

# Контроль. Диагностика

TESTING. DIAGNOSTICS



11 (101) 2006  
ноябрь



## Оборудование ультразвукового контроля

Нашему предприятию  
15 лет!

### ОБОРУДОВАНИЕ РУЧНОГО И МЕХАНИЗИРОВАННОГО КОНТРОЛЯ

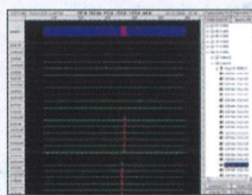
#### УИУ "СКАРУЧ"

малогабаритная ультразвуковая измерительная установка серии "Сканер"



### ОБОРУДОВАНИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО КОНТРОЛЯ

АУИУ "Сканер" - ультразвуковой многоканальный дефектоскоп



#### Установки механизированного УЗК

Сварных швов труб, листов,  
баллонов, валов, дисков  
ПЭ трубопроводов



#### Установки АУЗК

Сварных швов труб, листов, сосудов  
Нержавеющих и титановых труб  
Бесшовных труб



000 "Алтеc", г. Москва, Токмаков пер., д.14, стр. 3  
<http://www.ndt.ru/ultes> e-mail: [info@ultes.info](mailto:info@ultes.info)

тел./факс: (495) 267-99-77, 265-10-83  
(495) 267-67-92, 265-17-82

# Контроль. Диагностика



№ 11(101) ноябрь 2006

**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. СУХОРИКОВ  
С.А. ТИМАСhev  
В.М. ТРУХАНОВ  
В.Л. ЧАХЛОВ  
Г.С. ШЕЛИХОВ  
В.И. ЭТИНГОВ

**Ответственные за подготовку и выпуск номера:**

П.Е. КЛЕЙЗЕР  
С.В. СИДОРЕНКО  
В.Г. ШЕВАЛДЫКИН  
А.Г. ГАНЖЕНКО  
Д.А. ЕЛИСЕЕВ

Журнал зарегистрирован в Государственном Комитете Российской Федерации по печати. Свидетельство о регистрации № 016960 от 25.12.97

Журнал распространяется по подписке, которую можно оформить в любом почтовом отделении (индекс по каталогу агентства Роспечать – 47649) по Объединенному каталогу "Пресса России" – 29075, по каталогу "Почта России" – 60260 или непосредственно в издательстве. Тел.: (495) 268 36 54; 268 69 19 Факс: (495) 269 48 97; 268 85 26 Http://www.Mashin.ru E-mail: td@mashin.ru

## СОДЕРЖАНИЕ

### ● ИНФОРМАЦИЯ

Коновалов Н.Н., Бирюкова Н.П., Лисицын В.И., Полковников А.В. Всероссийский конкурс специалистов неразрушающего контроля – 2006 . . . . . 3

### ● КОНТРОЛЬ, ДИАГНОСТИКА ЗА РУБЕЖОМ

Ланге Ю.В. По страницам иностранных журналов . . . . . 8

### ● ТЕОРИЯ, МЕТОДЫ, ПРИБОРЫ, ТЕХНОЛОГИИ

Киржанов Д.В., Лебедев О.В., Будадин О.Н., Авраменко В.Г. Выбор оптимальной физико-математической модели для диагностики светопрозрачных ограждающих конструкций . . . . . 15

Ким-Серебряков Д.В., Авраменко В.Г., Лебедев О.В., Будадин О.Н., Киржанов Д.В. Тепловой контроль динамики остывания строительной конструкции при отключении систем теплоснабжения . . . . . 19

Смирнов Ю.В., Малай В.А., Будадин О.Н., Троицкий-Марков Т.Е. Тепловой контроль и мониторинг технического состояния потенциально опасных объектов в условиях ограниченного доступа . . . . . 24

Хренников А.Ю., Щербаков В.В., Языков С.А. Тепловизионный контроль как средство для обнаружения дефектов высоковольтного электрооборудования . . . . . 28

Асадов Х.Г., Керимов М.Д. Об оптимизации нестационарного режима работы систем дистанционного зондирования на примере теплового контроля энергоэффективности зданий и сооружений . . . . . 33

Чуриков А.А., Антонова Л.Л. Методика определения геометрических и временных параметров неразрушающего контроля комплекса теплофизических свойств . . . . . 36

Романенко Г.В., Чернышов В.Н. Повышение метрологического уровня методов и средств неразрушающего контроля ТФС материалов на основе алгоритмов оптимальной обработки контролируемых температурных полей . . . . . 46

Ксенофонтов В.Е. Разработка методов оценивания и диагностирования эффективности функционирования навигационных комплексов летательных аппаратов . . . . . 50

Чуприн В.А., Галаненко Д.В., Мищенко В.П. Вопросы автоматизации приемочного неразрушающего контроля металлоизделий на промышленных предприятиях СНГ . . . . . 54

Суслин М.А. Основы расчета микроволновых резонансных систем датчиков неразрушающего контроля исследуемых объектов . . . . . 60

Зацепин Н.Н. Магнитостатика деформированных тел. 1. Вывод дифференциальных уравнений, описывающих закономерности относительных напряжений и обобщенной коэрцитивной силы. . . . . 70

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.

