

Глава 8. Выявление дефектов теплоизоляции линейных технологических объектов	213
8.1. Контроль состояния теплоизоляции трубопроводов	214
8.2. Обследование дымовых труб	217
8.3. Выявление дефектов в элементах линий электропередач	223
8.4. Исследование температуры движущейся стеклопластиковой ленты в процессе ее производства	227
Глава 9. Определение качества теплоизоляции промышленных печей	228
9.1. Качественный контроль дефектов ограждений печей	230
9.2. Количественная оценка размеров дефектов	233
Список литературы	237

Научное издание

Дроздов Валентин Алексеевич, Сухарев Виталий Иванович

ТЕРМОГРАФИЯ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

Редакция литературы по строительным материалам и конструкциям
 Зав.редакцией И. А. Фонин
 Редактор Э. С. Шестопалова
 Внешнее оформление художника В. А. Козлова
 Технический редактор М. Д. Левина
 Корректор Н. С. Сафронова
 Оператор Н. М. Гаввулина

ИБ № 3585

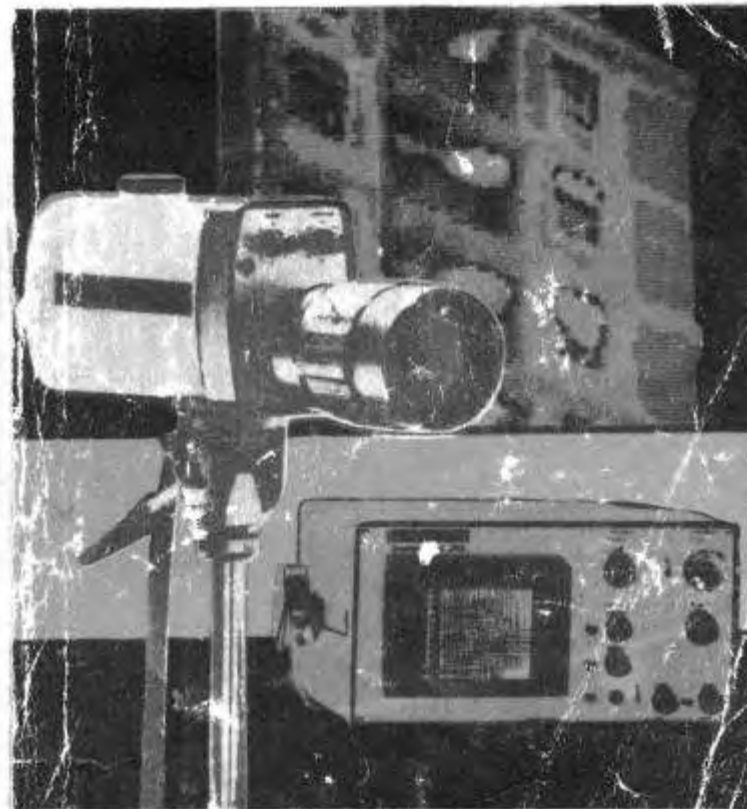
Подписано в печать 09.12.86. Т-08186 Формат 84x108 1/32
 Усл.печ.л. 12,60 Усл.кр.-отт. 12,81 Уч.-изд.л. 18,10 Тираж 1780
 Изд. № АУП-930 Зак. № 834 Цена 2 руб 80 коп

Стройиздат, Москва, Каляевская, 23а

Тульская типография Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательства, полиграфии и книжной торговли
 г. Тула, пр. Ленина, 109

З.А. Дроздов
 З.И. Сухарев

ТЕРМОГРАФИЯ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ



20.179
D 75

УДК 69:536.51.083

Дроздов В.А., Сухарев В.И. Термография в строительстве. — М.: Стройиздат, 1987. — 240 с.: ил.

Изложены особенности применения термографии в различных отраслях строительства. Даны методы контроля теплозащитных характеристик, термических сопротивлений, воздухопроницаемости, дефектоскопии строительных конструкций зданий и сооружений различного назначения.

Для научных и инженерно-технических работников научно-исследовательских и проектных организаций.

Табл. 31, ил. 57, список лит.: 22 назв.

Печатается по решению секции литературы по строительной физике и строительным конструкциям редакционного совета Стройиздата.

Рецензент: д-р техн. наук, профессор В.С. Горшков.

Научно Техническая
БИБЛИОТЕКА
НИИИЭП
Инв. № 340.98

(2)

Д 3202000000 — 231 — 81 — 87
047 (01) — 87

© Стройиздат, 1987

ВВЕДЕНИЕ

В решениях XXVII съезда КПСС намечены конкретные меры развития и эффективного использования научно-технического потенциала страны, повышения качества исследований и разработок, ускорения внедрения научно-технических достижений в народное хозяйство.

Важнейшей отраслью народного хозяйства является капитальное строительство, валовая продукция которого составляет около 150 млрд. руб. в год.

Повышение благосостояния советского человека, являющееся основной задачей социальной программы нашей партии, включает создание благоприятных комфортных условий для труда и отдыха трудящихся, заботу об их здоровье, развитие физической и духовной культуры. В условиях развитого социалистического общества эти задачи должны решаться на строгой научной основе.

Повышение качества строительства, уменьшение материалоемкости зданий и сооружений, снижение энергетических затрат при строительстве и эксплуатации зданий невозможно без совершенствования метрологической базы, особенно для определения и оперативного контроля теплофизических показателей зданий и их отдельных элементов.

В последние годы в СССР и зарубежных странах в различных отраслях науки и техники: энергетике, медицине, металлургии, а также химической, радиотехнической, электротехнической промышленности и строительстве для изучения процессов теплообмена на поверхностях различных объектов и определения их температурных полей успешно применяют технику инфракрасного излучения. Особо следует отметить использование тепловизоров, которые относятся к классу оптико-электронных приборов, способных преобразовывать тепловое излучение объекта в инфракрасной области спектра в видимое изображение. Интенсивность полутонов видимого изображения пропорциональна при этом плотности тепловых потоков, излучаемых различными участками поверхности объекта.

В настоящее время накоплен определенный опыт применения тепловизионной техники в строительстве. Работы НИИ строительной физики, Московского института радиотехники и автоматики, ЦНИИЭП жилища и других институтов и организаций показывают, что тепловизионная техника может успешно использоваться в строительстве как средство массового оперативного контроля качества ограждающих конструкций, выявления дефектов теплоизоляции зданий и мест утечек тепловой энергии в наружных ограждениях, массового теплофизического обследования отапливаемых и неотапливаемых зданий и сооружений, линий электропередач, тепловых и газовых сетей, сохранности теплоизоляции тепловых агрегатов, при контроле технологических процессов производства и изготовления строительных конструкций и др.

В настоящей книге обобщен отечественный и зарубежный опыт применения приборов и методик, предназначенных для контроля теплофизических показателей и дефектоскопии в строительстве на основе тепловизионной техники. Намечены перспективные области применения тепловизионной техники в будущем.

Авторы выражают благодарность рецензенту д-ру техн. наук, проф. В.С. Горшкову за ценные замечания, сделанные при рецензировании книги.

Глава 1. ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДОВ ТЕРМОГРАФИИ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

Для обеспечения долговечности зданий и сооружений, комфортных условий в помещениях при одновременном снижении их материалоемкости и экономии энергетических затрат во время строительства и эксплуатации необходимо проведение подробных теплофизических исследований как отдельных конструктивных элементов, так и объекта в целом. Большой удельный вес в этих исследованиях занимает определение различных температурных полей, особенно на поверхностях строительных конструкций при различных граничных условиях.

Температура поверхностей строительных конструкций зависит от интенсивности лучистого и конвективного теплообмена и состояния поверхностей конструкций, в частности от физико-технических свойств материалов конструкций, наличия теплопроводных включений, как конструктивно обусловленных, так и случайных, являющихся технологическими или конструктивными дефектами и др.

Несмотря на совершенствование испытательного оборудования при значительном увеличении объемов строительства, лабораторные и натурные определения температуры строительных конструкций проводят на основе выборочного контроля отдельных образцов конструктивных решений с помощью термодатчиков (как правило, термопар или термометров сопротивления) и измерительно-регистрирующей аппаратуры.

Существенной особенностью, присущей всем исследованиям с применением термодатчиков, является получение температур в фиксированных точках, поэтому для получения полной картины распределения температур в сложных конструкциях необходимо большое число термодатчиков. При этом увеличивается не только время их установки, но и время измерений и обработки результатов. Так, например, для проведения натуральных испытаний зданий со сложными многослойными ограждениями требуется установить несколько сотен термодатчиков.

Большая трудоемкость и высокая стоимость этих работ затрудняет осуществление необходимого контроля теплофизических качеств во время приемки зданий в эксплуатацию и особенно перед капитальным ремонтом или реконструкцией.

При приемке зданий в эксплуатацию необходима комплексная оценка всех элементов и систем. При оценке теплозащитных качеств ограждающих конструкций часто возникают определенные трудности, так как комиссия ограничивается визуальной оценкой качества работ и не вооружена средствами для проверки теплофизических характеристик, основными из которых являются сопротивление теплопередаче, сопротивления воздухопроницаемости, теплоустойчивости и др. Возникает необходимость периодической проверки теплозащитных качеств ограждений в процессе эксплуатации зданий.

Перед капитальным ремонтом необходимы обследования для получения данных о состоянии элементов зданий, позволяющих определить объем работ по капитальному ремонту. Прежде всего проводят оценку состояния стен, путем осмотра наружных и внутренних поверхностей, выявляют трещины и измеряют ширину их раскрытия, определяют прочность бетона панелей или блоков в местах с большим количеством трещин, определяют влажность, производят вскрытие стыков наружных стеновых панелей и определяют воздухопроницаемость стыков и состояние герметика. При обследовании перекрытий выявляют трещины (их характер и ширину раскрытия), измеряют прогибы дефектных плит. При обследовании стен, перегородок и перекрытий выявляют места, имеющие пониженную звукоизоляцию. Далее проводят осмотр балконных плит для выявления их состояния. Выявляют дефекты конструкции крыши. При общем осмотре здания фиксируют состояние оконных и дверных проемов и металлических сливов, внутренней отделки помещений, облицовки, полов. Перед реконструкцией полносборных зданий, связанной с перепланировкой помещений, надстройкой, которая может повлечь за собой увеличение постоянных и временных нагрузок на отдельные элементы зданий с целью количественной оценки фактической несущей способности конструкций с учетом изменений, происходящих во времени, производят инструментальное обследование. На основании данного обследования составляют техническое заключение, которое вместе с паспортом служит исходным материалом для проектирования реконструкций зданий.

Таким образом, из всех видов контроля наиболее часто используется визуальное обследование наружных и внутренних стен, стыков, перекрытий, мест сопряжений оконных и балконных коробок с панелями. При этом выявляют трещины, деформации и другие дефекты после их проявления на поверхности, но не получают данных о состоянии материала, арматуры и закладных деталей, о теплопроводных качествах ограждений. Все это определяется только после вскрытия конструкций, что затруднено особенно когда здание эксплуатируется. Как правило, к вскрытиям прибегают в крайних случаях, и часто состояние элементов в процессе их эксплуатации остается невыясненным. Поскольку все испытания трудоемки и требуют много времени для их проведения, то конструкции обследуют выборочно, что не дает полной ясности о состоянии здания в целом. Поэтому возникает необходимость в разработке новых прогрессивных видов и методов контроля для оценки теплозащитных качеств ограждающих конструкций и зданий в целом.

1.1. СУЩНОСТЬ И ВОЗМОЖНОСТИ ТЕРМОГРАФИЧЕСКИХ МЕТОДОВ

Инфракрасное излучение возникает в результате внутренних физико-химических процессов, протекающих в веществе — источнике излучения (колебательные и вращательные движения молекул и атомов, колебания узлов решетки). Основным способом генериро-

вания инфракрасного излучения является нагревание тел, поэтому часто это излучение называется тепловым.

Быстрое развитие инфракрасной техники и методов обнаружения и измерения инфракрасного излучения, а также рост интереса к ним связан с целым рядом преимуществ их применения в практике исследований теплового состояния тел по сравнению с другими методами. К одному из преимуществ следует отнести неограниченность использования метода, так как все тела, имеющие температуру выше абсолютного нуля, излучают электромагнитную энергию, значительная часть которой приходится на инфракрасную область спектра.

К другим преимуществам относятся: высокотемпературная разрешающая способность приборов; дистанционность измерения, соизмеримая с космическими измерениями сквозь атмосферу при полном исключении механического контакта и нарушении поля температур вокруг контакта измеряемого объекта; возможность интерпретации внутренних глубинных дефектов по измерениям возмущений поля температур на поверхности тела; высокопространственная разрешающая способность приборов (до долей квадратного миллиметра); высокочастотная разрешающая способность приборов (определяющая скорость обзора поверхности тела, т.е. оперативность контроля); возможность обзора одним и тем же прибором малых (до нескольких сантиметров) и очень больших (до сотен метров) объектов; большой диапазон температур, охватываемых одним и тем же прибором.

Наряду с преимуществами приборы, действие которых основано на использовании инфракрасного излучения, имеют свои недостатки:

температура может быть измерена только тонких поверхностных слоев материалов;

существенное влияние на результат измерений могут оказывать теплорадиационные свойства объекта и окружающей среды и величина лучистого теплообмена между ними;

хотя инфракрасное излучение пропускается атмосферой в условиях дымки лучше, чем видимое, тем не менее интенсивность прошедшего излучения в большей степени зависит от соотношения и концентрации различных газов, паров воды и т.д.

