

Об авторах



Владимир Платонович Вавилов — доктор техн. наук, проф., член-корр. Международной Инженерной Академии, заведующий лабораторией тепловых методов контроля Томского НИИ интроскопии.

В. П. Вавилов разработал основы теории теплового неразрушающего контроля, включая метод динамической тепловой томографии. Принимал участие в кооперативных научных исследованиях в США, Канаде, Англии, Италии, Германии, Финляндии и Японии. Является разработчиком пакета компьютерных программ для моделирования задач теплового контроля и обработки экспериментальных данных, а также соавтором методик по телевизионному обследованию строительных сооружений и дымовых труб. Представляет интересы стран СНГ в Европейской Рабочей Группе по количественной ИК термографии (QIRT). Аттестован по III уровню теплового контроля. Автор пяти монографий и более 160 статей.

Инфракрасная термография является эффективным средством технической диагностики в силу своей дистанционности, оперативности и возможности контролировать тепловые процессы в энергонагруженных объектах. Благодаря появлению нового поколения портативных тепловизоров, области применения термографии непрерывно расширяются, прежде всего, в энергетике.



Альберт Николаевич Александров — ведущий специалист ОАО «Фирма ОРГРЭС» в области инфракрасного контроля состояния дымовых труб, зданий, теплотрасс и тепломеханического оборудования.

Соавтор ряда методик и статей по применению инфракрасных приборов в энергетике.

Библиотека электротехника

**В. П. Вавилов,
А. Н. Александров**

ИНФРАКРАСНАЯ ТЕРМОГРАФИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА В СТРОИТЕЛЬСТВЕ И ЭНЕРГЕТИКЕ

**ПРИЛОЖЕНИЕ К ЖУРНАЛУ
ЭНЕРГЕТИК**

Вниманию специалистов

Вышли в свет следующие выпуски

“Библиотечки электротехника”:

Конюхова Е. А., Киреева Э. А. **Надежность электроснабжения промышленных предприятий.**

Могузов В. Ф. **Обслуживание силовых трансформаторов** (части 1 и 2).

Таубес И. Р., Удрис А. П. **Использование реле ДЗТ-21 и ДЗТ-23 для защиты трансформаторов, автотрансформаторов и блоков.**

Киреева Э. А. **Повышение надежности, экономичности и безопасности систем цехового электроснабжения.**

Овчинников В. В. **Защита электрических сетей 0,4 – 35 кВ** (части 1 и 2).

Иноземцев Е. К. **Ремонт турбогенераторов** (части 1 и 2).

Яковлев Л. В. **Пляска проводов на воздушных линиях электропередачи и способы борьбы с ней.**

Овчаренко Н. И. **Дифференциально-фазная высокочастотная защита линий электропередачи напряжением 110 – 220 кВ ДФЗ-201.**

Шабад М. А. **Автоматизация распределительных электрических сетей с использованием цифровых реле.**

Георгиади В. Х. **Поведение энергоблоков ТЭС при перерывах электроснабжения собственных нужд** (части 1 – 3).

Семенов В. А. **Основы оперативного диспетчерского управления энергосистемами.**

Подписку можно оформить в любом почтовом отделении связи по объединенному каталогу “ПРЕССА РОССИИ”. Том 1. **Российские и зарубежные газеты и журналы.**

Индексы “Библиотечки электротехника”

— приложения к журналу “Энергетик”

88983 — для предприятий и организаций;

88982 — для индивидуальных подписчиков.

Адрес редакции
журнала “Энергетик”:

109280, Москва, ул. Автозаводская, д. 14/23.

Телефон (095) 275-19-06

E-mail: energy@mail.magelan.ru

Библиотечка электротехника

— приложение к журналу “Энергетик”

Основана в июне 1998 г.

Выпуск 9(57)

**В. П. Вавилов,
А. Н. Александров**

ИНФРАКРАСНАЯ ТЕРМОГРАФИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА В СТРОИТЕЛЬСТВЕ И ЭНЕРГЕТИКЕ

Москва

НТФ “Энергопрогресс”, “Энергетик”

2003

УДК 621.384.3
ББК 31.16
В 12

Главный редактор журнала "Энергетик" А. Ф. ДЬЯКОВ

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

"Библиотечки электротехника"

В. А. Семенов (*председатель*), И. И. Батюк (*зам. председателя*),
Б. А. Алексеев, К. М. Антипов, Г. А. Безчастнов, А. Н. Жулев,
В. А. Забегалов, В. Х. Ишкин, Ф. Л. Коган, В. И. Кочкарев,
Н. В. Лисицын, Л. Г. Мамиконянц, Л. Ф. Плетнев, В. И. Пуляев,
Ю. В. Усачев, М. А. Шабал

В. П. Вавилов, А. Н. Александров

В 12 Инфракрасная термографическая диагностика в строительстве и энергетике. — М.: НТФ "Энергопрогресс" 2003. — 76 с.; ил. [Библиотечка электротехника, приложение к журналу "Энергетик", Вып. 9(57)].

В брошюре обобщен опыт российских специалистов в области практических приложений метода инфракрасной термографии, прежде всего, при обследовании строительных сооружений и дымовых труб. Описаны новейшие мировые тепловизоры и рассмотрены методические особенности тепловизионных испытаний и процедур обработки данных.

Для специалистов центральных заводских лабораторий, практических операторов-термографистов и студентов соответствующих специальностей.

ISSN 0013-7278 © НТФ "Энергопрогресс", "Энергетик", 2003

Предисловие

Экономическая ситуация, сложившаяся в последние годы в энергетике, заставляет принимать меры, направленные на увеличение срока эксплуатации различного оборудования.

Решение задач по оценке технического состояния зданий, сооружений и тепломеханического оборудования электростанций в значительной степени связано с внедрением эффективных методов инструментального контроля и технической диагностики, в частности, основанных на дистанционном анализе поверхностных температурных полей объектов по их собственному тепловому излучению. Термин "неразрушающий контроль" относится к испытаниям материалов, узлов и машин, в то время как "техническая диагностика" связана с оценкой сложных технических систем. В англоязычной научно-технической литературе можно встретить термины "nondestructive testing" (неразрушающий контроль), "predictive maintenance" (обслуживание с прогнозом), а также "condition monitoring" (исследование технологических процессов).

В настоящей брошюре описан метод технической диагностики (ТД), основанный на применении инфракрасной (ИК) термографии, или тепловидения. Данный метод получил сравнительно широкое распространение в электроэнергетике, в связи с чем многие энергетические предприятия организовали тепловизионные диагностические лаборатории. В то же время, учитывая изначальную универсальность тепловизионного метода и значительную стоимость аппаратуры, необходимо расширять номенклатуру контролируемого оборудования, безотказная и эффективная работа которого связана с поддержанием нормативных температурных режимов.

В брошюре рассмотрены возможности ИК термографии при диагностике зданий, дымовых труб, тепломеханического оборудования, тепловых сетей и прудов-охладителей ТЭС. Данное издание можно рассматривать как самостоятельное дополнение к недавно опубликованной брошюре С. А. Бажанова [1], посвященной тепловизионной диагностике электротехнического оборудования. Испо-

льзованы результаты многочисленных практических обследований, выполненных научно-внедренческой фирмой "Инновация" (г. Томск) и ОАО "Фирма ОРГРЭС" (г. Москва), в том числе в сотрудничестве с компанией "Stockton Infrared Services" (США). Наибольшее внимание уделено применению тепловизоров в диагностике строительных сооружений и дымовых труб, т.е. там, где в последние годы возник устойчивый спрос на тепловизионные осмотры и где авторы обладают наибольшим практическим опытом.

Авторы считают своим долгом выразить признательность сотрудникам ЗАО "ПАНАТЕСТ" (г. Москва) М. А. Вихрову и С. А. Милованову, материалы которых были использованы при написании брошюры, а также сотрудникам "Сибтехэнерго" (г. Новосибирск) В. Г. Гилевичу и В. Г. Демину, участвовавшим в тепловизионных обследованиях.

Все замечания по настоящей брошюре

просьба направлять по адресу:

115280, г. Москва, Автозаводская ул., 14/23.

Редакция журнала "Энергетик".

Авторы

Список использованных терминов

Аэротермография — тепловая съемка с самолета или вертолета

Внутренняя термография — тепловая съемка внутренних поверхностей ограждений зданий и сооружений

Инфракрасная диагностика (съемка, осмотр, инспекция) — применение инфракрасной аппаратуры с целью получения специфической информации о качестве структуры, системы, процесса или объекта

Инфракрасная термография (тепловидение) — метод получения информации об объекте путем бесконтактной регистрации собственного, отраженного и прошедшего оптического излучения объекта в инфракрасном диапазоне

Качественная инфракрасная термография — метод анализа структуры, системы, процесса или объекта путем наблюдения особенностей текстуры инфракрасного изображения

Количественная инфракрасная термография — метод анализа структуры, системы, процесса или объекта путем присвоения численных значений наблюдаемым особенностям инфракрасного изображения

Наземная термография — тепловая съемка элементов земного ландшафта или наружных поверхностей ограждений зданий и сооружений

Оператор-термографист — специалист, выполняющий инфракрасную диагностику и обеспечивающий сбор и анализ термографической информации

Оптический пирометр — устройство для измерения средней температуры тел в пределах угла зрения по собственному оптическому (тепловому) излучению тел

Спротивление теплопередаче ограждающей конструкции — сумма термического сопротивления ограждающей конструкции и терми-

ческих сопротивлений наружного и внутреннего пограничных слоев, примыкающих к ограждающей конструкции

Температурный напор — разность температур воздуха снаружи и внутри помещения

Температурный перепад — локальное изменение температуры в месте тепловой аномалии

Тепловая аномалия — локальное изменение распределения теплового излучения объекта, трактуемое как отклонение от нормы

Тепловизор (термограф) — устройство для получения тепловых (инфракрасных) изображений

Тепловое (инфракрасное) изображение — изображение объекта контроля, создаваемое за счет собственного теплового излучения и/или различий в излучательной (отражательной, пропускательной) способности поверхности объекта контроля

Тепловой неразрушающий контроль — неразрушающий контроль, основанный на регистрации температурных полей объекта контроля

Термическое (тепловое) сопротивление однослойной ограждающей конструкции — отношение толщины конструкции к ее коэффициенту теплопроводности

Термограмма (цветная и/или черно-белая) — тепловое (инфракрасное) изображение объекта контроля или его отдельного участка

Термографическая документация — представление результатов инфракрасной диагностики в виде фотографии, видеопленки или другой твердой или электронной копии, полученной с помощью любых технических средств

ГЛАВА ПЕРВАЯ

Краткая характеристика современных тепловизоров

1.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

В отечественной литературе встречаются три термина, обозначающих технику дистанционной регистрации и визуализации тепловых полей: “теповидение”, “термовидение” и “термография”. Соответствующим англоязычным термином является “ИК термография” (IR thermography).

Эксперименты в области тепловидения с использованием различных физических эффектов, в частности, эвапорографии, проводились еще до второй мировой войны, в том числе и в России. Часто считают, что прообразом современных тепловизоров с оптико-механическим сканированием явился бортовой тепловизор фирмы “Barnes” (США), разработанный в 1954 г. и положивший начало так называемым “впередсмотрящим” ИК системам (Forward Looking Infrared — FLIR), которые размещают на летательных аппаратах. В этих тепловизорах предусмотрена только строчная развертка сцены, поскольку кадровую развертку осуществляют за счет перемещения летательного аппарата относительно поверхности Земли. В начале 60-х годов шведская фирма “AGEMA Infrared Systems” (тогда AGA, сейчас “FLIR Systems”) разработала первый настоящий ИК тепловизор для военных целей. Его гражданская модификация модель Thermovision-650 больше напоминала телескоп из-за использования оптики большого диаметра. Следующая коммерческая модель — Thermovision-665 весила 35 кг, требовала охлаждения приемника жидким азотом и также была далека от последующих портативных приборов (интересно отметить, что именно эта модель послужила прототипом известного отечественного прибора ТВ-03, который выпускался без особых изменений до начала перестройки). Прибор Thermovision-680 (1968 г.) со сменной оптикой стал первым коммерческим тепловизором, получившим широкое распространение.

Введение аккумуляторного питания в следующую модель — Thermovision-750 превратило ее в портативный измерительный тепловизор, который однако требовал размещать в поле зрения температурный эталон. В 1978 г. была разработана модель Thermovision-780, в которой был использован встроенный эталон температуры, а запись термоизображений производили на видеопленку. В 1986 г. фирма отказалась от охлаждения ИК приемника жидким азотом и ввела в модель Thermovision-870 термоэлектрическое охлаждение наряду с процессором Хаски для расчета температуры и калибровки в реальном времени. В 1988 г. на рынке появился тепловизор Thermovision-400 массой около 7 кг, который в течение многих лет оставался непревзойденным прибором для полевой ИК съемки. В 1995 г. начал выпуск нового поколения тепловизоров серии Thermovision-500, в котором применены мозаичные детекторы, устанавливаемые в фокальной плоскости (Focal Plane Array — FPA). В ряде моделей этой серии термоэлектрический холодильник, обеспечивающий относительно невысокий уровень охлаждения, заменен компрессором Стирлинга, с помощью которого ИК приемник охлаждается до $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$. Новейшими приборами фирмы “FLIR Systems” являются тепловизоры ThermaCam E2 и ThermaCam P60. Близкие по техническим параметрам тепловизоры выпускаются рядом других фирм: “Raytheon” (США), “Indigo” (США), “Santa Barbara Focalplane” (США), “Mikron” (США), “AIM” (Германия), “CEDIP” (Франция), “NEC” (Япония). В 2002 г. на мировом рынке заявили о себе китайские производители тепловизоров (фирма “Guangzhou Sat Infrared Technology”), использующие импортные детекторы излучения.

Серийные российские тепловизоры отстают по техническим показателям от западных приборов. В современных портативных тепловизорах широко применяют *неохлаждаемые болометрические матрицы*, что фактически означает появление *ИК телевидения*. Наибольшее пространственное и температурное разрешение достигается в приборах, использующих матричные детекторы, работающие по принципу квантовых ловушек (QWIP детекторы), однако эти детекторы требуют охлаждения до температуры $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$. Следует заметить, что FPA матрицы зарубежного производства, как правило, входят в список стратегических изделий, и их поставка в Россию требует оформления лицензий соответствующих ведомств (в США — Департамента торговли или Госдепартамента).

Тепловизоры, используемые в промышленной технической диагностике, подразделяют на *показывающие* и *измерительные*; соответственно их заводская стоимость находится в пределах 7 — 17 тыс. и 25 — 50 тыс. дол. США. В последние годы получили распространение так называемые *тепловизионные модули*, которые включают в

Таблица 1. Технические параметры отечественных и зарубежных тепловизоров (данные по состоянию на апрель 2002 г.)*

Модель, фирма, страна	Диапазон измеряемых температур, $^{\circ}\text{C}$	Температурная чувствительность, $^{\circ}\text{C}$	Спектральный диапазон, мкм	Формат кадра и битность цифрового представления	Частота кадров, Гц	Рабочая температура, $^{\circ}\text{C}$	Система записи термограмм	Масса, кг	Цена**, тыс. дол.
ТВ-04, “Исток”	10 + 100	0,15	3,5 + 5,5	128 × 128	1/3	—	Через компьютер	3	—
Радага-4, АОМЗ, Украина	25 + 50	0,2	—	140 × 132	25	—	Через компьютер	—	—
TR1-9301, МВП “Т-П-Т”	—	0,1	8 + 13	175 × 200	6	-30 + +40	—	8,4 (2 блока)	—
Метис-2 (военн.), ГИПО	Показывающий прибор	—	8 + 13	—	—	-50 + +60	—	11	—
Сосна, “Метрон”	Показывающий прибор -20 + +200	0,1	3 + 5	48-элементный детектор	25	-20 + +40	—	3,1	—
ИРГИС-200, “Иртис”	-20 + 350	0,05	3 + 5 + 8 + 12	256 × 256	1/1,5	-10 + +45	Через компьютер	1,8 (камера)	18
ИСКРА, ГИПО	-10 + 40	0,1	—	—	—	—	31 термограмма в RAM	—	—
ТКВр-ИФП, ИФП	20 + 41 (мелдлина)	0,03	2,9	128 × 128	—	—	—	5	20
Тепловизор “Сыч”	Показывающий прибор	0,1	8 + 12	Микролометр	—	-15 + +45	Отсутствует	2,8	—

Модель, фирма, страна	Диапазон измеряемых температур, °С	Температурная чувствительность, °С	Спектральный диапазон, мкм	Формат кадра и битность цифрового представления	Частота кадров, Гц	Рабочая температура, °С	Система записи термограмм	Масса, кг	Цена**, тыс. дол.
ТН-4604МП, "Спектр", Москва	Измерение в локальной зоне	0,15	8 + 13	320 × 240 (неохл.)	25	-	Ввод в компьютер	2,7	25
<i>Зарубежные тепловизоры и передающие ИК камеры</i>									
ThermaCAM 545, FSI, США	Показывающий прибор -20 + +350	0,1	7,5 + 13	320 × 240 (неохл.)	50 (60)	-15 + +50	PCMCIA карта, 8 бит, PAL	1,9	27,5
ThermaCAM 695, FSI, США	Измерительный прибор -40 + 2000	0,1	7,5 + 13	320 × 240 (неохл.)	50 (60)	-15 + +50	PCMCIA карта, 14 бит, PAL, запись звука	1,9	48,9
ThermaCAM SC 3000, FSI, США	Измерительный прибор для научных исследований -20 + +2000	0,02	8 + 9 GaAs QWIP	320 × 240	50 (60)	-15 + +50	PCMCIA карта, 14 бит, PAL, запись звука	3,2	81,7
ThermaCAM PM 390, FSI, США	Измерительный прибор -10 + +2000 (2000)	0,07	3,4 + 5 PtSi FPA	256 × 256	50 (60)	-15 + +50	PCMCIA карта, 12 бит, PAL	1,7	56,8
ThermaCAM E2, FSI, США	Измерительный прибор -20 + +250	0,12	7,5 + 13	320 × 240 (неохл.)	NTSC	-15 + +45	Флэш-карта, до 50 изображений JPEG	0,7	28 13 (показывающая версия)

Модель, фирма, страна	Диапазон измеряемых температур, °С	Температурная чувствительность, °С	Спектральный диапазон, мкм	Формат кадра и битность цифрового представления	Частота кадров, Гц	Рабочая температура, °С	Система записи термограмм	Масса, кг	Цена**, тыс. дол.
ThermaCAM P60, FSI, США	Измерительный прибор -40 + +2000	0,06	7,5 + 13	320 × 240 (неохл.)	NTSC, PAL	-15 + +45	Флэш-карта, 128 Мбайт	2	-
Jade II, CEDIP, Франция	Измерительный прибор До 1200	0,02 - 0,1 в зависимости от модели	8 + 14 3 + 5 7,5 + 9,6	320 × 240 (неохл.)	150	-	Вывод на PC	2	-
TVS-620, Nippon Avionics, Япония	Измерительный прибор -20 + +900	0,1	8 + 14	320 × 240 12 бит	30	0 + +40	PAL, NTSC, RS-232C, флорпи-диск	2	-
MIKroScan-7200, "Mikron", США NES, Япония	Измерительный прибор -10 + +2000	0,1	3 + 5,2	255 × 233	2; 22	-10 + +50	PCMCIA карта	2,5	26
MIKroScan-7200, "Mikron", США NES, Япония	Измерительный прибор -40 + +2000	0,1	8 + 14	320 × 240 (неохл.)	30 (?)	-	PCMCIA карта	1,8	35
Explorer, "Raytheon", США	Измерительный прибор -20 + +900	0,15	8 + 14	320 × 240 (неохл.)	30	0 + +40	RS-232, PCMCIA, карта 10 Мбайт	2,9	35 (цветн.)
PalmIR 225 Digital, "Raytheon", США	Показывающий прибор	-	7 + 14	160 × 120 (неохл.)	30; 25	-20 + +49	-	1,2	7 (ч/б монитор) 18 (цветн.)
Radiometric 500 Digital, "Raytheon", США	Измерительный прибор	0,1	7 + 14	320 × 240 (неохл.)	50; 60	0 + +40	Запись на флэш-карту 16 Мбайт	2,3	25 (цветн.)

