

**З.Г. Салихов, О.Н. Будадин, Е.Н. Ишметьев, А.П. Щетинин,
Т.Е. Троицкий-Марков, Е.В. Абрамова**

**ИНЖЕНЕРНЫЕ ОСНОВЫ
ТЕПЛОВОГО КОНТРОЛЯ.
ОПЫТ ПРОМЫШЛЕННОГО
ПРИМЕНЕНИЯ**

Москва, 2008 г.

УДК 62-52:519.122
С16

Рецензенты:
член-корреспондент РАН Н.А. МАХУТОВ,
член-корреспондент РАН Э.С. ГОРКУНОВ

Инженерные основы теплового контроля. Опыт практического применения: Монография / З.Г. Салихов, О.Н. Будадин, Е.Н. Ишметьев, А.П. Щетинин, Т.Е. Троицкий-Марков и Е.В. Абрамова, - М.: ИД МИСиС, 2008, - 476 с.

В монографии обобщены и систематизированы современные достижения в области метода и средств теплового неразрушающего контроля с точки зрения его широкого практического применения в различных отраслях промышленности.

Представлен комплексный инженерный подход к созданию технологий теплового контроля: от теоретических основ, включающих теорию инфракрасного излучения, инженерный расчет параметров теплового контроля и оптимальное построение систем, аппаратуры и методик, до нормативно-правового обеспечения и методической базы с учетом последних нормативных документов.

Приведены примеры разработки основ методик теплового контроля технического состояния и энергоэффективности и опыт практического применения в различных отраслях промышленности: металлургии, строительстве, ЖКХ, электроэнергетике, теплоэнергетике, контроля потенциально опасных специальных объектов и т.п.

Монография предназначена для специалистов, аспирантов и студентов, разрабатывающих методики, изучающих и применяющих на практике метод и средства теплового неразрушающего контроля в различных отраслях промышленности для оценки технического состояния материалов, изделий и конструкций.

Без объявления

ISBN 978-5-87623-207-6

© З.Г. Салихов, О.Н.Будадин,
Е.Н. Ишметьев, А.П.Щетинин,
Т.Е. Троицкий-Марков,
Е.В. Абрамова
© Издательский Дом МИСиС, оформление, 2008

Вступительное слово

В последние пятнадцать лет в России наметилась тенденция увеличения числа техногенных аварий и катастроф.

Одна из основных причин этого явления - большая изношенность основных фондов (на некоторых предприятиях уровень износа составляет до 80%). По различным оценкам стоимость восстановления основных фондов в России в настоящее время составляет сумму более 800 млрд. долларов США.

Единственным способом снижения роста техногенных аварий и катастроф является 100% контроль и диагностика технического состояния с определением остаточного ресурса изделий и конструкций на всех стадиях их производства и эксплуатации. Своевременно обнаружить и распознать потенциально опасные зоны, узлы, детали – значит принять превентивные меры по ремонту не всего объекта в целом, а его конкретной части.

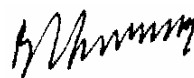
Инвестиционная привлекательность, а, следовательно, и высокий инновационный потенциал этой сферы обеспечивается тем, что общественное значение диагностики и неразрушающего контроля будет интенсивно возрастать по мере старения основных фондов, устойчивого роста тарифов и цен на энергоносители.

В настоящее время акцент делается на создание компьютеризированной аппаратуры контроля и методов первичной обработки информации, и практически отсутствуют разработки методов анализа внутренней структуры материалов и изделий на основе данных неразрушающего контроля.

В настоящей монографии даны инженерные основы принципиально новых технологий и программно-аппаратных средств для решения широкого круга задач по комплексной диагностике состояния городского хозяйства и промышленных объектов со сложными эксплуатационными характеристиками, в т.ч. с обнаружением и распознаванием параметров внутренних дефектов на основе прогрессивного метода тепловой дефектометрии, с численной оценкой фактического состояния зданий, сооружений, технических устройств и их остаточного эксплуатационного ресурса.

Безусловно данная монография выходит в печати своевременно и будет с пользой служить для обучения и аттестации широкого круга специалистов в области диагностики эксплуатационного состояния строительных, энергетических и промышленных объектов.

Президент Российского Общества
Неразрушающего Контроля (РОНКТД),
Президент 10 ECND, член Европейской
академии, директор ЗАО «НИИИН
МНПО «Спектр», академик РАН, д.т.н.,
проф.



В.В.Клюев

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|--|----------|
| ВВЕДЕНИЕ | 8 |
| Глава 1 ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ОРГАНИЗАЦИИ ТЕПЛОВОГО КОНТРОЛЯ | |
| 1.1 Понятия теплового контроля (ТК). Классификация и задачи. Неразрушающий контроль и безопасность эксплуатации..... | 11 |
| 1.2 Термины и определения | 23 |
| 1.3 Организация контроля..... | 27 |
| 1.4 Квалификация персонала | 28 |
| 1.5 Требования безопасности..... | 29 |
| Глава 2 ОСНОВЫ ТЕОРИИ ТЕПЛОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ..... | |
| 2.1 Спектр электромагнитных колебаний и энергетические величины | 30 |
| 2.2 Законы теплового излучения | 31 |
| 2.3 Схема теплового контроля объектов | 36 |
| 2.4 Коэффициент излучения | 37 |
| 2.5 Двухканальный способ регистрации теплового излучения..... | 48 |
| 2.6 Прохождение теплового излучения через атмосферу..... | 51 |
| Глава 3 ОСНОВЫ ИНЖЕНЕРНОГО РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ТЕПЛОВОГО КОНТРОЛЯ | |
| 3.1 Моделирование процесса теплового контроля | 52 |
| 3.1.1 Моделирование процесса обнаружения внутренних дефектов многослойных объектов по анализу температурных полей | 52 |
| 3.1.2 Моделирование процесса тепло- и влагопереноса во время фазовых переходов жидкость - твердое тело в многослойных объектах | 62 |
| 3.2 Метод обнаружения дефектов на фоне структурных неоднородностей и помех | 68 |
| 3.2.1 Быстрый алгоритм обнаружения аномалий | 68 |
| 3.2.2 Построчная и матричная обработка измерений..... | 70 |
| 3.2.3 Разработка алгоритмов выделения аномальных участков..... | 72 |
| 3.2.4 Разработка алгоритмов оценки индивидуальных характеристик аномалий..... | 73 |
| 3.3 Исследование и разработка метода обнаружения плоских контуров аномальных участков при тепловом контроле..... | 73 |
| 3.3.1 Математические модели построения по точкам и воспроизведения кривых..... | 73 |
| 3.3.2 Интерполирование с помощью многочленов..... | 74 |
| 3.3.3 Построение контуров с применением многочленов Безье | 75 |
| 3.3.4 Определение контуров с применением дуг окружности | 76 |
| 3.4 Основные закономерности ТК..... | 77 |

| | |
|---|----------------|
| Глава 4 ОСНОВЫ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМ И АППАРАТУРЫ ТЕПЛОвого КОНТРОЛЯ ОБЪЕКТОВ | 83 |
| 4.1 Системный подход к проектированию программно-аппаратных комплексов ТК | 83 |
| 4.2 Промышленные системы ТК | 84 |
| 4.3 Системы построения изображений в инфракрасном диапазоне спектра | 87 |
| 4.4 Приемники ИК излучения..... | 89 |
| 4.5 Оптические системы тепловизоров..... | 101 |
| 4.6 Теплогенераторы для активного ТК объектов | 107 |
| 4.7 Основные характеристики тепловизоров | 116 |
| 4.8 Спектральная передаточная функция оптико- электронного канала тепловизионных технических средств..... | 119 |
| 4.9 Определение порогового значения сигнала для обнаружения дефектов в процессе ТК | 122 |
| 4.10 Период проведения измерений при тепловом контроле | 127 |
| 4.11 Методические аспекты выбора аппаратуры для проведения ТК | 130 |
| 4.12 Средства теплового контроля | 140 |
| 4.13 Программно-аппаратный мультизадачный мобильный комплекс диагностики технического состояния потенциально опасных объектов | 151 |
| Глава 5 МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОЦЕНКИ ДОСТОВЕРНОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ ТЕПЛОвого КОНТРОЛЯ ОБЪЕКТОВ И МЕТРОЛОГИЧЕСКАЯ АТТЕСТАЦИЯ МЕТОДИК ТЕПЛОвого КОНТРОЛЯ | 156 |
| 5.1 Методические основы анализа и оценки характеристик реальных дефектов объектов контроля..... | 156 |
| 5.3 Определение достоверности результатов контроля в условиях отсутствия эталонного значения искомого параметра..... | 165 |
| 5.4 Методика сопоставительного анализа результатов контроля при метрологической аттестации | 169 |
| 5.5 Влияние погрешности коэффициента излучения объекта и температуры сторонней засветки на методическую погрешность измерения температуры | 173 |
| Глава 6 ПРАКТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕПЛОвого КОНТРОЛЯ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ, ЭНЕРГЕТИКЕ И ПРОМЫШЛЕННОСТИ | 182 |
| 6.1 Общие методические рекомендации по проведению ТК..... | 182 |
| 6.2 Тепловой контроль в строительстве | 188 |
| 6.2.1 Натурные испытания качества теплозащиты наружных ограждающих конструкций | 188 |
| 6.2.2 Активный тепловой контроль тонкостенных покрытий строительных конструкций..... | 197 |

| | |
|---|-----|
| 6.3 Тепловой контроль теплотехнических инженерных систем и оборудования..... | 205 |
| 6.3.1 Перечень диагностируемых объектов..... | 205 |
| 6.3.2 Тепловой контроль дымовых и вентиляционных труб и газоходов..... | 206 |
| 6.3.3 Проведение ТК теплофикационного оборудования..... | 220 |
| 6.3.4 Контроль тепловой изоляции оборудования и трубопроводов..... | 227 |
| 6.4 Тепловой контроль объектов электроэнергетики..... | 237 |
| 6.4.1 Общие положения контроля электрооборудования..... | 237 |
| 6.4.2 Особенности проведения теплового контроля..... | 245 |
| 6.4.3 Тепловизионный контроль контактных соединений..... | 248 |
| 6.4.4 Тепловой контроль силовых трансформаторов, автотрансформаторов, масляных реакторов..... | 250 |
| 6.4.5 Тепловой контроль маслонаполненных трансформаторов тока..... | 254 |
| 6.4.6 Тепловой контроль маслонаполненных трансформаторов напряжения..... | 256 |
| 6.4.7 Тепловой контроль электродвигателей и синхронных генераторов..... | 258 |
| 6.4.8 Тепловой контроль выключателей масляных, воздушных, вакуумных, элегазовых..... | 259 |
| 6.4.9 Тепловой контроль конденсаторов..... | 261 |
| 6.4.10 Тепловой контроль разъединителей и отделителей..... | 262 |
| 6.4.11 Тепловой контроль маслонаполненных вводов..... | 263 |
| 6.4.12 Тепловой контроль вентильных разрядников..... | 263 |
| 6.4.13 Воздушные линии электропередач..... | 264 |
| 6.4.14 Тепловой контроль высокочастотных заградителей..... | 265 |
| 6.4.15 Тепловой контроль подвесных фарфоровых и полимерных изоляторов..... | 265 |
| 6.4.16 Тепловой контроль аппаратов, вторичных цепей и узлов..... | 265 |
| 6.4.17 Тепловой контроль электрических кабелей и электропроводки..... | 266 |
| 6.5 Диагностирование технического состояния сосудов и аппаратов хранения жидких химически опасных веществ с использованием метода ТК..... | 283 |
| 6.6 Тепловой контроль и мониторинг технического состояния потенциально опасных объектов в условиях ограниченного доступа..... | 286 |
| 6.7 Тепловой контроль концентраторов напряжений и дефектов металлических конструкций при их нагружении..... | 292 |
| 6.8 Тепловой контроль технического состояния нагревательных элементов в реальных условиях с оценкой остаточного ресурса..... | 300 |
| 6.9 Тепловой метод диагностики технического состояния и оценки безопасности эксплуатации сосудов, работающих под внутренним давлением..... | 310 |
| 6.10 Тепловой контроль футеровки опасных зон металлургических печей..... | 319 |
| 6.11 Компьютерная система автоматического управления процессом тепловой переработки материалов во вращающейся печи и контроль состояния ее футеровки..... | 327 |

| | |
|--|-----|
| 6.12 Диагностика эксплуатационного состояния фурменной или опасной зоны пирометаллургического агрегата тепловым методом..... | 330 |
|--|-----|