Достоверность результатов измерения температур термографическими методами во многом определяется достоверностью и точностью оценки свойств поверхности исследуемого излучающего тела и промежуточной среды. В оптических методах измерения температуры особенно важна методическая сторона процесса измерений, так как именно она оказывает в конечном счете влияние на результирующую погрешность полученных результатов.

Основной величиной, характеризующей свойства поверхностей, является их излучающая способность. В общем случае излучающая способность поверхностей различных материалов зависит от их температуры, но и она не постоянна во всем спектре электромагнитного излучения, т.е. эта величина спектральная. В литературе обыч-

но приводятся значения интегральной способности материалов без указания участка спектра, в котором проводились измерения. При определении величины излучающей способности исследуемых материалов необходимо учитывать тот факт, что инфракрасные приборы работают в узком спектральном диапазоне, да к тому же имеют неравномерный коэффициент преобразования на разных длинах волн этого диапазона. Поэтому целесообразно проводить измерения излучающей способности материалов тем прибором, который используется при исследованиях.

Методы и приборы, основанные на обнаружении и измерении инфракрасного излучения, только несколько лет назад вышли из лабораторной практики и сразу нашли широкое применение. Это обстоятельство объясняется тем, что открытие и теоретическая проработка основ использования инфракрасного оптического диапазона были сделаны еще в прошлом столетии. Однако только в последние годы, начиная с 60-х годов нашего столетия, интенсивное развитие полупроводниковой техники, физики твердого тела позволило создать чувствительные преобразователи инфракрасного излучения, отвечающие требованиям измерительной техники.

В последние годы инфракрасные системы широко применяются в различных областях техники. Наиболее известны в мировой практике тепловизионные системы фирмы АГА (Швеция), "Фуджицу Лимитед" (Япония) и "Барнес Инжиниринг Компани" (США). Проходят испытания опытные образцы отечественных тепловизоров типа ИК-10, БТВ-1, АТП-44 и др. Температурная разрешающая способность этих тепловизоров от 0,1 до 0,5⁰С, диапазон измеряемых температур от -20⁰ до 100⁰С.

Все эти приборы основаны на преобразовании теплового излучения в электрический сигнал. По законам физики плотность теплового излучения пропорциональна четвертой степени абсолютной температуры поверхности, следовательно, зная величину теплового потока излучения и излучающую способность поверхности, можно определить и температуру этой поверхности. На этом законе, известном в физике как закон Стефана-Больцмана, основан метод дистанционного измерения температуры поверхности с использованием аппаратуры, регистрирующей инфракрасное излучение. Тепловизоры преобразуют невидимое тепловое излучение от предмета в видимое его изображение, на котором видно распределение температур на поверхности этого предмета.

Инфракрасные приборы позволяют фиксировать температуру только тонкого (толщиной от 1 до 3 микрон) слоя поверхности объектов. Однако распределение температур на поверхности исследуемого объекта несет информацию не только об общем его тепловом состоянии, но и о структуре и качестве обработки поверхности, о наличии теплопроводных неоднородностей (трещин, ребер жесткости, уплотнений, материалов, инородных включений, скопления влаги, разрушений материалов, напряженных состояний), о наличии внутренних скрытых источников тепла и т.д. Распределение температур на поверхности объекта фиксируется инфракрасными прибо-

рами на термограмме. Термограмма представляет собой плоское тепловое изображение поверхности объекта, которое может быть зафиксировано на экране электронно-лучевой трубки на диаграммной ленте или фотобумаге.

Некоторые тепловизоры позволяют получать цветное тепловое изображение объекта, на котором каждому цвету соответствует определенная температура поверхности.

Возможность определения полей температур на поверхности тел и их изменений во времени позволяет не только контролировать тепловое состояние этих тел, но и выявлять различного рода нарушения однородности их структуры, приводящие к изменению процессов теплообмена тел с окружающей средой. Такого рода нарушения могут быть расположены как на поверхности тел, так и внутри их. И если эти нарушения не связаны с конструктивными особенностями исследуемых объектов, то они могут быть отнесены к классу дефектов. Инфракрасные методы в этом случае позволяют проводить тепловую дефектоскопию различных изделий и материалов, обязательным условием которой является наличие определения величины теплового потока, пронизывающего контролируемую область объекта.

Внутренние дефекты и явления могут быть обнаружены только в тех пределах, которые вносят возмущение в поле температур на поверхности изделия. В этом кроются очевидные ограничения и необходимость проведения предварительных оценок и методических экспериментов. Не всякий дефект может быть обнаружен, а лишь такой, у которого размеры, глубина залегания и теплофизические характеристики создадут на поверхности тела возмущение поля температур, соизмеримое с температурной чувствительностью прибора. Измерения должны производиться в момент проявления наибольшего температурного контраста на поверхности.

Тепловизоры могут служить не только как средство оперативного массового контроля качества теплоизоляции строительных конструкций и заменить используемые устаревшие методы теплофизических исследований строительных конструкций, они открывают новые возможности перед исследователями и проектировщиками.

1.2. ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕРМОГРАФИИ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

Метод термографирования в настоящее время нашел широкое применение в различных отраслях народного хозяйства. Область его применения постоянно расширяется и совершенствуется. Впервые тепловизоры были использованы для осмотра линий электропередач и энергетических установок для выявления и устранения перегреваемых элементов. При этом контроль проводился на протяжении всей линии электропередачи с вертолета, а на подстанциях — с земли. Во время обследования, если температура деталей превышала окружающую среду на 10°C , их брали на особый контроль, а на 30°C — немедленно понижали нагрузки в линии, заменяли или

срочно их ремонтировали. При скорости вертолета около $75 \cdot 10^3$ м/ч на расстоянии 90–120 м от проводников обнаруживались элементы, нагретые на 3°C выше окружающей среды.

Применение тепловизоров в металлургии открывает широкие возможности для контроля качества обмуровки плавильных печей, конвертеров, разливочных ковшей. Диагностика мест прогорания и расслоения обмуровки в них производится с наружной стороны без остановки оборудования. Термографирование работающей печи позволяет выявить места разрушения слоя футеровки и определить срок необходимого ремонта.

Весьма перспективно применение тепловизора для исследования технологических аппаратов и производственного оборудования, связанного с термической обработкой материалов и изделий. Так применение тепловизора позволяет определять места прогаров теплоизоляции во вращающихся печах для обжига цементного клинкера. Экономическое значение и роль таких обследований с точки зрения охраны труда трудно переоценить.

Тепловизоры успешно применяют для контроля тепловой изоляции промышленных дымовых труб, нефте- и газопроводов, теплосетей, при аэрофотосъемках для изучения температуры поверхности земли и воды при различных метеорологических условиях и временах года. Нельзя переоценить применение тепловизоров при исследовании температурных режимов поверхностей обдуваемых тел в аэродинамических трубах. Одной из самых широких областей применения тепловизоров за рубежом является их использование в области термографии строительных конструкций как в экспериментальных исследованиях, так и при обследованиях зданий различного назначения с целью выявления дефектов теплоизоляции и ограждающих конструкциях или выявления конструктивных недостатков. Такие работы проводятся в Швеции, США, Англии, Канаде, Японии, Финляндии, ПНР и др.

Применение тепловизора при теплофизических исследованиях в климатических камерах позволяет детально обследовать всю поверхность конструкции. При этом в сложных случаях выявляются весьма существенные детали, которые при традиционном методе исследования с применением термомпар были либо не выявлены, либо осложнили бы исследование. Примерами таких сложных случаев являются экспериментальные панели ЦНИИЭП жилища с эффективным пенополистирольным утеплителем в полиэтиленовых пакетах, в которых сложные границы ребер с помощью тепловизора были определены точно и быстро. Еще более сложным явилось распределение температур на поверхности экспериментального щита с восстановленными фресками XI в. из церкви Спаса на Ковалеве под Новгородом, разрушенной фашистами в 1941 г. Щит на титановой основе с титановыми ребрами жесткости был доставлен в НИИСФ для изучения влияния титановых ребер жесткости на температурный режим поверхности смонтированного на щите фрагмента фресок. Температурный режим на поверхности фрески оказался настолько сложным, что определение его без помощи тепловизора

заяло бы очень много времени. Обследование его с помощью тепловизора заняло всего 30 мин (не считая времени монтажа и введения щита в режим температурного перепада). В целом вместе с монтажом, выводом на стационарный режим, термографированием и демонтажем щита обследование заняло один день.

Обследование эксплуатируемых зданий с целью выявления дефектов теплоизоляции и мест утечек тепла основано на том, что на основе распределения температуры на поверхности конструкции можно получить качественную картину распределения теплового потока в конструкции. Причем тепловизоры позволяют фиксировать распределение температур как на внутренней, так и на наружной поверхности ограждающих конструкций зданий.

Обследование желательно проводить в зимнее время при наличии перепада температур между внутренним и наружным воздухом. При этих условиях неоднородности теплоизоляции в ограждающих конструкциях зданий проявляются в виде изменения температурного поля на поверхности. Вначале проводят термографирование наружной поверхности здания и отмечают на термограммах места искривления температурного поля. Обычно дефекты теплоизоляции приводят к утечке тепла из помещения, т.е. к увеличению в этом месте температуры наружной поверхности. Затем отмеченные места подвергаются более тщательному обследованию с помощью тепловизора с внутренней стороны и определяются размеры, характер и возможная глубина предполагаемого дефекта. При термографировании с внутренней стороны место дефекта будет холоднее, чем бездефектные участки конструкции. Полученные термограммы дефектных мест сравниваются с термограммами бездефектных конструкций или с известными типами дефектов. Продолжительность обследования жилого здания в зависимости от его объема колеблется от нескольких десятков минут до нескольких часов.

Примером обследований труднодоступных участков ограждений могут служить температурные поля на внутренней поверхности куполов в соборах московского Кремля. На холодных участках поверхности стен и сводов образуется конденсат. Если не предотвратить этот процесс, то творения древних художников могут погибнуть. Задача состоит в том, чтобы определить оптимальные значения влажности и температуры, необходимые для сохранности художественных ценностей. И в первую очередь важно знать распределение температур на поверхности фресок. Но обычными способами это сделать невозможно, так как большая высота сооружений затрудняет доступ ко всем интересующим местам. Использование тепловизоров позволяет за несколько часов получить данные распределения температуры на поверхностях фресок, оконных откосов различных ярусов, куполов.

Тепловизор успешно используется также и в научных исследованиях теплофизических свойств экспериментальных строительных конструкций как в натуральных, так и в лабораторных условиях. При этом производится съемка температурных полей на поверхности конструкций и по термограммам строятся поля изотерм. Эти иссле-

дования позволяют определить однородность строительных материалов, влияние различных теплопроводных включений на температуру поверхности панелей, эффективность слоя теплоизоляции, теплоизоляционные качества стыков различных конструкций, теплорадиационные характеристики строительных материалов и т.д.

Другие направления использования тепловизора в строительстве связаны с проблемами строительства в районах Крайнего Севера. На примере г. Норильска проводятся исследования долговечности теплоизоляции типовых строительных конструкций, теплового режима цокольных перекрытий в зданиях с вентилируемым подпольем, построенных на вечномерзлом грунте, тепловой инерции ограждений в жилых зданиях при смене режима отопления и т.д.

Заслуживает внимания опыт польских специалистов по использованию тепловизора для исследования процесса термообработки железобетонных изделий на домостроительных комбинатах. Ими исследовались неравномерности распределения температур на поверхности опалубки и ее влияние на достигнутую прочность, напряжение и долговечность бетона. Были исследованы распределения температур на поверхности стальной опалубки сантехкабин и бетонных балок при их пропаривании. В результате были выявлены места со значительным градиентом температур (более 30°C), что приводило к перегреву одних зон и недогреву других. Это явление сопровождалось неравномерным ростом прочности бетона в различных зонах и появлением термических напряжений в нем, приводивших в ряде случаев к появлению трещин.

Особо следует остановиться на применении тепловизора для изучения памятников архитектуры и уникальных зданий. С применением тепловизора были обследованы Успенский собор московского Кремля, Дом Союзов, здание СЭВ. При этом проявились главные преимущества термографического обследования – возможность дистанционного обследования конструкций, позволяющая проводить обследование в пределах прямой видимости (быстрота обследования 1–2 дн. на объект); фиксирование результатов на фотопленку позволяет создать архив термограмм, высокую точность. Использование тепловизора позволяет выявить температурные неоднородности ограждающих конструкций и некоторые особенности эксплуатации конструкций. Так, при обследовании Успенского собора сквозь штукатурку с фресками просматриваются ряды кладки (тычковые и ложковые) и отдельных камни, легко обнаруживаются трещины в кладке.

К возможным областям применения термографии в строительстве относятся следующие:

- диагностика работы строительных и дорожных машин;
- анализ режимов термовлажностной обработки железобетонных и бетонных изделий;
- приемочная дефектоскопия бетонных и железобетонных изделий;
- активный контроль сварки арматуры и стальных конструкций непосредственно в процессе сварки;

определение положения арматуры и толщины защитного слоя в железобетонных изделиях;

анализ термонапряженного состояния массивности бетона в процессе возведения и эксплуатации сооружений;

испытание металлических образцов;

контроль качества листовых строительных материалов в процессе изготовления;

контроль качества защиты атомных реакторов электростанций; контроль утечек в теплофикационных и водопроводных системах;

определение положения подземных и скрытых коммуникаций;

контроль работы вращающихся обжиговых печей;

решение аэродинамических задач обдува моделей застройки и отдельных зданий;

контроль за работой энергетического оборудования и автоматики на стройках и его диагностика;

противопожарное наблюдение с воздуха за большими районами;

изучение и контроль тепловых технологических процессов;

контроль качества изоляции на ТЭС и АЭС;

наблюдение за фильтрацией в земляных и бетонных плотинах;

контроль уровня и положения теплых и холодных жидкостей в герметизированных системах;

контроль процессов сушки.

