЗАО "НИИИИ МНПО "СПЕКТР"**

Отдел оптических и телевизионных систем диагностики

## МПМ-2У

**Металлографические  
Портативные  
Микроскопы**

Полная линия решений оперативной металлографии



МПМ-2У-СП



МПМ-2У-КС



МПМ-2У

**Модульная конструкция** — легкость модификации для работы в труднодоступных местах, на выпуклых и вогнутых поверхностях, трубах малого диаметра (от 20 мм) и др.

**Двухкоординатный столик** позволяет сканировать поверхность по двум координатам (съемка по ГОСТ 5639)

**Увеличение** — 100х, 200х, 400х; опционально — 500х, 800х

**Габариты** — 70x70x120 мм (МПМ-2У, без адаптера и фотокамеры)

**Масса** — не более 1,2 кг

**Питание**  
от батарей или сети 220 В / 50 Гц

119048, Москва, ул. Усачёва, 35, стр.1, оф. 513-516а

Тел.:(495) 245 57 68, 245 59 18. Тел./факс:(495) 245 53 65. [Http://www.nio7spectr.ru](http://www.nio7spectr.ru). E-mail:nio7@newmail.ru

# Контроль. Диагностика



№ 5(107) май 2007

Главный редактор

В.В. КЛЮЕВ, акад. РАН

Заместители

главного редактора:

В.Г. ШЕВАЛДЫКИН

П.Е. КЛЕЙЗЕР

Редационный 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. СУХОРУКОВ

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

### ● КОНТРОЛЬ, ДИАГНОСТИКА ЗА РУБЕЖОМ

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

### ● ТЕОРИЯ, МЕТОДЫ, ПРИБОРЫ, ТЕХНОЛОГИИ

Будадин О.Н., Вавилов В.П. Разработка технологии активного теплового контроля  
тонкостенных покрытий строительных конструкций ..... 6

Авраменко В.Г., Будадин О.Н., Лебедев О.В., Киржанов Д.В. Обработка  
тепловизионного изображения при использовании дефектометрии качества  
строительных сооружений ..... 15

Ильин В.А., Попов А.В. О прочности тонкостенной емкости (бака)  
с трещиноподобным повреждением коррозионного происхождения ..... 22

Еременко В.П. Методика измерения нелинейности деформирования бетона  
по числу импульсов акустической эмиссии ..... 27

Мурашов В.В., Румянцев А.Ф. Дефекты монолитных деталей и многослойных  
конструкций из полимерных композиционных материалов и методы их выявления.  
Часть 2. Методы выявления дефектов монолитных деталей и многослойных  
конструкций из полимерных композиционных материалов ..... 31

Ермолов И.Н. Торец вместо зарубки ..... 42

Артамонов В.В., Артамонов В.П., Хитров О.Н. Теоретические и прикладные основы  
процесса накатки металлографических реплик ..... 44

Горелов В.А. Оценка работоспособности инструмента методами диагностики  
процессов резания ..... 48

Юркевич В.В. Геометрический образ в продольном сечении детали,  
обрабатываемой на токарном станке ..... 52

Нахапетян Е.Г. Особенности применения комплексных методов диагностики  
в быстроперестраиваемых производственных системах ..... 62

### ● РАЗНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Асанов Г.Н., Ляпина Г.И., Нуждин Г.А., Самошкин Ю.А. Мониторинг удовлетво-  
ренности потребителей ..... 71

Итоги IV Международной научно-технической конференции  
"Диагностика оборудования и конструкций с использованием магнитной памяти  
металла" ..... 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.



практическим потребностям и согласуется с результатами теоретических и экспериментальных исследований.

#### Выводы

1. Теоретически и экспериментально доказана возможность применения теплового (тепловизионного) неразрушающего контроля для обнаружения отслоений тонких строительных покрытий от основания, определены области применения и возможности теплового метода.

2. Разработана и апробирована методика теплового контроля для практических обследований тонких строительных покрытий, в частности штукатурных покрытий ограждающих конструкций жилых домов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Будадин О.Н., Потапов А.И., Колганов В.И. и др. Тепловой неразрушающий контроль изделий. М.: Наука, 2002. 476 с.