Глава 7 НОРМАТИВНО-ПРАВОВОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ И МЕТОДИЧЕСКАЯ БАЗА ТЕПЛОвого КОНТРОЛЯ.....337

| | |
|---|-----|
| 7.1 Законодательные основы применения теплового контроля | 337 |
| 7.2 Система нормативного и методического обеспечения ТК | 339 |
| 7.3 Организационная структура лабораторий теплового контроля | 339 |
| 7.4 Система документирования в лаборатории теплового контроля..... | 344 |
| 7.5 Независимый и внутренний аудит качества ТК..... | 346 |
| 7.6 Система аттестации персонала, лабораторий и методик теплового контроля..... | 350 |

ПРИЛОЖЕНИЯ

| | |
|--|-----|
| 1 Справочные данные | 361 |
| 2 Технические характеристики измерительных приборов | 365 |
| 3 Техническое задание на выполнение работ по тепловому контролю | 380 |
| 4 Протокол проведения тепловизионного обследования..... | 381 |
| 5 Протокол теплового контроля | 384 |
| 6 Заключение о состоянии контролируемого объекта по результатам ТК..... | 386 |
| 7 Вкладыш к энергетическому паспорту здания | 387 |
| 8 Характерные дефекты ограждающих конструкций зданий..... | 388 |
| 9 Характерные дефекты дымовых труб..... | 391 |
| 10 Карта дефектов ствола дымовой трубы..... | 406 |
| 11 Карта дефектов кирпичного магистрального газохода..... | 407 |
| 12 Термограммы характерных дефектов дымовой трубы | 408 |
| 13 Дефекты теплофикационного оборудования | 409 |
| 14 Термограмма технологического трубопровода (паропровода) | 419 |
| 15 Термограммы поверхности котлов с характерными дефектами | 420 |
| 16 Справочные данные и примеры термограмм при тепловом контроле электрооборудования..... | 421 |
| 17 Тепловой контроль резервуаров..... | 424 |
| 18 Перечень нормативных и методических документов | 426 |
| 19 Цветные рисунки и термограммы | 437 |

ЛИТЕРАТУРА.....457

ВВЕДЕНИЕ

Современные технологии контроля качества, надежности и энергоэффективности оборудования и строительных конструкций – это, прежде всего, экспресс-обследование с определением точных теплотехнических и др. характеристик в натуральных условиях неразрушающими методами. Без них построить эффективную систему мониторинга энергетической, промышленной и экологической безопасности невозможно.

Для получения достоверной информации о параметрах внутренней структуры материалов необходимо применять многопараметрический неразрушающий контроль, основанный на анализе взаимодействия различных физических полей с материалами.

Значимость диагностики и неразрушающего контроля для народного хозяйства будет увеличиваться по мере постоянного роста тарифов и цен на энергоносители, выхода из строя выработавших свой ресурс промышленных объектов, обуславливающих в свою очередь рост аварийных ситуаций с человеческими потерями.

Как показывает мировой опыт, в ближайшем будущем основой технологий экспресс - диагностики состояния технических объектов станут методы неразрушающего контроля и совместной обработки результатов многопараметрических спектральных и энергетических измерений.

Традиционными, наиболее востребованными, методами неразрушающего контроля большинства материалов и объектов являются ультразвуковой, радиационный, СВЧ и др.

Одним из перспективных методов неразрушающего контроля и диагностики является пока только развивающийся тепловой, где информацию о характеристиках объекта несет температура его поверхности, значения которой в основном определяются изменением теплофизических, геометрических характеристик и параметров нагрузки.

Тепловой контроль имеет ряд очевидных преимуществ перед другими методами дефектоскопии:

- широкую область применения – возможность осуществления контроля как с тепловым нагружением объекта (активный тепловой контроль, например, металлопроката), так и без теплового нагружения (пассивный тепловой контроль, например, контроль жилых зданий);

- возможность полной автоматизации процесса контроля;

- высокую производительность контроля при практически любой величине разрешения вследствие его дистанционности и применения современных средств компьютерной техники, обеспечивающих регистрацию миллионов элементов в секунду;

- мобильность технических средств;

- возможность контроля объектов без вывода их из эксплуатации;

- в большинстве случаев оптимальные соотношения параметров – стоимость аппаратуры/окупаемость при внедрении;

- высокая востребованность метода и средств дистанционной, высокоинформативной экспресс - диагностики в различных отраслях;
- существенными практическими достижениями в данной области в плане предложения новой аппаратуры и технологий контроля;
- необходимостью устойчивого развития экономики при наличии требований экономии топливно-энергетических ресурсов, что невозможно на современном технологическом уровне без развития средств и технологий теплового контроля, диагностики и мониторинга.

Привлекательна инвестиционная деятельность в области развития и применения теплового контроля в силу высокого инновационного потенциала этой сферы в современных условиях, о чем свидетельствует бурно развивающийся рынок средств контроля и предложений услуг.

Благодаря трудам российских ученых, в т.ч. Технологического института энергетических обследований, диагностики и неразрушающего контроля «ВЕМО» – научный руководитель, д.т.н. Будадин О.Н., Государственного технологического Университета "Московский институт стали и сплавов" – научный руководитель «Заслуженный деятель науки РФ», д.т.н., профессор Салихов З.Г. и др., российская школа по диагностике и неразрушающему контролю занимает достойное место в мире (что признано на международных конференциях по ТНК в Канаде, США), а в России получила признание на государственном уровне присуждением Государственной премии РФ в области науки и техники (указ Президента РФ от 09.09.2004. № 1154).

В целях мобилизации потенциала современных методов диагностики и неразрушающего контроля для решения острейших проблем безопасности (технической, энергетической, эксплуатационной) целесообразно использовать тепловой (тепловизионный) контроль как наиболее эффективный метод оценки качества и диагностики технического состояния инженерных систем, оборудования, ограждающих конструкций и других объектов различных отраслей промышленности.

Технические средства теплового контроля строятся по принципу мобильной модульной программно-аппаратной структуры с унифицированной системой сбора и обработки многоканальной информации в едином информационно-аналитическом концентраторе по мультизадачной технологии.

В такой постановке тепловой контроль ориентирован на применение в различных отраслях промышленности, имеет широкий спектр функциональных возможностей, который зависит от области применения.

Реализация технологий теплового контроля позволит в частности обеспечить:

- независимую техническую оценку качества различных объектов;
- повышение эффективности контроля за пожарной безопасностью электроустановок, в первую очередь на объектах жилого фонда и социальной сферы;
- предупреждение возникновения аварий и чрезвычайных ситуаций в системах энергоснабжения;

- экономию топливно-энергетических ресурсов и снижение потерь при хранении и транспортировке энергоносителей, продукции и отходов;
- сокращение бюджетных дотаций на ремонтно-восстановительные работы и расходов на ликвидацию последствий аварийных ситуаций и т.д.

Актуальность применения технологий теплового контроля определяется необходимостью:

- повышения безопасности, технической надежности, энергетической эффективности объектов промышленности и энергетики, ЖКХ и др;
- техническим обеспечением деятельности органов власти и субъектов предпринимательства при организации технического мониторинга предупреждения аварий, систем сертификации и надзора высокоэффективными средствами диагностики и неразрушающего контроля, надежного энергетического сервиса;
- закрепления и развития достигнутого российского приоритета в методологическом, программном и системном обеспечении технологий диагностики и неразрушающего контроля, задачами поддержки и использования потенциала российских разработчиков и исследователей;
- более полного удовлетворения потребностей общества, органов государственной власти в объективной информации о безопасности, техническом состоянии и энергоэффективности жизненно важных, потенциально опасных и энергоемких объектов;
- снижения экологической нагрузки и реализации возможностей, заложенных в Киотском протоколе.

Материалы монографии позволят активизировать научно-инженерные разработки, обучение, сертификацию, аттестацию и ускоренное внедрение теплового контроля в различные отрасли народного хозяйства.

Авторы выражают благодарность за участие в подготовке настоящей монографии д.т.н. Вавилову В.П., к.т.н. Сергееву С.С., Сучкову В.И., Дубовкиной Н.В., Щигреву С.А., Артемову Д.А., Федорову А., Смирнову Ю.В., Малаю В.А., Слиткову М.Н.

Глава 1 ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ОРГАНИЗАЦИИ ТЕПЛОВОГО КОНТРОЛЯ

1.1 Понятия теплового контроля (ТК). Классификация и задачи. Неразрушающий контроль и безопасность эксплуатации

Исследования современного состояния уровня развития и востребованности неразрушающего контроля показали, что определение и оценку качества, безопасности, надёжности эксплуатации большого класса материалов, изделий и конструкций в различных отраслях промышленности эффективно проводить по анализу их температурных полей. Это обусловлено тем, что для многих объектов функционирование связано с температурными нагрузками, при этом, их внутренняя структура оказывает заметное воздействие на характер излучаемого теплового поля, что позволяет по анализу его аномалий судить об изменениях свойств материала, его теплотехнических характеристик (ТТХ) в целом, либо его отдельных зон.

Температурное поле поверхности объекта, используемое в тепловом методе контроля, является источником информации об особенностях процесса теплопередачи, который, в свою очередь, зависит от конструкции и материалов объекта, технологии его функционирования и наличия дефектов. Под дефектом понимается каждое отдельное несоответствие продукции требованиям нормативной технической документации, влияющее на характер образования температурного поля поверхности (в виде локального температурного перепада) контролируемого объекта из-за различных теплофизических свойств «хороших» (качественных) и дефектных участков объекта.

Это обстоятельство позволяет применять тепловые методы для контроля широкого спектра изделий и материалов, как металлических, так и неметаллов или включающих и те и другие слои.

Объектами ТК являются изделия и конструкции, в которых необходимо выявление дефектов: трещин, пустот, пор, раковин, мест непровара, непроклея, плохой тепло-, гидро- и электроизоляции, неоднородности состава, наличия посторонних примесей, изменения геометрических размеров, места термического и усталостного перенапряжения и т.п.

Согласно нормативных документов [1,2] различают активный и пассивный способы ТК в зависимости от наличия или отсутствия воздействия внешнего источника энергии. Считается, что активные способы предназначены для обнаружения дефектов и изменений в структуре и физико-химических свойствах объектов, тогда как пассивные способы более пригодны для контроля тепловых режимов и обнаружения отклонений от заданной формы, от заданных теплофизических характеристик материалов и геометрических размеров. В ГОСТ 23483 [1] вводятся также следующие понятия: односторонний, двухсторонний, комбинированный, синхронный и несинхронный способы теплового контроля в зависимости от взаимного расположения источника нагрева, термочувствительного элемента и объекта контроля и последовательности контрольных операций. Ссылки в тексте на ГОСТы не противоречат Феде-

ральному закону «О техническом регулировании» от 27.12.02г. № 184-ФЗ [203] ввиду того, что они действуют вплоть до их замены соответствующими техническими регламентами либо национальными стандартами.