Трудно претендовать на полноту перечня возможных применений термографии и термодефектоскопии, поскольку опыт их применения невелик.

Дальнейшее развитие и совершенствование методов термографирования в строительстве связано с развитием тепловизионной техники. Особо следует отметить необходимость внедрения тепловизоров в массовый контроль качества строительства на всех его стадиях от домостроительных комбинатов до эксплуатации и ремонта существующих зданий и сооружений.

Глава 2. ОСНОВЫ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕРМОГРАФИИ

Всякое тело, имеющее температуру выше абсолютного нуля, излучает с поверхности тепло и одновременно воспринимает тепло от лучей, испускаемых окружающими телами. В результате тело может нагреваться, охлаждаться или находиться в тепловом равновесии. В последнем случае происходит процесс взаимного облучения.

Количество энергии, поглощаемое какой-либо микросистемой, измеряется квантами, величина которых определяется как произведение универсальной константы h и частоты поля излучения ν . Скорость света в вакууме определяется по формуле

$$c = \lambda \nu, \quad (2.1)$$

где λ — длина волны излучения.

В зависимости от частоты излучения или длины волны энергия излучения может воздействовать на ядра атомов вещества; электронные оболочки атомов; молекулы вещества в целом.

Излучение, энергия которого способна вызвать изменение состояния в ядрах атомов, называется гамма-излучением (диапазон волн 10^{-9} – 10^{-11} м); излучение, способное вызвать изменение состояния в электронных оболочках атомов — рентгеновским, ультрафиолетовым и видимым излучением (10^{-11} – $0,72 \cdot 10^{-6}$ м); а изменение в состоянии молекул — инфракрасным излучением ($0,72 \cdot 10^{-6}$ – 10^{-3} м).

Всякое излучение, источником которого является тепловая энергия излучающего тела, принято называть тепловым излучением. Оно возникает в результате непрерывного хаотического движения молекул.

При повышении температуры излучающего тела увеличивается энергия поступательного, колебательного и вращательного движения частиц, вследствие чего растет лучистый поток, а также средняя величина квантов излучения. Как показывают исследования, вращение молекул вокруг своей оси при низкой температуре создает длинноволновые инфракрасные излучения.

Вследствие хаотичности молекулярного движения возможны большие скорости движения некоторых частиц и при малых значениях температуры, следовательно, при этих условиях возможно возникновение фотонов, однако вероятность ничтожно мала, поэтому интенсивность коротковолнового излучения при низких температурах практически равна нулю. Таким образом, в результате повышения температуры излучающего тела лучистый поток не только увеличивается, но и изменяет его спектральный состав.

2.1. ФИЗИЧЕСКИЕ ЗАКОНЫ ТЕПЛОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Основным физическим законом, определяющим интенсивность излучения тел, является закон Планка. Он является одним из основных законов теплового излучения, характеризующим распределение энергии в спектре излучения абсолютно черного тела в зависимости от его температуры T и длины волны λ . Спектральная интенсивность излучения $r_{\lambda T}$ идеального излучателя в пределах полусферы в интервале длины волн от λ до $\lambda + \Delta\lambda$ при температуре T определяется формулой Планка

$$r_{\lambda T} = C_1 \lambda^{-5} \left[\exp \frac{C_2}{\lambda T} - 1 \right]^{-1}, \quad (2.2)$$

где C_1 и C_2 — константы излучения Планка.

Энергия, излучаемая предметом, распределяется во всем электромагнитном спектре. В то время как форма распределения остается довольно постоянной, количество и спектральное распределение энергии зависят в значительной мере от температуры. Для любого

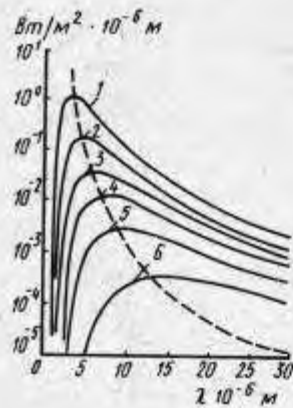


Рис.2.1. Изотермы Планка при температуре
1 - 1000 К; 2 - 700 К; 3 - 600 К; 4 - 400 К; 5 - 300 К; 6 - 200 К

предмета с определенной температурой имеется только одна длина волны, для которой излучаемая энергия является максимальной. Около 75% энергии предмета приходится на длинные волны и 25% на короткие волны для этой максимальной точки (рис.2.1). Для большинства случаев нет необходимости, а в некоторых случаях нежелательно производить измерения на максимальной длине волны.

При количественной оценке термограмм основной целью является измерение разностей излучаемой энергии отдельными участками поверхности, которая соответствует разности температур этих участков.

Действительное количество энергии инфракрасного излучения, испускаемое поверхностью предмета определяется в основном его температурой и излучательной способностью. Хотя температура является основным параметром, определяющим количество излученной энергии, определение излучательной способности поверхности предмета или коэффициента излучения в процессе проведения измерения представляет наибольшую сложность, так как в большинстве случаев они имеют неопределенную величину.

Зависимость между общим количеством излучаемой телом энергии, его температурой и излучательной способностью определяется законом Стефана-Больцмана. Этот закон может быть выведен из закона Планка путем интегрирования его во всем диапазоне электромагнитного спектра, т.е. от $\lambda_1 = 0$ до $\lambda_2 = \infty$.

Закон Стефана-Больцмана устанавливает, что плотность излучения W_T абсолютно черного тела с температурой T , находящегося в среде, обладающей свойствами черного тела и имеющей температуру $T_{ср}$, пропорциональна разности четвертых степеней температур T и $T_{ср}$

$$R_T = \sigma (T^4 - T_{ср}^4), \quad (2.3)$$

где σ - постоянная Стефана-Больцмана, или постоянная идеального излучения, равная отношению суммарной плотности излучения черного тела к его абсолютной температуре в четвертой степени $\sigma = 5,6687 \cdot 10^{-12} \text{ Вт/(см}^2 \cdot \text{К}^4)$.

В частном случае, когда температура излучателя велика по сравнению с температурой окружающей среды или поглощающая способность среды мала, вторым членом правой части формулы (2.3) можно пренебречь и получить выражение плотности излучения абсолютного черного тела, $\text{Вт/(см}^2 \cdot \text{К}^4)$:

$$R_T = \sigma T^4. \quad (2.4)$$

Длина волны λ_{max} , соответствующая максимуму энергии излучения тела, обратно пропорциональна его абсолютной температуре T

$$\lambda_{\text{max}} = C_\lambda / T, \quad (2.5)$$

где $C_\lambda = 2898 \cdot 10^{-6} \text{ м} \cdot \text{К}$ - постоянная закона смещения, равная произведению абсолютной температуры черного тела на длину волны, при которой спектральная интенсивность излучения этого тела максимальна.

Эта зависимость носит название закона Вина (смещения) и получена путем дифференцирования формулы Планка и определения длины волны λ_{max} , при которой плотность излучения рассматриваемого тела максимальна для данной температуры.

Наиболее употребительна формула Вина

$$\lambda_{\text{max}} = 2897 \cdot 10^{-6} / T, \text{ м}. \quad (2.6)$$

Плотность излучения черного тела в любом направлении, составляющем угол θ с нормалью к излучающей поверхности R_θ , равняется плотности излучения в направлении к нормали, умноженной на $\cos \theta$. Это известный закон Ламберта, называемый законом косинусов, который записывается следующим образом:

$$R_\theta = R_n \cos \theta. \quad (2.7)$$

Чтобы получить поверхностную плотность излучения в телесном угле конечной величины, необходимо проинтегрировать выражение $2\pi R_n \cos \theta \sin \theta d\theta$ по всем углам от 0 до θ

$$R_\omega = 2\pi R_n \int_0^\theta \cos \theta \sin \theta d\theta = 2\pi R_n \left. \frac{\sin^2 \theta}{2} \right|_0^\theta = \pi R_n \sin^2 \theta, \quad (2.8)$$

или

$$R_\omega = \pi R_n \sin^2 \theta, \quad (2.9)$$

где R_n - плотность излучения единичной поверхности в направлении нормали к ней в бесконечно малом телесном угле; ω - величина телесного угла; R_ω - плотность излучения поверхности в данном направлении и в данном телесном угле.

2.2. ИСТОЧНИКИ ТЕПЛОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Излучение нечерных тел. Черное тело, как следует из закона Кирхгофа, является самым лучшим тепловым излучателем: плотность излучения любого реального тела в любой области спектра не может быть больше плотности излучения черного тела при той же температуре.

Излучение реального тела при температуре T можно характеризовать спектральной плотностью энергетической яркости $L_\lambda(\lambda, T)$ для каждой монохроматической составляющей излучения или энергетической яркостью L . Для оценки излучательной способности реальных тел введено понятие спектрального коэффициента излучения $\epsilon(\lambda, T)$, причем

$$\epsilon(\lambda, T) = L_\lambda(\lambda, T) / L_\lambda^0(\lambda, T), \quad (2.10)$$

где $L_\lambda(\lambda, T)$ и $L_\lambda^0(\lambda, T)$ — спектральные плотности энергетической яркости соответственно реального тела и черного тела при температуре T и длине волны λ .

Из закона Кирхгофа очевидно, что $\epsilon(\lambda, T) = a(\lambda, T)$, т.е. коэффициент излучения реального излучателя равен его коэффициенту поглощения. Интегральный коэффициент излучения $\epsilon(T)$ для сложного лучистого потока определяется отношением энергетических яркостей $L(T)$ данного тела и $L^0(T)$ абсолютно черного тела при одной и той же температуре T

$$\epsilon(T) = \frac{L(T)}{L^0(T)} = \frac{\int_0^\infty \epsilon(\lambda, T) L_\lambda(\lambda, T) d\lambda}{\int_0^\infty L_\lambda^0(\lambda, T) d\lambda}, \quad (2.11)$$

Значения $\epsilon(\lambda, T)$ и $\epsilon(T)$ зависят не только от температуры и материала излучающего тела, но и от состояния его поверхности.

Нечерные тела по характеру спектрального распределения их излучения разделяются на серые и селективные излучатели. Серыми излучателями называются источники излучения, коэффициент поглощения которых имеет одно и то же значение для разных длин волн. Спектральная кривая излучения серого излучателя совпадает по форме с кривой излучения черного тела при той же температуре: положение максимума излучения одинаковы и все ординаты кривой серого излучателя могут быть получены путем умножения ординаты кривой черного тела на постоянный коэффициент излучения $\epsilon(T)$. Из этого следует, что для серых излучателей справедлив закон Стефана—Больцмана с поправкой на коэффициент $\epsilon(T)$

$$W(T) = \pi L(T) = \epsilon(T) \sigma T^4. \quad (2.12)$$

Селективными излучателями называются такие источники излучения, у которых спектральный коэффициент излучения имеет различные значения для разных длин волн.

Инфракрасная техника имеет дело с разнообразными источниками инфракрасных излучений — в подавляющем большинстве источ-

никами теплового излучения, в качестве которых должно рассматриваться слабонагретое тело (газообразное, жидкое, твердое). Источники инфракрасных излучений целесообразно классифицировать на искусственные и естественные.

Искусственные источники излучения применяются в активных инфракрасных системах, а также для измерительных целей. В активных инфракрасных системах применяются вольфрамовые лампы накаливания обычных типов и зеркальные (термоизлучатели), кварцевые лампы накаливания с галогенным циклом, средне- и низкотемпературные (темные) излучатели для нагревательных установок, электрические дуги, газоразрядные лампы, импульсные лампы, оптические квантовые генераторы (ОКГ или лазеры).

Для измерительных целей применяются источники с точно определенными параметрами излучения: полые излучатели (модели черного тела), силитовый излучатель, окисленные никелевые ленты и др. Естественными источниками инфракрасных излучений являются всевозможные нагретые тела, которые представляют собой либо объекты наблюдений и измерений (например, при неконтактных методах измерения температуры различных нагретых тел и т.п.), либо источники помех (тепловые фоны), действие которых приходится учитывать при измерениях. В табл. 2.1 приведены данные о распределении энергии излучения в процентах для основных типов ламп накаливания.

Табл. 2.1. Отношение энергии, выделяемое лампами накаливания, к потребляемой энергии, %

Излучение	Пустотная лампа	Лампа, наполненная аргоном и азотом	Бесспиральная лампа, наполненная аргоном и азотом	Лампа, наполненная криптоном и ксеноном
Видимое	7	10	12	13
Инфракрасное	86	68	74	76
Потери в держателях	7	3	2	2
Потери в газе	0	19	12	9

Лампы накаливания обычных типов могут применяться как излучатели только в ближней инфракрасной области спектра: стеклянная колба лампы поглощает излучения с длиной волны более $2,6 \cdot 10^{-6}$ м. Лампы накаливания общего назначения промышленностью СССР выпускаются 26 типов на напряжения 127 и 220 В и мощностью от 15 до 1500 Вт. Кроме того, выпускается 8 типов ламп с повышенной световой отдачей (127 и 220 В от 40 до 100 Вт). Мощными инфракрасными излучателями могут служить также прожекторные лампы накаливания типа ПЖ в 16 разновидностях напряжением 50, 110, 127 и 220 В, мощностью от 25 до 2000 Вт.