Модель, фирма, страна	Диапазон измеряемых температур, °С	Температурная чувствительность, °С	Спектральный диапазон, мкм	Формат кадра и битность цифрового представления	Частота кадров, Гц	Рабочая температура, °С	Система записи термограмм	Масса, кг	Цена**, тыс. дол.
Galileo, "Amber Raytheon", США	Показывающий прибор	0,025	3 ÷ 5	Охлаждающий FPA детектор 256 × 256	1400 (при 64 × 64)	0 + 50	12 бит	4,5	90
SAT-HY6800, "Guangzhou Sat Infrared Technology", Китай	Измерительный прибор -10 + 2000	0,08	8 + 14	320 × 240 (неохл.)	50	-	-	2,5	48
IR913	Измерительный прибор -10 + 1500	0,06	8 + 14	320 × 240 (неохл.)	50	-20 ÷ +30	PCMCIA карта 32 Мбайт	2,5	24
ImageIR LC, "Santa Barbara Focairplane", США	Показывающий прибор	0,02	3 ÷ 5	Охлаждающий FPA детектор 256 × 256	60	-	RS 170, 14 бит	-	40
AEG Infragot-Module, Германия	Показывающий прибор	0,01	8 + 10	256 × 256 QWIP	200	-	-	-	-
VARIOSCAN-3011, "Jenoptik Laser Optik Systeme GmbH", Германия	Измерительный прибор -40 + 1200	0,03	8 + 12	300 × 200 HgCdTe, жидкий азот	0,8; 0,2; 0,4	-10 + +40	Флэш-карта	5	-
VarioTHERM, "Jenoptik Laser Optik Systeme GmbH", Германия	Измерительный прибор -25 + 1200	0,1	3,4 + 5	256 × 256 PHSi, Стирлинг	50	-10 + +50	PCMCIA	3,9	-

Модель, фирма, страна	Диапазон измеряемых температур, °С	Температурная чувствительность, °С	Спектральный диапазон, мкм	Формат кадра и битность цифрового представления	Частота кадров, Гц	Рабочая температура, °С	Система записи термограмм	Масса, кг	Цена**, тыс. дол.
Alpha, "Indigo Systems", США	Показывающий прибор	-	7,5 + 13,5	160 × 128	25 (CCIR) 30(RSI70A)	0 ÷ +45	Монохромный, RS-170, формат 12-бит, цифровой выход	0,2	15
Omega, "Indigo Systems", США	Показывающий прибор с интервалом до 500 °С	0,085	7,5 + 13,5	160 × 128	25 (CCIR) 30(RSI70A)	0 + +40	Монохромный, RS-170, формат 14-бит, цифровой выход	0,12	9 - 13 (в зависимости от объектива)
VisIR Ti 100, Ti 200, "Indigo Systems and Thermoteknix Systems", США	Измерительный прибор -50 + 500 °С	0,085	7,5 + 13	160 × 120 (неохл.)	30	50	14 бит, PCMCIA карта	1,6	20 - 30
MicroIR LTC5506, "BAE Systems", США	Показывающий прибор	0,1	8 + 14	320 × 240 (неохл.)	60	-20 + +50	Видеовыход RS-170, последовательный интерфейс RS-422	2,5	15 - 25 (в зависимости от объектива)

* Приведены по возможности наиболее представительные модели отдельных серий (использованы материалы выставки "Аэро-Сенс-2002", Орландо). Данные таблицы не носят рекламного или рекомендательного характера и не отражают предпочтений авторов.

** Цены завода-изготовителя. Ряд цен указан на основе частной информации; цена зависит от комплектации аксессуарами.

*** Ряд российских тепловизоров не упомянут ввиду малого объема их выпуска.

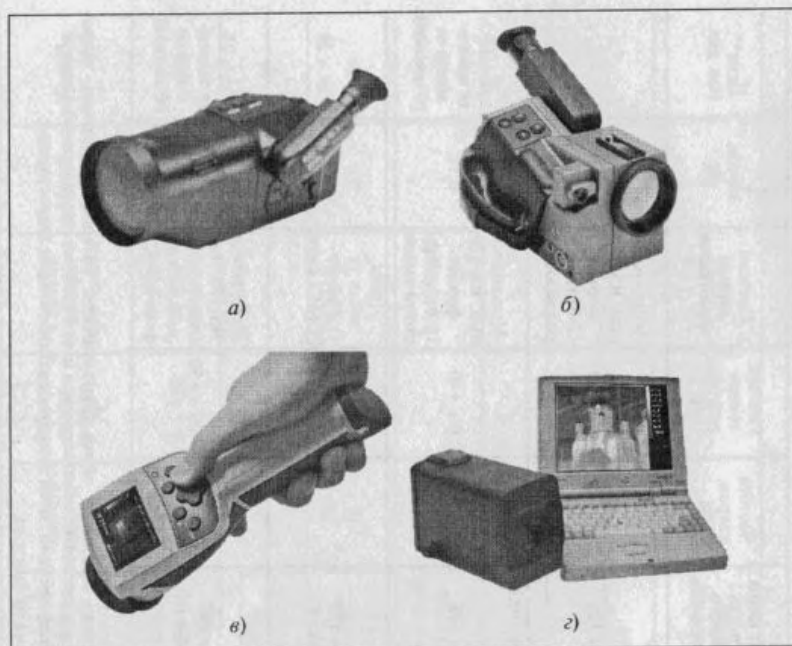


Рис. 1. Типовые модели тепловизоров:

a — показывающий тепловизор PalmIR 250 Digital; *б* — измерительный тепловизор ThermoCam 695; *в* — измерительный тепловизор ThermoCam E2; *г* — измерительный тепловизор ИРТИС

себя мозаичный детектор излучения, электронный блок обработки сигнала и объектив. Модули имеют стандартный видеовыход (PAL или NTSC) и при подключении монитора превращаются в показывающие тепловизоры.

Основные технические характеристики отечественных и зарубежных тепловизоров приведены в табл. 1. Ниже будет дана краткая характеристика некоторых типовых моделей, имеющих на рынке в настоящее время (рис. 1). Фирмы-производители применяют гибкую ценовую политику, при которой стоимость тепловизионных систем зависит от их комплектации, в особенности от наличия объективов, фильтров, устройств записи и документирования термограмм, а также программного продукта. В силу интенсивной конкуренции на мировом рынке, тепловизоры одного класса, но выпускаемые различными фирмами, имеют близкие цены. Колебания цен обычно связаны с различным уровнем сервиса в конкрет-

ной стране, а также с комплектацией системы всевозможными аксессуарами.

1.2. ТИПОВЫЕ МОДЕЛИ ТЕПЛОВИЗОРОВ

Показывающий тепловизор PalmIR 250. Малогабаритная камера PalmIR 250 Digital фирмы "Raytheon" является типичным представителем показывающих тепловизоров, предназначенных для использования в качестве приборов ночного видения и для технической диагностики (рис. 1, *a*). Использована длинноволновая неохлаждаемая болометрическая матрица 320×240 и 2,5-дюймовый черно-белый или цветной монитор; запись изображений производят на PCMCIA карту емкостью до 8 Мбайт (до 60 изображений); масса тепловизора 1,8 кг. Стоимость прибора с черно-белым монитором составляет 13 тыс. дол. США.

Измерительный тепловизор ThermoCAM 695. Данный прибор завершает серию 500 измерительных тепловизоров с неохлаждаемым приемником излучения, разработанных фирмой "FLIR Systems, Inc." (рис. 1, *б*). Использована стандартная неохлаждаемая болометрическая матрица 320×240 ; 12-битную цифровую запись термограмм производят на PCMCIA карту емкостью до 170 Мбайт. Прибор снабжен цветным монитором. Основная область применений — техническая диагностика в строительстве и промышленности.

Измерительный тепловизор ThermoCAM E2. Самый малогабаритный измерительный тепловизор (новинка 2002 г. фирмы "FLIR Systems") имеет массу около 0,7 кг, включая аккумуляторы (рис. 1, *в*), и использует матрицу 160×120 . Отсутствие видеоискателя компенсируется наличием лазерного целеуказателя. При стоимости около 25 тыс. дол. США данный прибор содержит все основные опции более дорогостоящих систем. Рекомендуемыми областями его применения являются электротехника, строительство и техническая диагностика промышленных установок.

Измерительный тепловизор ИРТИС-2000 отечественного производства использует охлаждаемый жидким азотом одноэлементный приемник коротко- или длинноволнового диапазона (рис. 1, *г*). За счет невысокой скорости сканирования удастся достичь температурной чувствительности до $0,05^\circ\text{C}$ при формате кадра 256×256 . Конструктивно прибор выполнен в виде камеры, стыкуемой с компьютером типа "лэп-топ". В комплект тепловизора включено программное обеспечение достаточно высокого уровня. За счет относительно невысокой цены (около 18 тыс. дол. США) тепловизор ИРТИС составляет определенную конкуренцию зарубежным приборам на российском рынке.

ГЛАВА ВТОРАЯ

Административные, промышленные и жилые здания

2.1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Одним из основных путей экономии топлива является уменьшение тепловых потерь и теплопоступлений через ограждающие конструкции строительных сооружений, достигающих по зарубежным источникам до 30 % общих энергопотерь.

Тепловизионный контроль качества строительных сооружений, благодаря своей оперативности, наглядности и достоверности получаемых результатов, успел зарекомендовать себя как один из основных способов диагностики ограждающих конструкций по окончании строительства и в период эксплуатации [2 – 27]. Согласно методике, утвержденной Госстандартом РФ в 2000 г. [2], понятие технической диагностики строительных сооружений включает:

- определение частичных и общих теплопотерь;
- обнаружение скрытых дефектов строительства;
- определение (оценку) сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций.

Этот способ диагностики позволяет выявить нарушения теплозащиты ограждающих конструкций, возникшие в результате следующих причин:

- ошибки проектирования;
- нарушения технологии изготовления строительных материалов, правил складирования, перевозки и т.п.;
- ошибки и нарушения технологии при строительстве зданий;
- неправильного режима эксплуатации.

Перечисленные факторы приводят к преждевременному снижению теплозащитных свойств в отдельных местах ограждающих конструкций в результате воздействия погодных (ветер, атмосферные

осадки) и естественно-климатических (циклы тепло — холод — тепло, влажность) условий. Это, в свою очередь, приводит к ухудшению микроклимата внутри зданий и перерасходу топлива на обогрев, вследствие увеличения тепловых потерь. Кроме того, ИК термография позволяет определить пути устранения ошибок проектирования, в результате которых температура в помещениях держится на недопустимо низком уровне. Помимо общего анализа состояния теплозащиты, весьма важной является такая утилитарная функция ИК термографии как обнаружение скрытых дефектов строительства, наличие которых также снижает комфорт внутри зданий и может приводить к их преждевременному разрушению. В дальнейшем под термином “дефект” будем понимать любое отклонение параметров строительства от нормативных требований. Основными видами дефектов, обнаруживаемых с помощью ИК термографии, являются:

- места протечек воздуха и воды (дефектная зачеканка швов с наружной стороны, отслоение пленки мастики от бетонной поверхности, недостаточное обжатие гермита и трещины в растворе и мастике, дефекты оконных блоков и проемов: некачественное уплотнение стен замазкой, сквозные щели в соединениях нижних элементов коробок, прерывистость мастики в устье стыка защелки оконного блока);

- “мостики” тепла и холода; ухудшение сопротивления теплопередаче (отсутствие теплоизоляции, аномальная увлажненность, некачественная кирпичная кладка, некорректные архитектурные и строительные решения и т.п.);

- дефектные панели ограждающих конструкций (нарушения толщины и расстановки утеплителя, адсорбция влаги в утеплителе, завышение объемной массы керамзитобетона, оседание утеплителя, скол края панели);

- отслоение штукатурки, облицовки и других покрытий.

Современные тепловизионные системы позволяют быстро и точно выявить дефектные участки и определить их границы. Количественную оценку обнаруженных дефектов производят в лабораторных условиях с использованием стандартного математического аппарата и соответствующих программных средств.

Обнаружение скрытых дефектов основано на использовании принципа сравнения текущей зоны контроля с эталонной (бездефектной) зоной. Эталонную зону указывают из технологических соображений или определяют в ходе тепловизионного осмотра, например, путем оценки сопротивления теплопередаче (см. ГОСТ 26629-85 [3]). Определение теплопотерь и сопротивления теплопе-

редаче осуществляют согласно ГОСТ 26254-84 [4] и СНиП II-3-79* [5]. При этом тепловизор или пирометр используют в качестве средства измерения поверхностной температуры, а тепловой поток (коэффициент теплообмена) измеряют с помощью датчика теплового потока.

Тепловизионный осмотр можно производить как внутри, так и снаружи помещений. Наружный осмотр позволяет определить общие теплопотери сооружения, в том числе оценить эффективность архитектурных решений и в ряде случаев сопротивление теплопередачи, а также обнаружить значительные дефекты строительства. Внутренний осмотр является более детальным и предназначен для обнаружения строительных дефектов и анализа теплового режима отдельных помещений. Имеются методики проведения тепловизионной диагностики внутри отдельных помещений путем локального понижения давления в них, например, с помощью вентилятора; при этом резко возрастает температурный сигнал, обусловленный протечками воздуха через стены и появляется возможность отличить протечки от локального ухудшения теплоизоляционных свойств.

Размеры зоны контроля определяются углом поля зрения тепловизора и расстоянием до объекта съемки. В среднем характерные размеры зоны контроля составляют от 3 до 30 м.

Расстояние до объекта контроля составляет от 0,5 до 100 м (в зависимости от типа применяемой аппаратуры, типа и размеров контролируемого объекта, цели и условий съемки).

Основная погрешность измерения температуры по абсолютно черному телу составляет не более $\pm 2\%$ верхнего значения шкалы или $\pm 2^\circ\text{C}$ (паспортное значение для большинства современных тепловизоров и пирометров). В ограниченных температурных интервалах, что характерно для строительной диагностики, погрешность, как правило, не превышает $\pm 1^\circ\text{C}$. При использовании метода сличения температурная чувствительность аппаратуры должна составлять не хуже $\pm 0,1^\circ\text{C}$ (паспортное значение для большинства современных тепловизоров) или $\pm 1^\circ\text{C}$ (для пирометров).

Основная относительная погрешность определения сопротивления теплопередаче составляет не более $\pm 30\%$ (при использовании методики, рекомендуемой нормативными документами [4, 5]).

Результаты осмотра представляются в виде черно-белых и/или цветных изображений на мониторе тепловизора или компьютера, а также в виде твердой копии с возможностью вывода значений в отдельных точках.

2.2. ТЕПЛОВИЗОРЫ ДЛЯ СТРОИТЕЛЬНОЙ ДИАГНОСТИКИ

В строительной диагностике с успехом применяют как коротковолновые (рабочий диапазон длин волн 2,0 – 5,5 мкм), так и длинноволновые (рабочий диапазон длин волн 7 – 14 мкм) модели пирометров и тепловизоров.