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

## Выбор оптимальной физико-математической модели для диагностики светопрозрачных ограждающих конструкций

В настоящее время в России ужесточаются требования к проведению контроля состояния жилых зданий после окончания строительства и во время эксплуатации. В первую очередь это вызвано соображениями энергетической эффективности и безопасности. Растущие цены на энергоносители порождают спрос на энергетически эффективные жилые здания. До 30 % тепла теряется жилым зданием через его светопрозрачные ограждающие конструкции.

При выборе оконных блоков на этапе проектирования здания учитывается множество показателей. Принимается во внимание поведение оконного блока в климате места постройки здания. В первую очередь важно, чтобы используемые материалы не были подвержены ускоренному старению и соответствовали экологическим нормам. На втором месте стоит способность оконного блока эффективно удерживать тепло. Выбор оконного блока, обеспечивающего необходимый уровень эффективности, обычно осуществляется на основании сертификата качества, в котором указаны результаты испытаний оконного блока в климатической камере [2].

Однако, как показывает практика, результаты испытаний в климатической камере далеко не всегда соответствуют реальному поведению оконного блока при установке в стене здания. Такой оконный блок, возможно, полностью соответствует требованиям долговечности и экологической чистоты, однако может недостаточно эффективно препятствовать потерям тепла во время отопительного сезона. Причины несоответствия различны, это и заводской брак, и ошибки, допущенные при монтаже. Важным фактором является рассмотрение свойств оконного блока в отрыве от свойств всей ограждающей конструкции, частью которой он является. Чем более суров климат, в котором эксплуатируется такое здание, тем более остро встает эта проблема.

Даже если на этапе постройки здание полностью соответствовало по энергоэффективности проекту, ни один производитель светопрозрачных ограждающих

конструкций не может гарантировать неизменность параметров его изделий во времени. Необходимы методики диагностики состояния светопрозрачных ограждающих конструкций, аналогичные по возможностям существующим методикам теплового неразрушающего контроля непрозрачных для света ограждающих конструкций строительных сооружений. На настоящий момент такие методики отсутствуют [1].

### Постановка задачи

В процессе обработки экспериментальных данных, полученных в ходе обследований тепловыми методами, исследователи сталкиваются с серьезными вычислительными задачами. Для оптимизации процесса обследования важно выбрать его физико-математическую модель, с одной стороны, наиболее адекватно учитывающую особенности обследуемого объекта, а с другой – требующую минимальных вычислительных затрат при допустимой погрешности результатов. В данной статье ставится цель создать оптимальную физико-математическую модель поведения светопрозрачной ограждающей конструкции в условиях ее эксплуатации, удовлетворяющую перечисленным требованиям.

### Обследуемый объект

Типичная светопрозрачная ограждающая конструкция, например стеклопакет, состоит из двух листов стекла с воздушной прослойкой. Модель поведения системы для определения ее теплотехнических характеристик должна быть основана на уравнении теплопроводности. В силу специфики объекта учет переноса массы (например, воды) в задаче не требуется. Выбор модели состоит из определения числа размерностей объекта и выявления возможности использования каких-либо приближений при решении уравнения теплопроводности.

Выбор модели осуществляется в 2 этапа. На первом этапе обследуемый объект помещается в климатиче-

скую камеру и подвергается в ней действию условий, аналогичных условиям окружающей среды при эксплуатации светопрозрачной ограждающей конструкции. На втором этапе поведение обследуемого объекта описывается с помощью различных математических моделей.

### Моделирование нестационарного режима теплопередачи

Исходя из геометрических характеристик обследуемого объекта, изначально для моделирования процесса был выбран одномерный режим передачи тепла. Толщина листа стекла много меньше его размеров в перпендикулярных направлениях, поэтому выбор одномерной модели представляется весьма логичным. Адекватность одномерной модели при моделировании поведения воздушной прослойки не очевидна. Это утверждение проверялось экспериментально.