2. Вавилов В.П. Тепловой контроль. М.: Машиностроение, 2004. 678 с. (Неразрушающий контроль: справ: 8 т. / под ред. В.В. Клюева. Т. 5.).

3. Вавилов В.П., Гринцато Э., Бизон П., Маринетти С. Тепловой контроль воздушных расслоений под фресками // Дефектоскопия. 1994. № 7. С. 3–83.

4. Grinzato E. Applications of infrared thermography to works of art: Preconference short course notes // 8<sup>th</sup> Inter. Conf. on Quantitative Infrared Thermography QIRT'06, 28–30 June 2006. 80 p.

5. Лебедев О.В., Будадин О.Н., Авраменко В.Г. и др. Разработка метода тепловой дефектометрии на основе решения обратных задач нестационарной теплопроводности // Всерос. науч.-техн. конф. "Неразрушающий контроль и техническая диагностика при производстве и эксплуатации авиационной и космической техники", Санкт-Петербург, 5–7 октября 2005 г. СПб.: ВЦ Северо-Запада РФ, 2005.

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

### Обработка тепловизионного изображения

#### при использовании дефектометрии качества строительных сооружений

В настоящее время много внимания уделяется решению проблем строительства и реконструкции зданий для обеспечения комфортного пребывания в них людей при эффективном использовании энергоносителей. Это связано с тем, что значительная часть основных фондов производственных строительных конструкций превысила допустимый ресурс эксплуатации, что привело к увеличению расхода энергоносителей. Нормальной практикой на территории России являются показатели удельного потребления условного топлива на человека, превышающие в несколько раз аналогичные западные [1]. В этом виноваты не только климатические условия, но и состояние жилищного фонда. По экспертным оценкам Госстроя РФ, только в зданиях массовых серий сверх нормы теряется до 40 % поступающих в них энергоресурсов. В целях экономии топливно-энергетических ресурсов издан указ Президента РФ [2]. Ужесточение требований к энергосбережению на территории России регламентируется СНиП и ГОСТ [4], а в Москве – московскими городскими строительными нормами [5]. Энергетической стратегией России на период до 2020 г. определено, что до 3/4 необходимого прироста

энергопотребления страны должно быть обеспечено за счет энергосберегающих мероприятий. Таким образом, энергоэффективность и энергосбережение являются приоритетами энергетической стратегии России.

Актуальность данной работы подтверждается рекомендациями и нормативными документами, а именно протоколом совместного заседания Совета Безопасности Российской Федерации и президиума Государственного совета Российской Федерации [6]. Согласно этому документу следует "сконцентрировать усилия и ресурсы на реализации конкурентоспособных технологий, направленных на повышение эффективности использования энергетических и природных ресурсов и других перспективных технологий". Перспективность метода теплового неразрушающего контроля подтверждается указом Президента Российской Федерации [7], за разработку которого была присуждена Государственная премия в области науки и техники за 2003 г. Правительством Москвы принято постановление [8], направленное на развитие инновационных научно-исследовательских программ в сфере

энергосбережений. Аналогичные постановления сейчас утверждаются в Санкт-Петербурге, Тамбовской, Калининградской областях и других регионах РФ, а территориальные строительные нормы приняты уже в 32 областях России.

Основной теплотехнической характеристикой, на основании которой составляется заключение о соответствии строительной конструкции нормативным требованиям и эксплуатационным нормам, является приведенное сопротивление теплопередаче наружных ограждающих конструкций, вычисляемое на основе локальных величин сопротивления теплопередаче каждого из типичных фрагментов наружных ограждающих конструкций здания. Рассматриваемый метод определения приведенного сопротивления теплопередаче разработан в Технологическом институте "ВЕМО" [9, 10]. Метод успешно демонстрировался на крупнейших конференциях, посвященных методам неразрушающего контроля, включая международные конференции [11].

Рассмотрим метод, предназначенный для определения теплотехнических характеристик строительных сооружений с оценкой энергоэффективности ограждающих конструкций по результатам *теплового неразрушающего контроля* (ТНК).

#### Постановка задачи

Основными параметрами, количественно определяющими энергосберегающие свойства ограждающей конструкции, являются сопротивление теплопередаче термически однородных зон  $R^{loc}$  и приведенное сопротивление теплопередаче  $R^{av}$ , учитывающее неравномерность распределения температуры по поверхности контролируемого объекта.