Рекомендуется использовать тепловизоры со следующими техническими параметрами:

Диапазон измеряемых температур, $^\circ\text{C}$	-20 + 30
Чувствительность, $^\circ\text{C}$	Не хуже 0,2
Диапазон рабочих температур, $^\circ\text{C}$	-15 + 40
Угол зрения (применение сменяемых объективов), град.	7 + 20
Число элементов в кадре (элементов в матрице)	Не менее 128 × 128
Частота смены кадров	Не хуже 1 Гц
Погрешность измерения (по черному телу)*.	Не хуже $\pm 1^\circ\text{C}$
Питание	Автономное

Наличие опции поправки результатов на значение коэффициента излучения
Наличие системы цифровой записи термограмм и вывода термограмм в видеостандарте

Выше приведены усредненные технические параметры тепловизоров, рекомендуемых для использования в строительной диагностике. В настоящее время на мировом рынке имеется большое число моделей тепловизоров, удовлетворяющих вышеуказанным требованиям, а в большинстве случаев превосходящих их (см. табл. 1). Показывающие тепловизоры применяют для обнаружения скрытых дефектов строительства, а простые количественные отсчеты температуры можно получить, размещая в их поле зрения соответствующие эталоны или предметы с известной температурой. Для оценки сопротивления теплопередаче необходимо применять измерительные системы.

2.3. ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА

Тепловизор является основным, но не единственным средством диагностики теплового состояния зданий и сооружений. Вспомогательными устройствами являются:

инфракрасный (оптический) пирометр;

* При определении сопротивления теплопередаче может потребоваться большая точность измерения).

датчик теплового потока;
анемометр;
ртутный термометр (или термощуп-термометр);
манометр;
воздушный насос;
термоанемометр;
влажномер;
психрометр.

Для уточнения значений коэффициентов теплоотдачи следует применять датчики (преобразователи) теплового потока, например типа ИТП или ПТП. Рекомендуется также использовать анемометры, например МС-13, а также ртутные термометры на диапазон $-20 \div +100$ °С с делением шкалы не более 1 °С или термощупы - термометры, например ЭТП-М. При оценке воздухопроницаемости сооружения возможно использование воздушных насосов различного типа для понижения давления внутри помещения. Перепад давления измеряют манометром, например типа ММН-6. Скорость движения воздуха измеряют термоанемометром. Влажность строительных конструкций измеряют дельтаметрическим влажмером. Анализ точки росы проводят аспирационным психрометром, например М-34.

Использование датчика теплового потока для определения коэффициентом теплоотдачи внутри и снаружи помещений является обязательным при определении сопротивления теплопередаче. При этом следует руководствоваться требованиями ГОСТ 25380-82 [6].

Из отечественных фирм-производителей указанного оборудования можно упомянуть фирму "ТЕХНОАС" (г. Коломна), завод "Эталон" (г. Омск), фирму "Стройприбор" (г. Челябинск). Фирма "KESTREL" (США) выпускает малогабаритные датчики, совмещающие измерение сразу нескольких параметров, таких как температура воздуха, влажность воздуха, температура точки росы и скорость ветра.

2.4. ТРЕБОВАНИЯ К ОБЪЕКТУ ИССЛЕДОВАНИЙ

Измерения производят снаружи и/или внутри помещений согласно стандартным методикам работы с тепловизором и вспомогательными устройствами. Температурный напор в контролируемом строительном сооружении, измеряемый как разность внутренней и внешней температур, должен быть не менее 10 °С в течение последних 24 ч (требование международного стандарта ISO 6781-83 [7]),

что, как правило, имеет место в течение отопительного сезона. Во время съемки изменение температурного напора не должно превышать ± 30 % действительного начального значения; температура воздуха внутри помещения не должна изменяться более чем на ± 2 °С, а ограждающие конструкции не должны подвергаться воздействию солнечной радиации в течение предшествующих 12 ч [7]. При определении (оценке) сопротивления теплопередаче следует руководствоваться требованиями ГОСТ 26254-84 [4], который требует, чтобы продолжительность периодов с наиболее установившимся режимом с отклонением среднесуточной температуры за этот период в пределах $\pm 1,5$ °С составлял от 1 до 3 сут. в зависимости от тепловой инерции ограждающей конструкции.

Идентификацию объектов на термограмме рекомендуется производить путем сравнения термограмм с видимым изображением той же зоны осмотра, которое получают с помощью фотоаппарата, цифрового фотоаппарата и/или цифровой (аналоговой) видеокамеры. В первом случае сравнение инфракрасного и видимого изображения производят визуально, в двух других случаях рекомендуется ввести изображение в персональный компьютер с последующим получением твердой копии (при работе с аналоговой видеокамерой необходимо применять специализированные устройства ввода телевизионных изображений в компьютер). Наиболее целесообразно применение цифровых фотоаппаратов, обеспечивающих запись изображений в формате .jpeg.

2.5. ПРОБЛЕМА КОЭФФИЦИЕНТА ИЗЛУЧЕНИЯ

Тепловизоры градуируют по моделям абсолютно черных тел (эталонным источникам) и вводят коррекцию на коэффициент излучения реальных объектов. Как известно, абсолютно черное тело испускает (и поглощает) максимальную при данной температуре тепловую энергию и обладает коэффициентом излучения, близким к единице. Реальные (серые) физические тела имеют коэффициент излучения менее единицы, что вызывает погрешность температурных измерений, определяемую точностью задания корректирующего значения. При обнаружении скрытых строительных дефектов знание коэффициента излучения объекта является желательным, но не обязательным, особенно в тех случаях, когда дефекты обнаруживают на однородном излучательном фоне (кирпичная стена, панель, оштукатуренные стены и т.п.). Более того, различия в излучательных свойствах объектов диагностики могут служить дополнительными

признаками их идентификации на термограмме. Интегральные коэффициенты излучения некоторых строительных материалов при температуре примерно 20 °С [5] приведены ниже:

Бетон	0,84 ÷ 0,95
Графит, окисленная поверхность	0,98
Гипс	0,8 ÷ 0,9
Глина обожженная	0,91
Дерево строганое:	0,8 ÷ 0,9
белое сырое	0,7 ÷ 0,8
шлифованное (полированное)	0,5 ÷ 0,7
Кирпич красный, шероховатый	0,86 ÷ 0,93
Кирпичная кладка оштукатуренная	0,94
Кирпич шамотный	0,95
Краска масляная (любого цвета)	0,94
Лак:	
черный матовый	0,96 ÷ 0,98
белый	0,8 ÷ 0,96
Мрамор сероватый полированный	0,93
Рубероид	0,93
Сажа:	0,95 ÷ 0,97
с жидким стеклом	0,96
нанесенная на твердую поверхность	0,96
Стекло матовое	0,96
Штукатурка (грубое покрытие)	0,91
Бумага черная, матовая	0,94
Эбонит	0,90
Плексиглас	0,92
Древесина (сосна)	0,86
Резина	0,94
Асбоцементная плита	0,92
Текстолит	0,93
Фторопласт	0,95
Ковровая белая керамика 15 × 15 мм	0,97
Половая глазурованная керамическая плитка	0,91
Алебастр	0,89
Пенополиуретан:	
негладкий	0,97
гладкий	0,98

Более подробные сведения можно найти в [1].

При определении теплототерь и сопротивления теплопередаче следует вводить поправку на коэффициент излучения объекта.

Влияние коэффициента излучения на температурные измерения обусловлено тем фактом, что тепловой поток Φ , регистрируемый приемником излучения, является функцией как абсолютной температуры T , так и коэффициента излучения ϵ . В популярной науч-

но-технической литературе связь T и ϵ иллюстрируют на основе закона Стефана-Больцмана для серого тела:

$$\Phi \sim \epsilon \sigma T^4, \quad (1)$$

где $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м² · К).

Связь изменений ΔT и $\Delta \epsilon$ получают в виде:

$$\left| \frac{\Delta T}{T} \right| = \frac{1}{4} \left| \frac{\Delta \epsilon}{\epsilon} \right|. \quad (2)$$

В реальной диагностике использование формулы (2) не вполне корректно в силу того, что зависимость Φ от T изменяется в различных спектральных диапазонах; кроме того, тепловизор также регистрирует отраженное излучение окружающей среды (других предметов). Более корректной является формула:

$$\Phi \sim \epsilon \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R(\lambda, T) d\lambda + (1 - \epsilon) \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R(\lambda, T_a) d\lambda, \quad (3)$$

где $R(\lambda, T)$ — функция Планка; $(1 - \epsilon)$ — коэффициент отражения твердого серого тела; T_a — температура окружающей среды.

Для фиксированных спектральных диапазонов можно считать, что $\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R(\lambda, T) d\lambda \approx K T^n$, где K — коэффициент; n — показатель степе-

ни, зависящий от спектрального интервала. Тогда уравнение (3) принимает вид:

$$\Phi \sim \epsilon T^n + (1 - \epsilon) T_a^n. \quad (4)$$

Для спектральных интервалов 3 – 5,5 и 7 – 14 мкм и диапазона температур от –20 до +80 °С соответственно $n = 10, 11$ и 4,83.

Очевидно, что тепловизор, калиброванный по черному телу, покажет кажущуюся (радиационную) температуру серого тела $T_{\text{каж}}$ согласно следующему трансцендентному уравнению:

$$T_{\text{каж}}^n = \epsilon T^n + (1 - \epsilon) T_a^n. \quad (5)$$

Соотношение вида (5) используется в ряде современных тепловизоров для автоматической коррекции температурных отсчетов, если введены значения коэффициента излучения ϵ и температуры окружающей среды T_a .

С учетом (5) уточненный вид формулы (1) для оценки связи изменений коэффициента излучения и температуры примет вид:

$$\left| \frac{\Delta T}{T} \right| = \frac{1}{n} \left[1 - \left(\frac{T_a}{T} \right)^n \right] \left| \frac{\Delta \epsilon}{\epsilon} \right|. \quad (6)$$

Интересно отметить, что при $T = T_a$ происходит полная компенсация излучательной способности твердых тел.

Пример. Пусть стена здания находится при температуре $T = 263$ К (-10 °С). Температура окружающей среды и облачного неба $T_a = 258$ К (-15 °С). Какова будет погрешность определения температуры штукатурки с помощью тепловизора, работающего в диапазоне длин волн 7 – 14 мкм, если значение коэффициента излучения в тепловизоре установлено для кирпичной кладки ($\epsilon = 0,94$)? Из табл. 2 следует, что при переходе от кирпичной кладки к штукатурке $\Delta \epsilon = 0,94 - 0,91 = 0,03$. Тогда из формулы (6) $\Delta T \approx 0,15$ °С для обоих диапазонов 3 – 5,5 мкм и 7 – 14 мкм, в то время как формула (2) дает $T \approx 2,1$ °С. Физически различие в значениях ΔT означает, что окружающая среда является источником компенсирующего излучения, обуславливающего снижение влияния флуктуаций коэффициента излучения на тепловизионные измерения.

2.6. МЕТЕОУСЛОВИЯ ПРИ ТЕПЛОВИЗИОННОЙ СЪЕМКЕ

На результаты тепловизионной съемки оказывает влияние географическое расположение ограждающих конструкций относительно частей света. Тепловизионную съемку не производят в дождь, туман, сильный снегопад, а также при наличии снега, измороси и влаги на контролируемых поверхностях. Погрешность измерений, вносимая вышеуказанными факторами, возрастает с увеличением расстояния до объекта.

Прямое и рассеянное солнечное излучение, особенно в весенне-летний период, может нагревать части ограждающих конструкций и создавать области аномальной температуры, которые следует отличать от температурных распределений, обусловленных тепло-

передачей через ограждающие конструкции. Эффект солнечного нагрева особенно существен при диагностике крыш. Кроме того, на гладких (глянцевых) поверхностях могут возникать *солнечные блики*, которые на термограмме выглядят как зоны повышенной температуры. В большинстве случаев наличие бликов легко устраняют путем перемещения тепловизора: изображение блика будет перемещаться, в то время как изображение аномально нагретой зоны останется на месте. Тепловизионную съемку рекомендуется проводить в предрассветные или ночные часы, когда тепловое влияние окружающей среды минимально. В дневное время наилучшие результаты достигаются при пасмурном небе. В исключительных случаях (зимой и при сравнении температур однотипных зон) возможны измерения температурных перепадов и в условиях прямой солнечной засветки. При этом абсолютные значения температуры могут существенно отклоняться от истинных, и полезную информацию будет нести разность температур однотипных зон (при отсутствии их прямого нагрева излучением солнца). Для съемки в дневное время наиболее пригодны тепловизоры длинноволнового диапазона. Тем не менее, во всех случаях следует учитывать возможный нагрев конструкций солнечной радиацией, мощность которой в средних широтах в ясный день может достигать 1 кВт/м^2 .

Сильный ветер способен существенно увеличивать теплоотдачу с поверхностей и снижать температуру. Рекомендуется проводить тепловизионную съемку при скорости ветра не более 5 – 7 м/с. При необходимости учитывать изменение коэффициента теплоотдачи, например, при определении сопротивления теплопередаче, следует использовать соответствующие формулы, рекомендованные теорией теплопередачи. Для приблизительного учета влияния скорости ветра измеренные значения температурных перепадов рекомендуется умножать на поправочный коэффициент [8], приведенный ниже:

Скорость ветра, м/с	1	2	3	4	5	6	7	8
Коэффициент поправки	1,00	1,36	1,64	1,86	2,06	2,23	2,40	2,54

При определении теплопотерь и сопротивления теплопередаче следует принимать во внимание суточный ход температуры окружающего воздуха. В силу различной теплоинерционности отдельных элементов ограждающих конструкций, соотношение измеренных температурных значений в любой момент времени могут не соответствовать истинному соотношению теплозащитных свойств

данных элементов. Оценку отклонения режима теплопередачи от стационарного следует проводить согласно ГОСТ 26629-85 [3]. Метод тепловизионного измерения сопротивления теплопередаче отдельных элементов конструкций рекомендуется осуществлять в лабораторных условиях путем размещения исследуемого объекта (панели, блока) в стенке климатической камеры. Следует отметить, что при определении сопротивления теплопередаче согласно ГОСТ 26254-84 [4] метод ИК термографии не обладает преимуществами, в первую очередь, высокой производительностью, по сравнению со стандартными средствами измерения температуры, вследствие необходимости выбирать период слабого изменения температуры ограждающей поверхности в течение длительного времени.

2.7. МИКРОМЕТЕОУСЛОВИЯ ПРИ ТЕПЛОВИЗИОННОЙ СЪЕМКЕ

Под микрометеоусловиями понимают условия, создающиеся вследствие специфического расположения в данной местности объекта контроля и окружающих объектов. Так, например, расположение строительного сооружения в низине создает эффект "холодного бассейна" и может приводить к появлению дополнительного конденсата на поверхности. Наличие деревьев и кустарников, соседних зданий и т.п. может влиять на солнечное облучение и порывы ветра. Высокотемпературные печи, калориферы внутри помещений могут вызывать как дополнительный нагрев объекта контроля, так и отраженную засветку.

2.8. РАССТОЯНИЕ ДО ОБЪЕКТА КОНТРОЛЯ

С увеличением расстояния до объекта контроля возрастает поле обзора, ухудшается детальность осмотра и искажаются значения истинной температуры за счет поглощения в атмосфере. Последний эффект несуществен при расстояниях менее 30 м, на которых обычно проводят съемку. При больших расстояниях следует применять соответствующие поправочные формулы, учитывающие поглощение излучения в атмосфере. Во многих современных тепловизорах соответствующая коррекция осуществляется непосредственно в приборе для стандартного состояния атмосферы и указанного расстояния до объекта контроля.

В зависимости от расстояния до объекта контроля и размеров зоны контроля в тепловизорах следует применять объективы с раз-

личным углом зрения. Ниже приведены размеры зоны контроля для объективов различного типа на расстоянии 10 м:

Объектив	7° × 7°	12° × 12°	20° × 20°	40° × 40°
Размер поля зрения, м, на расстоянии 10 м	1,2	2,1	3,5	8,2

Для больших расстояний производится простой пропорциональный пересчет размеров зоны контроля, например, тепловизор с объективом 20° × 20° на расстоянии 100 м будет визировать зону размером $3,5 \cdot (100/10) = 35$ м.

2.9. УСЛОВИЯ ВНУТРИ ПОМЕЩЕНИЙ

При прочих равных условиях один и тот же строительный дефект (протечка воздуха, "мостик" холода), как правило, лучше обнаруживается при осмотре внутри помещения. Основными мешающими факторами при таком осмотре являются: 1) наличие вентиляторов и нагревателей любого типа; 2) экранирование зон контроля мебелью, коврами и т.п.; 3) отслоение обоев, штукатурки и т.п.; 4) неравномерная окраска зоны контроля.