Изначально наиболее адекватной обследуемому объекту считалась модель нестационарной теплопроводности. Эта модель прошла многократную проверку при обследовании непрозрачных для света ограждающих конструкций здания и показала хорошие результаты.

Модель основана на одномерном нестационарном уравнении теплопроводности

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

с заданием начальных условий в виде стационарного распределения температуры в одномерном многослойном объекте и заданием граничных условий третьего рода в виде

$$-\lambda\frac{\partial T(z, t)}{\partial z}\Big|_{z=z_0} = \alpha(T(z, t) - T_0(t))\Big|_{z=z_0} \quad (2)$$

В уравнениях (1)–(2)  $c(z)$  является удельной теплоемкостью среды,  $\rho(z)$  — удельной плотностью среды,  $\lambda(z)$  — удельной теплопроводностью среды, а величина  $T(t, z)$  означает изменение распределения температуры вдоль толщины объекта во времени. Уравнение (1) решается для области между внутренней поверхностью внутреннего стекла и внешней поверхностью внешнего стекла. Для обеих поверхностей объекта задаются граничные условия в виде (2), в этом уравнении  $\alpha$  обозначает коэффициент теплоотдачи соответствующей поверхности объекта, а  $\lambda$  —

удельный коэффициент теплопередачи материала объекта вблизи соответствующей поверхности. Поведение окружающей среды вводится в систему уравнений с помощью зависимости  $T_0(t)$  — зависимости температуры воздуха вблизи поверхности объекта. В ходе эксперимента измеряется температура воздуха вблизи обеих поверхностей объекта: обращенной в помещение и обращенной на улицу.

### Проверка адекватности одномерного приближения

Для проведения эксперимента типичный оконный блок был помещен в однополостную климатическую камеру. Оконный блок состоит из рамы с одной створкой, внутри створки находится однополостной стеклопакет. Область внутри камеры соответствовала улице, область лаборатории вне камеры — помещению. Оконный блок был установлен в бетонную оправу, стык между рамой оконного блока был обработан строительной пеной. Схема установки оконного блока в камере представлена на рис. 1, а. В ходе эксперимента меняли температуру внутри климатической камеры для моделирования стационарного и нестационарного режимов теплопередачи.

На поверхности стеклопакета, рамы блока и бетонной оправы в ходе эксперимента измеряли температуру поверхности и плотности теплового потока. Для оценки общего состояния объекта, а также для сопоставления данных контактных измерений и инфракрасного обследования проводили измерения тепловизором.

Записанные автоматическими самопишущими датчиками зависимости представлены на рис. 2. Изображенному временному промежутку соответствует нестационарный режим передачи тепла. Соответствующие тепловые потоки изображены на рис. 3, а.

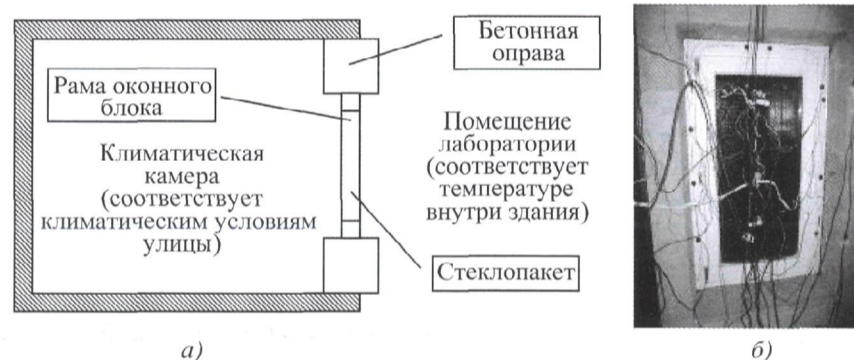
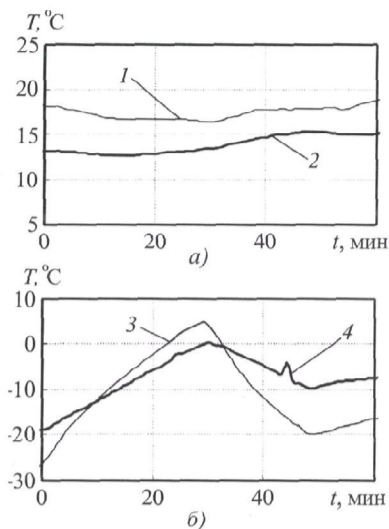


Рис. 1. Однополостная климатическая камера для испытания оконного блока: а — схема установки оконного блока в камере; б — внешний вид оконного блока во время эксперимента



Рис. 2. Зависимости от времени температуры воздуха и поверхностей стекла оконного блока: а – поверхности стекла с теплой стороны; б – поверхности стекла с холодной стороны; 1 – теплый воздух; 2 – теплая поверхность; 3 – холодный воздух; 4 – холодная поверхность



Экспериментальные данные использовали для решения обратной задачи теплопроводности с помощью уравнения нестационарной теплопроводности. При решении обратной задачи теплопроводности приняли за известные физические параметры стекла. Подразумевали, что воздушная прослойка между стеклами ведет себя как материал с соответствующими удельной плотностью, удельной теплоемкостью и удельной теплопроводностью. Неизвестной величиной считали удельную теплопроводность, проводили вариации этой величины.