При исследовании приемников лучистой энергии, при калибровке инфракрасных приборов, при спектральных измерениях, используют источники инфракрасного излучения с определенными параметрами. Модели идеально (абсолютно) черного тела не существует. Однако

создаются и широко используются модели черного тела (полые излучатели), по свойствам настолько близкие к идеальному, что они удовлетворяют требованиям измерений с очень высокой точностью. Принципиально такой моделью является непрозрачная замкнутая полость с достаточно малым отверстием и равномерно нагретыми стенками. Геометрическая форма полости при этом практического значения не имеет, хотя из конструктивных соображений чаще всего модели придают трубчатую форму.

Коэффициент излучения (коэффициент поглощения) излучающего отверстия модели черного тела может быть вычислен по следующей формуле:

$$\alpha = 1 - [(1 + a_{ст})A_0/A] / [1 - (1 - a_{ст})(A - A_0)/A], \quad (2.13)$$

где A_0 — площадь излучающего отверстия; A — площадь внутренней поверхности полости; $a_{ст}$ — коэффициент поглощения стенок.

В моделях черного тела предусматривается надежная теплоизоляция внутренней полости, стенки которой должны быть сделаны из материала, способного длительно выдерживать рабочую температуру. Обогрев осуществляется почти всегда электронагревательной обмоткой, витки которой располагаются так, чтобы полость нагревалась равномерно. Кроме того, в конструкции предусматривается терморезистор или термистор для контроля температуры излучающей полости.

При использовании активных и пассивных инфракрасных систем часто приходится принимать во внимание полезные или мешающие излучения естественных источников, которые можно разделить на три основные группы: наземные источники — почва, растительность, водная поверхность, здания, транспортные средства, люди; атмосферные источники — пар воды, атмосферные газы, облака, пыль, полярное сияние, космические источники — Солнце, Луна и другие планеты, звезды, туманности.

Наземные источники излучения. К этим источникам относятся объекты, находящиеся на поверхности земли. Спектральное распределение излучения таких источников зависит не только от их температуры, но и от излучательной и отражательной способности. Излучение элементов ландшафта (почвы, растительности, зданий и т.п.) образуется суммированием их собственного теплового излучения и отраженного ими солнечного излучения.

Излучение водных поверхностей в инфракрасной области спектра почти совпадает с излучением черного тела, так как слой воды толщиной менее 0,1 мм полностью поглощает падающее на него излучение, начиная с $\lambda = 2 \cdot 10^{-6}$ м, а при толщине 0,1 м — начиная с $\lambda = 0,95 \cdot 10^{-6}$ м.

Излучение растительных массивов из-за трудности определения их температуры изучено недостаточно полно. Растения обладают собственным механизмом регулирования своей температуры (например, в жаркое время травяной покров нагревается меньше, чем скалы). Можно считать приближенно, что общая неровность поверхнос-

ти растительных массивов (травяных покровов, крон деревьев и т.п.) приближает их по излучательным свойствам к черному телу.

Атмосферными источниками излучения являются капли и молекулы воды, молекулы различных газов, частицы пыли и т.д., которые рассеивают, отражают и поглощают излучение, приходящее к ним от космических или наземных источников. Таким образом, атмосферные источники являются вторичными источниками инфракрасного излучения, они создают фон, мешающий наблюдению.

Особенно сильно оказывается мешающее действие излучения дневного и ночного неба. В инфракрасной области спектра для $\lambda > 3 \cdot 10^{-6}$ м собственное тепловое излучение атмосферы преобладает над рассеянным атмосферой солнечным излучением. Собственное тепловое излучение неба днем и ночью приблизительно одинаково.

Спектр излучения неба, покрытого низкими облаками, близок к спектру излучения черного тела, так как облака, состоящие из мелких капелек воды, рассеивают излучение многократно и диффузно; нижняя поверхность облаков рассеивает излучение, полученное от земных и водных поверхностей, которые излучают тепло подобно черному телу. Следовательно, излучение низких облаков можно принять таким же, как излучение черного тела при температуре приземного слоя воздуха.

Излучение высоких облаков также подобно излучению черного тела, но при более низкой температуре воздуха. Так как температура воздуха на высоте ниже, чем в приземном слое, то и интенсивность излучения слабее, чем у низких облаков.

К группе космических источников излучения относится Солнце. Его угловой диаметр для земного наблюдателя составляет $32'$. Яркость солнечного диска максимальна в центре и несколько уменьшается к краям. Это уменьшение различно в разных областях спектра. В ультрафиолетовой области при $\lambda = 0,32 \cdot 10^{-6}$ м яркость на краю солнечного диска составляет 60% яркости в центре, в инфракрасной области — около 8%.

Спектральное распределение энергии солнечного излучения близко к излучению черного тела примерно при 6000°C . При расчетах обычно пользуются сглаженной планковской кривой, соответствующей излучению черного тела при указанной температуре.

Излучение Солнца в инфракрасной области обследовано достоверно только до $\lambda = 12 \cdot 10^{-6}$ м, так как более длинноволновые излучения полностью поглощаются земной атмосферой. Существует узкое окно прозрачности при длине волны $\lambda = 21 \cdot 10^{-6}$ м, пропускающее только 14% солнечного излучения. Солнце представляет собой очень мощный источник излучения, создающий на поверхности Земли (на границе атмосферы) энергетическую освещенность, равную $1,4 \text{ кВт} \cdot \text{м}^{-2}$.

Вторым по яркости космическим источником излучения является Луна. Угловой диаметр лунного диска для земного наблюдателя равен $31'$. Луна посылает Земле отраженное солнечное излучение. Энергетическая освещенность, создаваемая Луной на поверхности

Земли в 465 000 раз меньше энергетической освещенности, создаваемой прямыми солнечными лучами.

Все планеты, даже самые близкие к Земле, создают во много раз меньшее излучение, чем Луна. Очень мало и излучение звезд, доходящее до Земли.

2.3. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ТЕПЛОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ТВЕРДЫМИ ТЕЛАМИ

Распределение спектральной плотности излучаемой поверхностями твердых тел, определяемое их поглощающей, отражающей и излучающей способностями, зависит от характера взаимодействия электромагнитных волн с веществом, его молекулами и атомами. Коэффициенты поглощающей, отражающей и излучающей способности веществ устанавливаются путем соотношения электромагнитной волны с веществом на границе раздела при переходе ее из одной среды в другую. Эти взаимодействия описываются уравнениями электродинамики — уравнениями Максвелла.

Электромагнитное излучение реальных тел в той или иной степени является селективным, что обуславливается спектром частот колебаний атомов и молекул.

Процессы взаимодействия электромагнитного излучения с веществом имеют очень сложный характер. Теоретический расчет на основе использования метода квантовой электродинамики в настоящее время оказывается не только трудоемким, но и даже невозможным. Поэтому эти величины определяют экспериментально на основе изучения спектров поглощения веществ.

Излучающая способность поверхности тела является сложной функцией и зависит от природы и теплового состояния тела и состояния его поверхности. Излучающая способность тела зависит не только от физических свойств и температуры тела, но и от состояния его поверхности, и позволяет отнести ее к чисто теплофизическим параметрам. При проведении измерений температуры поверхностей и величины радиационного теплового потока необходимо знать зависимость излучающей способности от температуры и длины волны. Взаимодействие инфракрасного излучателя с веществом определяется по спектрам поглощения.

В твердом теле уровни энергий отдельных атомов перекрываются, образуя широкие зоны. Широкие полосы диэлектриков располагаются почти по всей инфракрасной (ИК) области. Полупроводники обладают сильным поглощением в сравнительно близкой к ИК области и значительно слабее — в далекой. У металлов поглощение в ИК области определяется, в основном, свободными электронами проводимости.

Диэлектрические материалы имеют различную поглощающую способность в зависимости от длины волны. Однако общим для всех диэлектриков является увеличение их поглощающей способности с увеличением длины волны, хотя на отдельных узких участках спектра может иметь место и обратная зависимость. Интегральная

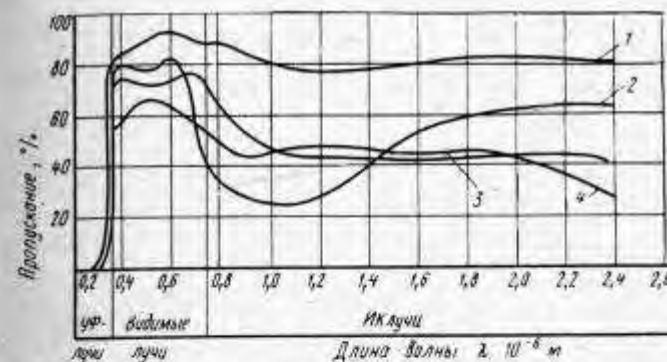


Рис.2.2. Спектральное пропускание стекла
1 — оконного; 2 — телопоглощающего; 3 — покрытого оловянно-сурьмяным составом; 4 — то же, окислокобальтовым составом

поглощающая способность диэлектриков является высокой (0,8—0,98), поэтому они в первом приближении могут рассматриваться как серые тела.

Большинство материалов, применяемых в строительстве, таких, как бетон, кирпич, штукатурка, различные краски, обои и т.д., следует отнести к разряду диэлектриков с коэффициентом излучения, близким к единице, т.е. излучающая способность большинства строительных материалов близка к излучающей способности абсолютно черного тела (АЧТ).

Некоторые материалы, прозрачные для видимого излучения, имеют значительный коэффициент поглощения в ИК диапазоне. Например, стекло, прозрачное для видимых лучей, в диапазоне длин волн 3—4 мкм имеет коэффициент поглощения, близкий к абсолютно черному телу (рис.2.2). Различные пластики, применяемые для облицовки ограждений, имеют гребенчатый спектр поглощения (излучения). Для измерения температуры поверхности этих материалов следует выделить нужные участки спектра с помощью специальных инфракрасных оптических фильтров, но прежде чем приступить к измерениям температур поверхностей ограждающих конструкций надо знать спектры поглощения материалов ограждений или спектральные коэффициенты собственного излучения материалов.

При определении эффективности использования инфракрасного метода регистрации теплового излучения поверхностей ограждающих конструкций зданий необходимо оценить мощности излучения с единицы поверхности ограждения и сравнить эту величину с величиной минимальной (пороговой) чувствительности приемника излучения при данных условиях эксперимента.

Мощность излучения абсолютно черного тела выражается в интегральной форме. В нашем случае интегрирование можно за-

меньше суммированием. При этом ошибка вычисления не выйдет за пределы точности измерения исходных параметров

$$W(\lambda) = \sum_{\lambda_1}^{\lambda_2} r T(\lambda) \Delta\lambda. \quad (2.14)$$

Перемножив и просуммировав значения $\epsilon_\lambda W_\lambda$ для всего интересующего нас диапазона длин волн, получим мощность излучения с 1 см² площади поверхности ограждения

$$W_{\text{пов}} = \sum_{\lambda_1}^{\lambda_2} \epsilon_\lambda W_\lambda. \quad (2.15)$$

В табл. 2.2 приведены значения спектральных коэффициентов излучения и спектральной плотности излучения шамотного кирпича при температуре $T_1 = 300$ К.

Т а б л и ц а 2.2. Изменение плотности излучения шамотного кирпича в зависимости от длины волны

λ	ϵ_λ	W_λ	$\epsilon_\lambda W_\lambda$
3	0,88	0,018	0,016
4	0,88	0,23	0,22
5	0,90	0,83	0,82
6	0,93	1,6	1,48
7	0,95	2,3	2,18
8	0,91	2,8	2,55
9	0,89	3,1	2,75
10	0,84	3,1	2,60
11	0,78	3,0	2,34
12	0,72	2,8	2,015
13	0,69	2,5	1,72
14	0,70	2,3	1,61

Расчеты интегральных плотностей излучения $W_{\text{пов}}$ поверхности шамотного кирпича для разных спектральных диапазонов $\Delta\lambda_1 = 3 - 14 \cdot 10^{-6}$ м и $\Delta\lambda_2 = 3 - 5 \cdot 10^{-6}$ м показывают, что в первом диапазоне рассчитанная величина равна $20,3 \cdot 10^{-5}$ Вт/м², а во втором $1,056 \cdot 10^{-5}$ Вт/м². Аналогичные расчеты выполнены для случая излучения шамотного кирпича при температуре $T_2 = 298$ К. Для $\Delta\lambda_1$ интегральная плотность излучения будет равна $19,12 \cdot 10^{-5}$ Вт/м², а для $\Delta\lambda_2 = 0,863 \cdot 10^{-5}$ Вт/м². Следовательно, при температурном контрасте $\Delta T = T_1 - T_2 = 2$ К контраст лучистости в спектральном диапазоне $\Delta\lambda_1 = 3 - 14 \cdot 10^{-6}$ м равен $1,18 \cdot 10^{-5}$ Вт/м², а для $\Delta\lambda_2 = 3 - 5 \cdot 10^{-6}$ м — $0,193 \cdot 10^{-5}$ Вт/м².

Приведенная методика вычисления позволяет определить численные значения лучистости поверхности ограждения в различных спектральных диапазонах. Из приведенных данных может быть сделан вывод, что в регистрирующих ИК излучение приборах широкого назначения следует применять приемники, работающие в большом диапазоне длин волн, но при этом использовать оптические фильтры для выделения необходимой полосы спектра.

Излучающая способность предмета находится в обратной зависимости от его ограждающей способности: чем выше излучение, тем меньше отражение, и наоборот. Предмет, излучающий максимальное количество энергии, теоретически возможное при данной температуре, называется черным телом. Он имеет коэффициент излучения, равный единице. Таким образом, все предметы, имеющие коэффициент излучения меньше единицы, излучают меньше энергии.