Радиационное влияние нагревателей можно устранить их экранированием теплонепроницаемыми предметами (например, используя полиэтилентерефталатную металлизированную пленку типа ПЭТФ-С или ПЭТФ-Н согласно ГОСТ 26629-85 [3]) или правильным выбором зоны и ракурса съемки. По возможности рекомендуется выключить радиаторы и калориферы за 12 ч, а лампы накаливания — незадолго до съемки. Минимально допустимое приближение оператора-термографиста к обследуемой поверхности составляет 1 м, электрических ламп накаливания — 2 м (требование ГОСТ 26629-85 [3]). При термографировании оконных стекол может возникать эффект отражения близстоящих источников теплового излучения, включая людей, в стекле; при этом оператор видит слабое изображение указанных источников на термограмме. Еще более сильное влияние оказывает отраженное солнечное излучение. В целом, термографирование полупрозрачных объектов, таких как диэлектрические пленки, оконные стекла и т.п., требуют использования специальных методических приемов, которые должны разделять эффекты теплопередачи от чисто оптических эффектов, например, на оконных стеклах целесообразно размещать самоклеящуюся пленку любого цвета и измерять ее темпера-

туру. Предметы, экранирующие стены и стыки, целесообразно удалить. Расслоения между декоративными покрытиями и штукатуркой, а также между основной стеной и штукатуркой могут сами по себе расцениваться как дефекты. Влияние неоднородного распределения коэффициентом излучения по зоне контроля можно учесть визуальным осмотром, а также введением соответствующих поправок с панели тепловизора. Не рекомендуется проводить измерение температуры поверхностей с коэффициентом излучения ниже чем 0,7 (ГОСТ 26629-85 [3]). Влияние коэффициента излучения велико при визировании металлических, в особенности блестящих, поверхностей. Большинство строительных материалов, а также металлы, покрытые слоем ржавчины, грязи и пыли, обладают достаточно высоким значением коэффициента излучения для выполнения измерений с требуемой точностью (± 1 °C). Простым способом оценки коэффициента излучения является размещение на исследуемой поверхности пленки из материала с высоким коэффициентом излучения, например самоклеющейся. Если значение коэффициента излучения неизвестно с требуемой точностью, то его влияние на измеренные значения температуры можно оценить путем изменения значения коэффициента излучения, вводимого с пульта управления тепловизором, при одновременном визировании одного и того же участка объекта контроля. Диапазон отсчетов температуры, полученный с помощью тепловизора, будет соответствовать диапазону изменения коэффициента излучения. Следует помнить, что данная оценка зависит от абсолютной температуры объекта, поэтому ее следует производить при рабочей температуре объекта.

Истинное значение коэффициента излучения объекта контроля можно определить, измеряя истинную температуру поверхности объекта с помощью контактного термометра: при этом вводимую в тепловизор поправку ε следует изменять до тех пор, пока показания тепловизора не будут совпадать с показаниями контактного термометра.

2.10. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОПOTЕРЬ

На основе проектной документации или, используя метод прямых измерений, определяют площадь ограждающей конструкции здания S (возможно косвенное определение размеров здания по термограмме с использованием маркера известных размеров, в качестве которого может служить любой предмет с хорошим излучательным контрастом, например металлическая метровая линейка).

Определяют среднюю температуру $T_{\text{внеш}}^{\text{ст}}$ ограждающих конструкций путем усреднения температуры на отдельных термограммах с учетом весовых вкладов отдельных зон, которые зависят от расстояния до объекта съемки при фиксации каждой термограммы, наличии в поле зрения посторонних объектов, например неба. В дальнейшем, тепловые потери могут рассчитываться для боковых ограждающих поверхностей, крыши и фундамента отдельно, а затем суммироваться. Если средние температуры по всем поверхностям близки, допускается их усреднение по всем поверхностям.

Измерение средних температур крыши и фундамента не всегда возможно. В этих случаях определяют теплотери только через боковые ограждающие конструкции, а полные теплотери здания определяют исходя из имеющихся рекомендаций.

Мощность теплотерь Q с любой поверхности на момент съемки определяют по соотношению:

$$Q = \alpha_{\text{внеш}} S (T_{\text{внеш}}^{\text{ст}} - T_{\text{внеш}}^{\text{возд}}), \quad (7)$$

где $\alpha_{\text{внеш}}$ — коэффициент теплоотдачи на наружной поверхности стенки; $T_{\text{внеш}}^{\text{возд}}$ — температура наружного воздуха; $T_{\text{внеш}}^{\text{ст}}$ — температура наружной поверхности стенки.

Значение $\alpha_{\text{внеш}}$ определяют с помощью датчиков теплового потока (приборы по ГОСТ 7076-78). Крутизна характеристики, т.е. зависимость выходного электрического сигнала от теплового потока, может различаться у различных датчиков; например, при работе с прибором ИТП-11 рекомендуется проводить измерения в условиях, соответствующих плотности теплового потока от 30 до 50 Вт/м².

При определении полных теплотерь здания за некоторый период времени, например за год, следует исходить из приведенной мощности теплотерь $Q_{\text{привед}}$, которую рассчитывают исходя из мощности теплотерь и температурного напора $\Delta T = T_{\text{внутр}}^{\text{возд}} - T_{\text{внеш}}^{\text{возд}}$ на момент съемки с учетом нормативного температурного напора $\Delta T_{\text{норм}} = T_{\text{внутр.норм}} - T_{\text{внеш.норм}}$. Здесь $T_{\text{внутр}}^{\text{возд}}$ — температура воздуха в помещении в период съемки; $T_{\text{внутр.норм}}$ — нормативная температура внутри помещений (см. требования СНиП II-3-79*); $T_{\text{внеш.норм}}$ — средняя зимняя температура для данной местности. Формула для расчета $Q_{\text{привед}}$:

$$Q_{\text{привед}} = Q \frac{\Delta T_{\text{норм}}}{\Delta T}. \quad (8)$$

Формула (8) справедлива для нормативного температурного напора, т.е. для такого напора, который имел бы место при поддержании теплового режима в здании согласно рекомендациям СНиП II-3-79*. Та же самая формула применима для расчета мощности теплопотерь при любом фактическом температурном напоре.

Окончательно, полные теплопотери из здания определяют из соотношения:

$$W = Qt, \quad (9)$$

где t — длительность периода (при годовых нормативных оценках $Q = Q_{\text{норм}}$ и t — градусо-сутки отопительного сезона; см. СНиП II-3-79*).

Относительные теплопотери, в частности в тех случаях, когда не удается определить коэффициент наружной теплоотдачи, находят как отношение температур наружной стенки в исследуемой и эталонной (индекс “этал”) зонах:

$$Q / Q_{\text{этал}} = T_{\text{внеш}}^{\text{ст}} / T_{\text{внеш.этал}}^{\text{ст}}. \quad (10)$$

Экономический ущерб от сверхнормативных теплопотерь определяют исходя из рассчитанных значений Q с учетом стоимости тепловой (электрической) энергии.

Как правило, расчетное значение стоимости рассеиваемой зданием энергии через ограждающие конструкции, крышу и фундамент, хорошо коррелирует с фактической оплатой энергии при эксплуатации здания. Тем не менее, методика вышеприведенного расчета учитывает теплопотери только за счет ухудшения теплоизолирующих свойств ограждающих конструкций. На практике существенные теплопотери могут быть обусловлены воздухопроницаемостью. Соответствующие оценки основаны на знании разности давлений и температур, однако методика определения теплопотерь за счет воздухопроницаемости с помощью тепловизора до сих пор отсутствует.

2.11. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ТЕПЛОПЕРЕДАЧЕ

Стационарный тепловой поток через многослойную плоскую стенку, разделяющую две среды с температурой $T_{\text{внутр}}$ и $T_{\text{внеш}}$ (рис. 2) определяется соотношениями:

$$Q = \frac{T_{\text{возд.внутр}} - T_{\text{возд.внеш}}}{R}, \quad (11)$$

$$\text{где } R = \frac{1}{\alpha_{\text{г}}} + \frac{l_1}{\lambda_1} + \frac{l_2}{\lambda_2} + \frac{l_3}{\lambda_3} + \frac{1}{\alpha_{\text{в}}};$$

$$Q = \alpha_{\text{внутр}} (T_{\text{возд.внутр}} - T_{\text{ст.внутр}}); \quad (12)$$

$$Q = \alpha_{\text{внеш}} (T_{\text{ст.внеш}} - T_{\text{возд.внеш}}). \quad (13)$$

Здесь R — полное сопротивление теплопередаче стенки; $\alpha_{\text{внутр}}$ — коэффициент теплоотдачи на внутренней поверхности ограждающей конструкции; $T_{\text{ст.внутр}}$ — температура внутренней поверхности стенки; l_i — толщина i -го слоя ($i = 1, 2, 3$); λ_i — коэффициенты теплопроводности слоев ($i = 1, 2, 3$).

Теплофизические характеристики типовых строительных материалов приведены в табл. 2. Зависимость коэффициента теплопроводности некоторых строительных материалов от их влажности показано на рис. 3.

Для характеристики отдельных компонент сопротивления теплопередаче вводят следующие понятия:

тепловое сопротивление пограничного слоя на внутренней поверхности

$$R_{\text{внут}} = \frac{1}{\alpha_{\text{внутр}}}, \quad (14)$$

тепловое сопротивление пограничного слоя на внешней поверхности

$$R_{\text{внеш}} = \frac{1}{\alpha_{\text{внеш}}}, \quad (15)$$

и термическое сопротивление многослойной стенки (число слоев N)

$$R_{\text{терм}} = \sum_{i=1}^N \frac{l_i}{\lambda_i}. \quad (16)$$

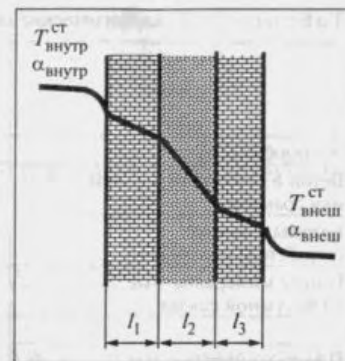


Рис. 2. Теплопередача через многослойную и плоскую стенку

Таблица 2. Теплофизические свойства материалов

Материал	Коэффициент теплопроводности λ , Вт/(м · К)	Плотность ρ , кг/м ³	Удельная теплоемкость C , Дж/(кг · К)	Коэффициент температуропроводности a , 10 ⁻⁷ м ² /с
Железобетон	1,63	2500	837,4	7,78
Бетон с каменным щебнем или гравием	1,45	2300	837,4	7,56
Бетоны ячеистые (газобетон, пенобетон)	0,40	1000	837,4	4,73
Плиты минералватные на битумной связке	0,12	400	753,7	3,86
	0,09	300	753,7	4,11
Плиты минералватные на синтетической связке	0,07	200	753,7	4,64
Шлак топливный	0,29	1000	753,7	3,86
Кирпичная кладка из глиняного кирпича на легком растворе	0,76	1700	879,3	5,06
Кирпичная кладка из силикатного кирпича на легком растворе	0,87	1900	837,4	5,48
Воздух в тонких прослойках*	0,07	1,3	928,4	579

* Тепловое сопротивление вертикальной воздушной прослойки составляет:

0,14 (м² · °С)/Вт — при толщине прослойки 1 см;

0,15 (м² · °С)/Вт — при толщине прослойки 5 см;

0,16 (м² · °С)/Вт — при толщине прослойки 10 см;

0,17 (м² · °С)/Вт — при толщине прослойки 15 см и более



Рис. 3. Зависимость коэффициента теплопроводности строительных материалов от влажности:

1 — бетон плотностью 2000 кг/м³; 2 — керамзитобетон плотностью 1200 кг/м³; 3 — кирпич красный плотностью 1800 кг/м³; 4 — шлаковата плотностью 200 кг/м³; 5 — стекловата плотностью 200 кг/м³; 6 — котельный шлак плотностью 1200 кг/м³

Тогда

$$R = R_{\text{внут}} + R_{\text{терм}} + R_{\text{внеш}} \quad (17)$$

Температуру наружной поверхности ограждающей конструкции определяют по следующей формуле:

$$T_{\text{внеш}}^{\text{ст}} = T_{\text{внут}}^{\text{возд}} + \frac{R_{\text{внеш}}}{R} (T_{\text{внут}}^{\text{возд}} - T_{\text{внеш}}^{\text{возд}}) \quad (18)$$

Дефекты ограждающих конструкций различного типа изменяют термическое сопротивление стенки на значение ΔR . При этом на внешней поверхности конструкции возникает температурный сигнал амплитудой:

$$\Delta T = \frac{R_{\text{внеш}}}{R} \frac{\Delta R}{R - \Delta R} (T_{\text{внут}}^{\text{возд}} - T_{\text{внеш}}^{\text{возд}}) \quad (19)$$

Измеряя ΔT с помощью тепловизора, можно оценить изменение термического сопротивления ограждающей конструкции ΔR .

Ограждающие конструкции зданий могут считаться стационарными только с той или иной степенью приближения. Чем больше амплитуда изменения температуры наружного воздуха в течение суток, тем выше степень нестационарности температурного поля стенки и тем большие погрешности вносят формулы (11) — (13), (18), (19). В ГОСТ 26254-84 [4] формула для определения R предложена в виде, аналогичном формуле (17):

$$R = R_{\text{в}} + R_{\text{к}} + R_{\text{н}} = \frac{t_{\text{в}} - \tau_{\text{в}}}{q_{\text{ф}}} + \frac{\tau_{\text{в}} - \tau_{\text{н}}}{q_{\text{ф}}} + \frac{\tau_{\text{н}} - t_{\text{н}}}{q_{\text{ф}}}, \quad (20)$$

где $R_{\text{в}}$, $R_{\text{н}}$ — сопротивления теплопередаче соответственно внутренней и наружной поверхностей; $R_{\text{к}}$ — термическое сопротивление однородной зоны ограждающей конструкции; $t_{\text{в}}$, $t_{\text{н}}$ — средние за расчетный период измерений значения температур соответственно внутреннего и наружного воздуха; $\tau_{\text{в}}$, $\tau_{\text{н}}$ — средние за расчетный период измерений значения температур соответственно внутренней и наружной поверхности ограждающей конструкции; $q_{\text{ф}}$ — средняя за расчетный период измерения фактическая плотность теплового потока.

Значения коэффициентов теплоотдачи на внутренних и наружных поверхностях измеряют экспериментально с помощью датчиков теплового потока (приборы по ГОСТ 7076-78). Использование значений, рекомендуемых СНиП II-3-79*, в этом случае нецелесообразно, поскольку реальные значения, в особенности $\alpha_{\text{внеш}}$, могут значительно отличаться от рекомендуемых. Существенные изменения $\alpha_{\text{внеш}}$ по высоте здания, влияние архитектурных элементов, таких как козырьки, выступы, колонны и т.п., делают затруднительным определение R по всему полю зрения тепловизора. Поэтому ограничиваются определением R в отдельных точках. В ряде случаев на плоских участках ограждающих конструкций возможно конвертировать термограммы в карты распределения R ; при этом погрешность может достигать 30 %. Целесообразно применять ИК термографию перед контактными измерениями тепловых потоков с целью более правильного определения мест крепления датчиков, поскольку даже большое число датчиков, требуемое стандартом, не может гарантировать надежных результатов вследствие возможного воздействия неучтенных нагревателей, влияния трехмерной геометрии, отслоений покрытий и т.п.

Помимо величины α , другими возмущающими факторами, влияющими на точность определения R являются: 1) несоответствие температуры воздуха в момент измерения ее значениям за предшествующие 8 – 12 ч; 2) нелинейное распределение температуры внутри ограждающей конструкции; 3) неточное задание коэффициента излучения.

Необходимость выбора периода измерений, когда справедлива формула стационарного режима (20), превращает определение R в длительную процедуру (до 15 дней согласно ГОСТ 26254-84). В настоящее время используют многоканальные цифровые датчики температуры и теплового потока с автономным питанием, которые прикрепляют к ограждающей конструкции. Записанные показатели анализируют на компьютере с целью выбора необходимых “стационарных” значений. В фирме “ВЕМО” (г. Москва) предложен алгоритм итеративной оценки R по нестационарным измерениям за несколько предшествующих дней, однако данный способ не прошел метрологической аттестации.

2.12. КАЧЕСТВЕННАЯ И КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ

Классификацию обнаруженных тепловых аномалий должен проводить обученный оператор-термографист. Наилучшие результа-

ты достигают при использовании цветных и черно-белых термограмм, которые оператор анализирует на основе своего опыта и критериев, изложенных ниже. Предпочтительность использования цветного изображения перед черно-белым зависит от объекта контроля, примененной палитры и опыта оператора. Черно-белые изображения имеют более естественный вид и наиболее пригодны, когда тепловую аномалию обнаруживают на фоне множества “тепловых отпечатков”, носящих шумовой характер. Черно-белые изображения легче интерпретировать, чем цветные, при наличии отраженной солнечной засветки. Цветное представление термограмм эффективно, если анализируемая тепловая аномалия по температуре отличается от окружающего температурного фона незначительно. Цветные термограммы также являются более наглядными при документировании результатов. Широко распространенная в настоящее время цветная палитра цветов каления (Iron) является компромиссной между черно-белым и цветным представлением термограмм.

При *качественной* оценке тепловых аномалий (анализе термограмм дефектов) решающими факторами являются сведения о тепловом режиме здания, опыт оператора и вид изображения соседних зон, на фоне которых обнаруживается данная аномалия. Применяют следующие правила *качественного* анализа термограмм [2].

Инфракрасную съемку следует дополнять визуальным осмотром или фотографированием. Видимое и инфракрасное изображения, как правило, не совпадают по текстуре. Эффективным результатом диагностики является компьютерное совмещение видимого и теплового изображения одного и того же участка конструкции, или оконтуривание дефектных зон на видимом изображении после их обнаружения на термограммах.

Оценку тепловых аномалий следует производить как по температурному перепаду в зоне аномалии, так и путем сравнения с эталонной зоной. Эталонная зона должна выбираться аналогичной контролируемой и находиться в тех же условиях теплообмена (располагаться вблизи исследуемой зоны).

При прочих равных условиях осмотр внутри помещения эффективнее наружного осмотра, поскольку при этом температурный перепад в зоне одной и той же тепловой аномалии больше на внутренней поверхности объекта. Кроме того, ряд дефектов, выявляемых изнутри, например, дефекты швов между потолочными плитами и стенами, могут не обнаруживаться снаружи.

Детальность осмотра ухудшается с увеличением расстояния до объекта съемки. При прочих равных условиях более эффективны тепловизоры с большим числом элементов разложения в кадре, на-

пример, тепловизоры, использующие матричные приемники излучения, которые имеют формат кадра близкий или превосходящий видеоформат.

Поверхности, визируемые под большим углом, кажутся холоднее. При съемке под большим углом удаленные зоны кажутся холоднее ближних. На больших расстояниях объекты контроля кажутся более холодными за счет поглощения в атмосфере.