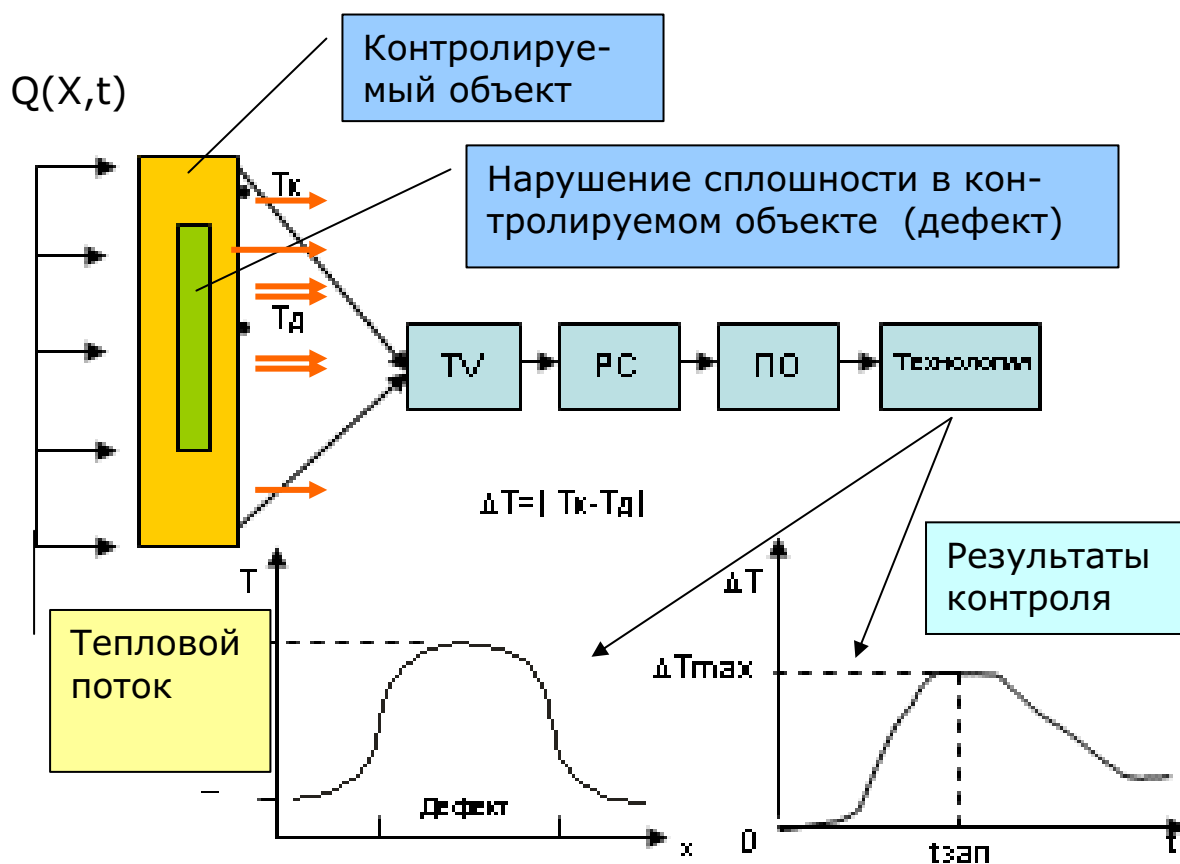


Рис. 1.1. Общая структурная схема теплового неразрушающего контроля.

Рассмотрим основные понятия и обобщенную схему проведения ТК (рис 1.1). Обобщенная схема проведения ТК включает в себя следующие основные элементы: теплогенератор (охлаждающее устройство), систему регистрации температурного поля поверхности контролируемого объекта (ТВ), компьютер для сбора, регистрации и обработки информации (РС), специальное, стандартное и системное программное обеспечение (ПО) и технологию контроля (методическое обеспечение).

Основное назначение теплогенератора (охлаждающего устройства) – возбудить в контролируемом объекте процесс нестационарной теплопередачи, как по всей площади поверхности, так и на определенном локальном участке. В ряде случаев внешние теплогенераторы (как отдельного блока) могут отсутствовать, в этом случае в качестве внутренних источников могут выступать элементы контролируемой конструкции, которые имеют повышенную температуру в процессе функционирования контролируемого объекта.

Полученное температурное поле на поверхности контролируемого объекта регистрируется тепловизионной системой, формируется панорамная тер-

мограмма (если поверхность охватывается несколькими кадрами) и обрабатывается с использованием специального программного обеспечения.

Строго говоря, системное и прикладное программное, и связанное с ним методическое обеспечение, являются главными компонентами системы теплового контроля, т.к. дают возможность решать три основные задачи:

1. Регистрацию температурного поля с определенными, оптимальными для решаемой задачи, технологическими режимами контроля и регистрации температурного поля.

2. Обнаружение заданных нарушений сплошности (дефектов) в контролируемых объектах с необходимой достоверностью.

3. Определение характеристик объектов контроля, в т.ч. характеристик материалов и дефектов с необходимой погрешностью, т.е. решение задачи дефектометрии.

Необходимым компонентом программного и методического обеспечения является математическое моделирование процесса теплового контроля, позволяющее теоретически описывать зависимости результатов контроля от его технологических режимов, параметров аппаратуры и т.п.

Это необходимо четко понимать всем специалистам, которые изучают тепловой метод, разрабатывают и эксплуатируют системы проведения контроля. Существует ошибочное мнение, что достаточно иметь тепловизор (тепловизионную систему), направить на объект контроля, получить хорошие термограммы, и – тепловой контроль проведен. Затем провести визуальный анализ зон аномальных температур на термограмме и идентифицировать их как дефекты, а где нет аномалий – как качественную область. Однако, такая технология далека от реального теплового контроля, элементы которого представлены на рис.1.1.

Следует понимать, что термограмма - это всего лишь видеоизображение температурного поля поверхности контроля в псевдоцветах. По термограмме возможно выявить лишь участки с той или иной температурой. Однако невозможно определить качество контролируемого материала: имеет ли дефекты, соответствуют ли его характеристики требованиям нормативных документов и т.д. В основном можно лишь сказать, что контролируемые участки отличаются по температуре, а где есть качество или дефект без определения причин на базе расчетных схем и результатов измерений невозможно.

Для того, чтобы определить количественные показатели качества контролируемого объекта (например, теплотехнические (ТТХ), необходимо не просто получить термограммы, а провести тепловой контроль по соответствующей специально разработанной технологии (методике) контроля, в которой этап регистрации термограмм является лишь одним из многих. Эти задачи и решает методическое обеспечение, реализованное, как правило, в методике проведения контроля и специальном программном обеспечении.

Перед внедрением методики теплового контроля, включающей технические и программные средства контроля и технологию его проведения, она должна в обязательном порядке пройти аттестацию на предмет установления соответствия заявленным в ней показателям их фактическим значениям. Ре-

зультаты аттестации могут утверждаться как службами главного метролога конкретных предприятий, с учетом особенностей законодательства, при использовании методик для собственных нужд, так и региональными и федеральными службами аттестации с соответствующей областью применения.

С точки зрения теплового контроля внутренние дефекты можно разделить на пассивные, то есть не выделяющие тепла, и активные, являющиеся источником аномального тепловыделения. Обнаружение первого типа дефектов, характерных для многослойных материалов, с помощью традиционных методов неразрушающего контроля (НК) затруднительно из-за отсутствия поглощения ионизирующего излучения в неметаллических слоях, сильного затухания ультразвука в рыхлых материалах, невозможности применять электромагнитные методы и т.д. Тепловой контроль таких дефектов требует использования процедуры активного способа.

Активный метод теплового контроля целесообразно применять, если отсутствует температурный напор, т.е. разница температур между внутренней и внешней средой по отношению к контролируемому объекту лежит в пределах погрешности регистрации температуры. Это может быть, например, контроль листового проката, изделий из полимерных композиционных материалов, ограждающих конструкций зданий при отсутствии отопления, отслоений штукатурки и т.п. В этом случае изменения температуры поверхности контролируемого изделия (материала) создается внешним источником нагрева или охлаждения. Последнее целесообразно при контроле объектов, имеющих высокую температуру.

При нагреве контролируемого объекта дефект оказывает сопротивление тепловому потоку, если его теплопроводность ниже теплопроводности материала изделия. Распространяясь вглубь изделия тепловой поток обтекает дефект по окружающим слоям основного материала. При этом имеет место накопление тепла в слое до дефекта и его недостаток в слое за ним, что проявляется в локальном повышении и понижении температуры, соответственно, на нагреваемой и противоположной нагреву поверхностях. Иногда говорят, что дефект "отражает" тепловой поток на поверхность нагрева и "затеняет" его на противоположной поверхности. Положительным температурным перепадом на поверхности нагрева называется разность между температурами дефектного и бездефектного (качественного) участков и отрицательная величина на противоположной поверхности. В случае использования охлаждения (горячекатаный прокат) знак меняется на противоположный.

Основные особенности проведения активного ТК:

- 1) локализация температурного перепада в участке над дефектом при отсутствии у него резких границ;
- 2) нестационарный характер температурного поля, состоящий в наличии момента времени, когда амплитуда перепада максимальна;
- 3) зависимость температурного поля от глубины залегания, раскрытия и площади дефекта при контроле нагреваемой поверхности. Именно эти особенности температурных полей наиболее характерны для процедур ТК.

Ряд проблем обеспечения проведения теплового контроля возникает из-за специфических свойств материалов и конструкций (анизотропности структуры, сложного состава, большого разброса физико-механических характеристик материалов, изменению коэффициента излучения). Это порождает некоторую неопределённость в выборе необходимых технических средств и анализа его результатов, заключающуюся в недостатке достоверных данных о возможностях метода контроля применительно к конкретным изделиям или их типам.

Анализ объектов контроля показывает, что более 50% материалов, изделий, конструкций в различных отраслях промышленности (энергетике, металлургии, машиностроении, топливно-энергетическом, жилищно-коммунальном комплексах и др.) могут с высокой эффективностью диагностироваться по анализу их температурных полей, как собственных, так и наведённых.

Т.к. температура является основным информационным параметром проведения диагностики, на который оказывает влияние большое число мешающих факторов, то требуется создание специальных технологий контроля, основанных на одновременной регистрации и обработке большого количества параметров температурных полей с учетом внешних характеристик среды и применения специальных алгоритмов обработки информации.

Таким образом, тепловой контроль реализуется только лишь через комплексный подход ко всем его составляющим, обобщенная схема которого представлена на рис.1.2.

Тепловой контроль в общем случае включает:

- анализ конструкторской и технологической документации;
- изучение объекта;
- моделирование процесса функционирования объекта;
- моделирование процесса теплового контроля объекта;
- теоретический анализ оптимальных параметров контроля;
- проведение отработки параметров контроля на образцах и реальном объекте;
- разработку технологии (методики) контроля;
- опытную эксплуатацию методики;
- аттестацию методики;
- проведение контроля в соответствии с методикой, включающей:
 - операции измерений:
 - определение количественных значений температуры в точках поверхности контролируемого объекта;
 - определение дополнительных характеристик состояния поверхности и окружающей среды;
- операции обработки результатов контроля;

- качественный и количественный анализ температурных полей на исследуемой поверхности;
- выявление зон с аномальной температурой, обусловленной наличием дефектов в контролируемом объекте;
- расчет на базе произведенных измерений искомых параметров объектов контроля;
- выдачу заключения и составление отчета по проведенному контролю;
- сопоставление полученных характеристик с нормативными значениями;
- определение параметров дефектов.