Для восстановления значения теплопроводности применяли широко используемый при решении обратных задач теплопроводности метод функционала правдоподобия [3]. Метод основан на построении функционала вида

$$\Phi[U] = \|U_{\text{мес}}(\tau) - U(\tau)\|, \quad (3)$$

где  $U(\tau)$  – некоторая вычисленная функция системы;  $U_{\text{мес}}(\tau)$  – измеренная функция системы. В качестве разницы между функциями использовали квадратичную невязку  $\int (U_{\text{мес}}(\tau) - U(\tau))^2 d\tau$ , интегрирование производили по промежутку интервала измерения. Вычисленная функция зависела от коэффициента теплопроводности воздуха. Таким образом, функционал (3) превращался в функцию

$$\Phi(\lambda) = \int_0^t (U_{\text{мес}}(\tau) - U(\tau, \lambda))^2 d\tau. \quad (4)$$

Разбиение исходного интервала измерений на интервалы меньшей продолжительности позволяет проводить статистический анализ результатов вычислений. На рис. 3, б представлен пример функционала правдоподобия, получаемого в ходе данной процедуры. Значение коэффициента удельной теплопровод-

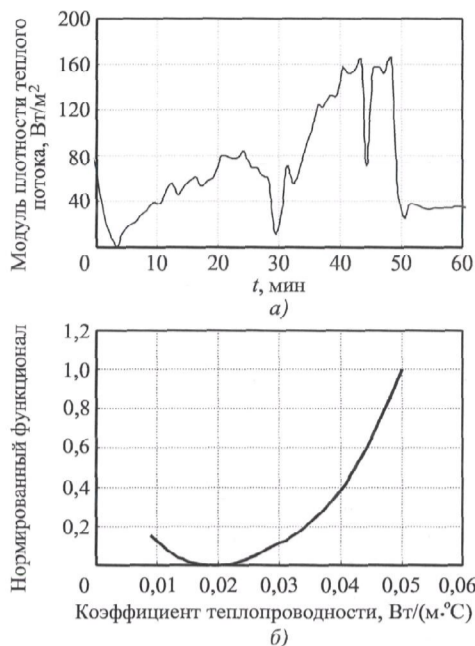


Рис. 3. Зависимость модуля плотности теплового потока через поверхность оконного блока (а), функционал правдоподобия (б)

ности, полученное при поиске минимума функционала правдоподобия на каждом из временных интервалов, считалось независимым косвенным измерением. В ходе статистической обработки независимых измерений было получено значение удельной теплопроводности воздуха  $34 \pm 3$  мВт/м·°С. Небольшой статистический разброс результатов вычислений говорит о справедливости одномерного нестационарного приближения при исследовании поведения объекта в режиме, близком к эксплуатационному.

**Обоснование стационарного приближения**

Между процессом передачи тепла в стеклопакете и процессом передачи тепла в стене здания есть существенная разница. При изготовлении стен используются материалы с большой удельной теплоемкостью и низкой теплопроводностью. Диапазон изменения удельных плотностей и удельных теплопроводностей сортов стекла, применяемых для изготовления оконных блоков и прозрачных для света стен, колеблется в очень большом диапазоне. Для определения приближения, которое целесообразно использовать, можно сравнить характерное время системы с характерным временем изменения параметров окружающей среды. Характерное время системы можно оценить по формуле

$$t = \frac{L^2 \rho c}{\pi^2 \lambda}, \quad (5)$$

где  $L$  – характерный линейный масштаб;  $\rho$  – удельная плотность материала, из которого изготовлен объект;  $c$  – удельная теплоемкость;  $\lambda$  – удельная теплопроводность материала. Согласно этой формуле характерное время для 3-миллиметрового листа стекла составляет около 5 мин, а для 8-миллиметровой воздушной прослойки – меньше минуты. Эти значения времени много меньше суток – характерного времени процессов, протекающих в окружающей среде [4]. Можно предположить, что в физико-математической модели поведения светопрозрачной ограждающей конструкции целесообразно использовать стационарное приближение.