При панорамной тепловизионной съемке многоэтажных зданий верхние этажи часто теплее нижних, что связано с естественной конвекцией, особенностями разводки системы отопления и/или углом визирования.

Тепловые аномалии отображаются на термограммах в виде областей повышенной или пониженной температуры и соответствуют: 1) архитектурным деталям; 2) неоднородностям коэффициента излучения поверхности; 3) неоднородностям теплообмена с окружающей средой; 4) различного рода дефектам.

При положительной разнице температур между внутренними помещениями и наружным воздухом мостики холода выглядят более холодными при осмотре изнутри и более теплыми при осмотре снаружи.

При положительной разнице температур между внутренними помещениями и наружным воздухом места протечки воздуха выглядят более холодными при осмотре изнутри и более теплыми при осмотре снаружи, если давление в данном помещении выше наружного давления; при инверсии давления места протечки выглядят более холодными как на внутренних, так и на наружных поверхностях.

Давление воздуха внутри помещений зависит от направления и скорости ветра, устройства вентиляционной системы объекта и температурного напора и может различаться в различных зонах. В многоэтажных зданиях давление внутреннего воздуха на нижних этажах часто выше, а на верхних этажах ниже, чем давление наружного воздуха. Эффект изменения давления приводит к тому, что, например, некачественные межпанельные швы в одном и том же здании могут выглядеть на термограмме теплее или холоднее, чем соседние участки в зависимости от местоположения шва по высоте здания. При этом решающим фактором отнесения шва к дефектным или бездефектным является сам факт наличия температурного градиента по сравнению с соседними зонами *независимо* от его знака.

Неокрашенные металлические элементы зданий и сооружений выглядят, как правило, более холодными, чем они есть на самом деле, за исключением ситуаций, когда есть интенсивная внешняя подсветка.

При анализе влагосодержания строительных конструкций, в особенности чердачных помещений, следует установить, проникает ли влага снаружи или изнутри, для чего необходимо знать особенности возведения и эксплуатации здания.

Горячие радиаторы, расположенные внутри помещений, создают отчетливые области повышенной температуры на наружных поверхностях, что может маскировать тепловые аномалии в дефектных зонах.

Существенные аномалии в области окон, напоминающие на термограмме изображение факела, как правило, свидетельствуют об открытых форточках, рамах или окнах.

Изображения тепловых аномалий с резкими границами часто соответствуют поверхностным эффектам или неравномерному солнечному нагреву, что легко идентифицируется при визуальном осмотре. В целом, тепловые аномалии в зоне протечек воздуха или воды имеют более резкие границы, чем тепловые аномалии над скрытыми внутренними дефектами.

При съемке окон следует иметь в виду, что при определенных углах визирования тепловизор будет фиксировать отраженное излучение неба, температура которого может изменяться в зависимости от температуры окружающего воздуха (при низкой плотной облачности) до $-15 \div -20$ °С (при ясном небе).

Изображения солнечных бликов перемещаются при перемещении оператора относительно объекта контроля, тогда как температурные эффекты не изменяют существенно вида теплового поля при изменении ракурса съемки.

При анализе тепловых аномалий и при измерении сопротивления теплопередаче необходимо учитывать разброс температур в отдельных помещениях здания и сооружения (температурный напор).

При диагностике межпанельных швов дополнительно к эффекту изменения давления внутреннего воздуха на вид термограммы существенное влияние оказывает тип дефекта: простое изменение теплового сопротивления при герметичном шве, или, что бывает чаще, нарушение герметичности шва, ведущее либо к утечкам теплого воздуха из помещения наружу (при повышенном давлении внутри), либо к натеканию холодного воздуха извне (при пониженном давлении внутри).

Ряд особенностей тепловизионной диагностики строительных сооружений иллюстрируются термограммами на рис. 4 – 8.

Инфракрасная термография особенно эффективна при диагностике панельных жилых домов. При соответствующем перепаде внутренней и наружной температур на термограммах хорошо видна

структура самих панелей, а также качество заделки межпанельных швов. На рис. 4, а приведен пример термометрии торца жилого дома с серьезными дефектами швов, на основании которой построена карта дефектов (рис. 4, б), где отмечены швы, подлежащие немедленному ремонту, а также панели, требующие утепления. В кирпичных зданиях сильнодефектный вертикальный шов так же характеризуется "размазанным" тепловым полем с существенным градиентом температуры как относительно близлежащей стены, так и относительно бездефектных швов (рис. 5; дефект указан стрелкой). Температурный шов справа от дефектного задан, но верхняя часть шва выглядит теплой, поскольку здесь шов замазан раствором темного цвета, который нагревается солнцем. Пример локального отсутствия утепления в шве приведен на рис. 6 (дефект указан стрелкой). Температурный градиент относительно

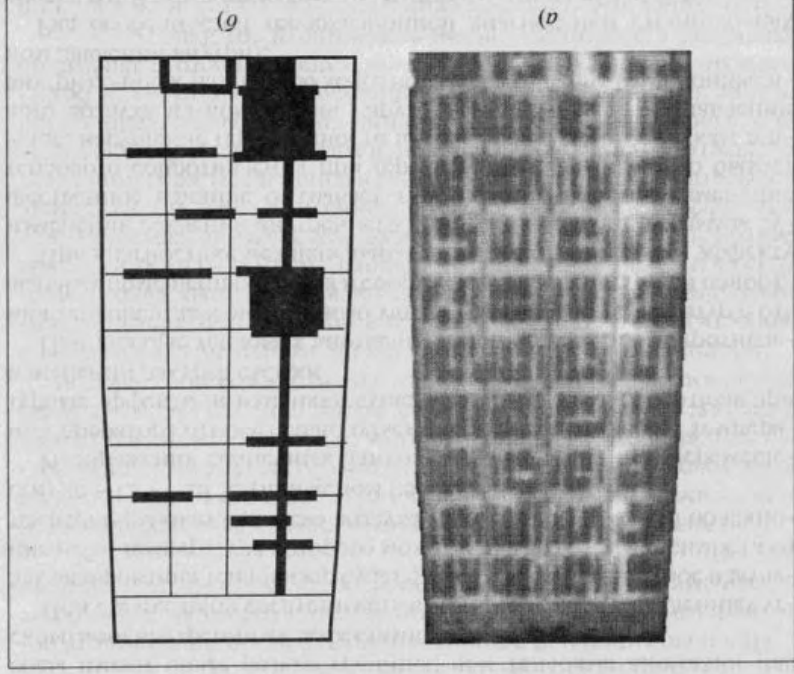


Рис. 4. Термометрия торца панельного жилого дома с многочисленными дефектами швов (а) и карта дефектов (б) (градиент температуры в зоне дефектов до 3°C по сравнению с бездефектными швами; градиент ребер бездефектных панелей по сравнению с заполнителем $2,5^{\circ}\text{C}$)

льно невелик (2°C), поэтому идентификация дефекта по результатам наружной съемки затруднительна. Тем не менее, при обследовании внутри помещения (кухни) даны дефект был надежно идентифицирован по значительному локальному понижению температуры (см. правую термометрию на рис. 6).

Изображения на рис. 7 относятся к обнаружению мест скопления воды в кровле крыши. Широкий волновой "карман" в кровле крыши производственного корпуса, выложенной из профнастила, виден на рис. 7, а в виде зоны черного цвета (съемка внутри помещения). Вид аналогичной зоны при наружной съемке показан на рис. 7, б. При этом визуальная съемка не позволяет обнаружить данный вид дефекта (см. фототрафию рис. 7, в). Весьма эффективной является тепловизионная съемка плоской кровли крыши с воздуха (с борта мотолета/платана, вертолета или самолета). Пример термометрии, на которой скопившаяся в кровле влага видна в вечернее время в виде теплых зон вследствие высокой теплоемкости воды, приведен на рис. 8 (влажный участок показан стрелкой).

Количественную оценку тепловых аномалий производят с целью определить степень их опасности для нормального функционирования здания. При этом значенная средняя температура пола, стен и потолка внутри помещения должны соответствовать нормам СНиП II-3-79*. Степень опасности обнаруженных аномалий оценивают по:

дополнительным потерям тепла через дефект;

несоответствию экспериментальных значений сопротивлений теплопередаче требованиям СНиП II-3-79*;

возможным последствием разрушения отражающей конструкции вследствие дефекта (сдвиг точки росы внутрь стены, коррозия материала стены, порез дефект;

Рис. 5. Термометрия вертикальной стены с отсутствием утеплителя в кирпичном жилом доме (градиент относительно бездефектных швов 4°C ; градиент температуры относительно близлежащей стены 6°C)



ГЛАВА ТРЕТЬЯ

Дымовые трубы

3.1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Тепловизионную диагностику дымовых труб (ДТ) осуществляют с целью определения их состояния в процессе эксплуатации, для прогнозирования объема и места приложения ремонта, а также для оценки качества ремонтных работ. Обследование ДТ выполняют организации, имеющие соответствующую лицензию, а операторы-термографисты должны быть аттестованы по уровню не ниже II.

Основания для проведения тепловизионной диагностики ДТ и газоходов изложены в документах [28 – 30]. Дополнительные сведения по устройству ДТ, теплотехническим расчетам и методическим аспектам тепловизионной диагностики можно найти в [31 – 35].

Дымовые трубы электростанций и газоходы должны подвергаться наружному осмотру 1 раз в год — весной. Внутреннее обследование дымовых труб должно производиться через 5 лет после их ввода в эксплуатацию, а в дальнейшем по мере необходимости, но не реже 1 раза в 15 лет. Внутреннее обследование труб с кирпичной и монолитной футеровкой может быть заменено тепловизионным обследованием, с частотой не реже 1 раза в 5 лет. Основное внимание при обследовании уделяется как визуальному осмотру состояния трубы с земли с помощью бинокля, так и тепловизионной съемке, осуществляемой как минимум с четырех точек по всей высоте трубы и по периметру с последующей записью на РСМСIA карту, флэш-карту или видеоманитофонную ленту. Перед выполнением работы следует ознакомиться с технической документацией, включая сведения о проведенных ремонтах, а также выбрать наиболее удобные точки наблюдения.

Основные дефекты ДТ являются результатом низкого качества строительства и эксплуатации в непроектном режиме со снижением объема и температуры дымовых газов из-за наличия неплотностей

Таблица 3. Характерные дефекты железобетонных дымовых труб

Наименование дефекта	Описание дефекта	Причины возникновения
<i>Железобетонный ствол</i>		
1. Дефектный шов	Шов бетонирования с наличием крупнопористого бетона и раковин	В результате некачественного выполнения шва, а также при образовании над ним крупнопористого бетона и раковин, в которых образуются трещины и скапливается влага, проникая в швы. Шов при этом разрушается по всей окружности (дефект строительства) или частично
2. Разрушающийся шов	Шов бетонирования с признаками разрушения	Расслоение бетона, образование каверн и т.п.
3. Шелушение поверхностного слоя бетона	Разрушение поверхностного слоя бетона до крупного заполнителя	Пониженная морозостойкость бетона; загрязнение исходных материалов глинистыми и илистыми примесями; применение некачественных заполнителей; низкая прочность вяжущего и повышенная пластичность смеси; нарушение теплового режима обработки бетона (в большинстве случаев — дефект строительства)
4. Трещины	Трещина на поверхности ствола с односторонним или сквозным раскрытием	Продольный изгиб вертикальной арматуры; выпучивание защитного слоя бетона; воздействие силовых нагрузок и температурных перепадов; расклинивающее действие продуктов коррозии арматуры; недостаточная толщина защитного слоя; расклинивающее действие воды в зимнее время
5. Глубокое и сквозное разрушение ствола	Разрушение бетона ствола; отслаивание крупного заполнителя и арматуры от бетона, сквозные отверстия	Результат периодического увлажнения и высыхания, замораживания и оттаивания бетона, сернокислотной и сульфатной коррозии

Продолжение табл. 3

Наименование дефекта	Описание дефекта	Причины возникновения
6. Крупнопористый бетон	Разрушение слоев бетона в виде гнезд небольших размеров или их скопления. По глубине: поверхностные раковины (3 — 4 см), глубокие — на всю толщину конструкции	Недостаточная проработка и отсутствие послойной укладки бетона; расслоение бетонной смеси от падения с большой высоты или сбрасывания в опалубку; отсутствие послойного вибрирования или штыкования; использование жесткой, сверхжесткой или слежавшейся бетонной смеси; расслоение бетона во время транспортировки; нарушение соотношения заполнителей; перенасыщенность конструкции арматурой
7. Сколы в бетоне	Вздутие и отрыв конусообразного куска бетона с образованием углубления в виде кратера	Разрушение одного из заполнителей бетона, что влечет местные отрывы бетона с поверхности конструкции
8. Отслаивание и разрушение бетона	Поверхностное разрушение бетона; отслаивание лещадками; скалывание лещадками; скалывание бетона с обнажением арматуры	Брак при строительстве, воздействие собственной массы трубы и ветрового момента, понижение прочности бетона
9. Влажные участки бетона	Увлажнение и обледенение ствола	Конденсация паров воды, проникающих в стены трубы из дымовых газов. Бетон ствола разрушается по причине вымывания свободной извести из бетона, периодических увлажнений и высыханий, замораживания и оттаивания с наружной стороны
Теплоизоляция и паровлагоизоляция		
10. Разрушение теплоизоляции (диатомовый кирпич, минеральная вата)	Теплоизоляция со стороны футеровки разрушается по толщине: превращается в массу белого цвета, местами с желтым налетом; превращается в порошкообразную массу	Вследствие наличия большого количества влаги в виде паров и оксидов серы в дымовых газах, которые мигрируют через футеровку в стены, где пары конденсируются и образуют кислоты

Продолжение табл. 3

Наименование дефекта	Описание дефекта	Причины возникновения
11. Разрушение паровлагоизоляции (битуминоля)	Паровлагоизоляция становится хрупкой и содержит трещины	По причинам, указанным выше
Футеровка		
12. Деформация ("рост") футеровки	Образование выпуклостей, выпирание и бочкообразное расширение кладки	Вследствие сульфатной коррозии происходит деформация футеровки (сульфатация и оследующая кристаллизация сульфатов). Футеровка пропитывается кислотой и сульфатами, расширяющими кладку
13. Разрушение футеровки	Полное или частичное разрушение, обвал футеровки с образованием отверстий	Результат химической коррозии (сернокислотной и сульфатной коррозии футеровки). Футеровка увеличивается в объеме до разрушения
14. Коррозия кирпича футеровки	Отслаивание кирпича лещадками	Результат сернокислотной и сульфатной коррозии футеровки
15. Трещины	Вертикальные, горизонтальные или наклонные трещины на поверхности футеровки с односторонним или сквозным раскрытием	В результате растягивающих усилий, воздействия температурных перепадов, разрушения кладки футеровки при образовании конденсата
16. Разрушение раствора кладки	Ослабление прочности и сцепления раствора кладки с кирпичом; частичное или полное выкрашивание и осыпание раствора в швах кладки	Результат химической коррозии
17. Перекрытие зазора	Отсутствие зазора между футеровкой и стволом; исчезает компенсационный зазор в узлах сопряжений отдельных звеньев	В результате химической коррозии футеровка расширяется по периметру и соединяется в распор со стволом, воздушная прослойка при этом полностью закрывается. Одновременно "рост" футеровки приводит к перекрытию компенсационного зазора

по тракту котел-дымовая труба, нарушений теплоизоляции и образования конденсата, разрушающего строительные материалы.

Характерными дефектами ДТ со стволом из кирпича являются: сквозные и несквозные вертикальные и горизонтальные трещины;

разрушение кладки в результате попеременного замораживания и оттаивания;

нарушение сцепления кирпича и раствора кладки от сернистой коррозии;

расширение кирпичной кладки (бочкообразность) между бандажными поясами;

деформация верхней части трубы (крен) вследствие сульфатации кирпичной кладки.

Характерные дефекты ДТ со стволом из железобетона и причины их возникновения в силу их важности приведены в табл. 3. Одним из наиболее распространенных дефектов ДТ с принудительной вентиляцией является закрытие (засоренность) воздушного канала или не работающая (не смонтированная) вентиляционная установка.

Преимуществами тепловизионного метода обследования ДТ и газоходов по сравнению с визуальным осмотром являются:

возможность обследования без останова котлов;

обнаружение дефектов, скрытых для глаза, в частности, дефектов в слое теплоизоляции и внутренние трещины;

возможность классифицировать дефекты по степени их опасности для теплотехнического состояния ДТ и газоходов.

Ограничения тепловизионного метода связаны:

с трудностями расшифровки ИК изображений и их привязки к специфическим видам дефектов;

с трудностями осмотра верхней части трубы из-за ограниченного угла зрения и крутого угла осмотра; устраняется удалением от трубы и применением длиннофокусной оптики;

с влиянием солнечной засветки (нагрев частей трубы и отраженная радиация); устраняется правильным выбором времени осмотра (рано утром, поздно вечером или в пасмурный день).

3.2. ТЕПЛОВИЗОРЫ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ДЫМОВЫХ ТРУБ

Тепловизоры, применяемые для диагностики ДТ, аналогичны применяемым в строительстве. Помимо чисто технических параметров важны массогабаритные показатели, возможность работы в труднодоступных местах, например, с крыши близстоящих сооружений. При летней съемке даже утром в 6 – 7 ч заметно влияние отраженного солнечного излучения, поэтому рекомендуется выбирать

тепловизоры длинноволнового диапазона. Дымовую трубу снимают с четырех – шести ракурсов, фиксируя четыре – шесть термограмм по высоте для их последующей “сшивки”, поэтому лучше использовать запись на РСМСIA карту или флэш-карту. При осмотре труб целесообразно применять два-три различных объектива (4; 7; 12; 18°), причем с помощью узкоугольных объективов (4; 7°) следует снимать верхнюю часть труб для получения более детальных изображений. При наличии в тепловизоре системы записи звука рекомендуется записывать речевые комментарии о наличии видимых глазом или с помощью бинокля текстурных особенностей на поверхности ДТ.