На результаты измерений оказывают влияние также размеры и форма предмета. Если, например, предмет имеет размер меньше проекции детектора на предмет, то температура, определенная системой, будет ниже действительной температуры предмета. В этом случае в программу измерений необходимо внести поправки. Если предмет имеет закругленные поверхности, например трубы, необходимо тщательно определить предельный угол измерения. Даже в этом случае иногда приходится вносить поправки для получения правильной температуры тела. Все данные о предмете (излучательную способность, размеры и форму предмета) следует учитывать при разработке всей системы измерения.

В литературе для различных материалов чаще всего приводится спектральное распределение коэффициента отражения $\rho(\lambda)$ или коэффициента пропускания $\tau(\lambda)$, а не коэффициента поглощения. Эти данные являются спектральным распределением кажущихся, а не истинных коэффициентов отражения или пропускания, в большинстве случаев правильно передающим положение полос поглощения.

На рис. 2.3 приведен спектр пропускания, а на рис. 2.4 — спектр отражения некоторых материалов, по которым можно судить о положении основных полос поглощения.

На рис. 2.5 приведен пример согласования спектральных характеристик источника инфракрасного излучения и облучаемого тонкого слоя воды. Температура излучателя составляла 1000 К; при этом максимум спектральной плотности излучения приходился на $\lambda = 2,8 \cdot 10^{-6}$ м, что соответствует сильной полосе поглощения воды на участке около $3 \cdot 10^{-6}$ м.

В теплофизике полупрозрачными называют такие вещества, которые частично прозрачны для собственного теплового излучения. В полупрозрачных твердых телах перенос тепла осуществляется одновременно радиационным (лучистым, фотонным) и кондуктивными путями. В жидкостях, наряду с этими процессами переноса тепла, имеет место конвективный теплообмен. С такой же ситуацией мы сталкиваемся в полупрозрачных ограждениях зданий, в которых, как правило, воздушные прослойки ограничены с двух сторон полупрозрачными материалами.

Проблему расчета температурных полей в таких веществах решают с помощью теории радиационно-кондуктивно-конвективного теплообмена. Эти расчеты представляют очень трудоемкий процесс, поэтому ограничимся рассмотрением экспериментальных исследований процессов теплопередачи в полупрозрачных матери-

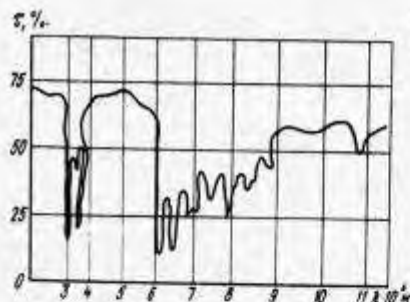


Рис.2.3. Спектр пропускания нйоловой пленки

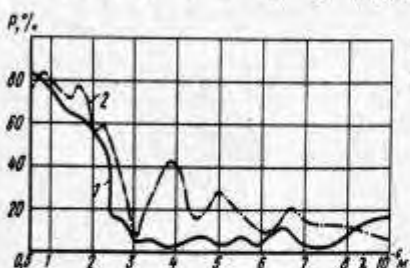


Рис.2.4. Спектр отражения
1 - цинковых белил; 2 - структурного гилса

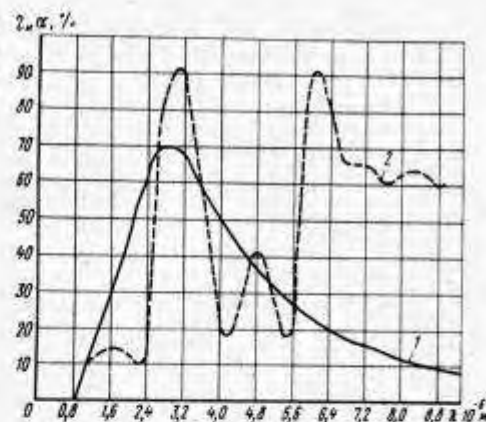
лах и конструкциях, основанных на измерениях температурных полей на их поверхностях.

В технологии производства полупрозрачных конструкций решение указанных вопросов необходимо, главным образом, для определения оптимальных режимов производства, повышения качества и надежности выпуска продукции. В эксплуатационных условиях они позволят оценить термическую прочность энергетических характеристик и другие факторы, от которых зависит работоспособность конструкций.

Методы измерения теплофизических характеристик полупрозрачных тел аналогичны методам, используемым для изучения непрозрачных тел. Отличие заключается в том, что при решении обратных задач, когда по температурному полю оценивают теплофизические характеристики, наряду с распределением температур и тепловых потоков необходимо знать оптические свойства веществ и границы пропускания исследуемых образцов конструкций. Например, в отличие от непрозрачных тел, где степень черноты или коэффициент излучения определяется свойствами тонкого приповерхностного слоя, у частично прозрачных материалов она является характеристикой не вещества, а конкретного образца, поставленного в конкретные условия теплообмена, поэтому степень черноты следует определять непосредственно в условиях проведения эксперимента.

Поскольку энергия, падающая на полупрозрачное тело, не вся пропускается им, а частично отражается, поглощается и излучается

Рис.2.5. Согласование спектральных характеристик источника ИК излучения (1) и облучаемого слоя воды (2)



вновь, то полупрозрачные тела характеризуются всеми четырьмя коэффициентами: поглощения, пропускания, отражения и излучения. Закон Кирхгофа в его обычной форме не применим, так как он выведен на основе теплового равновесия энергии поглощения и излучения при равенстве температур, им следует пользоваться с учетом пропускания энергии

$$J_{\text{соб}} \lambda = \alpha_{\lambda}(T) n_{\lambda}^2 J_{\text{о},\lambda}(\lambda, T), \quad (2.16)$$

где $\alpha_{\lambda}(T)$ - спектральный коэффициент поглощения поверхности для состояния термодинамического равновесия; n_{λ} - спектральный показатель преломления среды для данной длины волны; $J_{\text{о},\lambda}(\lambda, T)$ - спектральная интенсивность излучения для вакуума; $J_{\text{соб}} \lambda$ - спектральная интенсивность собственного излучения поверхности.

Процесс взаимодействия падающей энергии с полупрозрачными телами вследствие многократных внутренних отражений потока излучения сложен, поэтому значения принятых коэффициентов отражения $\rho(\lambda, T)$, пропускания $\tau(\lambda, T)$, излучения $\epsilon(\lambda, T)$ будут отличаться от измеренных. Причем кажущийся коэффициент отражения $\rho^*(\lambda, T)$ будет иметь большую величину за счет добавочной энергии, обусловленной внутренним ее отражением. Взаимосвязь кажущихся коэффициентов и принятых нормативными документами устанавливается следующими соотношениями:

кажущийся коэффициент излучения

$$\epsilon^*(\lambda, T) = [1 - \rho(\lambda, T)] [1 - \tau(\lambda, T)] / [1 - \rho(\lambda, T) \tau(\lambda, T)], \quad (2.17)$$

кажущийся коэффициент отражения

$$\rho^*(\lambda, T) = \rho(\lambda, T) \left\{ 1 + \frac{\tau^2(\lambda, T) [1 - \rho^2(\lambda, T)]}{1 - \rho^2(\lambda, T) \tau^2(\lambda, T)} \right\}, \quad (2.18)$$

кажущийся коэффициент пропускания

$$\tau^*(\lambda, T) = \tau(\lambda, T) \frac{[1 - \rho(\lambda, T)]^2}{1 - \rho^2(\lambda, T) \tau^2(\lambda, T)}. \quad (2.19)$$

Согласно законам термодинамики сумма этих коэффициентов должна быть равна единице

$$\epsilon^*(\lambda, T) + \rho^*(\lambda, T) + \tau^*(\lambda, T) = 1. \quad (2.20)$$

В общем случае задачу теплового переноса в частично прозрачных телах нужно рассматривать как трехмерную задачу, даже в случае наличия направленного потока теплового излучения. Этот процесс может значительно усложниться при наличии температурного градиента по толщине полупрозрачного материала, что вызывает дополнительные перераспределения потоков из-за теплопроводности вещества. В этом случае энергия будет излучаться не только с наружной поверхности полупрозрачного тела, но и внутренними слоями, температура которых отличается от температуры наружной поверхности. Поток, излучаемый внутренними слоями, подвержен частичному поглощению и отражению, что затрудняет расчет его величины. Поэтому излучательные характеристики полупрозрачных тел, как правило, определяются экспериментально.

2.4. ПРОХОЖДЕНИЕ ТЕПЛОвого ИЗЛУЧЕНИЯ ЧЕРЕЗ ГАЗЫ

Как известно тепловое излучение от предмета подвергается воздействию различных источников радиации атмосферы. Предметы, находящиеся вблизи, создают фоновую радиацию, которая отражается от объекта исследования. Это приводит к уменьшению контраста и ухудшению результатов измерения теплового излучения. Атмосфера так же, как и источники радиации, ослабляет излучение путем его рассеивания после прохождения через молекулы и аэрозольные вещества. В настоящее время существуют различные методы и модели для определения ослабляющего воздействия атмосферы на тепловое излучение. Пропускная способность атмосферы зависит от метеоусловий, распределения газов и твердых частиц. Зависимость состояния атмосферы от метеоусловий в значительной степени проявляется в нижних ее слоях, где содержание водяных паров, газов и твердых частиц непрерывно изменяется.

Определение пропускной способности атмосферы производится приближенно путем измерения теплового излучения в реальных условиях или на моделях. Разработаны как математические модели, так и эмпирические формулы для расчета.

Земная атмосфера состоит из многоатомных молекул метана (CH_4), воды (H_2O), углекислоты (CO_2), озона (O_3), оксида углерода (CO). Так как в приземных слоях атмосферы давление выше, то не происходит разложение этих молекул на отдельные атомы, поэтому земная атмосфера имеет не линейный, присутствующий одноатомным газам, а полосатый спектр поглощения. Поглощение излучения

Рис. 2.6. Схема рассеивания излучения молекулой

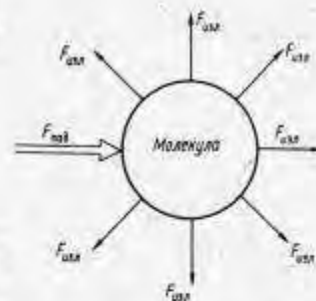
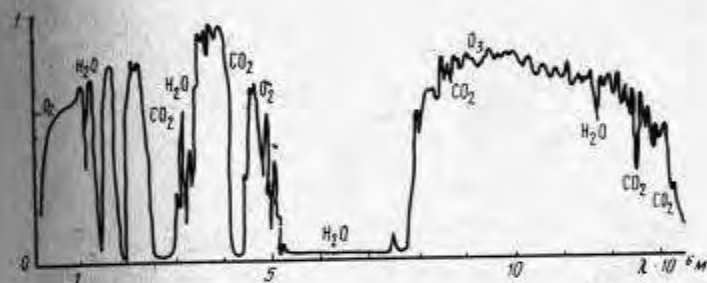


Рис. 2.7. Пропускание ИК излучения атмосферой



в атмосфере происходит за счет резонансного поглощения компонентами атмосферы. Оно наблюдается в отдельных участках спектра (полосах), когда частоты излучения совпадают с собственными частотами колебаний и вращений молекул воды, углекислого газа, озона или их частей.

Поглощенная энергия, падающая в определенном направлении потока, вновь излучается. При этом энергия распространяется во всех направлениях, в результате происходит ослабление излучательной энергии (рис. 2.6). Иной характер ослабления излучения наблюдается при рассеянии в частицах пыли и воды. Здесь ослабление увеличивается при уменьшении длины волны излучения, а при увеличении длины волны ($\lambda > 4 \cdot 10^{-6}$ м) уменьшается. Поглощение теплового излучения в значительной степени проявляется в областях с центрами, соответствующими резонансным частотам составных частей атмосферы. Так, для воды резонансная частота составляет 2,7; 3,2; 6,3 (10^{-6} м), для углекислого газа — 2,7; 4,3; 15 (10^{-6} м), озона — 4,8; 9,6; 14,2 (10^{-6} м), оксида углерода — 4,8 (10^{-6} м), метана — 3,2; 7,8 (10^{-6} м).

В диапазоне длины волны 2 — 20 (10^{-6} м) имеются так называемые окна прозрачности. Они располагаются при длине волны 3,5–5 и 8–14 (10^{-6} м (рис. 2.7)). Для данной длины волны λ и при опреде-

ленном состоянии атмосферы коэффициент пропускания атмосферы определяется законом Бугера-Ламберта-Бера

$$\tau(\lambda) = e^{-E^*(\lambda)x}, \quad (2.21)$$

где $E^*(\lambda)$ — показатель ослабления атмосферы, равный $K^*(\lambda) + \Sigma^*(\lambda)$; $[K^*(\lambda) - \text{показатель поглощения атмосферы; } \Sigma^*(\lambda) - \text{показатель рассеяния атмосферы}]$; x — расстояние между камерой и объектом.

Если какую-либо полосу пропускания исследовать спектрографом с высокой разрешающей способностью, то она окажется состоящей из сотен тысяч отдельных линий поглощения. Расположение этих линий носит случайный характер, в большей степени для воды

(H_2O) и в меньшей для углекислоты (CO_2). Все это затрудняет построение математической модели, так как необходимо определить поглощение в узких полосах, а затем произвести интегрирование. Рассмотрим влияние основных составляющих атмосферы на ослабление излучения. Поглощение излучения парами воды A_λ описывается следующей формулой:

$$A_\lambda = 1 - \frac{J_\lambda}{J_{0\lambda}} = 1 - e^{a\lambda l}, \quad (2.22)$$

где $J_\lambda, J_{0\lambda}$ — интенсивное спектральное пропускание потока излучения до и после прохождения слоя; $a\lambda$ — коэффициент поглощения; l — содержание воды в атмосфере, выраженное в сантиметрах осадочной воды, которая содержится в столбе атмосферы 10^{-2} м², и длиной, равной длине пути луча.