Для подтверждения этого предположения был проведен эксперимент, аналогичный описанному эксперименту с использованием климатической камеры. Эксперимент проходил в условиях эксплуатации оконного блока. В ходе эксперимента записывали временные зависимости температур поверхностей оконного блока и окружающего воздуха (рис. 4, б) и временные зависимости плотностей теплового потока (рис. 4, а).

Локальное сопротивление теплопередаче оконного блока и его термическое сопротивление вычисляли в избранные моменты на основании известных теплофизических формул:

$$R_{\alpha} = \frac{T_{in}^a - T_{ex}^a}{q}; \quad (6)$$

$$R = \frac{T_{in}^w - T_{ex}^w}{q}. \quad (7)$$

В формулах (6) и (7)  $R_{\alpha}$  и  $R$  – локальное сопротивление теплопередаче и термическое сопротивление оконного блока;  $q$  – плотность теплового потока, протекающего через оконный блок в момент измерения величин  $T_{in}^a$ ,  $T_{ex}^a$ ,  $T_{in}^w$  и  $T_{ex}^w$  – температуры воздуха внутри и снаружи помещения и температуры внутренней и внешней поверхностей оконного блока. Обработка массива данных позволила провести статистическую обработку результатов независимых косвенных измерений. Сопротивление теплопередаче оконного блока оказалось равно  $0,407 \pm 0,009 \text{ м}^2 \cdot \text{°С/Вт}$ , термическое сопротивление –  $0,222 \pm 0,005 \text{ м}^2 \cdot \text{°С/Вт}$ . Оба значения соответствуют проектным, погрешность их вычисления составляет около 3%. Такой результат дает основание считать выбранное приближение адекватным поставленной задаче.

#### Вывод

При обследовании светопрозрачных ограждающих конструкций после монтажа строительного сооружения в режиме их эксплуатации целесообразно исполь-

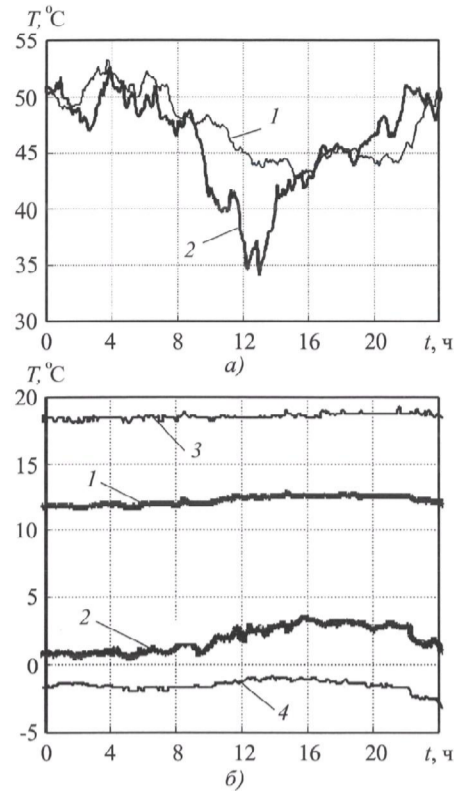


Рис. 4. Временные зависимости плотности тепловых потоков (а), температуры воздуха и поверхности объекта (б): 1, 2 – теплая и холодная поверхности стекла соответственно; 3, 4 – теплый и холодный потоки воздуха соответственно

зовать методы диагностики и контроля качества, основанные на решении прямых и обратных задач теплопроводности. При решении задач теплопроводности хорошо выполняются одномерное и линейное приближения. С использованием таких приближений возможно создание метода оперативной диагностики состояния светопрозрачных ограждающих конструкций.

#### ЛИТЕРАТУРА

- ГОСТ 31166–2003. Конструкции ограждающие зданий и сооружений. Метод калориметрического определения коэффициента теплопередачи, стандарт введен в действие с 1 июля 2003 г.
- ГОСТ 26602.1–99. Блоки оконные и дверные. Методы определения сопротивления теплопередаче, стандарт введен в действие 1 января 2000 г.
- Thermal Nondestructive Testing of Buildings in Practice / O. Lebedev, D. Kirzhanov, V. Avramenko and O. Budadin // Proc. of 16<sup>th</sup> WCNDT. Montreal, 2004. № 609. P. 1–8.
- Будадин О.Н., Абрамова Е.В., Родин М.А., Лебедев О.В. Тепловая дефектометрия зданий и строительных сооружений // Дефектоскопия. 2003. № 5. С. 77–94.