В основе метода лежит модель многослойного объекта, которая используется для описания ограждающей конструкции. Для многослойного объекта локальное значение сопротивления теплопередаче выражается формулой

$$R^{loc} = \frac{1}{\alpha^{in}} + \frac{1}{\alpha^{ex}} + \sum_{n=1}^N \frac{l_n}{\lambda_n}, \quad (1)$$

где  $\alpha^{in}$ ,  $\alpha^{ex}$  — коэффициенты теплоотдачи на внутренней и внешней поверхностях объекта;  $N$  — число слоев конструкции;  $l_n$  — толщина слоя  $n$ ;  $\lambda_n$  — коэффициент теплопроводности слоя  $n$ . Приведенное сопротивление теплопередаче ограждающей конструкции определяется формулой

$$R^{av} = \sum_{j=1}^J S_j \left[ \sum_{j=1}^J \frac{S_j}{R_j^{loc}} \right]^{-1}, \quad (2)$$

где  $J$  — число термически однородных зон ограждающей конструкции. Каждая термически однородная зона  $j$  имеет площадь  $S_j$ , а каждой ее точке соответствует локальное сопротивление теплопередаче  $R_j^{loc}$ , определенное по формуле (1).

Согласно существующим методикам [2] величина сопротивления теплопередаче в реперных точках конструкции определяется экспериментально с использованием датчиков плотности теплового потока и датчиков температуры сред по обе стороны ограждающей конструкции с помощью соотношения

$$R^{loc} = \frac{T_{in}^{air} - T_{ex}^{air}}{I}, \quad (3)$$

где  $T_{in}^{air}$ ,  $T_{ex}^{air}$  — температуры воздуха вблизи внутренней и внешней поверхности ограждающей конструкции соответственно;  $I$  — плотность теплового потока через ограждающую конструкцию.

Указанные методики ориентированы на применение в условиях стационарного процесса теплопередачи в ограждающих конструкциях. В действительности стационарный режим теплопередачи в конструкции может быть создан только в лабораторных условиях. При теплотехническом обследовании строительных объектов в условиях их эксплуатации такие условия недостижимы. В этом случае режим передачи тепла является нестационарным вследствие суточных колебаний температуры наружного воздуха, резкой смены погоды и других причин.

Таким образом, необходимо создание альтернативных методов определения локальных и интегральных теплотехнических характеристик ограждающих конструкций. Альтернативный метод должен позволять проводить определение требуемых характеристик в условиях, достижимых при эксплуатации обследуемых конструкций. Ниже рассмотрена методика определения этих характеристик с использованием термограмм обследуемого объекта и температурной истории (серии значений температур через заданные интервалы времени) в реперных точках. При этом температурная история в каждой из реперных точек используется для определения сопротивления теплопередаче в ней. Это достигается путем решения обратной задачи нестационарной теплопроводности в условиях нестационарного режима передачи тепла через ограждающую конструкцию. Полученные значения локальных теплотехнических характеристик и термограмма ограждающей конструкции используются для определения интегральных характеристик конструкции.

#### Описание метода

Разработанный метод осуществляет обработку экспериментальных данных, полученных в ходе теп-



ловизионного обследования, и реализует математические алгоритмы 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.

Для определения локальных теплотехнических характеристик производится решение обратной задачи нестационарной теплопроводности в многослойном объекте, состоящее в определении величин 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. Затем решается одномерная прямая задача нестационарной теплопроводности. Приведенные ниже выкладки применимы для описания как многослойных, так и однослойных объектов, поэтому в дальнейшем будут рассматриваться многослойные объекты. 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. Далее будем называть эту поверхность внутренней. Направим ось  $z$  к противоположной стороне конструкции, которую будем называть внешней. Величины, относящиеся к внутренней стороне конструкции, обозначим индексом "in", а к внешней – индексом "ex",  $T(z, t)$  – зависимость температуры от координаты  $z$  и времени  $t$ . Уравнение теплопроводности имеет вид

$$C(z)\rho(z)\frac{\partial T(z, t)}{\partial t} = \lambda(z)\frac{\partial^2 T(z, t)}{\partial z^2}, \quad (4)$$

где  $C(z)$ ,  $\rho(z)$  и  $\lambda(z)$  – теплофизические характеристики: удельная теплоемкость, плотность и коэффициент теплопроводности материалов слоев соответственно. Они считаются постоянными внутри каждого из слоев и не зависящими от температуры, а следовательно, задаются кусочно-постоянными функциями координаты  $z$ .