Величину l определяют по абсолютной влажности или количеству водяных паров в воздухе с учетом его относительной влажности и температуры.

Экспоненциальный закон действителен только для монохроматического потока или для небольшого интервала длины волны $\Delta\lambda$. На поглощение излучения парами влияют как температура, так и давление.

При оценке зависимости поглощения от давления P следует вводить поправочный коэффициент H , определяемый по формуле Эльзассера

$$H = \sqrt{P/P_0}, \text{ т.е. } A_H = HA_{0\lambda}, \quad (2.23)$$

где P — атмосферное давление на данной высоте H ; P_0 — атмосферное давление на уровне моря; A_H — показатель поглощения на высоте H ; $A_{0\lambda}$ — показатель поглощения на уровне моря.

Поскольку содержание водяных паров в атмосфере зависит от метеорологических условий, то при расчетах принимают их средние значения для каждой конкретной местности. Средние значения показателей метеорологических условий определяются путем статистической обработки метеорологических данных за длительный промежуток времени.

Другим не менее важным составляющим атмосферы является углекислый газ. Содержание его в атмосфере весьма незначительно

(0,029%) и практически не изменяется с удалением от земной поверхности и, поэтому ослабление излучения углекислым газом в меньшей степени зависит от метеусловий, хотя с увеличением давления полосы поглощения излучения углекислым газом расширяются, что ведет к увеличению интенсивности поглощения излучения газом. В этом случае также вводится поправочный коэффициент H .

Рассеяние излучения атмосферой зависит не от собственной частоты колебания молекул, а от размеров частиц и скопления молекул. Например, для частиц, размер которых значительно меньше длины волны излучения, справедлив закон Релея

$$J_s/J_0 = KV^2\lambda^{-4}, \quad (2.24)$$

где J_s, J_0 — интенсивность рассеянного и падающего излучения; K — постоянный коэффициент, V — исследуемый объем.

Следовательно, видимое излучение рассеивается больше, ИК — меньше, о чем свидетельствует наличие голубого неба. Закон Релея хорошо описывает молекулярное рассеивание и справедлив лишь для чистого воздуха. Если размеры частиц больше или соизмеримы с длиной волны излучения, то рассеивание практически не зависит от длины волны, поэтому следует оценить приближенно типичные случаи состояния атмосферы. Например, дымка представляет слабое помутнение воздуха у земной поверхности, вызываемое рассеиванием света на взвешенных мельчайших капельках воды или кристалликах льда. Она придает воздуху голубовато-серый оттенок. Видимость при дымке в отличие от тумана более 1 км. Дымка может наблюдаться на высоте от 0 до $7 \cdot 10^3$ м и состоит из пыли, капелек воды и твердых частиц.

Туман представляет помутнение воздуха, вызванное скоплением продуктов конденсации (капель или кристаллов, или тех и других вместе), взвешенных в воздухе непосредственно над поверхностью земли (горизонтальная видимость менее 1 км). Туман содержит капельки воды от 0,1 до $10 \cdot 10^{-6}$ м. Задымленный туман (для промышленных районов) наблюдается на высоте от десятков метров до нескольких километров, состоит из продуктов химического производства, размер частиц как и у дымки.

Дымка и задымленный туман рассеивают и поглощают излучения, но с преобладанием рассеивания. Следует отметить, что для обнаружения цели в слабых туманах лучше использовать инфракрасную, чем видимую область излучения.

В отличие от тумана облака и дождь состоят из капелек воды больших размеров, поэтому поглощение и рассеивание излучения облаками и дождем очень сильно. Исключение составляют перистые и чечевидные облака, которые состоят из частичек льда и имеют малый показатель ослабления излучения.

Результаты исследования показывают, что сухой воздух в средних широтах обладает большим поглощением излучения в диапазоне $(8-12) \cdot 10^{-6}$ м, чем в диапазоне $(3-5) \cdot 10^{-6}$ м из-за наличия углекислого газа.

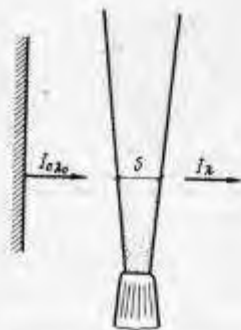


Рис.2.8. Схема взаимодействия излучения с газовой струей

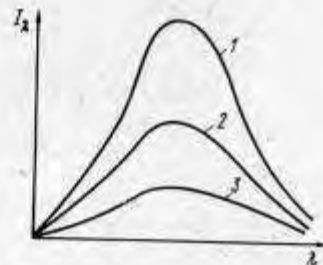


Рис.2.9. Зависимость поглощения излучения от размера газовой струи
 $1 - J_{0\lambda}$; $2 - J_{\lambda}$ при S_1 ; $3 - J_{\lambda}$ при $S_2 (S_1 < S_2)$

В чистой тропической зоне, как правило, незначительно влияние промышленных отходов, но влажность атмосферы выше, чем в средней полосе, поэтому в этих районах предпочтительнее диапазон (8–12) 10^{-6} м. Однако необходимо обеспечить оптимальное соотношение коэффициента пропускания и тепловой чувствительности системы. Исследованиями установлено, что они имеют лучшие соотношения в диапазоне (8–12) 10^{-6} м.

Все изложенное относится и к газовым средам. Однако при наличии газовых потоков и сред может наблюдаться отклонение от закона Бугера в следующих случаях:

1. Когда возбуждаемые излучением молекулы вещества не успевают возвращаться в исходное состояние.
2. Когда показатель поглощения Kx слоя газа очень высокий, поток быстро ослабляется. Так, например, при $Kx = 2 \tau = 15\%$, при $Kx = 4 \tau = 2\%$.

Среду, коэффициент ослабления которой равен 2%, можно назвать черной, так как она поглощает практически всю энергию потока. Все это может быть продемонстрировано на следующем примере (рис. 2.8). Из сопла выходит газовая струя, поперечное сечение которой равно x . Падающий поток $J_{0\lambda}$, проходя через газовую струю, ослабляется. Характер ослабления зависит от размеров газовой струи (рис. 2.9). В практике не встречаются газовые среды, где поглощение или пропускание излучения не зависело бы от длины волны, т.е. их нельзя считать серыми телами. К серым телам могут относиться только газы со взвешенными твердыми частицами золы после продуктов сгорания технологического сырья, когда размеры отдельных частиц больше длины волны излучения.

Концентрации газовых частиц и молекул изменяются в зависимости от температуры и скорости струи. Если температура струи $T_{стр}$ и окружающей среды T_c не равны $T_{стр} \neq T_c$, то размеры газового потока можно привести к эквивалентной струе с $T_{стр} = T_c$

$$x' = x (T_{стр}/T_c), \quad (2.25)$$

где x' , x — эквивалентные и действительные размеры газового потока.

Еще с одной особенностью газовых сред мы встречаемся при исследовании газовых потоков, образующихся при сжигании топлива. При этом в факеле происходит обильное выделение мелких частиц сажевого углерода. Поскольку неизвестен сам механизм образования сажевых частиц, поэтому неизвестны и их размеры и начальные концентрации, а следовательно, и их поглощающая способность.

2.5. ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ

Сравнительно быстрое развитие в последние годы ИК техники объясняется тем, что все тела, которые имеют температуру выше абсолютного нуля, излучают ИК энергию; исследуемые поверхности не подвергаются какому-либо воздействию; конструкции их просты, надежны и т.д.

Как известно, контроль температурных полей можно производить методом параллельного или последовательного (сканирования) получения информации. При параллельном съеме информации осуществляется одновременный контроль температуры в различных точках объекта. При последовательном — контрольные данные температуры поступают последовательно от одной точки объекта к другой. И тот и другой методы съема информации применяются при оптико-электронном контроле и измерении температурных полей.

Примерами оптико-электронных систем с параллельным съемом информации являются электронно-оптические преобразователи эвапорографы; эджеографы: устройства, использующие жидкие кристаллы и фоточувствительные пленки; устройства с набором световодов и фотоприемников и т.п. Они в основном используются только для визуализации температурных и прежде всего низкотемпературных полей, в тех случаях, когда не требуется проведения точных измерений.

В настоящее время из оптико-электронных систем получили распространение только жидкокристаллические пленки и приборы, основанные на их использовании.

В практике наиболее широкое распространение получили сканирующие системы. Они более универсальны, приспособлены к автоматизации и имеют хорошие метрологические характеристики. Сканирующие системы инфракрасного диапазона излучения получили специальное название — тепловизоры. Тепловизорам как измерительным приборам присущи метрологические (диапазон измеряемых температур, точность измерения, быстродействие, разрешающая способность) и технические характеристики [вид траектории сканирования, период сканирования, показатели мгновенного и полного визирования, или углы мгновенного и полного визирования (рис. 2.10)].

В настоящее время сканирующий контроль температурных и вообще оптических полей осуществляется двумя типами систем,

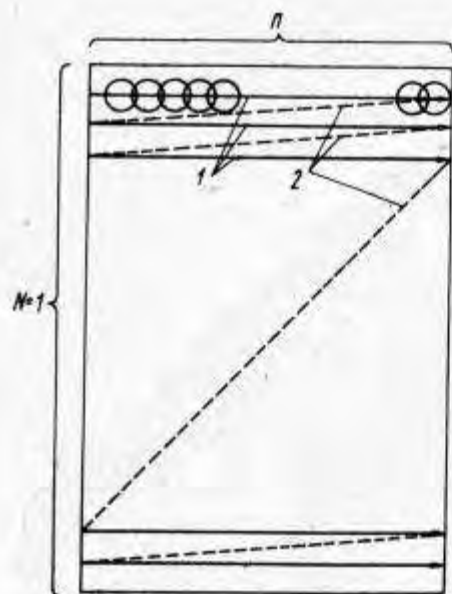


Рис.2.10. Схема сканирования теплового изображения
1 – прямой рабочий ход развертки; 2 – обратный ход развертки (N – количество строк в кадре; n – количество элементов в строке)

которые обладают постоянством угловых или линейных параметров мгновенного визирования. В системах первого типа постоянным является угол мгновенного визирования при всех положениях оптической оси визирования. В системах второго типа постоянной является разрешающая способность по всей плоскости изображения входного объекта системы. Например, если поверхность объекта представляет часть вогнутой сферы (первый случай) и плоскость (второй случай), разрешающая способность объектов будет одинакова. К основным техническим характеристикам тепловизионных систем относятся: сканирующее пятно, угловые параметры мгновенного и полного визирования, разрешающая способность, быстродействие системы.

Сканирующее пятно – площадь на поверхности исследуемого объекта, средняя температура которой фиксируется на экране тепловизора в виде точки. Размеры и форма сканирующего пятна в тепловизорах определяются способом сканирования, типом фотоприемника, аппаратурными и полевыми диафрагмами, характеристиками усилительно-преобразовательного тракта и др.

Сканирующее пятно имеет круглую, иногда прямоугонную или крестообразную форму. Системы, в которых размеры сканирующего пятна неодинаковы в различных направлениях, условно называют неизотропными. Сканирующее пятно удобно оценивать в двух направлениях: вдоль вектора скорости (dV) и перпендикулярно вектору скорости (dV_1). В неизотропных системах $dV \neq dV_1$.

Траектория сканирования L – это последовательность точек

$[x_0(t), y_0(t)]$ на плоскости, занимаемых световым лучем при формировании изображения. Траектория сканирования может образовывать непрерывную линию, набор линий или дискретное множество точек. Задание траектории сканирования связано с заданием множества точек на поверхности объекта осматриваемых измерительной системой в определенной последовательности.

Большинство сканирующих систем осуществляет периодически повторяющееся в пространстве сканирование поля и имеет постоянную траекторию сканирования в процессе работы.

Период сканирования поля τ_k , который имеет место при регулярном сканировании, представляет время, в течение которого сканирующее пятно проходит всю траекторию сканирования и возвращается в начальную точку. При равномерном непрерывном движении сканирующего пятна для невозвратных траекторий $\tau_k = L/V$, для возвратных $\tau_k = 2L/V$. Построчную траекторию иногда характеризуют периодом строки, т.е. временем просмотра одной строки и возвращения в начало следующей строки.

Показатель мгновенного визирования P определяется отношением линейного размера сканирующего пятна к расстоянию до картинной поверхности $P = d/x$. Для неизотропных систем имеются два значения показателя мгновенного визирования $P_x = dx/x$ и $P_y = dy/x$, где dx , dy – линейные размеры сканирующего пятна в ортогональных направлениях.

Показатель полного визирования P определяется отношением длины траектории сканирования к расстоянию до картинной поверхности

$$P = (L + d)/x.$$

Эти параметры инвариантны к расстоянию до картинной поверхности, т.е.

$$P = d_1/x_1 = d_2/x_2 = d/x$$

и

$$P = L_{\text{тр}}/d_1/x_1 = L_2 + d_2/x_2 = L + d/x. \quad (2.26)$$

Некоторые системы удобнее оценивать угловыми параметрами мгновенного и полного визирования. Геометрическая разрешающая способность тепловизоров (Γ) в общем случае может быть определена как отношение показателя полного визирования к показателю мгновенного визирования $\Gamma = (L_{\text{тр}} + d)/d$. Это есть полная линейная разрешающая способность, определенная по всей длине сканирования. Для неизотропных систем полную разрешающую способность целесообразно определять по размеру сканирующего пятна, измеренному вдоль траектории сканирования $\Gamma_V = L_{\text{тр}} + d_V/d_V$. Системы, в которых удобнее определять угловые параметры, полную разрешающую способность оценивают по углам полного и мгновенного визирования, измеренным в плоскости траектории или пространстве.