Рис.1.2. Схема теплового неразрушающего контроля.

В таблице 1.1 приведены некоторые области использования теплового контроля для диагностики технического состояния объектов.

Области применения ТК

Таблица 1.1

| <i>Области применения</i> | <i>Объекты контроля, выявляемые дефекты</i> |
|--|--|
| Авиакосмическая | ИК – влагометрия; дефекты структуры композитов, готовых панелей, клеевых и др. соединений, защитных покрытий, контроль теплового режима бортовых РЭА, пирометрия лопаток ГТД |
| Атомная энергетика | Тепловая дефектометрия ТВЭЛ, мониторинг энергокоммуникаций, контроль напряжённого состояния металла, анализ пористости материалов |
| Автомобильная промышленность | Дефектоскопия упрочняющих покрытий, качества закалки и термоупрочнения |
| Агрокомплекс | Энергообследования объектов с/х на предмет энергосбережения, контроль ТФК продуктов, дефектоскопия деталей сельхозтехники, состояния зернохранилищ, накопительных резервуаров |
| Вентиляция и кондиционирование | Диагностика качества герметичности коммуникаций, контроль технического состояния воздушных компрессоров, вакуум – насосов |
| Водоснабжение, теплотрассы, автодороги, канализация | Картирование трубопроводов и дорог, обнаружение мест утечек и нарушений гидротеплоизоляционного покрытия теплотрасс, определение мест и степени активизации мерзлотных, эрозийных, оползневых и обводняющих процессов, диагностика балок и плит перекрытия мостов в статике и динамике |
| Железнодорожная отрасль | Обнаружение перегрева букс, дефектов контактных сетей, определение мест и величины стока электричества на изоляторах, диагностика электрооборудования подвижного состава, рельсов, опор и пролётных строений мостов в статике и динамике |
| Лазерная техника | Анализ тепловых режимов активных элементов лазеров |
| Машиностроение | Контроль тепловых режимов работы машин, механизмов, дефектоскопия деталей, узлов; обнаружение и распознавание внутренних нарушений сплошности в изделиях различных форм (в т.ч. из полимерных и композитных материалов) |
| Материаловедение | Тепловая диагностика напряжённого состояния объектов на основе термоэластического эффекта, контроль ТФХ конструкционных материалов |
| Металлургия | Обнаружение во всех видах металлопроката дефектов в соответствии с нормативной документацией при скоростях перемещения проката от 0 до 2 м/с и темпера- |

| | |
|--|---|
| | туре до 450 град. С, контроль технического состояния крупных тепловыделяющих объектов (доменных, коксовых, цементных и др.) печей, котлов, воздухопроводов, дымоходных труб и т.п. в процессе их эксплуатации, определение и контроль утонения защитных оболочек тепловых агрегатов, распределения и динамики изменения температурных полей, местоположения аномальных участков, их формы и других параметров, контроль температуры расплавов |
| Медицина, здравоохранение | Термодиагностика сосудистых заболеваний, онкологии, кожных болезней и др. |
| Микроэлектроника | Лазерный контроль пайки, сварки: ИК-томография полупроводников, БИС; дефектов теплоотводов |
| Нефтегазопроводы | Обнаружение утечек и экологический контроль охраняемых зон с помощью лазерной, инфракрасной, радиометрической и других измерительных систем, диагностика состояния изоляционного покрытия и эффективности катодной защиты, герметичности швов, утонения стенок труб, фиксация несанкционированных подключений, определение пространственного положения магистральных трубопроводов, а также выявление нарушений залегания трубопроводов в грунте (разрушение насыпи и обваловки, всплывий и обнажений трубы, деформаций трубопровода в результате подвижек грунта и т.д.), координатная привязка трубопроводов, контроль пересечений и несанкционированных подключений и т.д. |
| Нефтехимия | ТК реакторных колонн и энергоагрегатов, обнаружение утечек из продуктопроводов |
| Стройиндустрия, ЖКХ (энергоаудит) | Выявление и распознавание дефектов в строительных объектах, определение плотности теплового потока, пронизывающего ограждающие конструкции, коэффициента теплообмена наружных поверхностей, коэффициента теплопередачи, приведенного в конкретных зонах и термического сопротивления; оценка энергоэффективности наружных ограждающих конструкций с определением зон сверхнормативных потерь, тепловых мостов и др. |
| Холодильные камеры и склады | Диагностика состояния эффективности работы систем охлаждения оборудования, определение дефектных зон термоизоляции |

| | |
|--|--|
| Энергетика (энерго-надзор), электромон-таж, электрическое хозяйство | ТНК турбин, дымовых труб, энергоагрегатов, состояние элементов электротехнического оборудования, состояние электропроводников (двигателей, щеточных механизмов), обнаружение дефектных контактов, соединений; обнаружение аварийных элементов в сети и энергосистемах (транспортёров, выключателей, приводов, двигателей и др.); определение мест утечек тока по изоляции и изоляционным конструкциям; обнаружение аварийных и перегруженных элементов в релейной защите и автоматике; обнаружение перегруженных кабелей и проводов в каналах, трубах и в скрытой проводке, диагностика состояния высоковольтного оборудования по наружной поверхности изоляционных конструкций и по нагреву корпусов оборудования |
| Экология | Обнаружение и оценка возможных разрушений инженерных сооружений, земляного полотна, путепроводов, мостов, тоннелей |

В настоящее время тепловой метод неразрушающего контроля уже нашел широкое применение в различных областях техники: это контроль строительных материалов, энерго- и электрооборудования, теплоизоляционных и огнеупорных слоев, металлических изделий, авиационной техники и т.п. [3-5].

В ряде случаев тепловой контроль имеет неоспоримые преимущества перед традиционными методами контроля, например, ультразвуковым. К ним относятся, например:

1. Возможность контроля объектов, имеющих широкий диапазон рабочих температур. Например, можно контролировать как холодный, так и горячий листовой прокат в процессе производства.

2. Тепловизионный метод теплового вида - бесконтактный и дистанционный: регистрирующая аппаратура располагается на таком расстоянии от объекта, которое позволяет получить максимальную информативность термограмм контролируемых поверхностей. Для сравнения: ультразвуковой контактный метод реализуется через наличие контакта между датчиками и объектом, например, через иммерсионную среду; ультразвуковой бесконтактный метод обеспечивает зазор между ультразвуковыми преобразователями и контролируемой поверхностью лишь несколько миллиметров.

При этом, резко снижаются требования к погрешности взаимного расположения (соосности) аппаратуры регистрации и объекта контроля (величина погрешности расположения аппаратуры может составлять 50 - 70 мм, аналогичная величина для ультразвукового контроля составляет 1 мм).

3. Возможность проведения контроля в различных климатических условиях, температуры окружающей среды, при пониженном давлении и в вакууме (например, в космосе, что в принципе невозможно ультразвуковым методом).

4. Возможность контроля быстро перемещающихся объектов, например, контроль листового проката при его движении со скоростью до 2 - 4 м/с, контроль электрооборудования метрополитена, железнодорожного транспорта и т.п. Максимальная скорость перемещения объектов контроля при ультразвуковом методе обследования - не более 0,5 м/с.

5. Малые габариты и вес аппаратуры ТК. Мобильная аппаратура.

6. Автоматизированные системы теплового контроля по параметрам цена/функциональные возможности имеют преимущества перед ультразвуковыми системами аналогичного назначения по стоимости.

7. Возможность контроля большой номенклатуры материалов (металлов, пластмасс, полимерных материалов, биметаллов, строительных материалов и т.д.) с различными формами поверхности (плоскость, цилиндр и т.д.) без существенной перенастройки аппаратуры.

8. Низкие требования к качеству поверхности контролируемого материала.

9. Экологическая безопасность

Технические средства, реализующие тепловой метод неразрушающего контроля, в основном охватывают два направления: дефектоскопы, дающие косвенную информацию о температурном поле исследуемого объекта и тепловизоры, позволяющие измерять собственно температуру на поверхности контролируемого изделия, причем идет постоянное совершенствование элементной базы приборов и способов обработки информации. В основном это разработка многоэлементных (матричных) приемников излучения, охлаждаемых специальными устройствами или неохлаждаемых, позволяющих существенно улучшить эксплуатационные характеристики тепловых дефектоскопов и тепловизоров, это, также и новые схемы аппаратной обработки изображений в реальном времени, встроенных абсолютно черных тел с целью повышения точности измерений температуры, и применение специализированных микропроцессорных схем.

Следует выделить основные этапы проведения теплового контроля при использовании его для целей дефектоскопии:

1. Определение оптимальных режимов обнаружения различных типов дефектов (выбор порогового значения температуры ΔT_n , времени запаздывания $\tau_{зан}$, т.е. времени наступления максимального перепада между качественной и дефектной точками, и максимальной мощности нагревателя).

2. Проведение непосредственно дефектоскопии, включающее:

а) съем информации с поверхности контролируемого объекта;

б) обнаружение дефектов посредством сравнения величины текущего информационного сигнала с выбранным пороговым значением;

в) определение характеристик дефектов (площади, координат расположения в контролируемом изделии и т.п.);

г) регистрацию результатов обнаружения дефектов;

д) отметку результатов дефектоскопии на объекте.

3. Накопление и хранение результатов дефектоскопии.

4. Обработка и анализ результатов дефектоскопии.

Развитие методов обработки информации о тепловых полях на поверхности контролируемого изделия позволяет переходить от обнаружения дефектов

к определению их характеристик: кроме протяженности (площади) дефектов, это глубина их залегания, раскрытие, теплофизические характеристики.

Для принятия правильного решения о наличии дефекта и последующего анализа и обработки результатов дефектоскопии на предмет обнаружения дефектов и определения их характеристик важное значение имеет предварительный выбор оптимальных параметров контроля, таких как плотность мощности нагрева контролируемой поверхности, время запаздывания, пороговые значения информационного сигнала.

Наличие оптимального значения времени запаздывания при контроле конкретных изделий, особенно имеющих сравнительно низкое значение теплопроводности, позволяет существенно расширить диапазон времени проведения контроля без ухудшения достоверности результатов тепловой дефектоскопии.

Это указывает на возможность относительно простого выбора времени запаздывания при тепловом контроле. Как правило, эту величину определяют перед проведением дефектоскопии посредством экспериментальных исследований образцов изделий. При простоте и доступности такого метода он обладает небольшой достоверностью, т.к. невозможно изготовить образцы из каждого контролируемого изделия, кроме того, это значительно уменьшает производительность дефектоскопии.

Выбор и применение оптимальных параметров режимов нагрева изделий позволяет значительно улучшить соотношение полезный сигнал/шум. Существуют оптимальные соотношения, определяющие связь между параметрами нагревателя (пятном нагрева, временем ввода энергии в контролируемое изделие и мощностью нагревателя) и выявляемостью дефектов типа расслоений для различных видов контролируемых изделий и параметров дефектов.