### Входные данные

Для расчета приведенного сопротивления теплопередаче наружных ограждающих конструкций используются следующие входные данные.

1. Термограмма наружных ограждающих конструкций исследуемого объекта. Далее под термограммой понимается матрица со значениями интенсивности. Соответствие интенсивностей и яркостного поля исследуемой конструкции устанавливается следующим образом. Термограммы различных зон исследуемой конструкции компонуются в единое изображение. Затем из всего изображения выбираются те участки, приведенное сопротивление которых необходимо рассчитать. На заключительном этапе цветное изображение яркостного поля выбранных участков преобразуется в черно-белое (интенсивность черно-белого изображения в некоторой точке равна целому числу из интервала  $[0, 255]$ ). Рассчитанный указанным образом массив значений и обозначается в дальнейшем как термограмма.

2. Натурные измерения температур:
  - внешнего воздуха;
  - внешней поверхности ограждающей конструкции;
  - внутреннего воздуха в реперной точке в момент снятия термограммы.
3. Рассчитанное значение сопротивления теплопередаче в реперной точке.
4. Данные для калибровки тепловизионных измерений.
5. Значение температуры в нескольких (двух и более) точках на внешней поверхности ограждающих конструкций.
6. Значения интенсивности термограммы в этих же точках.

### Алгоритм преобразования термограммы

Для расчета приведенного сопротивления теплопередаче необходимо установить соответствие между значениями интенсивностей точек термограммы и температурами в этих точках. В программе используется специальная функция установления соответствия. Это реализовано по следующей причине. Как правило, функция восстановления температурного поля по термограмме, приведенная в руководстве тепловизора, достаточно сложна и содержит большое количество теплофизических параметров окружающей среды (например, влажность, температура окружающего воздуха) и поверхности объекта (ее излучательная способность или степень черноты), которые сложно определить непосредственно при обследова-

нии. Поэтому, задавая эти параметры на основе какой-либо модели, а не прямого измерения, можно получить значения температур с большой погрешностью. К тому же функция восстановления температурного поля может различаться для разных моделей тепловизоров, и описанный алгоритм (и основанная на нем программа) не будет обладать универсальностью. Для установления указанного соответствия зависимость интенсивности точек термограммы от значений температур в этих точках раскладывается в ряд Тейлора:

$$\begin{aligned}
 I(x, y) = F(\{\theta\}, T(x, y)) = & F(\{\theta\}, T(x_0, y_0)) + \\
 & + T(x_0, y_0) \frac{\partial F(\{\theta\}, T(x, y))}{\partial T(x, y)} \Big|_{x_0, y_0} \frac{T(x, y) - T(x_0, y_0)}{T(x_0, y_0)} + \\
 & + \frac{T^2(x_0, y_0) \partial^2 F(\{\theta\}, T(x, y))}{\partial T^2(x, y)} \Big|_{x_0, y_0} \times \\
 & \times \left( \frac{T(x, y) - T(x_0, y_0)}{T(x_0, y_0)} \right)^2 + \dots,
 \end{aligned} \quad (5)$$

где  $\{\theta\}$  – набор теплофизических параметров, влияющих на интенсивность термограммы;  $T(x, y)$  – истинное значение температуры на поверхности исследуемого объекта;  $I(x, y)$  – некоторая функция, измеренная при помощи тепловизора. Для определенности за  $I(x, y)$  следует принять температуру, измеряемую тепловизором при некоторых оговоренных заранее параметрах работы прибора. Ограничимся в зависимости (5) первыми двумя членами разложения и введем измеренную температуру поверхности объекта  $\tilde{T}(x, y)$  по правилу (6). Будем считать, что некоторые коэффициенты  $A$  и  $B$  имеют одинаковое значение для всех точек термограммы:

$$\tilde{T}(x, y) = A + BI(x, y); \quad (6)$$

Выделим на термограмме объекта точки, соответствующие ограждающей конструкции. Очевидно, что число таких точек конечно. Пронумеруем эти точки от 1 до  $N$  и получим соответствующий им ряд значений  $\tilde{T}(x_n, y_n)$ ,  $n = 1 \dots N$ . Далее величины  $\tilde{T}(x_n, y_n)$ ,  $I(x_n, y_n)$  и  $T(x_n, y_n)$  будем обозначать  $\tilde{T}_n$ ,  $I_n$  и  $T_n$ . Для установления соответствия между величинами  $T_n$  и  $\tilde{T}_n$ ,  $n = 1 \dots N$ , воспользуемся дополнительными экспериментальными данными.

Из  $N$  точек термограммы выделим  $M$ , в которых измерим температуру поверхности объекта с помощью откалиброванного измерительного прибора, на-

пример контактного термометра. Определим коэффициенты  $A$  и  $B$  по методу наименьших квадратов:

$$D(A, B) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M (\tilde{T}_m - T_m)^2. \quad (7)$$

Подстановка в уравнение (7) выражения (6) для  $\tilde{T}_m$  и условий  $\frac{\partial D(A, B)}{\partial A} = 0$  и  $\frac{\partial D(A, B)}{\partial B} = 0$  даст систему уравнений (8) для определения коэффициентов  $A$  и  $B$ . Система уравнений (8) имеет решение (9), определяющее значения искомых коэффициентов:

$$\begin{cases} 2AM + 2B \sum_{m=1}^M I_m - 2 \sum_{m=1}^M T_m = 0; \\ 2A \sum_{m=1}^M I_m + 2B \sum_{m=1}^M I_m^2 - 2 \sum_{m=1}^M T_m I_m = 0; \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{aligned}
 A &= \frac{\sum_{m=1}^M T_m \sum_{m=1}^M I_m^2 - \sum_{m=1}^M I_m \sum_{m=1}^M T_m I_m}{M \sum_{m=1}^M I_m^2 - \left( \sum_{m=1}^M I_m \right)^2}, \\
 B &= \frac{M \sum_{m=1}^M T_m I_m - \sum_{m=1}^M T_m \sum_{m=1}^M I_m}{M \sum_{m=1}^M I_m^2 - \left( \sum_{m=1}^M I_m \right)^2}.
 \end{aligned} \quad (9)$$

Вычисление коэффициентов  $A$  и  $B$  позволяет перейти от измеренного массива значений  $I_n$  к массиву значений  $\tilde{T}_n$  с измеренными значениями температур поверхности в выбранных точках ограждающей конструкции.

#### Алгоритм расчета приведенного сопротивления теплопередаче

Расчет приведенного сопротивления теплопередаче  $R^{av}$  проводится в рамках следующих приближений:

- 1) тепловизионная съемка внутри наружных ограждающих конструкций выполняется при стационарном процессе теплопередачи;
- 2) температура внутреннего (наружного) воздуха постоянна вблизи всей внутренней (внешней) поверхности ограждающих конструкций;
- 3) коэффициент теплоотдачи на внешней поверхности стены одинаков для всех точек внешней поверхности ограждающих конструкций.

Для расчета  $R^{av}$  необходимо знать температуры наружного и внутреннего воздуха, температуру внешней поверхности объекта в реперной точке и сопротивление теплопередаче в реперной точке  $R^{loc}$  и массив зна-



чений  $\tilde{T}_n$ ,  $n = 1...N$ , полученный в результате калибровки термограммы.

Для получения физически корректных результатов проводится компрессия входных данных, заключающаяся в преобразовании входных данных. Действительно, если тепловизионные данные указывают на существование зон поверхности с температурой меньше температуры внешнего воздуха, то в рамках используемых приближений сопротивление теплопередаче в этих зонах стремится к бесконечности. Подобные значения указывают на наличие некорректно проведенных измерений, и их следует исключить из рассмотрения.