Одним из важнейших параметров тепловизоров, как и любой контрольно-измерительной системы, является быстродействие системы, т.е. быстродействие обработки информации. Как уже отмечалось,

таким параметром является период сканирования, который характеризует интегральное быстродействие системы, т.е. время, необходимое для того, чтобы провести цикл исследования и быть готовым к следующему. Однако при использовании системы не для полного, а для частичного сканирования, важно оценить объект путем быстрой локальной обработки информации в точке.

Быстродействие обработки информации в точке $\tau_{эл}$ определяется временем в течение которого система контролирует температуру одного элемента поля, т.е. временем перемещения сканирующего пятна на расстояние, равное размеру сканирующего пятна, $dV = \tau_{эл} = dV/V$.

Инфракрасная камера тепловизора производит развертку исследуемого участка и фокусирует инфракрасное излучение на детекторе, который преобразует инфракрасный сигнал в электрический. После усиления этот сигнал регулирует интенсивность электронного пучка в трубе телевизионного устройства. Пучок разворачивается на экране и дает изображение, наблюдаемое камерой. На экране возникает тепловая картина, на которой более светлые участки соответствуют поверхностям предмета с высокими температурами. Высокая частота развертки позволяет получить на экране реальную наглядную тепловую картину. Изображение тепловой картины возможно не только на экране электронно-лучевой трубки, но и на поляризационной пленке, электрохимической бумаге.

Первые сообщения о тепловизионных системах появились в 1957 г. В настоящее время в Советском Союзе и за рубежом эксплуатируются примерно два десятка различных тепловизионных систем. Приведем характеристики тепловизоров, получивших распространение в последнее время в отечественной практике.

Тепловизор "Рубин". Прибор предназначен для исследования квазистационарных температурных полей. Состоит из двух отдельных блоков: инфракрасной камеры, смонтированной на штативе, и блока регистрации с записью изображения на электрохимической бумаге шириной 125 мм. Диапазон регистрируемых температур от -30°C до 200°C . Порог чувствительности при $+25^{\circ}\text{C}$ составляет $0,05^{\circ}\text{C}$. Температурный диапазон и чувствительность прибора вполне удовлетворительны с точки зрения его использования для термографирования строительных конструкций. Однако большие габариты и масса прибора (215 кг), а также значительная потребляемая мощность (200 Вт) делают его практически непригодным для натуральных обследований зданий. Отсутствие наглядного изображения, даваемого электронно-лучевой трубкой, создает дополнительные неудобства при пользовании прибором. Время развертки и записи на бумагу одного кадра составляет 1 мин. На рис. 2.11 приведена для примера оптическая схема тепловизора "Рубин".

Тепловизор конструкции ВЭИ имени В.И.Ленина. Прибор предназначен для визуального наблюдения и фотографирования тепловых полей, преобразуемых в яркие полутоновые изображения на экране электронно-лучевой трубки. Он состоит из: передающей камеры, блока воспроизведения изображения, блока питания и тубуса

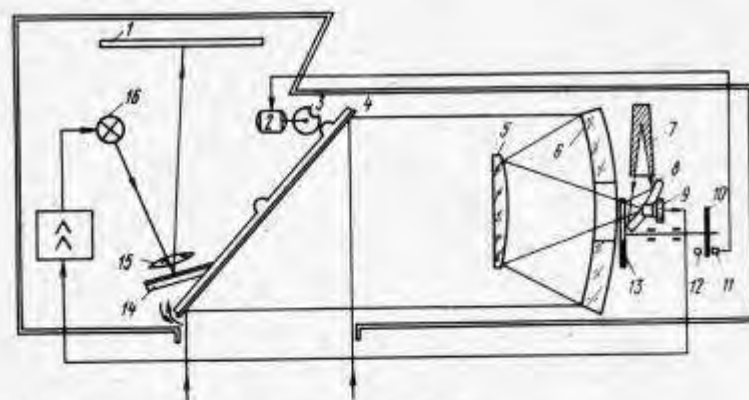


Рис. 2.11. Оптическая схема тепловизора "Рубин"

1 - световоспринимающий экран; 2 - синхронный двигатель; 3 - кулачковый привод; 4 - сканирующее зеркало; 5 - сферический контроотражатель; 6 - сферическое зеркало; 7 - эталонный источник излучения; 8 - фокусирующее зеркало; 9 - приемник излучения; 10 - механический прерыватель; 11 - фотоэлемент; 12 - светодиод; 13 - аттенуатор; 14 - отклоняющее зеркало; 15 - линза; 16 - источник света

с фотоаппаратом. Прибор имеет чувствительность $0,4^{\circ}\text{C}$ и диапазон регистрируемых температур от -20°C до 150°C , что примерно соответствует аналогичным характеристикам "Рубина". Габариты и вес (общий вес 38 кг) делают его более транспортабельным и только отсутствие автономного питания затрудняет использование прибора для натуральных обследований. Однако он может с успехом использоваться для термографирования строительных конструкций в климатических камерах, на испытательных стендах и т.д.

Тепловизор БТВ. Предназначен для визуального наблюдения на экране электронно-лучевой трубки температурных полей на поверхности слабо нагретых объектов и исследования нестационарных тепловых процессов.

Прибор состоит из двух отдельных блоков: инфракрасной камеры и видеоконтрольного устройства. Регистрация изображения осуществляется путем фотографирования с экрана электронно-лучевой трубки. В температурном диапазоне $-30^{\circ}\text{C} - 1200^{\circ}\text{C}$ прибор имеет температурную разрешающую способность $0,4^{\circ}\text{C}$. Его вес 48,5 кг, потребляемая мощность 200 Вт.

В СССР разработаны еще несколько марок тепловизоров, но они либо еще не вышли из стадии опытных образцов, либо их параметры не отвечают требованиям, необходимым для обследования строительных конструкций. По этой причине они не рассматриваются в данном обзоре.

Лидирующее положение в области разработки тепловизионной техники за рубежом занимают Швеция, США и Япония. Примером тепловизионной аппаратуры, выпускаемой Японией, может служить

"Инфраглаз", разработанный компанией "Фуджицу Лимитед". Прибор имеет температурную разрешающую способность $0,1^{\circ}\text{C}$. Диапазон измеряемых температур от 0° до 50°C . В качестве устройства преобразования применена электронно-лучевая трубка. В устройстве предусмотрено выделение сигнала одной строки на отдельном индикаторе. Кроме черно-белого, в приборе предусмотрено еще и цветное видеоконтрольное устройство, имеющее десять цветовых градаций. На нем также возможно шестикратное увеличение какой-либо выбранной зоны. Кроме того, "Инфра-глаз" снабжен процессором обработки данных и цифровым печатающим устройством. Это стационарная тепловизионная система не предназначена для натуральных обследований.

Тепловизор фирмы "Джейол Лимитед" (Япония) имеет температурный диапазон от -30° до 2000°C и три поддиапазона. Его чувствительность при температуре 35°C составляет $0,2^{\circ}\text{C}$.

Тепловая картина воспроизводится с помощью электронно-лучевой трубки, на экране которой можно отобразить температурный профиль изучаемого объекта.

Тепловизор "Сирис" фирмы "Локхид" (США) имеет чувствительность $0,2^{\circ}\text{C}$ в диапазоне температур от -20° до 200°C . Тепловая картина воспроизводится на экране электронно-лучевой трубки, а также с помощью самонисца.

Одной из ведущих зарубежных фирм, занимающейся разработкой и изготовлением тепловизионных систем, является фирма АГА (Швеция). Этой фирмой разработана целая серия тепловизоров различных систем АГА-650, АГА-680, АГА-750, АГА-720, АГА-782, АГА-780, а также инфракрасный радиометр и "Термопонт-80" (рис. 2.12) и линейное сканирующее устройство "Термопрофиль-5". Все тепловизоры, выпускаемые данной фирмой, имеют общие основные технические решения. Оптико-механическая схема преобразования инфракрасного излучения одинаковая, за исключением более ранней модели тепловизора АГА-650. В передающей камере системы АГА-650 осуществляется оптико-механическое сканирование поля. Траектория сканирования — построчная. Кадровая развертка изображения выполняется с помощью колеблющегося плоского зеркала, а строчная — с помощью четырехгранной призмы, которая, вращаясь со скоростью 400 об/с, дает развертку 1600 строк в секунду. Проходящее через призму инфракрасное излучение фокусируется на приемнике излучения из антимолибда индия, охлаждаемого жидким азотом. Спектральный диапазон принимаемых излучений $2-5,6 \cdot 10^{-6}$ м.

Система имеет следующие параметры: траектория сканирования — построчная (100 строк); период сканирования — $1/16$ с; полная разрешающая способность — 14 000 элементов; разрешающая способность в строке — 140 элементов; угол мгновенного визирования — $1,3$ мрад; угол полного визирования — $10 \times 10^{\circ}$; диапазон измеряемых температур — от -30° до 2000°C ; поддиапазоны измеряемых температур от -30° до 850°C с 10-ю ступенями и 7-ю переключателями; $850-2000^{\circ}\text{C}$ — при использовании 8 светофильтров;

Рис.2.12. Тепловизор АГА-780



минимально различима — разность температур — $0,2^{\circ}\text{C}$ (при температуре объекта 30°C).

Передающая камера имеет сменные объективы с углами полного визирования $25 \times 25^{\circ}$ и $45 \times 45^{\circ}$. Объект контроля может располагаться на расстоянии от 0,95 м до бесконечности, фокусировка — дистанционная (электродвигателем) и ручная. Камера работает при окружающей температуре от -15° до 55°C , ее габариты $200 \times 240 \times 550$ мм, масса — 13,5 кг. В блоке воспроизведения осуществляется синхронное отражение контролируемого температурного поля на экране размером 90×90 мм. Синхронизация развертки электронного луча в ЭЛТ производится от синхроимпульсов с 4-го и 5-го блоков передающей камеры. Видеосигнал приемника излучения модулирует яркость изображения на ЭЛТ. Картина теплового поля может быть черно-белой или цветной.

Оптика сканирующего устройства других систем тепловизоров представлена на рис. 2.13. В этих системах сканирование по строке и кадру осуществляется с помощью пропускающих вращающихся призм, что позволяет осуществить менее габаритную компоновку всей системы.

Объектив, состоящий из трех кремневых линз, обеспечивает фокусировку изображения объекта на расстоянии от 0,2 до 3,3 м. В комплект тепловизоров входит набор сменных объективов с углами обзора $3,5$; 7 ; 12 и 40° . Характеристики объективов приведены в табл. 2.3.

При необходимости уменьшения наименьшего фокусного расстояния используются специальные удлинительные кольца. Оптико-механическое сканирование осуществляется с помощью двух восьмигранных пропускающих призм, приводимых во вращение отдельными скоростными моторами (рис. 2.14). Скорость враще-

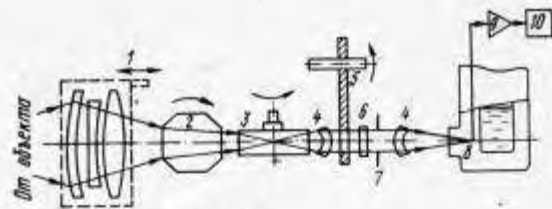


Рис.2.13. Схема тепловизора АГА-780

1 - объектив; 2, 3 - призмы кадрового и строчного сканирования; 4 - конденсаторные линзы; 5 - прерыватели; 6 - светофильтр; 7 - диаграмма; 8 - приемник с сосудом Дьюара; 9 - предусилитель; 10 - видеоконтрольное устройство

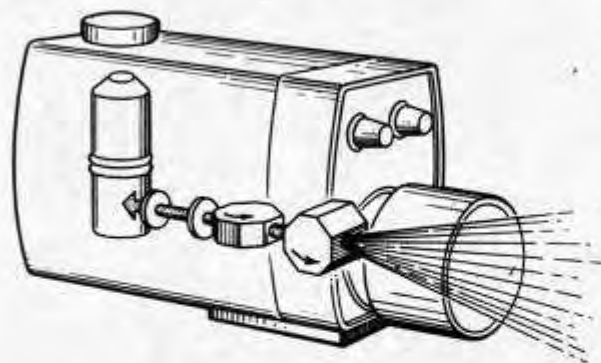


Рис.2.14. Оптическая схема тепловизора фирмы АГА

ния обоих моторов строго синхронизирована. Для этой цели имеется специальный блок синхронизации, который соединен с блоками электронной развертки в видеоконтрольном устройстве (ВКУ).

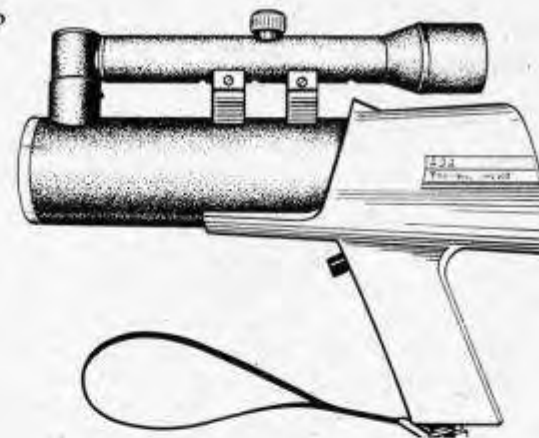
Таблица 2.3. Характеристики объективов, используемых в тепловизорах фирмы АГА

Угол обзора объектива, град.	Наименьший фокус, м	Фокусное расстояние, мм	Геометрическая разрешающая способность, мрад*
3,5	3,3	191	0,5
7	1,0	99	1,1
12	0,7	52	1,9
20	0,5	33	3,4
40	0,2	17	5,8

* Геометрическая разрешающая способность, измеренная как чувствительность на цель при контрасте 50%.