Проведение теплового контроля, где не требуется получение численных значений характеристик дефектов, а только их обнаружение производится с использованием тепловых дефектоскопов. Разработка дефектоскопов, как правило, направлена на решение определенного круга задач, например, дефектоскопии металлов, полимерных материалов, сотовых конструкций, электронных схем и т.д. Поэтому параметры дефектоскопа, в т.ч. и параметры всех его блоков, включая алгоритмы обработки информации, должны рассчитываться только из условия обеспечения решения определенных задач. К сожалению, в отечественной и зарубежной литературе мало работ, посвященных вопросам разработки тепловых дефектоскопов, хотя для многих задач теплового контроля вполне достаточно применения тепловых дефектоскопов, что значительно удешевляет контроль.

Выбор параметров дефектоскопов опирается, как правило, на объект контроля, чему предшествует тщательное его изучение, включая создание оптимальных для данных задач блоков дефектоскопа и алгоритмов обработки информации, как аналоговой, так и цифровой.

Для повышения достоверности технической диагностики ведется постоянная работа по совершенствованию существующей и разработке новой нормативной базы по тепловому неразрушающему контролю.

Руководитель Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору Пуликовский К.Б. приказом от 13 декабря 2006 года №

1072 утвердил РД-13-04-2006 «Методические рекомендации о порядке проведения теплового контроля технических устройств и сооружений, применяемых и эксплуатируемых на опасных производственных объектах» (далее – Методические рекомендации) [4].

Методические рекомендации определяют организацию и технологию теплового контроля при изготовлении, строительстве, монтаже, ремонте, реконструкции, эксплуатации, техническом диагностировании (освидетельствовании) технических устройств и сооружений (в том числе архитектурных сооружений – зданий), применяемых и эксплуатируемых на опасных производственных объектах, подконтрольных Федеральной службе по экологическому, технологическому и атомному надзору (Ростехнадзору) и предназначены для специалистов неразрушающего контроля предприятий и организаций, осуществляющих указанные функции.

В соответствии с [4] и далее по тексту будем в основном применять термин тепловой контроль (ТК) вместо тепловой неразрушающий контроль (ТНК). ТК проводят в целях выявления дефектов и определения их параметров, для оценки качества и соответствия контролируемых объектов требованиям нормативной технической документации. В зависимости от характера объекта применяется пассивный или активный способ ТК.

ТК включает: анализ конструкторской и технологической документации, определение количественных значений температуры в точках поверхности контролируемого объекта, определение дополнительных характеристик состояния поверхности и окружающей среды; качественный и количественный анализ температурных полей на исследуемой поверхности; выявление зон с аномальной температурой, обусловленной наличием дефектов в контролируемом объекте; расчет на базе произведенных измерений теплотехнических параметров объектов контроля и сопоставление их с нормативными значениями, определение параметров дефекта; оценку качества объектов контроля.

Методические указания излагают общие принципы организации и технологии теплового контроля, а также четко устанавливают требования к предприятиям и организациям, осуществляющих ТК. Только при выполнении этих требований, обеспечивается необходимое качество проведения ТК.

Среди разработчиков данного Руководящего документа начальники управлений Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору (Ростехнадзору): государственного энергетического надзора, государственного строительного надзора, по надзору за специальными и химически опасными производствами и объектами; по надзору за объектами нефтегазодобычи, переработки и магистрального трубопроводного транспорта, специалисты НТЦ «Промышленная безопасность» и Технологического института энергетических обследований, диагностики и неразрушающего контроля «ВЕМО», а также Государственный технологический университет «Московский институт стали и сплавов».

Необходимо особо подчеркнуть, что РД-13-04-2006 [4] является базовым методическим документом общего характера, в рамках которого должны быть разработаны технологические инструкции (карты), регламенты или частные методики применения ТК, определяющие технологию и параметры контроля, не-

обходимые расчеты, анализ температурных полей и форму протокола с результатами проведенного контроля и рекомендациями для конкретного вида или типа технических устройств или сооружений.

Такие частные методики (технологические инструкции) должны разрабатываться организациями, имеющими специалистов не ниже второго уровня квалификации, и должны быть аттестованы в установленном порядке уполномоченными органами на предмет достижения целей контроля соответствующих технических устройств, инженерных систем, зданий и сооружений и необходимой достоверности его результатов.

1.2 Термины и определения

Используемые термины установлены в приведенных в монографии нормативных документах.

Аккредитация органов оценки соответствия (аккредитация) – официально оформленное Органом аккредитации признание компетентности юридического лица (или его обособленного подразделения) выполнять работы в определенной области оценки соответствия.

Активный способ теплового контроля — способ теплового контроля, при котором объект контроля подвергается воздействию нагрева или охлаждения внешним источником.

Аттестация лабораторий неразрушающего контроля – деятельность по подтверждению соответствия лабораторий неразрушающего контроля установленным требованиям (например, промышленной безопасности).

Аттестация методики выполнения измерений (МВИ) – процедура установления и подтверждения МВИ предъявляемым к ней метрологическим требованиям.

Аттестация методических документов по НК – деятельность по подтверждению соответствия методических документов по неразрушающему контролю предъявляемым требованиям.

Аттестация средств неразрушающего контроля – деятельность по подтверждению применимости заявленных средств неразрушающего контроля к контролю технических устройств, зданий, сооружений и их элементов.

Дефект — каждое отдельное несоответствие продукции требованиям нормативной технической документации.

ИК-термография – термография, осуществляемая исследованием теплового излучения объектов.

Инфракрасный сканер — прибор, предназначенный для визуализации распределения температуры вдоль линии сканирования объекта по его тепловому излучению.

Избыточная температура — превышение измеренной температуры узла контролируемого объекта над температурой аналогичных узлов других фаз.

Испытательная лаборатория (в том числе лаборатория неразрушающего контроля) – орган оценки соответствия, аккредитованный для проведения испытаний.

Квалификация – соответствие определенным требованиям, таким, как образование, профессиональные знания, навыки и опыт, которые дают возможность специалисту выполнять неразрушающий контроль.

Контактное соединение — токоведущее соединение (болтовое, сварное, методом обжатия), обеспечивающее непрерывность токовой цепи.

Коэффициент дефектности — отношение измеренного превышения температуры контролируемого контактного соединения к превышению температуры, измеренному на участке шины на расстоянии более 1м от контролируемого контакта.

Лаборатория неразрушающего контроля – организация (предприятие), одним из видов деятельности которой является осуществление неразрушающего контроля, или подразделение организации (предприятия), применяющее неразрушающий контроль технических устройств, зданий и сооружений для собственных нужд.

Линия сканирования — линия, вдоль которой производится регистрация теплового излучения объекта.

Методика выполнения измерений (МВИ) содержит последовательность операций и правил, выполнение которых обеспечивает получение результатов измерений с известной погрешностью.

Методика испытаний – организационно-методический документ, обязательный к выполнению, включающий метод испытаний, средства и условия испытаний, отбор проб, алгоритмы выполнения операций по определению одной или нескольких взаимосвязанных характеристик свойств объекта, формы представления данных и оценивания точности, достоверности результатов, требования техники безопасности и охраны окружающей среды.

Методика неразрушающего контроля (МНК) – совокупность правил, операций и условий, реализующая один или несколько видов (методов) НК.

Неразрушающий контроль (НК) — контроль, при котором не должна быть нарушена пригодность технических устройств, зданий и сооружений к применению и эксплуатации.

Натурные испытания теплозащитных качеств наружных ограждающих конструкций зданий и сооружений тепловизионным методом (тепловизионные обследования) – натурные испытания теплозащитных качеств наружных ограждающих конструкций здания (или сооружения) тепловизионным

методом с целью контроля соответствия измеренных в натуральных условиях нормируемых показателей элементов тепловой защиты здания требованиям нормативных документов и обнаружения скрытых дефектов.

Нормируемые показатели теплозащитных качеств наружных ограждающих конструкций здания – теплотехнические (приведенное сопротивление теплопередаче отдельных элементов ограждающих конструкций зданий), энергетические (теплопотери через ограждающую оболочку здания за отопительный период) и санитарно-гигиенические (температурный перепад между температурами внутреннего воздуха и поверхности ограждающих конструкций и температура на внутренней поверхности выше температуры точки росы) параметры качества наружных ограждающих конструкций.

Орган оценки соответствия - орган, который предоставляет услуги по оценке соответствия и который может быть объектом аккредитации: испытательные лаборатории; органы сертификации (аттестации).

Пассивный способ теплового контроля — способ теплового контроля, при котором объект контроля не подвергается воздействию внешнего источника тепловой энергии.

Пирометр — прибор, предназначенный для бесконтактного измерения температуры в области пятна контроля по интенсивности теплового излучения поверхности объекта.

Показатель визирования — отношение минимального диаметра (круга) пятна контроля пирометра в плоскости излучателя, перпендикулярной оптической оси пирометра, к расстоянию от него до переднего среза объектива.

Превышение температуры — превышение измеренной температуры нагрева над температурой окружающего воздуха.

Результат контроля - установленная оценка соответствия объекта контроля предъявляемым ему техническим требованиям.

Реперные зоны (базовые участки)— зоны без температурных аномалий на поверхности объекта контроля, на которых настраивают тепловизор и проводят контактные измерения температур и тепловых потоков.

Реперные точки – точки, выбранные в центре реперных зон, в которых устанавливаются контактные измерители температур и тепловых потоков.

Сертификация (аттестация) персонала – процесс подтверждения органом оценки соответствия квалификации и компетентности кандидата установленным требованиям Системы сертификации.

Система НК — совокупность участников, которые в рамках регламентирующих норм, правил, методик, условий, критериев и процедур осуществляют деятельность в области НК — одного из видов экспертизы промышленной безопасности, связанной с применением средств НК.

Специализированная организация – юридическое лицо, располагающее условиями выполнения теплового контроля одного или нескольких типов объектов и подготовленным персоналом для их проведения.

Сопrotивление теплопередаче - характеризует способность ограждающей конструкции оказывать сопротивление проходящему через нее тепловому потоку; определяют для участков ограждающих конструкций, имеющих равномерную температуру поверхностей.

Средство неразрушающего контроля – техническое устройство, вещество, материал, программный продукт, используемые для получения и обработки информации об объекте для проведения неразрушающего контроля.

Система экспертизы промышленной безопасности (далее — Система экспертизы) — совокупность участников экспертизы промышленной безопасности, а также норм, правил, методик, условий, критериев и процедур, в рамках которых организуется и осуществляется экспертная деятельность.

Персонал в области неразрушающего контроля – специалисты, допущенные к выполнению неразрушающего контроля технических устройств, зданий и сооружений на объектах различного подчинения.

Приведенное сопротивление теплопередаче - определяют для ограждающих конструкций, имеющих неоднородные участки (стыки, теплопроводные включения, притворы и т.д.) и соответствующую им неравномерность температуры поверхности.

Температурная аномалия — локальное отклонение температуры от нормы.

Температурная история - измеренные значения температур через заданные интервалы времени в реперных точках в течение периода измерений.

Температурный перепад - локальное изменение температуры в месте тепловой аномалии.

Температурное поле — распределение значений температуры по поверхности контролируемого объекта.

Температурный напор — разность температур воздуха (или внутренней среды объекта контроля) вблизи внутренней и наружной поверхностей ограждающей конструкции.

Тепловизионный метод — метод теплового контроля, основанный на регистрации, визуализации и анализе температурных (тепловых) полей объектов контроля с помощью **инфракрасной термографии** (тепловидения).

Тепловизор — прибор, предназначенный для преобразования теплового изображения объекта в видимое.

Тепловой контроль — неразрушающий контроль, основанный на анализе температурных (тепловых) полей объекта контроля.