Введем ограничения на значения коэффициента теплоотдачи  $\alpha^{ex} \in (\alpha_{min}^{ex}, \alpha_{max}^{ex})$  и локального сопротивления теплопередаче  $R^{loc} \in (R_{min}, R_{max})$ . Величины  $\alpha_{min}^{ex}$ ,  $\alpha_{max}^{ex}$ ,  $R_{min}$  и  $R_{max}$  не измеряются и являются параметрами используемой модели, которые устанавливают ограничения на значения величин  $\alpha^{ex}$  и  $R^{loc}$ . В рамках указанных приближений  $R^{av}$  можно рассчитать только в случае, если значения температур внутреннего и внешнего воздуха различаются. Будем считать, что значения температуры воздуха по обе поверхности ограждающей конструкции постоянны и равны соответственно  $T^{in|a}$  и  $T^{ex|a}$ . Для определенности считается, что  $T^{in|a} > T^{ex|a}$  (случай  $T^{in|a} < T^{ex|a}$  аналогичен рассматриваемому случаю).

Экспериментальные данные, не удовлетворяющие введенным ограничениям, можно не рассматривать либо провести их компрессию. Используем второй подход, так как в противном случае можно лишиться слишком большого количества экспериментальных данных. Введем значение температуры  $\tilde{T}^{loc}$ , удовлетворяющее перечисленным ограничениям в реперной точке. Значение температуры в этой точке  $\tilde{T}^{loc}$  рассчитывается по формуле (6) с использованием известных коэффициентов  $A$  и  $B$ . Определим диапазон температур реперной точки  $[T_{min}^{loc}, T_{max}^{loc}]$ , обеспечивающий выполнение ограничений:

$$[T_{min}^{loc}, T_{max}^{loc}] = \left[ T^{ex|a} + \frac{T^{in|a} - T^{ex|a}}{R^{loc} \alpha_{min}^{ex}}, T^{ex|a} + \frac{T^{in|a} - T^{ex|a}}{R^{loc} \alpha_{max}^{ex}} \right] \quad (10)$$

Рассчитаем значение  $\tilde{T}^{loc}$  по следующему правилу:

$$\tilde{T}^{loc} = \begin{cases} T_{min}^{loc}, & \tilde{T}^{loc} < T_{min}^{loc}; \\ \tilde{T}^{loc}, & T_{min}^{loc} \leq \tilde{T}^{loc} \leq T_{max}^{loc}; \\ T_{max}^{loc}, & T_{max}^{loc} < \tilde{T}^{loc}. \end{cases} \quad (11)$$

Значение коэффициента теплоотдачи на внешней поверхности объекта определяется следующим соотношением:

$$\alpha^{ex} = \frac{T^{in|a} - T^{ex|a}}{R^{loc} (\tilde{T}^{loc} - T^{ex|a})}. \quad (12)$$

С помощью полученного значения  $\alpha^{ex}$  по формуле (13) определим диапазон  $[T_{min}, T_{max}]$ , в котором может меняться измеренное значение температуры стены. Введение этого ограничения гарантирует удовлетворение условия  $R^{loc} \in [R_{min}, R_{max}]$ :

$$[T_{min}, T_{max}] = \left[ T^{ex|a} + \frac{T^{in|a} - T^{ex|a}}{R_{max} \alpha^{ex}}, T^{ex|a} + \frac{T^{in|a} - T^{ex|a}}{R_{min} \alpha^{ex}} \right]. \quad (13)$$

Обозначим измеренные значения температур на поверхности ограждающей конструкции, прошедшие процедуру компрессии,  $\hat{T}_n$ . Получим значения  $\hat{T}_n$  с использованием известных значений  $\tilde{T}_n$ :

$$\hat{T}_n = \Phi + \Gamma \tilde{T}_n. \quad (14)$$

Коэффициенты  $\Phi$  и  $\Gamma$  должны обеспечивать выполнение условий  $\hat{T}_n \in [T_{min}, T_{max}]$  и  $\hat{T}_n^{loc} = \Phi + \Gamma \tilde{T}_n^{loc}$ . Этим требованиям удовлетворяют

$$\Phi = \begin{cases} \frac{T_{min} - \tilde{T}^{loc}}{\min\{T_n\} - \tilde{T}^{loc}}, & \min\{T_n\} < T_{min}; \\ 1, & \{T_n\} \in [T_{min}, T_{max}]; \\ \frac{T_{max} - \tilde{T}^{loc}}{\max\{T_n\} - \tilde{T}^{loc}}, & \max\{T_n\} > T_{max}. \end{cases} \quad \Gamma = \tilde{T}^{loc} - \Phi \tilde{T}^{loc}; \quad (15)$$