3.3. ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА

При обследовании ДТ используют следующие вспомогательные устройства:

ИК термометр (оптический пирометр);

датчик теплового потока;

анемометр;

ртутный термометр (или термошуп-термометр);

манометр;

молоток Кошкарова;

термоанемометр;

влажномер;

психрометр.

3.4. ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЙ

Теплофизические характеристики строительных материалов. В основе тепловизионной диагностики состояния конструктивных слоев ДТ и газоходов лежат процессы теплопередачи через цилиндрические и плоские стенки.

Стационарная теплопередача через многослойную цилиндрическую стенку. Аналогично выражениям (11) – (13) для плоской стенки тепловой поток Q через цилиндрическую многослойную стенку (рис. 9) определяют следующим образом (на примере трехслойной стенки):



Рис. 9. Стационарная теплопередача через многослойную цилиндрическую стенку

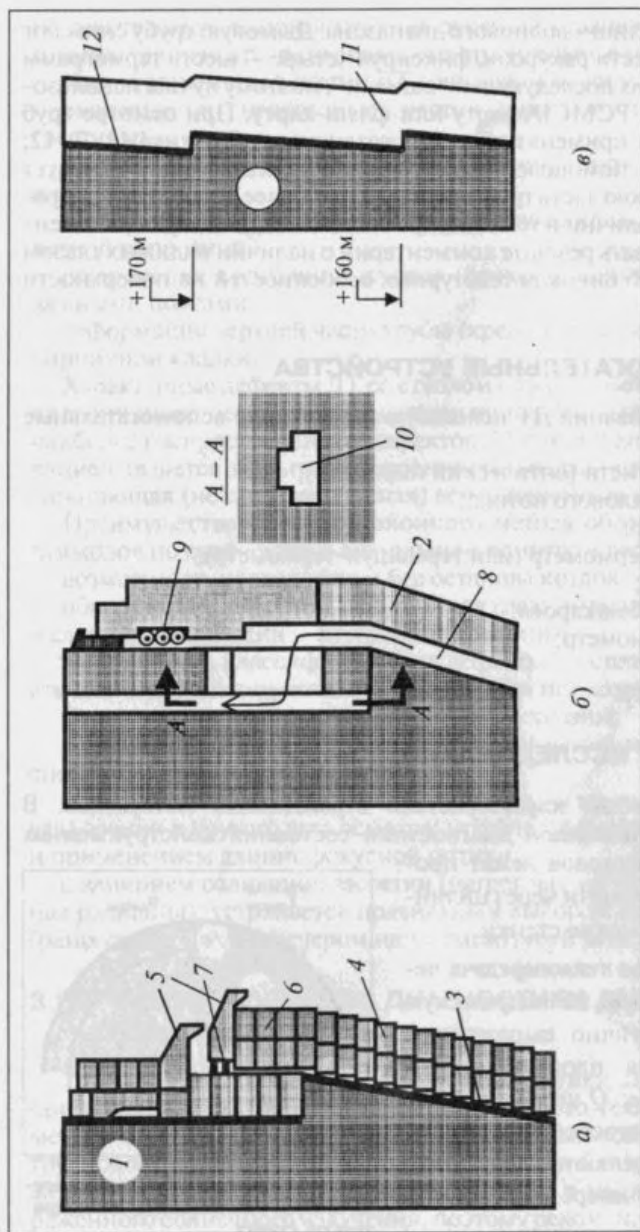


Рис. 10. Конструкции железобетонных дымовых труб:

а — возведенных после 1964 г.; б — с воздушным вентилируемым зазором; в — с монолитной футеровкой; 1 — железобетонный ствол; 2 — футеровка из глиняного кирпича; 3 — паровлагоизоляция; 4 — футеровка из кислотоупорного кирпича; 5 — слезник; 6 — глиняный обыкновенный кирпич, или строительный легковес; 7 — асбестовый шнур; 8 — вентилируемый воздушный зазор; 9 — компенсатор из асбеста и битума; 10 — воздушные каналы в зоне консолей ствола; 11 — футеровка из силикатполимербетона или полимербетона; 12 — металлическая разделительная диафрагма

Таблица 4. Температурные аномалии и соответствующие им дефекты в зависимости от давления дымовых газов в трубе

№ п/п	Тип дефекта	Характер температурного распределения		Примечания
		Труба под разрежением	Труба под избыточным давлением	
1	Дефектный шов бетонирования	Горизонтальная холодная линия	Горизонтальная теплая линия	—
2	Трещина несущего ствола	Холодная линия	Теплая линия	Подтверждается при визуальном осмотре
3	Сквозная трещина несущего ствола	Холодная линия	Теплая линия	Подтверждается при визуальном осмотре
4	Понижение сопротивления газопропусканию материала несущего ствола	Холодный участок	Теплый участок	—
5	Разрушение несущего ствола	В зависимости от глубины разрушения — либо холодный, либо теплый участок		Устанавливается при визуальном осмотре
6	Коррозия футеровки до 60 %	Теплый участок	Теплый участок	—
7	Обрушение футеровки	Теплый участок	Теплый участок	—
8	Понижение сопротивления газопропусканию футеровки	Теплый участок	Теплый участок	—
9	Отсутствие теплоизоляции в прослойке между стволом и футеровкой	Теплый участок	Теплый участок	—
10	Золыстые отложения	Холодный участок	Холодный участок	Уточняется по проекту

$$Q = \frac{T_{\text{газ}} - T_{\text{внеш}}}{R}; \quad (21)$$

$$\text{где } R = \frac{r_4}{r_1} \frac{1}{\alpha_r} + \frac{r_4}{\lambda_1} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{r_4}{\lambda_2} \ln \frac{r_3}{r_2} + \frac{r_4}{\lambda_3} \ln \frac{r_4}{r_3} + \frac{1}{\alpha_v};$$

$$Q = \alpha_{\text{внутр}} (T_{\text{газ}} - T_{\text{внутр}}^{\text{ст}}); \quad (22)$$

$$Q = \alpha_{\text{внеш}} (T_{\text{внеш}}^{\text{ст}} - T_{\text{внеш}}^{\text{возд}}). \quad (23)$$

Здесь $T_{\text{газ}}$ — температура горячего газа в ДТ; R — полное сопротивление теплопередаче ствола ДТ; остальные обозначения аналогичны введенным в § 2.11.

Следует отметить, что в формуле (21) тепловой поток определен на единицу площади внешней поверхности ДТ.

Конструкции ДТ и газоходов и их характерные дефекты. Дымовые трубы в зависимости от степени агрессивности дымовых газов и их объема, климатической зоны и времени возведения имеют различную конструкцию. Схемы фрагментов типичных ДТ приведены на рис. 10.

В различных режимах работы дефекты ДТ дают на термограммах различные виды поверхностных температурных аномалий. Характеристика температурных сигналов от дефектов различного типа дана в табл. 4 в зависимости от того, работает труба под разрежением или избыточным давлением.

Газоходы, выполненные из кирпича, железобетонных панелей или блоков с футеровкой и теплоизоляцией, имеют те же дефекты, что и сами ДТ (см. табл. 6), которые развиваются значительно интенсивнее, и их долговечность, например, при сжигании сернистого топлива, не превышает 5 — 10 лет.

3.5. ПРОВЕДЕНИЕ СЪЕМКИ И АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Перед началом термографирования на генеральном плане предприятия намечают точки наблюдения (точки съемки). При этом отдельные поля зрения должны перекрывать друг друга, поскольку при наблюдении цилиндрических объектов боковые поверхности не поддаются количественному анализу вследствие геометрических искажений и ослабления излучения согласно закону Ламберта.

Перед проведением съемки изучают проектную, исполнительскую, эксплуатационную и другую имеющуюся техническую документацию по ДТ и газоходам, включая паспорта, акты ввода объектов в эксплуатацию, материалы предыдущих обследований, состав, объем и время проведения текущих и капитальных ремонтов.

Одновременно с тепловизионным обследованием проводят визуальный осмотр наружной поверхности ствола и газоходов в бинокль (монокль) или подзорную трубу. Рекомендуется выполнить фотосъемку ДТ и газоходов с помощью цифрового фотоаппарата или цифровой видеокамеры), по возможности с тех же точек съемки, которые намечены для термографирования.

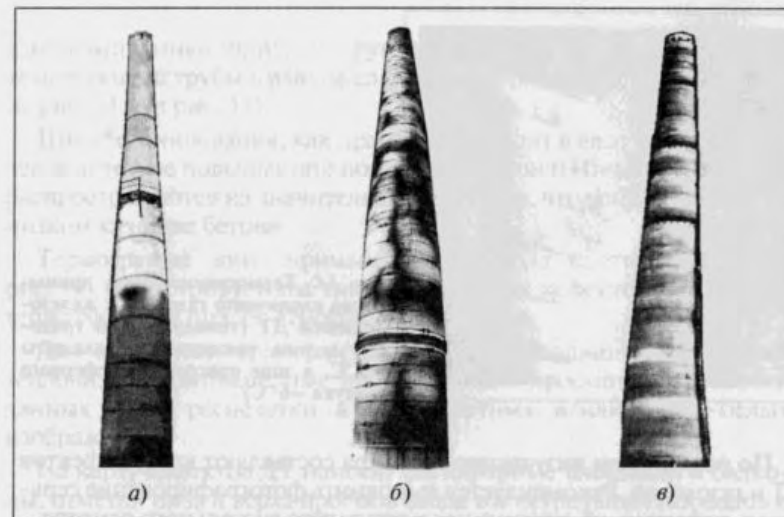


Рис. 11. Панорамные термограммы дымовых труб:

a — металлическая труба высотой 40 м с внутренней футеровкой, достигающей половины высоты (видно разрушение верхней части футеровки; амплитуда сигнала до 6 °С); *б* — кирпичная труба высотой 60 м с многочисленными трещинами (амплитуда сигнала до 7 °С); *в* — железобетонная труба с нарушениями теплоизоляции (амплитуда сигнала до 3 °С)

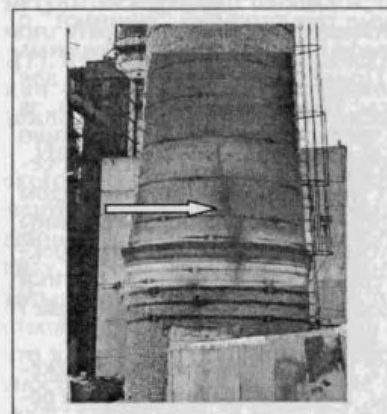


Рис. 12. Термограмма отремонтированной вертикальной трещины в кирпичной трубе обнаружила сохранение присосов (температурный градиент до 2,7 °С)

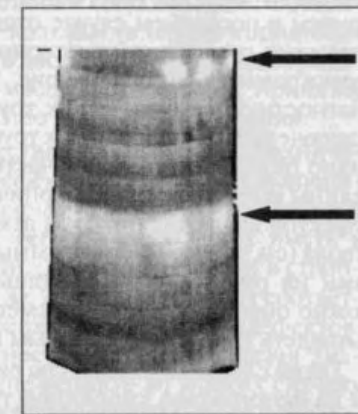


Рис. 13. Термограмма зон оседания минватных плит в теплоизоляции железобетонной ДТ (температурный градиент до 2,7 °С)



Рис. 14. Термограмма зоны примыкания кирпичного газохода к железобетонной ДТ (температурный градиент в зоне снижения теплозащиты $+5^{\circ}\text{C}$, в зоне присоса атмосферного воздуха -6°C)

По результатам визуального осмотра составляют карту дефектов ДТ и газоходов. Рекомендуется выполнить фотографирование серьезных дефектов, обнаруженных в результате визуального осмотра.

В ходе съемки измеряют:

- температуру наружного воздуха на каждой точке наблюдения;
- направление ветра;
- скорость ветра.

При составлении отчета по результатам тепловизионной инспекции ДТ используют как отдельные, так и панорамные термограммы, причем в последнем случае отдельные термограммы «сшивают» с помощью средств компьютерной графики. Примеры панорамных термограмм показаны на рис. 11. Применение термографии для диагностики металлических труб, как правило, неэффективно, за исключением футерованных труб. В частности, на рис. 11, а хорошо видно разрушение верхней части футеровки, которая достигает середины высоты трубы. В кирпичных трубах преобладающим видом дефектов являются присосы атмосферного воздуха через трещины ствола (см. пример термограммы трубы с многочисленными дефектами на рис. 11, б). С помощью термографической диагностики можно оценить качество косметического ремонта, который может выглядеть удовлетворительным при визуальном осмотре.

Такой случай изображен на рис. 12, где ИК термограмма наложена на фотографию кирпичной трубы, в которой был выполнен ремонт вертикальной трещины. Тем не менее, термограмма наглядно иллюстрирует наличие присосов воздуха через трещину. Наиболее разнообразны дефекты железобетонных труб. Следует отличать локальное ухудшение теплозащиты ствола, например, вследствие осе-

дания минватных плит, от круговых теплых зон, обусловленных конструкцией трубы в районе слезниковых рядов (см. термограммы на рис. 11, в и рис. 13).

Швы бетонирования, как правило, выглядят в виде холодных колец вследствие повышенной пористости бетона. Иногда такие зоны распространяются на значительные площади, что свидетельствует о низком качестве бетона.

Термограмма зоны примыкания газохода к стволу ДТ (см. рис. 14) иллюстрирует два типа характерных дефектов: ухудшение теплозащиты и присос атмосферного воздуха.

Для обработки термограмм используют входящие в комплект тепловизора компьютерные программы для просмотра, обработки данных и их распечатки в виде цветных и/или черно-белых изображений.

На карту дефектов ДТ наносят светофорные площадки и балконы, отметки низа и верха проемов ввода магистральных газоходов и отметки консолей железобетонного ствола, если они просматриваются на термограмме.

На карты дефектов газоходов наносят отметки верха и низа газохода, расстояния между температурными швами, размеры панелей и т.п.

Масштабирование термограмм по вертикали производят по отметкам светофорных площадок, балконам и консолям железобетонного ствола, а также по бандажным кольцам (в случае кирпичных ДТ). В случае железобетонных ДТ при достаточно четком изображении швов секций бетонирования, масштабирование и привязку температурных аномалий производят по швам бетонирования.

Идентификацию дефектов осуществляют путем теплотехнического моделирования характерных дефектов и сравнения экспериментальных и расчетных данных, причем в случае их совпадения данный дефект считается наиболее вероятным. Следует иметь в виду, что в задачах тепловизионной диагностики ДТ, как и в строительной диагностике, одному и тому же значению εT могут соответствовать различные комбинации конструктивных слоев и дефектов, что является отражением некорректности постановки задачи диагностики. Поэтому заключение о типе дефекта во многих случаях носит субъективный характер и зависит от квалификации оператора-термографиста. К наиболее неопределенным параметрам теплотехнической модели ДТ относятся: 1) температура газа и ее изменение с высотой; 2) коэффициенты теплоотдачи на внутренней и наружной поверхности и их изменение с высотой. На практике

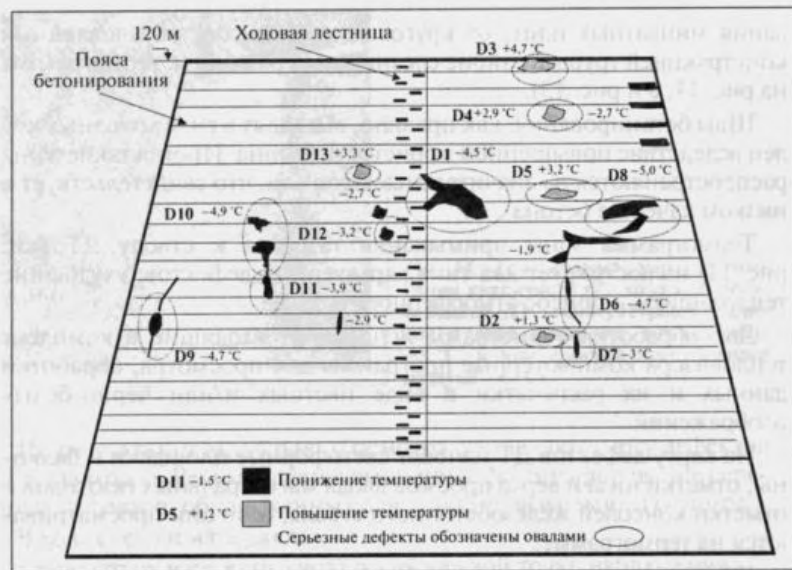


Рис. 15. Пример карты дефектов железобетонной ДТ, выявленных методом ИК термографии (светлые зоны соответствуют пониженной теплозащите, черные — присосам атмосферного воздуха)

ситуация осложняется тем, что температуру газа часто измеряют на выходе из котла, а не на входе в ДТ.

После идентификации дефектов их наносят на карту дефектов, которая может быть составлена как отдельно по тепловизионным данным, так и совместно с результатами визуального осмотра. Визуальный осмотр, включающий определение марки бетона, оценку состояния молниезащиты, а в ряде случаев данные геодезической съемки, является необходимым этапом обследования ДТ. Осмотр наружной поверхности ДТ производят с помощью бинокля для установления крупных дефектов: открытой арматуры и горизонтальных трещин, выпученных мест в защитном слое бетона, отслоений и сколов бетона, наличия крупнопористого бетона, мест течей и т.п. На железобетонных трубах внимательно осматривают швы бетонирования. Пример карты дефектов железобетонной ДТ приведен на рис. 15.

ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ

Паропроводы, паровые и водогрейные котлы

4.1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Основные показатели качества тепловой изоляции (ТИ), максимально допустимые тепловые потери через ТИ и температуры наружных поверхностей регламентируются соответствующими нормами [36].

Качество ТИ связано не только с предельными нормами теплопотерь, но и с расходом и стоимостью примененных теплоизоляционных материалов. Фактические тепловые потери отличаются от проектных вследствие низкого качества исполнения теплоизоляционных работ и сложности учета фактических условий внешней теплоотдачи. Кроме того, в процессе эксплуатации ТИ изменяет свои свойства, иными словами, деградирует, в результате чего возрастают тепловые потери и температура на поверхности ТИ. Прежде всего, это относится к ТИ оборудования и паропроводов высокого давления и температуры, а также к котельным обмуровкам, где большинство теплоизоляционных материалов работает при предельных температурах. С учетом того, что каждый процент превышения норм теплопотерь эквивалентен перерасходу приблизительно 300 кг условного топлива в год на 1 МВт установленной мощности, затраты на содержание ТИ в надлежащем виде, а значит и систематический контроль, экономически целесообразны. Применение для контроля ТИ контактных термощупов и преобразователей теплового потока (тепломер Шмидта, тепломер ИТП-2) не всегда возможно вследствие трудностей доступа к объекту контроля (наличие арматуры, балок, труб и т.п.). Трудоемкость обследований можно существенно снизить, используя тепловизионную аппаратуру.

Целями испытаний ТИ являются:

- 1) локализация и определение объемов разрушения ТИ перед ремонтом;
- 2) оценка качества ТИ при приемке после монтажа, ремонта или реконструкции;
- 3) обследование состояния ТИ и ее паспортизация;
- 4) определение суммарных теплопотерь через ТИ для оценки КПД основного оборудования.

Во всех случаях проводят проверку соответствия ТИ установленным нормам потерь тепла через ТИ и температуры на ее поверхности. Полученные результаты испытаний ТИ позволяют путем сравнения их с нормативными или проектными показателями оценить состояние или качество выполнения ремонта ТИ, выявить дефектные участки, наметить пути устранения дефектов.

Испытаниям подлежит ТИ основного и вспомогательного оборудования и трубопроводов с температурой теплоносителя выше 100 °С. Согласно Нормам и ПТЭ Р.4 пп. 4.3.30; 4.9.11, при температуре воздуха в помещении 25 °С, температура на поверхности ТИ не должна превышать 45 °С при температуре теплоносителя равной или менее 500 °С, и 48 °С — при температуре теплоносителя 500 — 600 °С. Для объектов, расположенных на открытом воздухе, температура на поверхности ТИ не должна превышать 55 °С при металлическом покровном слое и 60 °С — при других видах покровного слоя.

Вследствие сложности и разнообразия оборудования электростанций все паропроводы и оборудование до начала испытаний необходимо разбить на отдельные группы.

Котельный цех. Испытаниям подвергается ТИ трубопроводов питательной воды, водоперепускные трубы в пределах котла, пароотводящие трубы, барабан, пароперепускные трубы, коллекторы пароперегревателя, трубопроводы перегретого пара (основного и вторично перегретого), холодные линии вторично перегретого пара, установка для подачи собственного конденсата на впрыски, обмуровка котла, воздушный и газовый тракт котла, системы пылеприготовления.

Турбинный цех. Испытаниям подвергается ТИ турбин, паропроводов свежего и вторично перегретого пара, пароперепускных паропроводов от стопорных и регулирующих клапанов до ЦВД турбины, трубопроводов питательной воды и конденсата, подогревателей, деаэраторов и т.п.

Во время испытаний следует измерять температуру окружающего воздуха вблизи объектов контроля, поскольку удельные теплопотери и температура на поверхности ТИ нормированы.

При обследовании ТИ используют те же тепловизоры, что и при строительной диагностике, однако диапазон измеряемых температур должен быть расширен до +1500 °С; также более жесткие требования предъявляют к портативности прибора.

Перед началом испытаний необходимо ознакомиться с проектом ТИ паропроводов и технологического оборудования. Следует определить и при необходимости уточнить:

- 1) схемы ТИ паропроводов и оборудования;
- 2) конструкции ТИ для каждого объекта;
- 3) материалы ТИ;
- 4) расчетные общие и удельные теплопотери через ТИ и температуру ее поверхности.

При отсутствии схем составляют эскизы оборудования и трубопроводов. По месту с учетом подходов, наличия лестниц и площадок выбирают точки для проведения измерений. При внешнем осмотре отмечают на схеме места с нарушенным покровным слоем, наличие разрушений ТИ (провисание, сползание) и другие видимые дефекты. На участках с недостаточной толщиной ТИ производят измерения температуры поверхности ТИ и окружающего воздуха. Для лучшей привязки результатов обследования рекомендуется выполнить фотографическую съемку обнаруженных дефектов, желательно в тех же ракурсах, что и тепловизионная съемка.

4.2. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для сравнения с нормативными значениями результаты испытаний должны быть пересчитаны по нижеследующим формулам.

Удельные потери тепла q , Вт/м, на 1 м изолированного трубопровода:

$$q = q_L L, \quad (24)$$

где q_L — измеренные потери тепла с 1 м² ТИ, Вт/м²; L — длина окружности ТИ, м.

Приведенные потери тепла при температуре окружающего воздуха 25 °С, Вт/м²:

$$q_{25} = q_L \frac{t_T - 25}{t_T - t_B}, \quad (25)$$

где t_T — температура теплоносителя в изолированных объектах, °С; t_B — температура окружающего воздуха, °С.

Температура поверхности ТИ при температуре окружающего воздуха 25 °С, °С:

$$t_{\text{ТИ}}^{25} = \frac{q_{25}}{q_L} (t_{\text{ТИ}} - t_{\text{в}}) 25, \quad (26)$$

где $t_{\text{ТИ}}$ — измеренная температура поверхности ТИ, °С.

Тепловой поток определяют по известным значениям температур поверхности ТИ и окружающего воздуха:

$$Q = 1,66(t_{\text{ТИ}} - t_{\text{в}}) + c[(t_{\text{ТИ}} + 273)^4 : (t_{\text{в}} + 273)^4], \quad (27)$$

где c — числовой коэффициент, учитывающий коэффициент излучения поверхности и постоянную Стефана-Больцмана; для оштукатуренных, окрашенных и запыленных поверхностей $c = 4,88 \cdot 10^8$ Вт/(м² · К⁴); для алюминиевого покровного слоя $c = 2,67 \cdot 10^8$ Вт/(м² · К⁴).

ГЛАВА ПЯТАЯ

Поверхности нагрева котельных агрегатов

5.1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Поверхностью нагрева стационарного котла в соответствии с ГОСТ 23172-78 называется элемент котла, необходимый для передачи теплоты рабочей среде или воздуху. Материалы, из которых изготовлены поверхности нагрева, выбраны с учетом параметров внутренней и внешней среды в зависимости от условий их работы. Трубы поверхностей нагрева, трубопроводов и коллекторов работают в тяжелых условиях. К их качеству предъявляются высокие требования, так как от этого в значительной степени зависит надежность работы котла. Основное внимание при обследовании уделяется, как визуальному осмотру поверхностей нагрева на предмет выявления видимых нарушений, так и тепловизионной съемке, осуществляемой в зонах прямой видимости (не закрытых другими трубами) труб котла.

Визуальный осмотр поверхностей нагрева выведенных из работы котлоагрегатов совмещают с тепловизионной съемкой, создавая архив визуальных изображений и термограмм, которые могут быть использованы при последующих осмотрах. Тепловизионный контроль забитости труб паровых и водогрейных котлов проводят как на стадии завершения капитального или среднего ремонта, так и до него. Для проведения тепловизионного обследования обеспечивают подачу теплой воды (40 – 60 °С) через поверхности нагрева котла. В процессе термографии маркируют (отмечают) забитые участки труб и другие аномалии (дефекты), выявленные при визуальном осмотре. Рекомендуется производить запись на цифровую фото- или видеокамеру с привязкой термограмм к местам дефектов.

5.2. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

После проведения осмотра и сбора информации производят анализ результатов, выявляют возможные причины повреждений и оценивают степень их влияния на состояние труб поверхностей нагрева. При визуальном осмотре выявляют следующие группы дефектов:

дефекты металлургического происхождения (плены, закаты, трещины и т.п.);

дефекты термической обработки (коррозия, окалинообразование и т.д.);

технологические дефекты, возникающие при изготовлении, монтаже и ремонте котла (гофры на гнутых участках труб, утонение стенок, вмятины, задиры и т.д.);

наружные загрязнения поверхностей нагрева (сажа, шлакозольные отложения и т.п.).

Забитость или частичная проходимость труб поверхностей нагрева определяют по термограмме, на которой темный и серый цвета (холодные зоны) соответствуют локальной непроходимости трубок; соответственно белый цвет (горячие зоны) указывает на нормальное состояние данного участка поверхности нагрева (рис. 16).

Забитость трубок определяется следующими внутренними загрязнениями:



Рис. 16. Термограмма труб поверхности нагрева котла

1) послемотажная загрязненность поверхности котла из-за отложения на ней оксидов железа;

2) загрязненность сварочным градом, песком, землей и другими посторонними предметами;

3) эксплуатационная загрязненность внутренней поверхности котла из-за отложений в виде кальциевых соединений и оксидов железа.

Тепловизионный контроль труб поверхностей нагрева котла не позволяет однозначно оценивать характер внутренних отложений (необходимы последующие лабораторные исследования), но позволяет получить общую картину состояния поверхностей нагрева котла в зонах возможного визуального осмотра.

Для устранения обнаруженных дефектов и дальнейшего исключения (замедления) их развития рекомендуется поддерживать оптимальные режимы работы котла и применять механизированные системы комплексной очистки (паровые, воздушные или водяные аппараты, устройства импульсной очистки, виброочистки, дробеочистки и др.). Предназначенные для этого устройства, а также средства дистанционного и автоматического управления ими, должны быть в постоянной готовности к действию.

Тепловизионный контроль труб поверхностей нагрева котла рекомендуется проводить всегда, когда котел выводят из работы, ввиду небольших экономических затрат и эффективности данного метода, позволяющего получить достоверную информацию на текущий момент времени с накоплением и использованием ее при последующих ремонтных работах и в эксплуатационных режимах.

Пруды-охладители электростанций

Термография прудов-охладителей позволяет получить картину распределения температур по акватории. Это дает возможность определить тепловые течения в водохранилищах, оценить эффективность охлаждения воды, выявить несанкционированные сбросы в водоемы, влияющие на тепловой режим энергетического оборудования тепловых электростанций. В частности, повышение температуры воды, поступающей на конденсаторы турбин, на 1 °С по сравнению с расчетной для ТЭС мощностью 4 млн. кВт вызывает перерасход топлива примерно на 25 000 т в год.

Съемку выполняют с борта вертолета в два этапа. Вначале с высоты 200 – 300 м снимают пруд по периметру с привязкой к береговым объектам, в результате чего устанавливают распределения температуры в местах сброса и забора циркуляционной воды, а также выявляют места несанкционированных сбросов в водоемы. Затем съемку повторяют тепловизором с широкоугольным объективом с высоты не менее 1000 м, в результате чего получают общую картину распределения температуры по поверхности пруда.

При невозможности получить изображение пруда в пределах одного кадра выполняют мозаичную съемку, после чего отдельные термограммы “сшивают” с помощью соответствующих компьютерных программ (в последние годы появились специализированные программы, предназначенные для составления панорамных термоизображений с учетом угловых искажений, параллакса и других факторов). Рекомендуется параллельно с тепловизионной съемкой производить обычную видеосъемку, в том числе со звуковым комментарием для лучшей привязки термограмм к наземным объектам. Излучательная способность воды весьма высока (0,96 – 0,98) при углах визирования, близких к нормали. При больших углах визирования имеют место явления зеркального отражения, в результате чего точность определения истинных температур может снижаться.

Поскольку тепловизионную съемку прудов-охладителей производят на значительных расстояниях, поглощение в атмосфере, отраженное солнечное излучение, осадки и туман могут оказывать существенное влияние на точность измерений. Рекомендуется выполнять съемку в пасмурный день при отсутствии ветра, тумана и дождя.

Требования к тепловизорам — стандартные. Запись термограмм можно производить как на РСМСІА карту (или флэш-карту), так и на видеоманитофон. На итоговой панорамной термограмме пруда идентифицируют места сброса и забора циркуляционной воды, а также зоны несанкционированных сбросов воды, если таковые имеются.

После анализа полученной информации можно сделать вывод об эффективности охлаждения воды и степени влияния различных факторов, мешающих этому охлаждению. Результаты тепловизионной съемки могут быть использованы для изменения теплового режима пруда-охладителя, что позволяет путем снижения температуры циркуляционной воды повысить глубину вакуума в кон-



Рис. 17. Обнаружение мест несанкционированного сброса воды в пруд (с разрешения фирмы “Stockton Infrared Services”)

денсаторе турбины и соответственно увеличить мощность и КПД турбоустановки.

Данное применение ИК термографии может быть проиллюстрировано на опыте работы фирмы "Stockton Infrared Services" (США) по обнаружению мест несанкционированного сброса канализационных стоков в пруд (рис. 17). Сбрасываемые воды имеют более высокую температуру и их "хвосты" хорошо видны при воздушной съемке (показаны стрелками).

ПОУДЫ, ОХЛАДИТЕЛИ, ЭЛЕКТРОСТАЦИИ

До этого момента в литературе не было опубликовано никаких сведений о применении ИК термографии для обнаружения мест несанкционированного сброса канализационных стоков в пруд. В настоящее время в литературе опубликовано несколько работ, посвященных применению ИК термографии для обнаружения мест несанкционированного сброса канализационных стоков в пруд. В настоящее время в литературе опубликовано несколько работ, посвященных применению ИК термографии для обнаружения мест несанкционированного сброса канализационных стоков в пруд.



Рис. 17. Обнаружение мест несанкционированного сброса канализационных стоков в пруд с помощью ИК термографии. Стрелками показаны "хвосты" сбрасываемых вод.

ГЛАВА СЕДЬМАЯ

Тепловые сети

Контроль состояния подземных тепловых сетей основан на дистанционном измерении поля температуры на поверхности грунта над теплотрассой и сравнении измеренных значений с расчетными, полученными методом математического моделирования возможных нарушений теплового режима сетей (дефектов). Результаты контроля предоставляются в виде термограмм и экспериментальных профилей распределения температур над поверхностью теплотрассы, которые сравнивают с профилями, полученными методом математического моделирования. Подготовку к измерениям начинают с изучения участка тепловой сети: типа прокладки, конструкции изоляции, ее состояния и т.д. При этом используют паспортные данные, исполнительные чертежи, отчетность теплосети, осмотр участка со вскрытием тепловых камер и т.п. Измерения поверхностных температур грунта производят при перепаде температур между наружным воздухом и водой в тепловой сети, превышающим минимально допустимый перепад ΔT_{min} , определяемый по формуле:

$$\Delta T_{min} = \Delta T_{разр} R \frac{\Delta R_0}{1 - R_0}, \quad (27)$$

где $\Delta T_{разр}$ — температурное разрешение (чувствительность) тепловизора, °С; R — проектное сопротивление теплопередаче, Вт⁻¹ · м² · °С; Δ — коэффициент теплоотдачи на поверхности грунта, Вт/(м² · °С); R_0 — относительное сопротивление теплопередаче подлежащего выявлению дефектного участка, принимаемое равным отношению значения, требуемого нормативно-технической документацией, к проектному значению сопротивления теплопередаче (но не более 0,85).

Значение Δ на поверхности грунта рекомендуют определять по формуле:

$$\Delta = E \sqrt{v \left(6 \cdot \frac{6,2}{v^2} \right)}, \quad (28)$$

где E — коэффициент (1,2 — для грунта; 1,4 — для асфальта); v — скорость ветра, м/с.

Температуру грунта измеряют при условиях, близких к стационарным, при отсутствии атмосферных осадков, тумана и задымленности. Обследуемая поверхность не должна находиться в зоне прямого или отраженного солнечного излучения. Учитывая изменения радиационного баланса Земли, измерение поверхностных температур грунта лучше всего производить за 2 — 3 ч до восхода Солнца. Обследуемая поверхность грунта должна быть по возможности ровной, свободной от травяного покрова, воды, камней и т.п. При проведении измерений приборы устанавливают так, чтобы поверхность грунта находилась в прямой видимости под углом зрения не менее 60° . Вид и амплитуда распределения температуры над расположенной теплотрассой зависит от глубины ее залегания, сопротивления теплопередаче теплоизоляции, теплопроводности почвы и разности температур почвы и теплоносителя.

В российских условиях теплотрассы расположены достаточно глубоко, и соответствующие поверхностные температурные сигналы размыты. Наилучшие результаты получают при съемке со значительной высоты (вплоть до борта вертолета или мотодельтаплана). При измерении поверхностных температур грунта над теплотрассой необходимо учитывать влияние на температурное поле соседних инженерных сетей, отапливаемых подвалов зданий, тепловых камер и т.п. Одновременно измеряют температуру воды в тепловой сети и температуру окружающей среды. Результаты заносят в журнал записи измерений. Сопротивление теплопередаче базового участка тепловой сети определяют по данным натурных измерений или согласно нормативно-технической документации по проекту участка сети. Пример термограммы городской теплотрассы, полученной с борта самолета, приведен на рис. 18; хорошо прослеживается трасса подземной трубы с компенсаторами и видна область существенной утечки теплой воды (отмечена стрелкой).