Термограмма — изображение температурных полей контролируемого объекта в видимом диапазоне, получаемое с помощью измерительных приборов (тепловизоров).

Термография – метод анализа пространственного и временного распределения тепловой энергии (температуры) в физических объектах, сопровождающийся, как правило, построением тепловых изображений (термограмм).

Термопрофиль — распределение температуры вдоль линии сканирования.

Технологическая карта контроля — документ, содержащий необходимый набор сведений из методического документа по НК, достаточный для НК объекта контроля конкретного типа (типоразмера).

Технологическая инструкция — документ, ориентированный на решение задачи НК конкретного объекта с указанием операций контроля и их параметров.

Угол визирования — угол, под которым наблюдаются крайние точки контроля на объекте.

Электрооборудование — совокупность электрических устройств, объединённых общими признаками — назначение, условия применения, принадлежность объекту (станку, цеху) и т. д.

Электроустановка — совокупность машин, аппаратов, линий и вспомогательного оборудования (включая сооружения и помещения), предназначенных для производства, преобразования, трансформации, передачи и распределения электрической энергии.

Эксперт по аттестации методических документов по НК (далее — эксперт) — лицо, которое осуществляет все или некоторые функции, относящиеся

к аттестации методических документов по НК, и обладающее признанной компетентностью в Системе НК.

1.3 Организация контроля

Тепловой контроль выполняется персоналом специализированной организации.

Организация, выполняющая тепловой контроль, должна быть аккредитована как испытательная лаборатория или аттестована как лаборатория неразрушающего контроля в соответствующих органах оценки соответствия.

Для проведения теплового контроля технических устройств, зданий и сооружений, применяемых и эксплуатируемых на опасных производственных объектах такая аккредитация (аттестация) является обязательной, для объектов другого подчинения – добровольная.

Организация должна быть оснащена необходимым для данных испытаний оборудованием и аппаратурой, поверенной в установленном порядке, и иметь квалифицированный персонал.

Тепловой контроль проводит аттестованный персонал в составе не менее двух человек.

При проведении натуральных испытаний тепловым (тепловизионным) методом организация руководствуется нормативными документами и/или методиками (аттестованными в установленном порядке) на данный вид контроля.

Для проведения натуральных испытаний тепловым методом конкретного объекта должен быть заключен договор между специализированной организацией и Заказчиком.

В Договоре обязательно предусматривается пункт о предоставлении Заказчиком необходимой технической документации о конструкции и составе материалов контролируемого объекта и пункт о создании необходимых условий на объекте для проведения теплового контроля.

Условия проведения контроля.

При тепловом контроле наружные поверхности не должны подвергаться воздействию солнечной радиации в течение предшествующих 4-7 часов. Прямое и рассеянное солнечное излучение нагревает экспонируемые части контролируемых объектов и создает области аномальных температур, которые специальными приемами отличают от температурных полей, обусловленных наличием дефектов в контролируемом объекте.

Тепловой контроль объектов, находящихся на открытом воздухе, не рекомендуется проводить в дождь, туман, снегопад и при наличии снега, инея, влаги на поверхности.

Тепловой контроль рекомендуется проводить днем — в облачную погоду, но наиболее целесообразно — ночью или в предутренние часы, когда тепловое влияние окружающей среды минимально.

Во время проведения тепловизионной съемки изменение температурного напора не должно превышать $\pm 30\%$ от действительной начальной величины.

При тепловом контроле на открытом воздухе скорость ветра не должна превышать 7 м/с, а температура воздуха — в пределах рабочего диапазона температур тепловизора. Поправочные коэффициенты для регистрируемых значений температуры приведены в приложении 1.

Рекомендуемая дальность тепловизионной съемки от 2 до 100 м в зависимости от габаритных размеров объекта контроля и размеров предполагаемых дефектов, а также оптической системы применяемого тепловизора.

Не рекомендуется проводить тепловой контроль поверхностей с коэффициентом излучения ниже 0,7. При необходимости проведения теплового контроля объектов с коэффициентом излучения ниже 0,7 поверхности объекта обрабатывают специальными средствами (окрашивание, чернение, окисление и т.д.) Справочные значения коэффициентов излучения представлены в главе 2 и приложении 1.

При проведении тепловизионной съемки дополнительные источники нагрева желательно выключить или изолировать.

Тепловой контроль проводят как в стационарных, так и нестационарных условиях воздействия окружающей среды (или источника тепловой стимуляции).

При этом для последующего проведения расчетов фактических характеристик контролируемого объекта и обнаруженных дефектов следует применять расчетные модели.

При наличии высокого уровня электромагнитных помех необходимо, перемещаясь с тепловизором, выбрать место съемки, где влияние электромагнитного поля на прибор будет минимальным.

Тепловой контроль электроустановок проводят при токах нагрузки не менее 30 % номинальной величины ($0,3I_{ном}$).

Компьютерная обработка исходной информации, получаемой датчиками, устанавливаемыми в реперных зонах, может проводиться с использованием специальных программ, обеспечивающих определение количественных характеристик с нормируемой погрешностью.

Компьютерная обработка исходных термограмм должна предусматривать создание панорамных термограмм поверхностей контролируемых объектов.

При определении теплотехнических характеристик следует принимать во внимание суточный ход температуры окружающего воздуха, влияние солнечной радиации и розу ветров в месте расположения обследуемого объекта.

1.4 Квалификация персонала

Испытательная лаборатория (если она осуществляет испытания в области неразрушающего контроля) или лаборатория неразрушающего контроля должна располагать персоналом, аттестованным в установленном порядке, имеющим соответствующую профессиональную подготовку, теоретические знания и практический опыт, необходимый для выполнения работ по НК.

Руководитель лаборатории отвечает в полном объеме за техническое обеспечение выполняемых лабораторией задач, достоверность (точность, воспроизводимость) результатов испытаний, за выполнение требований правил

техники безопасности, промсанитарии, за надлежащее качество всех видов выполняемых работ.

Специалисты, осуществляющие тепловой контроль должны иметь личную сертификацию (аттестацию) в области неразрушающего контроля, которая подтверждается наличием квалификационных удостоверений [211, 213, 216, 217].

Аттестованные специалисты в соответствии с квалификационными уровнями могут выполнять неразрушающий контроль тепловым методом тех объектов, которые указаны в их удостоверениях.

Руководитель работ по тепловому контролю должен иметь квалификацию не ниже II уровня в соответствии с принятой Системой сертификации персонала.

При тепловом контроле электроустановок руководитель должен иметь группу по электробезопасности не ниже IV и допущен к испытаниям и измерениям в электроустановках до и более 1000 В, а остальной персонал — не ниже III.

Персонал должен знать и правильно эксплуатировать используемую аппаратуру, владеть компьютерной грамотностью и основами теплотехнических расчетов.

Руководство лабораторией гарантирует компетентность всех, кто работает со специальным оборудованием и средствами контроля, проводит испытания, оценивает результаты и подписывает отчеты об испытаниях и неразрушающем контроле. За персоналом с низкой квалификацией должен быть обеспечен соответствующий надзор. Специфические задачи должны поручаться персоналу с учетом соответствующего образования, подготовки, опыта и/или проявляемого мастерства.

1.5 Требования безопасности

При проведении теплового контроля различных объектов необходимо соблюдать правила безопасности в соответствии с требованиями действующих нормативных документов, а также нормативных документов организации, в которой эксплуатируется объект.

Перед допуском к проведению контроля все лица, участвующие в его выполнении, проходят инструктаж по безопасным приемам выполнения работ с регистрацией в журнале по установленной форме.

В случае выполнения контроля на высоте, внутри технических устройств (аппаратов) и в стесненных условиях специалисты, выполняющие контроль, должны пройти дополнительный инструктаж по технике безопасности согласно положению, действующему в организации. Работы на высоте, внутри аппаратов должны выполняться бригадой в составе не менее чем 2 или 3 человека в зависимости от степени опасности.

Запрещается работа на неустойчивых конструкциях и в местах, где возможно повреждение проводки электропитания средств контроля.

Ответственность за соблюдением Правил безопасности персоналом при проведении теплового контроля возлагается на руководителя лаборатории неразрушающего контроля.

Глава 2 ОСНОВЫ ТЕОРИИ ТЕПЛОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

2.1 Спектр электромагнитных колебаний и энергетические величины

Тепловой (теповизионный) контроль есть метод дистанционной регистрации, визуализации и анализа тепловых (температурных) полей объектов [5]. Электромагнитное (тепловое, или инфракрасное) излучение возникает в твердых телах, жидкостях и газах вследствие колебаний атомов в кристаллической решетке или вращательно-колебательного движения молекул. Инфракрасное излучение занимает широкий диапазон электромагнитного спектра с длинами волн от 0,75 мкм до 1000 мкм, находясь между видимым светом и радиоволнами (см. рис. 2.1).

В научно-технической литературе можно найти различные разбиения ИК диапазона на суб-диапазоны. Например, согласно рекомендации международного светотехнического словаря выделяют коротковолновой участок ИК спектра (ближняя область) от 0,76 до 1,4 мкм, средневолновой участок (средняя область) от 1,4 до 3 мкм и длинноволновой участок (дальняя область), который простирается от 3 до 1000 мкм. В тепловидении терминами "коротковолновой" и "длинноволновой" участки спектра, как правило, обозначают диапазоны 3...5,5 мкм и 7...14 мкм, что связано со спектральными диапазонами работы популярных ИК детекторов на основе антимонида индия (InSb) и тройных соединений (CdHgTe).

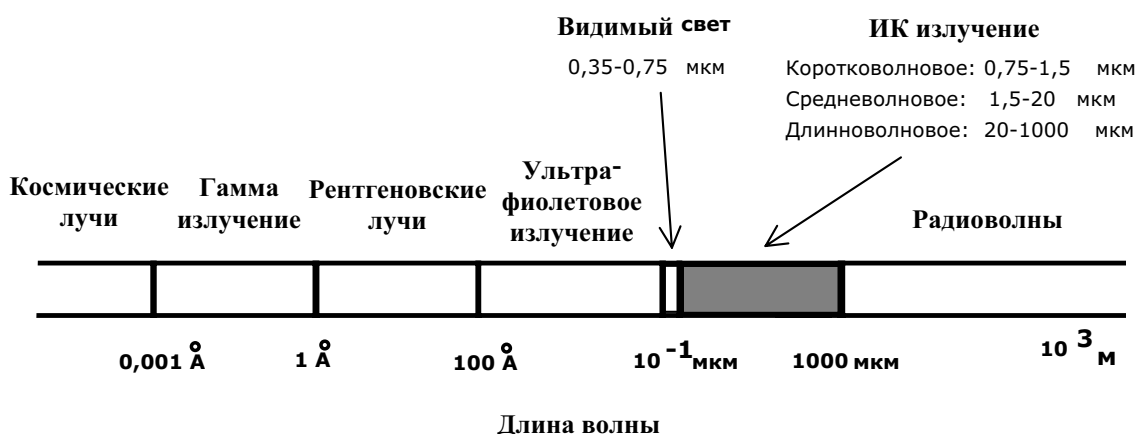


Рис. 2.1. Спектр электромагнитных колебаний.

В табл. 2.1 приведены основные энергетические величины и единицы их измерения, используемые в теории ИК излучения.