Термограмма, откалиброванная с учетом компрессии входных данных, представляет собой исходные данные для расчета приведенного сопротивления теплопередаче. Считая, что каждому пикселю изображения термограммы соответствует некоторая постоянная заданная площадь поверхности исследуемого объекта, несложными математическими преобразованиями из формулы (2) можно получить выражение для приведенного сопротивления теплопередаче ограждающей конструкции:

$$R^{av} = N \left[ \sum_{n=1}^N \frac{\alpha^{ex} (\hat{T}_n - T^{ex|a})}{T^{in|a} - T^{ex|a}} \right]^{-1}. \quad (16)$$

### Технико-экономические показатели

В настоящее время теплотехнические показатели строительных конструкций определяют по ГОСТ 31166–2003 [12]. Метод основан на прямых измерениях температур воздуха внутри помещения и снаружи вблизи испытываемой ограждающей конструкции и на определении средней величины теплового потока, протекающего через участок стены, ограниченный измерительным прибором. Метод применим при лабораторных исследованиях, а в условиях эксплуатации зданий может использоваться при минимальных размерах исследуемых фрагментов 2,0×2,0 м, обусловленных размерами испытательного прибора и необходимой свободной зоны. Согласно требованиям ГОСТ 31166–2003 один из линейных размеров обследуемого объекта должен быть больше 0,75 м. При размерах прибора 0,5×0,5 м и ширине свободной зоны, равной тройной толщине ограждающей конструкции, например, для серии КОПЭ – 0,25×3 м минимальный размер исследуемого фрагмента должен быть 2,0×2,0 м.

На практике обеспечить выполнение этого условия можно только для торцовых стен. Если учесть, что подавляющее большинство современных ограждающих конструкций имеет толщину от 0,35 до 0,7 м, возможность использования для определения фактического значения приведенного сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций ограничена. ГОСТ 26254–84 [13] имеет более широкую область применения по размерам и типам ограждающих конструкций, однако погрешность определения сопротивления теплопередаче в иных случаях достигает 300 % [14].

Определение энергосберегающих характеристик и тепловых потерь через ограждающие конструкции зданий с высокой эффективностью может производиться на основе анализа их температурных полей комплексным тепловизионным методом. Это обусловлено тем, что при эксплуатации здания в период отопительного сезона существует температурный напор между внутренним и наружным воздухом, поэтому наличие различных дефектов, повреждений, конструктивных элементов, имеющих отличное от основного материала сопротивление теплопередаче, будет регистрироваться как зоны с аномальными температурами, анализ которых позволяет идентифицировать их по признакам дефект–качество. Определение количественных значений теплотехнических характеристик ограждающих конструкций в реальных условиях эксплуатации требует измерения температуры контактными приборами в течение определенного

периода времени, последующего анализа контактных и бесконтактных измерений с использованием физико-математических моделей процесса теплопередачи через контролируемую конструкцию.

В Москве тепловизионные обследования с определением фактических значений приведенного сопротивления теплопередаче наружных ограждающих конструкций согласно МГСН [5] "Энергосбережение в зданиях. Нормативы по теплозащите и тепловодо-электроснабжению" являются обязательными. Введение МГСН способствовало повышению качества строительных объектов. Например, качество строительства объектов, сданных в эксплуатацию в 2003 г., улучшилось на 50 % по сравнению с 2000 г. [15].

Для определения фактического состояния характеристик строительных объектов Технологическим институтом "ВЕМО" разработана и внедрена в практику технология комплексного теплового (тепловизионного) обследования зданий и строительных сооружений в реальных условиях их эксплуатации (в летний и зимний периоды) с определением их теплотехнических характеристик.

Технология определения приведенного сопротивления теплопередаче наружных ограждающих конструкций строительных сооружений в реальных условиях их эксплуатации включает в себя:

- 1) рекомендации по комплектации аппаратной части аппаратно-программного комплекса, реализующего методику;
- 2) рекомендации по установке измерительной аппаратуры;
- 3) методику измерения температурной истории обследуемого объекта;
- 4) методику проведения тепловизионного обследования;
- 5) методику обработки результатов измерений;
- 6) комплекс аппаратно-программных средств.