Типовая процедура обработки результатов состоит в сравнении измеренной максимальной температуры поверхности грунта над теплотрассой с расчетной максимальной температурой поверхности грунта для данного участка. Максимальную расчетную темпе-



Рис. 18. Термограмма участка подземной теплотрассы, полученная аэросъемкой (с разрешения фирмы "Stockton Infrared Services")

ратуру поверхности грунта над теплотрассой для данного участка сети определяют по данным натурных измерений или согласно нормативно-технической документации по проекту участка сети. Расчет максимальной температуры поверхности грунта можно производить нормативным методом с использованием персональных компьютеров.

Тепловизионный метод пригоден для выявления участков теплотрасс с повышенными тепловыми потерями, обусловленными увеличением коэффициента теплоотдачи вследствие увлажнения или разрушения тепловой изоляции, затопления канала водой и т.д. С определенной точностью данный метод позволяет определять места утечек теплоносителя из трубы, уменьшая зону вскрытия грунта над теплотрассой, снижая трудозатраты и тем самым, уменьшая объем выполняемых земляных работ.

ГЛАВА ВОСЬМАЯ

Вакуумное оборудование турбоустановок

Качество вакуумплотных соединений в турбинных установках напрямую связано с эффективностью их работы, в частности, с расходом топлива. Штатный контроль вакуума по перепаду давления не позволяет идентифицировать дефектные места, а использование теческательщиков неэффективно в силу чисто технических проблем, например, трудностей доступа к зонам контроля. Физическая основа применения ИК термографии связана с тем, что при натекании атмосферного воздуха в места неплотных соединений установок, имеющих повышенную температуру, возникает эффект охлаждения, который тем заметнее, чем больше объем натекаемого воздуха (выше вакуум или больше дефект).

В России систематические исследования по обнаружению мест нарушения вакуума в турбоустановках тепловых станций не проводились и соответствующие методические указания отсутствуют. Из литературы известно, что на атомной станции Peach Bottom "Peco Energy Company" (США) ИК термография является штатным методом анализа состояния конденсаторов [37]. Как известно, основная функция конденсатора состоит в конденсировании выходного пара из паровых турбин низкого давления. Максимальная "тепловая" эффективность работы конденсатора достигается поддержанием вакуума в турбине на минимально возможном уровне. Тем не менее, на практике возможно натекание атмосферного воздуха до нескольких кубометров в минуту. Основными зонами нарушения вакуума являются:

- 1) уплотнения турбины;
- 2) устройства удаления воздуха;
- 3) смотровые окна и лазы;
- 4) клапана и фланцы;
- 5) сварные соединения и т.п.

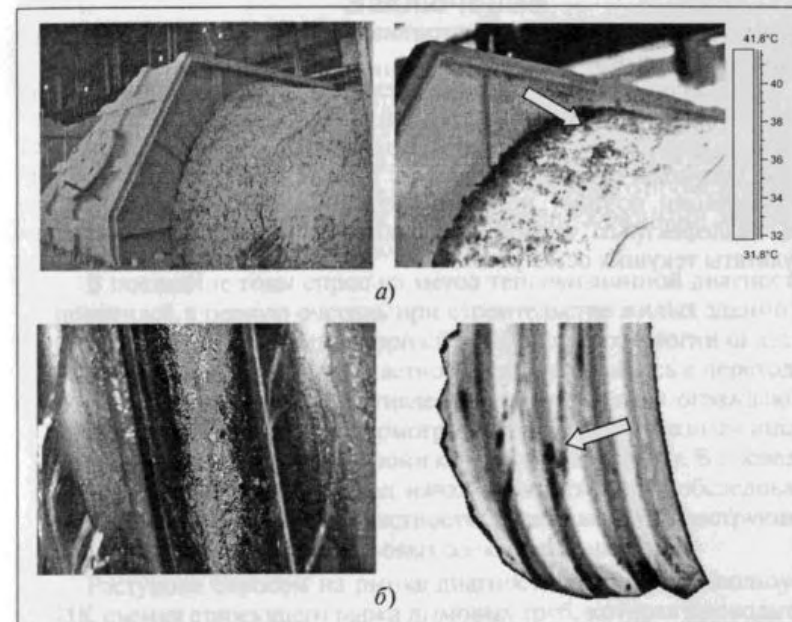


Рис. 19. Обнаружение мест нарушения вакуума в турбоустановках тепловой станции:

a — зона между корпусом турбины и теплоизоляцией (средняя температура теплоизоляции 41 °С; понижение температуры в зоне дефекта до 8 °С); *б* — зона сварки ребра компенсатора корпуса ПСГ-1 (средняя температура на ребре 96 °С; понижение температуры в зоне дефектов до 6 °С)

На атомной станции Peach Bottom внедрена программа использования ИК термографии для обнаружения мест натекания воздуха в вышеупомянутых компонентах. Подчеркивается, что роль данного метода — скорее качественная, нежели количественная. Тем не менее, термография весьма эффективна для оценки качества ремонта вакуумплотных соединений.

Поскольку, степень вакуума и структура соответствующих систем на атомных и тепловых станциях аналогичны, следует ожидать, что ИК термографию можно применить и на ТЭС. Фрагментарный опыт авторов в данной области показал, что в некоторых вакуумплотных соединениях вид температурных распределений в случае нарушения вакуума изменяется столь значительно, что идентификация протечки возможна даже оператором с небольшим опытом термографии. Тем не менее, во многих случаях, интерпретация ре-

зультатов съемки является нетривиальной и требует систематических исследований.

Две иллюстрации достаточно очевидных дефектов приведены на рис. 19 (дефекты отмечены стрелкой). Следует отметить, что термограммы фланцевых соединений, в частности, в критически важной зоне цилиндра низкого давления, с трудом поддаются простой интерпретации, поэтому, по-видимому, необходимо накопление атласа “бездефектных” термограмм, с которыми следует сравнивать результаты текущих осмотров.

Выводы

Выводы



Заключение

Несмотря на трудности интерпретации тепловых изображений, получаемых с помощью тепловизоров, метод инфракрасной термографии остается привлекательным для промышленности в силу дистанционного характера измерений, высокой производительности и возможности выявлять феномены теплового происхождения, которые косвенным образом связаны с разнообразными дефектами энергонагруженного оборудования.

В последние годы спрос на метод тепловизионной диагностики проявился в первую очередь при строительстве жилых зданий, где необходимость внедрять энергосберегающие технологии оказалась жизненно необходимой. В частности, это проявилось в переходе на новые требования к сопротивлению теплопередаче ограждающих конструкций, причем ИК термография оказалась полезным инструментом для выявления зон пониженной теплозащиты. В последние годы тепловизионный метод начал внедряться при обследовании промышленных зданий, в частности, ограждающих конструкций и кровли крыш корпусов тепловых электростанций.

Растущим спросом на рынке диагностических услуг пользуется ИК съемка стареющего парка дымовых труб, которая проводится в рамках соблюдения федерального закона о промышленной безопасности. Не отменяя штатного визуального обследования, тепловизионная диагностика доказала свою эффективность при обнаружении скрытых дефектов теплоизоляции и сквозных дефектов ствола.

Инфракрасная термографическая диагностика строительных сооружений и дымовых труб, наряду с испытаниями электротехнических объектов, подкреплена соответствующими методическими документами. В то же время имеются другие многообещающие области применения тепловизионного метода, где критерии отбраковки до сих пор разработаны слабо и требуют проведения научно-исследовательских работ. Среди них имеются области, разрабатываемые в течение длительного времени, например, обнаружение утечек тепловой воды из подземных теплоотрасс, а также сравнительно новые области, такие как выявление мест нарушения вакуума в турбоустановках ТЭС.

Заканчивая данную брошюру, уместно привести слова крупного российского специалиста Л. З. Криксунова, который сказал, что “возможности ИК техники ограничены только нашим воображением”.

Список литературы

1. **Бажанов С. А.** Инфракрасная диагностика электрооборудования распределительных устройств. — Библиотечка электротехника, Прилож. к журн. "Энергетик". М.: НТФ "Энергопрогресс", "Энергетик", 2000.
2. **Диагностика и определение теплотехнических характеристик наружных ограждающих конструкций строительных сооружений тепловизионным методом.** — Свид. об аттестации МВИ № 1305/442 от 10.01.2001, Госстандарт России.
3. **ГОСТ 26629-85.** Метод тепловизионного контроля качества. Теплоизоляция ограждающих конструкций.
4. **ГОСТ 26254-84.** Здания и сооружения. Методы определения сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций.
5. **СНиП II-3-79*.** Строительная теплотехника.
6. **ГОСТ 25380-82.** Здания и сооружения. Метод измерения плотности тепловых потоков, проходящих через ограждающую конструкцию.
7. **Международный стандарт ISO 6781-83.** Теплоизоляция. Качественное выявление теплотехнических нарушений в ограждающих конструкциях. Инфракрасный метод.
8. **Thermographic Inspection of Electrical Installations** // Publ. 556 556 776, AGEMA Infrared Systems Inc. Sweden. 1985.
9. **Ведомственные строительные нормы по теплотехническим обследованиям наружных ограждающих конструкций зданий с применением малогабаритного тепловизора (ВСН 43-96).** — Утв. Департаментом строительства г. Москвы 30.07.96.
10. **Прейскурант на экспериментально-наладочные работы и работы по совершенствованию технологии и эксплуатации электростанций и сетей.** Т. 7. Разд. 28. Инфракрасный контроль состояния энергетического оборудования и сооружений. — М.: ОРГРЭС, 1992.
11. **Дроздов В. А., Сухарев В. И.** Термография в строительстве. М.: Стройиздат, 1987.
12. **Вавилов В. П.** Тепловые методы контроля: Справочник. М.: Машиностроение, 1991.
13. **Вавилов В. П.** Инфракрасная термография механических напряжений в строительных конструкциях (диагностика казармы ТВВКУС в г. Томске после катастрофы) // Контроль. Диагностика. 1998. № 1. С. 21 — 25.
14. **Вавилов В. П.** Диагностика строительных конструкций методом инфракрасной термографии // В мире неразрушающего контроля. 2000. Июнь. № 2. С. 8 — 11.
15. **Фокин К. Ф.** Строительная теплотехника ограждающих частей зданий. М.: Стройиздат, 1973.
16. **Исаченко В. П., Осипова В. А., Сукомел А. С.** Теплопередача. М.: Энергия, 1969.
17. **Petersson B., Axen B.** Thermography: Testing of thermal insulation and airtightness of buildings. - Swedish Council for Building Research. Sweden, 1980.
18. **ANSI/ASHRAE Standard 101-1981.** Application of infrared sensing devices to the assessment of building heat loss characteristics // ASHRAE, 1791 Tullie Circle NE, Atlanta, Georgia 30329, USA.
19. **ASTM Standard C1060.** Thermographic inspection of insulation in envelope cavities in wood frame buildings // ASTM, 1916 Race Street, Philadelphia, Pennsylvania 19103, 1987, USA.
20. **ISO Standard 6781.** Thermal insulation — Qualitative detection of thermal irregularities in building envelopes — Infrared method // NIST, 1430 Broadway, New York 10081, USA.
21. **ASTM Standard C1153-90.** Standard practice for the location of wet insulation in roofing systems using infrared imaging // Annual Book of ASTM Standards. Vol. 04.06, ASTM, 1916 Race Street, Philadelphia, Pennsylvania 19103, USA.
22. **Ljungberg S. A.** Infrared techniques in buildings and structures: operation and maintenance. — In: Infrared methodology and technology, Nondestructive testing monographs and tracts, ed // X. Maldague, Gordon & Breach Science Publishers, USA, 1992. P. 211 — 252.
23. **Hart J. M.** A Practical guide to infrared thermography for building surveys // Building Research Establishment Report, Garston, Watford, USA.
24. **ASTM Designation E 1186-87.** Standard practices for air leakage site detection in building envelopes, Nov. 1987 // ASTM, 1916 Race Street, Philadelphia, Pennsylvania 19103, USA
25. **Guidelines for specifying and performing infrared inspections** // Infrascpection Inst., 1st Ed., Jan. 1988, USA.

26. Evans J. Meteorology and infrared measurements // Proc. SPIE "Thermosense IV". Vol. 313, 1981, USA.
27. Merkblatt. (ber Thermografische Untersuchungen an Bauteilen and Bauwerken // DGZfP, Ausgabe October 1993, Berlin, Germany.
28. РД 34.21-562-93. Инструкция по эксплуатации железобетонных дымовых труб с металлическими газоотводящими стволами на тепловых электростанциях.
29. СП 13-101-99. Правила надзора, обследования, проведения технического обслуживания и ремонта промышленных дымовых и вентиляционных труб. — М.: Госстрой РФ. 1999.
30. Методика тепловизионной диагностики дымовых труб и газоходов. — Свид. об аттестации МВИ № 11 / 442 от 6.03.2002, Госстандарт России.
31. Энно И. К., Дужих Ф. П., Мелентьев Н. Н. Дефектоскопия дымовых труб инфракрасной техникой // Электрические станции, 1988, № 6.
32. Vavilov V., Demin V., Shiryaev V. Inspecting smokestacks by IR thermographic smokestacks and heat conduction modeling // Proc. SPIE "Thermosense-XXIII". Vol. 4360, Orlando, USA, 2001. P. 324 — 332.
33. Волков Э. П., Гаврилов Е. И., Дужих Ф. П. Газоотводящие трубы ТЭС и АЭС. М.: Энергоатомиздат, 1987.
34. Франчук С. В. Таблицы теплотехнических показателей строительных материалов. М.: Энергоатомиздат, 1969.
35. Тепловой расчет котельных агрегатов / Под ред. Н. В. Кузнецова. М.: Энергия, 1973.
36. Хижняков С. В. Практические расчеты тепловой изоляции. М.: Госэнергоиздат, 1976.
37. Lanis M. A. Infrared Applications for Steam Turbine Condenser Systems // Proc. SPIE "ThermosenseXXII", Vol. 4020, 2000. P. 107 — 113.

Содержание

Предисловие	3
Список использованных терминов	5
ГЛАВА ПЕРВАЯ. Краткая характеристика современных тепловизоров	7
1.1. Общие сведения.	7
1.2. Типовые модели тепловизоров	15
ГЛАВА ВТОРАЯ. Административные, промышленные и жилые здания	16
2.1. Общие положения	16
2.2. Тепловизоры для строительной диагностики	19
2.3. Вспомогательные устройства	19
2.4. Требования к объекту исследований	20
2.5. Проблема коэффициента излучения	21
2.6. Метеоусловия при тепловизионной съемке	24
2.7. Микрометеоусловия при тепловизионной съемке.	26
2.8. Расстояние до объекта контроля	26
2.9. Условия внутри помещений	27
2.10. Определение теплотерь	28
2.11. Определение сопротивления теплопередаче	30
2.12. Качественная и количественная оценка результатов	34
ГЛАВА ТРЕТЬЯ. Дымовые трубы	42
3.1. Общие положения	42
3.2. Тепловизоры для диагностики дымовых труб	46
3.3. Вспомогательные устройства	47
3.4. Объект исследований	47
3.5. Проведение съемки и анализ результатов	50
ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ. Паропроводы, паровые и водогрейные котлы	55
4.1. Общие положения	55
4.2. Анализ результатов	57
ГЛАВА ПЯТАЯ. Поверхности нагрева котельных агрегатов	59
5.1. Общие положения	59
5.2. Анализ результатов	60
ГЛАВА ШЕСТАЯ. Пруды-охладители электростанций	62
ГЛАВА СЕДЬМАЯ. Тепловые сети	65
ГЛАВА ВОСЬМАЯ. Вакуумное оборудование турбоустановок	68
Заключение	71
Список литературы	72

Библиотечка электротехника

Приложение к производственно-массовому журналу "Энергетик"

ВАВИЛОВ ВЛАДИМИР ПЛАТОНОВИЧ
АЛЕКСАНДРОВ АЛЬБЕРТ НИКОЛАЕВИЧ

**Инфракрасная термографическая диагностика
в строительстве и энергетике**

АДРЕС РЕДАКЦИИ:

109280, Москва, ул. Автозаводская, 14/23

Телефоны: (095) 275-19-06, тел. 275-00-23 доб. 22-47; факс: 234-74-21

Редакторы: Л. Л. Жданова, Н. В. Ольшанская

Худож.-техн. редактор Т. Ю. Андреева

Корректор З. Б. Драновская

Сдано в набор 21.08.2003 г. Подписано в печать 24.09.2003 г.

Формат 60×84¹/₁₆. Печать офсетная.

Печ. л. 4,75. Тираж 1200 экз. Заказ БЭТ/09(57)-2003

Макет выполнен издательством "Фолиум": 127238, Москва, Дмитровское ш., 58.

Отпечатано типографией издательства "Фолиум": 127238, Москва, Дмитровское ш., 58.

Журнал "Энергетика за рубежом"

— приложение к журналу "Энергетик"

Подписывайтесь на специальное приложение к журналу "Энергетик" — **"Энергетика за рубежом"**. Это приложение выходит **один раз в два месяца**.

Журнал "Энергетика за рубежом" знакомит читателей с важнейшими проблемами современной зарубежной электроэнергетики, такими, как:

- развитие и надежность энергосистем и энергообъединений;
- особенности и новшества экономических и рыночных отношений в электроэнергетике;
- опыт внедрения прогрессивных технологий в энергетическое производство;
- модернизация и реконструкция (перемаркировка) оборудования электростанций, электрических и тепловых сетей;
- распространение нетрадиционных и возобновляемых источников энергии;
- энергосбережение, рациональное расходование топлива и экологические аспекты энергетики.

Подписку можно оформить в любом почтовом отделении связи по объединенному каталогу **"ПРЕССА РОССИИ"**. Том 1. Российские и зарубежные газеты и журналы.

Индексы журнала "Энергетика за рубежом"

— приложения к журналу "Энергетик"

87261 — для предприятий и организаций;

87260 — для индивидуальных подписчиков.