Основные энергетические величины и единицы их измерения (в соответствии с системой СИ и рекомендациями Международной комиссии по освещению)

Табл. 2.1

| <i>Наименование (синонимы)</i> | <i>Определяющее выражение</i> | <i>Основная единица измерения</i> |
|---|--|---|
| Поток излучения (лучистый поток, мощность излучения) Radiant power, radiant flux | $\Phi = \int_0^{\infty} \Phi_{\lambda} d\lambda$ | [Вт] |
| Энергия излучения (лучистая энергия) Radiant energy | $W = \int_0^{\tau} \Phi(\tau) d\tau$ | [Дж] |
| Энергетическая сила света (сила излучения) Radiant intensity | $I = d\Phi / d\Omega$ | [Вт/ср ¹] |
| Энергетическая светимость (поверхностная плотность потока излучения, излучательность) Radiant exitance | $R = d\Phi / dF$ | [Вт/м ²] |
| Энергетическая освещенность (облученность, плотность мощности, плотность дозы, радиация) Irradiance, dose-rate | $E = d\Phi / dF$ | [Вт/м ²] |
| Энергетическая яркость (лучистость) Radiance | $L = \frac{I}{dF \cos \Theta}$ | [Вт/(м ² ·ср ¹)] |

2.2 Законы теплового излучения

Согласно *закону Планка*, спектральная поверхностная плотность потока излучения физического объекта определяется его температурой T и спектральной излучательной способностью (коэффициентом излучения) ε_{λ} :

$$R_{\lambda}(T, \varepsilon_{\lambda}) = \frac{\varepsilon_{\lambda} C_1}{\lambda^5 (e^{C_2/\lambda T} - 1)}, \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{мкм)}; \quad (2.1)$$

$$C_1 = 3.7418 \cdot 10^8 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{мкм}^4); C_2 = 1.4388 \cdot 10^4 \text{ мкм} \cdot \text{К}.$$

Закон Планка первоначально был получен для абсолютно черного тела (АЧТ - Black Body), которое испускает максимум возможной при данной температуре энергии, что имеет место при $\varepsilon_{\lambda}^{BB} = 1$, поэтому классическая запись закона Планка имеет вид:

$$R_{\lambda}(T) = \frac{C_1}{\lambda^5 (e^{C_2/\lambda T} - 1)}. \quad (2.2)$$

Для $\lambda T < 5000$ (мкм·К) справедлива формула Вина:

$$R_{\lambda}(T) = \frac{C_1}{\lambda^5 e^{C_2/\lambda T}} \quad (2.3)$$

Для $\lambda T > 10^5$ (мкм·К) имеет место приближение Релея-Джинса:

$$R_{\lambda}(T) = 2 C_1 T / (C_2 \lambda^4). \quad (2.4)$$

В ТК величина λT обычно изменяется от 800 до 5000 (мкм·К), что соответствует спектральному диапазону от 3 до 14 мкм и температуре объектов от 0 до +100°C, следовательно, возможно использование формулы Вина (2.3).

Закон Вина для длины волны λ_m , характеризующейся максимальным значением функции Планка R_{λ_m} , выражается в следующем виде:

$$\lambda_m = \frac{2898}{T} \approx \frac{3000}{T}, \quad (2.5)$$

где λ_m выражена в мкм, а T - в К. Например, если принять, что поверхность тела человека (в одежде) имеет температуру около 300 К, то длина волны максимальной мощности излучения составляет около 10 мкм.

Практические расчеты по общей формуле Планка удобно проводить, если рассмотреть ее безразмерную форму записи:

$$y = 142,32 x^{-5} [e^{4,9651/x} - 1]^{-1}; \quad x = \lambda / \lambda_m; \quad y = R_{\lambda}^{BB} / R_{\lambda_m}. \quad (2.6)$$

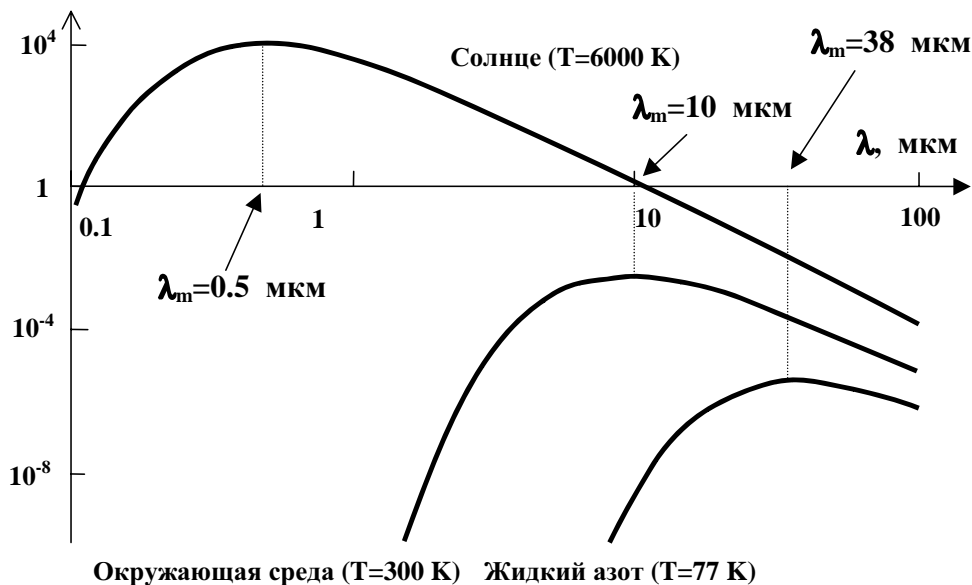
Графики функции Планка R_{λ}^{BB} для различных температур АЧТ согласно формулам (2.2) и (2.6) показаны на рис. 2.2, откуда следует, что: 1) для каждой температуры максимум излучения имеет место на определенной длине волны, которая возрастает с уменьшением температуры; 2) мощность излучения резко спадает с уменьшением температуры. Вышеуказанные особенности теплового излучения тел выражаются соответственно законами Вина и Стефана-Больцмана.

В диапазоне длин волн $\lambda_1 \div \lambda_2$ поверхностную плотность потока излучения $R(T, \varepsilon_{\lambda})$, выраженную в Вт/м², определяют по формуле:

$$R(T, \varepsilon_{\lambda}) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R_{\lambda}(T, \varepsilon_{\lambda}) d\lambda. \quad (2.7)$$

а)

$R_\lambda(T)$, Вт/(см²·мкм)



б)

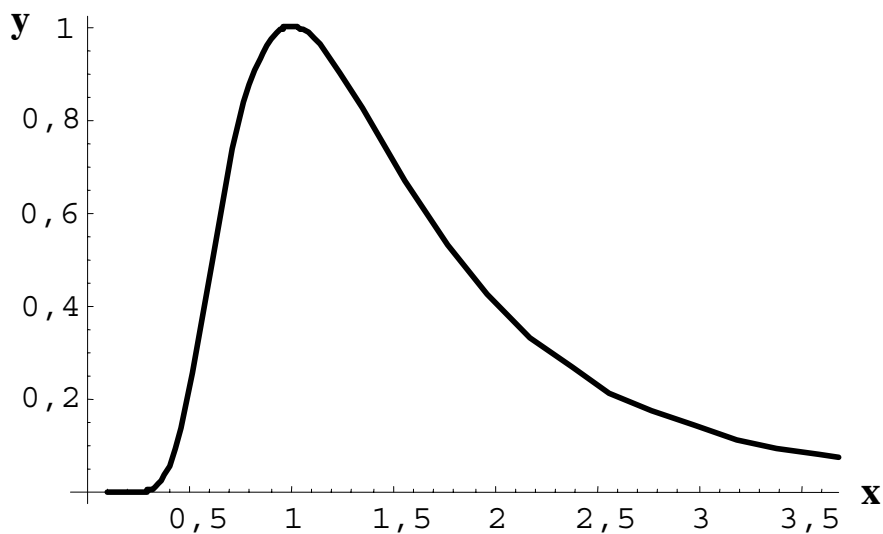


Рис. 2.2. Закон Планка для АЧТ:

а - в абсолютных единицах;

б - единая изотермическая кривая.

Спектральный ход коэффициента излучения ε_λ может быть весьма причудливым, в особенности у газов, которые характеризуются линейчатым спектром излучения. Для многих твердых и жидких тел, называемых «серыми», зависимость коэффициента излучения от длины волны можно пренебречь ($\varepsilon = const.$), тогда:

$$R(T, \varepsilon) = \varepsilon \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{C_1}{\lambda^5 (e^{C_2/\lambda T} - 1)} d\lambda = \varepsilon R^{AЧТ}(T, \tau) . \quad (2.8)$$

Значения интеграла R^{BB} (или $R^{AЧТ}$) в формуле (2.8), описывающего поверхностную плотность потока излучения АЧТ в отдельных спектральных интервалах, табулированы. В ИК термографии используют преимущественно коротковолновый (3...5,5 мкм) и длинноволновый (7...14 мкм) спектральный диапазоны, что соответствует, с одной стороны окнам прозрачности атмосферы, а с другой стороны подкреплено наличием коммерчески доступных приемников излучения, в частности, на основе InSb и CdHgTe. Кроме того, согласно закону Вина, в указанных диапазонах сосредоточена основная мощность излучения тел при температурах от 0 до +100⁰С.

В диапазоне всех длин волн от 0 до ∞ поверхностная плотность потока излучения выражается *законом Стефана-Больцмана*:

$$R^{AЧТ}(T, \lambda = 0 \div \infty) = \sigma T^4 \text{ для АЧТ,} \quad (2.9)$$

$$R(T, \varepsilon, \lambda = 0 \div \infty) = \varepsilon \sigma T^4 \text{ для серого тела.} \quad (2.10)$$

Здесь: $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ - постоянная Стефана-Больцмана.

Тепловое излучение, плотность потока которого описывается формулами (2.7-2.10), испускается телом в телесный угол зрения π стерадиан. Тепловизор регистрирует часть этого излучения, попадающего в телесный угол Ω согласно *закону Ламберта*:

$$J_{\Omega} = R \Delta S \frac{\Omega}{\pi} \cos \varphi, \quad (2.11)$$

где ΔS - площадь, визируемая тепловизором в пределах его мгновенного угла зрения на поверхности объекта контроля; φ - угол между нормалью и направлением телесного угла Ω . Обе величины ΔS и Ω определяются размерами приемной площадки приемника излучения и параметрами оптического объектива.

При падении излучения на тело (рис. 2.3) имеют место следующие оптические феномены: 1) поглощение с коэффициентом α_{λ} ; 2) отражение с коэффициентом ρ_{λ} , и 3) пропускание с коэффициентом τ_{λ} . Очевидно, что на любой длине волны

$$\alpha_{\lambda} + \rho_{\lambda} + \tau_{\lambda} = 1, \quad (2.12)$$

что выражает закон сохранения энергии.

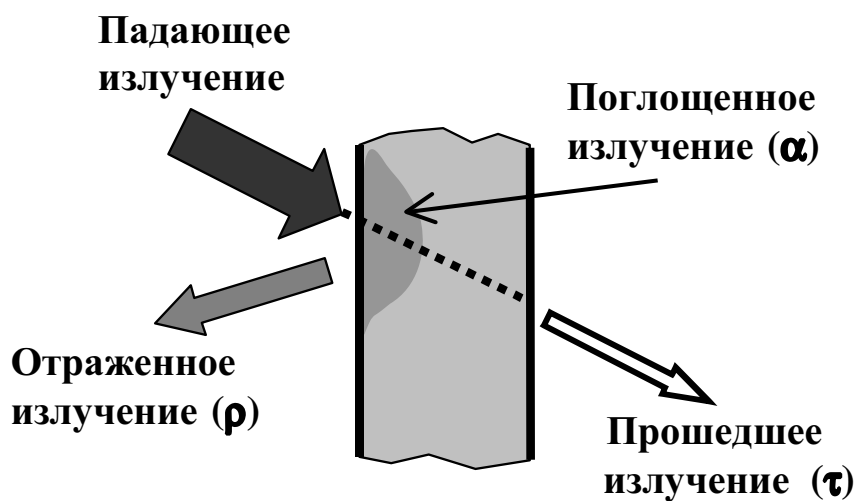


Рис.2.3. Взаимодействие излучения с телом.