Технология позволяет определять величину приведенного сопротивления с погрешностью не более 15 %. В ее 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.

Разработанный метод позволяет достичь существенного экономического и технического эффекта. Преимущества метода заключаются в следующем:

- позволяет оперативно определять теплотехнические характеристики строительных конструкций;





— дает возможность проведения обследования без изменения режима эксплуатации строительной конструкции;

— допускается возможность энергетических обследований ограждающих конструкций зданий независимо от отопительного сезона, для энергетических обследований в летний период разработана специальная модификация методики [16];

— применяемые современные математические методы обработки данных позволяют сократить время обследования с 14 (требуемых по ГОСТ) до 5 рабочих дней.

Достоверность и надежность эксплуатации методик подтверждена результатами обследования более 500 строительных объектов в течение четырех лет. Разработанные математические методы и требования к аппаратному обеспечению реализованы в виде методик и аппаратно-программных комплексов, использующих стандартные измерительные и вычислительные средства. Предлагаемые методики обеспечивают определение показателей назначения с погрешностью не более 15 %, имеют соответствующие сертификаты Госстандарта РФ и признаны Госэнергонадзором РФ и Минэнерго РФ как базовые для определения качества строительства и эффективности энергосбережения строительных конструкций.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Дмитриев А.Н. Управление энергосберегающими инновациями в строительстве зданий: учеб. пособие. М.: АСВ, 2000. 320 с.
2. О реформе жилищно-коммунального хозяйства в Российской Федерации: Указ Президента РФ от 28 апреля 1997 г. № 425.
3. Тепловая защита зданий: СНиП 23-02-2003.
4. ГОСТ Р 51387. Энергосбережение. Нормативно-методическое обеспечение. Основные положения. Введ. 30 ноября 1999 г., № 485 ст. М.: Госстандарт России, 1999.
5. Энергосбережение в зданиях. Нормативы по теплозащите и тепловодоэлектроснабжению: Московские городские строительные нормы 2.01-99. М., 1999.
6. Совместное заседание Совета Безопасности Российской Федерации и президиума Государственного совета Российской Федерации от 24 февраля 2004 г. № 1.
7. Указ Президента Российской Федерации от 9 сентября 2004 г.
8. О городской программе по энергосбережению в городе Москве: Постановление Правительства Москвы от 9 октября 2001 г. № 912-ПП.
9. 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.
10. Будадин О.Н., Абрамова Е.В., Слитков М.Н. Методика диагностики и энергетических обследований наружных ограждающих конструкций строительных сооружений тепловизионным бесконтактным методом: свидетельство об аттестации Госстандарта России № 09/442-2001 от 09.07.2001 г. М.: Госстандарт России, 2001. 41 с.
11. Lebedev O., Kirzhanov D., Avramenko V., Budadin O. Thermal Nondestructive Testing of Buildings in Practice // Proc. of 16-th WCNDT, 2004. № 609. P. 1-8.
12. ГОСТ 31166-2003. Конструкции ограждающие зданий и сооружений. Метод калориметрического определения коэффициента теплопередачи. Введ. 01 июля 2003 г. М., 2003.
13. ГОСТ 26254-84. Здания и сооружения. Методы определения сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций. М., 1984.
14. Будадин О.Н., Абрамова Е.В., Троицкий-Марков Т.Е., Лебедев О.В. Разработка теплового метода промышленного контроля зданий и строительных сооружений: [электронный ресурс] // XVI конференция "Не разрушающий контроль и диагностика": сб. ст. СПб., 2002.
15. Будадин О.Н., Лебедев О.В., Абрамова Е.В., Авраменко В.Г., Троицкий-Марков Т.Е. Практическая реализация теплового неразрушающего контроля зданий и строительных сооружений // Сб. докл. 4-го Всерос. науч.-практ. семинара. СПб., 2004. С. 106-107.
16. Будадин О.Н., Абрамова Е.В., Круторов О.С. и др. Методика диагностики и энергетических обследований наружных ограждающих конструкций строительных сооружений тепловизионным бесконтактным методом (летний вариант): свидетельство об аттестации Госстандарта России № 02/442-2002 от 09.08.2002 г. М., 2002. 41 с.