Закон Кирхгофа устанавливает, что в точке поверхности теплового излучателя при любой температуре и длине волны спектральный коэффициент направленного излучения для заданного направления равен спектральному коэффициенту поглощения для противоположно направленного неполяризованного излучения. Практически, этот закон устанавливает простое численное соответствие между коэффициентами поглощения и излучения тел:

$$\alpha_{\lambda} = \varepsilon_{\lambda}. \quad (2.13)$$

Закон Кирхгофа выражает тот факт, что на определенной длине волны тело способно поглотить и испустить одинаковое количество энергии. Для теплового контроля это имеет первостепенное значение, поскольку позволяет легче интерпретировать эффекты поглощения/излучения и корректно трактовать показания ИК термометров и тепловизоров, которые производителями калибруются по эталонным источникам (моделям АЧТ).

При измерении температуры объектов по их тепловому излучению, представляет интерес изменения теплового потока в зависимости от изменения температуры. Производная от функции Планка по температуре имеет вид:

$$\frac{\partial}{\partial T} R_{\lambda}(T) = \frac{C_2 e^{C_2/\lambda T}}{\lambda T^2 (e^{C_2/\lambda T} - 1)} R_{\lambda}(T). \quad (2.14)$$

Соответствующие значения также табулируются [5]. Во всем диапазоне длин волн:

$$\frac{\partial}{\partial T} R(T, \varepsilon) = 4\varepsilon\sigma T^3, \quad (2.15)$$

или в конечных разностях:

$$\Delta R(\Delta T = T_1 - T_2, \varepsilon) = 4\varepsilon\sigma \left(\frac{T_1 + T_2}{2}\right)^3 \Delta T \quad (2.16)$$

В радиационной пирометрии удобно использовать следующее монохроматическое представление функции Планка:

$$R_\lambda(T) = K(\lambda) T^n, \quad (2.17)$$

где $K(\lambda)$ - функция длины волны; $n = 5/\beta$ при $\beta \leq 2.5$; $n = 1 + 2.5/\beta$ при $\beta \geq 2.5$; $\beta = \lambda/\lambda_m$. Показатель степени n в таком представлении характеризует изменение $R_\lambda(T)$ в процентах при изменении температуры на 1%, поскольку из формулы (2.15) следует:

$$n = \frac{\partial R_\lambda(T)/R_\lambda(T)}{\partial T/T}. \quad (2.18)$$

Формула (2.17) содержит кажущееся противоречие, которое состоит в неограниченном увеличении $R_\lambda(T)$ при уменьшении длины волны и возрастании n . Однако, фактически, $R_\lambda(T)$ уменьшается вследствие более быстрого уменьшения $K(\lambda)$. В связи с этим формула (2.17) означает, что при переходе в коротковолновую часть спектра с ростом температуры возрастает лишь *относительное* приращение спектральной плотности излучения.

2.3 Схема теплового контроля объектов

Поскольку объект контроля всегда находится в окружении других физических тел, также испускающих и отражающих ИК (тепловое) излучение, то суммарное излучение тела, регистрируемое, например, тепловизором, складывается из *собственного, прошедшего и отраженного* излучения. В большинстве случаев тепловой контроль (тепловидение) имеет дело с оптически непрозрачными объектами ($\tau_\lambda = 0$), для которых формула (2.12) приобретает вид:

$$\alpha_\lambda + \rho_\lambda = 1 \quad \text{или} \quad \varepsilon_\lambda + \rho_\lambda = 1. \quad (2.19)$$

Упрощенная схема тепловизионного контроля оптически непрозрачного объекта показана на рис. 2.4. Поток излучения, регистрируемый тепловизором, складывается из потока собственного излучения и части потока излучения окружающей среды и посторонних объектов, отраженного от поверхности объекта контроля:

$$\Phi = \Phi_{\text{соб}} + \Phi_{\text{отп}} = \Gamma_1 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varepsilon_\lambda R_\lambda^{AQT}(T) + \Gamma_2 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \rho_\lambda \varepsilon_{\lambda a} R_\lambda^{AQT}(T_{\text{amb}}), \quad (2.20)$$

где Γ_1, Γ_2 -геометрические факторы, описывающие ослабление потоков излучения от объекта контроля и окружающей среды в зависимости от геометрии эксперимента и параметров объектива, а индекс “*amb*” относится к окружающей среде (ambient), включая посторонние объекты.

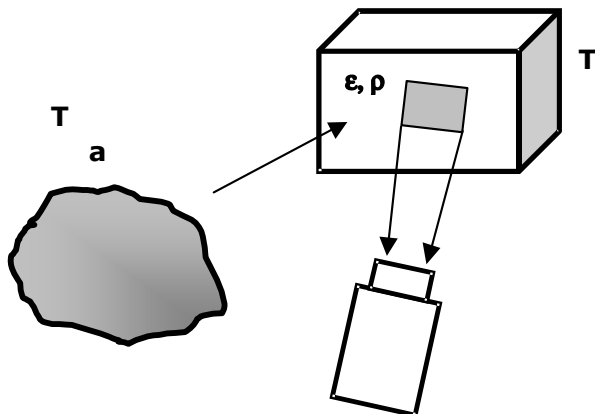


Рис. 2.4. Схема регистрации теплового излучения.

Составление уравнений энергетического баланса весьма важно при выводе энергетического уравнения ИК систем, поскольку в объектив тепловизора, помимо излучения контролируемого объекта, попадает также прямое излучение внутренних элементов тепловизора и в, частности, самого приемника излучения. В современных измерительных системах эти составляющие потока излучения измеряют и учитывают при калибровке приборов. Простейшей иллюстрацией взаимного влияния объектов друг на друга является случай двух "абсолютно черных" бесконечных плоскостей с температурой T_1 и T_2 , расположенных параллельно друг другу. Результирующий поток излучения в пространстве между ними (без учета поглощения) равен:

$$\Delta R = \sigma (T_1^4 - T_2^4). \quad (2.21)$$

Взаимодействие тел различной геометрической формы и обладающих различными коэффициентами излучения описывается соответствующими коэффициентами Γ и $\varepsilon_{эфф}$.

2.4 Коэффициент излучения

Без потери общности можно принять, что окружающая среда излучает как АЧТ, тогда уравнение (2.20) можно записать в виде:

$$\Phi = \Gamma_1 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varepsilon_\lambda R_\lambda^{АЧТ}(T) + \Gamma_2 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} (1 - \varepsilon_\lambda) R_\lambda^{АЧТ}(T_a). \quad (2.22)$$

Из уравнения (2.22) следует, что только при визировании АЧТ ($\varepsilon_\lambda = 1$) справедлива градуировка тепловизора, выполненная изготовителем по эталонному

источнику (модели АЧТ), в то время как при визировании реальных объектов показания тепловизора зависят не только от температуры объекта, но и от его излучательных свойств. Параметры T и ϵ сложным образом воздействуют на вид термограмм, что затрудняет их интерпретацию в терминах температуры.

В табл. 2.2 - 2.4 приводятся величины коэффициента излучения для некоторых распространенных материалов. В приложении 1 табл. 1 приводятся значения коэффициентов излучения в зависимости от изменения температуры. Следует обратить внимание на резкое различие величин ϵ у металлов и неметаллов. Металлы, особенно полированные, выступают в роли зеркал, хорошо отражающих и плохо поглощающих тепловое излучение, в то время как большинство неметаллов могут рассматриваться как хорошо излучающие серые тела, многие из которых приближаются по свойствам к АЧТ. Еще одним интересным свойством излучения тел в ИК диапазоне является тот факт, что некоторые материалы, такие как человеческая кожа, снег, краски и т.п., могут обладать выраженными отражающими свойствами в видимой части спектра, но быть хорошими поглотителями в ИК спектре.

Интегральные коэффициенты излучения строительных материалов при температуре 20°C

Таблица 2.2

| <i>Материал</i> | <i>Коэффициент излучения</i> |
|---|------------------------------|
| 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 |
| Лак белый | 0,8...0,96 |
| Мрамор сероватый полированный | 0,93 |
| Рубероид | 0,93 |
| Сажа | 0,95...0,97 |
| Сажа с жидким стеклом | 0,96 |
| Сажа, 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 | 0,97 |
| Половая глазурованная керамическая плитка | 0,91 |
| Алебастр | 0,89 |
| Пенополиуретан не гладкий | 0,97 |
| Пенополиуретан гладкий | 0,98 |

Коэффициенты излучения строительных материалов, рекомендуемые фирмой FLIR Systems (AGEMA Infrared Systems) для различных спектральных диапазонов

Таблица 2.3

| <i>Материал</i> | <i>Длина волны, мкм</i> | <i>Коэффициент излучения</i> |
|----------------------------------|-------------------------|------------------------------|
| Алюминий | КВ* | 0,83...0,94 |
| Асбест | КВ | 0,96 |
| Кирпич, обычный | КВ | 0,81...0,86 |
| Кирпич красный | КВ | 0,90 |
| Бетон, сухой | 5 | 0,95 |
| Замерзшая почва | ДВ* | 0,93 |
| Стекло | 5 | 0,97 |
| Гранит, естественная поверхность | 5 | 0,96 |
| Гравий | ДВ | 0,28 |
| Железо | КВ | 0,91...0,96 |
| Известняк | 5 | 0,96 |
| Известь | КВ | 0,87 |
| Пластик, черный | КВ | 0,95 |
| Пластик, белый | КВ | 0,84 |
| Картон | 5 | 0,81 |
| Штукатурка | КВ | 0,86...0,90 |
| Фанера | КВ | 0,83...0,98 |
| Полипропилен | КВ | 0,97 |
| Резина | 5 | 0,97 |
| Обои (легкий рисунок) | КВ | 0,90 |

* КВ = 2,0... 2,5 мкм

ДВ = 6,5...20,0 мкм

Коэффициенты излучения изделий радиоэлектроники

Таблица 2.4

| <i>Изделие</i> | <i>Коэффициент излу- чения</i> |
|--|--|
| Резисторы: угольные пленочные металлопленочные остеклованные трубчатые проволочные намотанные | 0,85 0,85...0,90 0,90 0,87 |
| Конденсаторы: переменные электролитические керамические дисковые цилиндрические пленочные слюдяные стеклянные | 0,85...0,95 0,28...0,36 0,90...0,94 0,90 0,90...0,93 0,90...0,95 0,91...0,92 |
| Транзисторы | 0,90 |
| Диоды | 0,89...0,90 |
| Импульсные трансформаторы | 0,91...0,92 |
| Сглаживающие дроссели | 0,89...0,93 |
| Платы: из слюды и эпоксидного стекла фторопластовые из эпоксидной фенольной смолы | 0,86 0,80 0,80 |
| Пластины из позолоченной меди из меди, с покрытием припоем | 0,30 0,35 |
| Провода: луженые медные с изоляцией на основе формальдегидной смолы | 0,28 0,87...0,88 |
| Детали из стеатита для выводов | 0,87 |