После сканирования с помощью призм параллельный пучок лучей через специальную линзу преобразуется в сходящийся и фокуси-

Рис.2.15. Прибор "Термопонт-80"



руется на чувствительной площадке приемника излучения. В качестве приемника излучения используется фотогальванический полупроводниковый детектор на основе соединения индия и сурьмы (Sn Sb). Приемник излучения охлаждается жидким азотом.

Нижний предел измеряемых температур таких приборов равен -20°C . Верхний предел зависит от используемых объективов, диафрагм и фильтров, которые обеспечивают определенную величину относительного отверстия оптической системы. При изменении относительного отверстия системы от 1:1,8 до 1:20 предел изменения температуры может изменяться от 190° до 850°C . В системе АГА-780 имеется автономное устройство для записи изображения в цифровой форме и передачи данных в ЭВМ. Фирмой АГА выпускается также не сканирующий оптический прибор, предназначенный для измерения температур поверхностей "Термопонт-80" (рис. 2.15). Прибор "Термопонт-80" предназначен для безконтактного измерения температуры поверхности объекта. Прибор имеет батарейное питание и поэтому полностью портативный и автономный. Он, как и другие описываемые приборы, основан на измерении плотности электромагнитной энергии в инфракрасной области спектра, излучаемой объектом, специальный встроенный микропроцессор на основе зарегистрированных данных производит операции расчета температуры поверхности, значения которой высвечиваются на экране с помощью жидких кристаллов. Таким образом, может быть определена непосредственно температура поверхности объекта, минимальные, максимальные или средние значения температур, а также разность между максимальной и минимальной температурой поверхности, полученной за предельный период измерений в одной точке, либо между разными точками поверхности. При этом могут быть учтены как измерения температур одного и того же участка поверхности в течение определенного периода измерения, так и последовательного измерения температуры в различных участках

поверхности путем ее ручного сканирования. Диапазон измеряемых температур прибора "Термопонт-80" находится в пределах от -30° до 1370°C . Спектральный диапазон чувствительности — от 8 до $14 \cdot 10^{-6}$ м. Использование специальных спектральных фильтров способствует снижению погрешности при определении температуры, которая вызывается влиянием солнечного или какого-либо другого теплового излучения сторонних источников, а также расстоянием до объекта и изменением влажности воздуха. Угол зрения 2° , разрешающая способность прибора при температуре $\pm 1^{\circ}\text{C}$.

Для расчета измеренной температуры поверхности по специальной программе в микропроцессор должны быть введены значения излучательной способности исследуемой поверхности и средней радиационной температуры теплового фона. С помощью прибора также могут быть произведены изменения излучателей способности поверхности материалов, если известна их температура.

Научно-исследовательским институтом строительной физики (НИИСФ) Госстроя СССР и Московским институтом радиоэлектроники и автоматики (МИРЭА) Минвуза РСФСР разработан тепловизор АТП-44М для применения в строительстве. Опытные образцы тепловизора изготовлены в Центральном особом конструкторском бюро Академии медицинских наук (ЦКБ АМН) СССР (рис. 2.16). Достоинствами прибора являются: технологичность, относительно невысокая стоимость и простота эксплуатации при сохранении достаточно хороших параметров. Эти положительные качества были достигнуты благодаря ряду конструктивных особенностей, к числу которых следует отнести: наличие цифровой памяти, обеспечивающей принципиальную возможность цифровой обработки видеосигнала и воспроизведение тепловых изображений в нормальном телевизионном стандарте в черно-белом и цветном вариантах; автоматическую стабилизацию уровня "черного" по любой температурной точке изображения, выбираемой оператором; введение в изображение на экране ВКУ шкалы изотерм в виде полутонного или цветного клина, шкалы уровня температур, знаковой служебной информации, что повышает информативность фотографической регистрации; наличие двух независимо регулируемых АЧТ, предназначенных для калибровки и проверки прибора в процессе эксплуатации; возможность записи тепловых изображений на серийный видеомagneтoфон.

Структурная схема тепловизора АТП-44М показана на рис. 2.17. Прибор состоит из приемной камеры, электронного блока и двух электрически нагреваемых АЧТ (на схеме не показаны). В приемной камере используется оптико-механическое сканирующее устройство, обеспечивающее формирование теплового изображения. Выходными сигналами камеры являются видеосигнал и сигналы с датчиков положения сканирующего узла. Коэффициент усиления изменяется ступенчато, причем ступени выбраны таким образом, что их значения соответствуют диапазонам температур, выносимых на индикатор. Полученный видеосигнал преобразуется в четырехразрядный двоичный код аналого-цифровым преобразователем (АЦП). Ввод кода данных в запоминающее устройство (ЗУ) и их адресация выпол-

Рис.2.16. Тепловизор "Перспектива" (АТП-44)

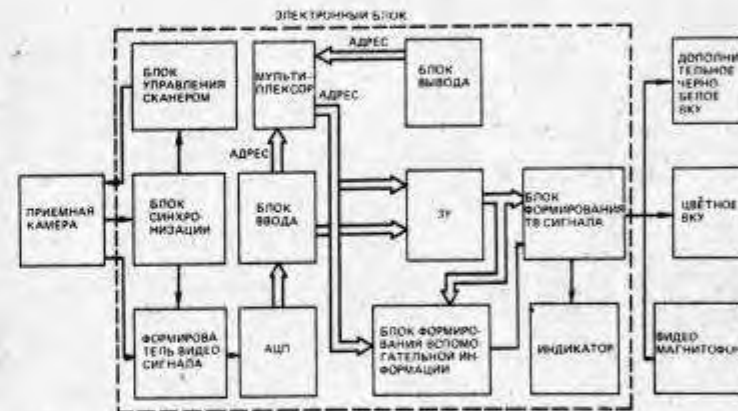


Рис.2.17. Структурная схема тепловизора АТП-44М

няются блоком ввода. Запись и считывание данных происходят независимо друг от друга. Ввод информации в ЗУ осуществляется во время обратного хода строчной телевизионной развертки, а вывод — во время ее прямого хода, при этом адрес для ЗУ переключается мультиплексором. Адрес считывания вырабатывает блок вывода. Этот же блок вырабатывает импульсы синхронизации для всех частей прибора. Блок формирования вспомогательной информации вырабатывает код полутонной шкалы изотерм, шкалы уровня температур, знаковой информации (строка цифр из 15 знаков), выбираемой оператором с помощью клавиатуры и маркера (курсора). Преобразование сигнала приемной камеры в телевизионный стандарт осуществляется блоком формирования телевизионного сигнала, на

выходе которого образуется черно-белый телевизионный сигнал с синхроимпульсами для подачи на индикатор и три сигнала цветности для вывода на цветное ВКУ. Предусмотрена также возможность подключения к электронному блоку дополнительного черно-белого ВКУ и видеомагнитофона. Регистрация изображения теплового поля объекта осуществляется фотографированием с экрана индикатора специальным фоторегистратором.

Большое внимание уделено проработке конструкции и внешнего вида тепловизора. В результате получен мобильный, легко транспортируемый прибор, обладающий современным видом, с удобным расположением органов управления. Электронный блок и камера устанавливаются на колесной тележке, снабженной штативной головкой. Тележка имеет емкости, в которые могут быть уложены и легко закреплены в них приемная камера, штативная головка и кабели. Положение электронного блока остается неизменным во время работы с прибором и во время транспортирования. Конструкция тележки предусматривает перевозку прибора на различных видах транспорта.

Техническая характеристика тепловизора АТН-44М

Температурная чувствительность при 25°C	не ниже 0,2°C
Температурный диапазон, °C	3; 6; 12; 24
Угол зрения, град.	12x12
Диапазон фокусировки, м	0,75-30
Время формирования одного кадра теплового изображения в режимах, с:	
записи	2,5
воспроизведения	1/25 (телевизионный стандарт)
Количество строк на индикаторе	256
Количество элементов разложения в строке	128
Объем памяти, Кбайт	64
Габариты, мм:	
приемной камеры	540x168x335
электронного блока	470x520x220
Масса, кг:	
приемной камеры	не более 12
электронного блока	" " 17
Потребляемая мощность, Вт	" " 100

Специализированная тепловизионная система "Термоконтроль". Тепловизионная система измерения и контроля качества в строительстве "Термоконтроль" была разработана институтом технологии и механизации (ИТМ) Академии строительства ГДР и Техническим университетом г. Дрездена для бесконтактного анализа медленно изменяющихся температурных полей.

Система выполнена в 2-х вариантах:

мобильный вариант, предназначенный для измерения и регистрации данных на месте исследования в натуральных условиях; стационарный вариант для проведения лабораторных исследований и анализа полученных на магнитной ленте данных с подключением дополнительных устройств.

Тепловизор состоит из следующих основных блоков: приемной

камеры, электронного блока, блока питания и черно-белого монитора. Конструкция построена по модульному принципу, что дает возможность расширять основной вариант системы в соответствии с предъявляемыми требованиями к ней. Предполагается подключение следующих дополнительных устройств, часть из которых находится в стадии разработки: черно-белый и цветной телевизор; рельефное записывающее устройство, аналоговый видеомагнитофон, цифровой кассетный магнитофон, мозаичное печатающее устройство.

Техническая характеристика тепловизора "Термоконтроль"

Чувствительность при 0°C	0,2
Поле обзора, град.	3,6x6; 14x24; 28x12
Расстояние до объекта, м	3
Наклонение поля обзора к горизонтالي, град.	от -120 до 90
Продолжительность строчного считывания, с	2
Время формирования изображения, с	2,56
Изотермы	измеряющие или постоянные
Шкала серых тонов	16 градаций
Тепловизионный сигнал, В	1
Сопротивление, Ом	75
Напряжение питания, В	220
Время непрерывной работы, ч	2

Развертка поля обзора осуществляется плоским зеркалом. Максимальное поле обзора состоит из 128 строк по 128 точек, кроме того, может быть получено обзорное поле в поперечном формате из 32 строк (среднее поле). Тепловое излучение направляется зеркальным объективом на инфракрасный детектор. Детектор охлаждается жидким азотом. В электронном блоке происходит управление приемной камерой и усиление сигнала в 10^4 раз. Сигнал дигитализируется 6-ю битами и запоминается в накопителе промежуточного изображения, который создает из отдельных измеряемых величин построение целое изображение с последующим воспроизведением на черно-белом или цветном телевизоре. В качестве накопителя изображения используются статические RAM типа И202 с произвольной выборкой. При этом в качестве ячеек памяти используются триггеры, которые активируются через адресные линии и содержание запоминающего устройства.

Ширина и уровень измерительного диапазона могут выбираться. В качестве индикаторов переключения используется шкала светодиодов. Электронные средства облегчают интерпретацию и анализ термограмм путем выборочного введения изотермы, измерения изотермической площади, инвертирования изображения.

Кроме фотографирования измеряемого объекта в инфракрасном диапазоне, возможно его фотографирование в видимом свете. Сравнение обоих геометрически точно совпадающих изображений очень облегчает интерпретацию термограмм.

Рельефно-профильное запоминающее устройство состоит из пишущего механизма ДСК-3 с электронными блоками. Формат поля зрения 5:3 позволяет геометрически правильно на мозаично-печа-

тающем устройстве "Роботрон-1156" воспроизводит термограмму, накопленную в цифровой форме из 128x128 знаков в виде серого изображения.

Поскольку печатающее устройство работает только в стационарных условиях, в настоящее время для записи данных на месте проведения обследований разрабатывается устройство записи на кассетный магнитофон "Роботрон-1250". Термограмма, преобразованная в цифровую форму и записанная на месте с подключением к инфракрасному прибору, дает лучшие предпосылки для последующего обширного количественного анализа. Благодаря преобразованию в цифровую форму, исключается искажение изображений в результате потери информации как при аналоговой видеозаписи. Термограммы, представленные в цифровой форме записи на магнитную ленту дают удобный доступ к вычислительным системам и к последующему анализу изображения. Кроме того, можно без каких-либо проблем создавать архивы термограмм, воспроизводить и тиражировать изображение.

С помощью этой системы можно записывать последовательность изображений, а также динамические процессы. Теоретический предел накопления изображений составляет 800. Он ограничен только установленным в регистраторе буферным запоминающим устройством (ЗУ). Применяемый в настоящее время вариант позволяет запоминать 12 изображений.

База оборудования системы анализа изображения с помощью ЭВМ представляет специальную вычислительную систему на основе микро-ЭВМ К-1520 Роботрон. Соответственно целевой установки были установлены дополнительные блоки и системы, которые входят в состав ЭВМ или были специально разработаны. Построенная таким образом система позволяет проводить широкую и качественно высокую обработку термограмм. В состав системы входят: центральный вычислительный блок; микро-ЭВМ К-1520 Роботрон с запоминающим устройством; клавиатура и терминал для коммуникации; устройство считывания с перфоленты для ввода программ и различного вида информации; ленточный перфоратор для вывода на перфорацию программ и различных данных; блок печати (печатающее устройство) для распечатки программ, термоизображений и другой информации; блок магнитной ленты для ввода и вывода программ, термограмм, данных; система построения изображений со специальным терминалом для передачи и воспроизведения различного рода термограмм.

Порядок анализа термограмм следующий. Запись термограмм производится на кассету, которая вводится через блок магнитной ленты в вычислительную систему. Затем производится обработка и анализ термограмм. По окончании анализа можно получить сведения о результатах переработки термограмм в форме распечатки данных на печатающем устройстве. Далее можно получить черно-белые или цветные фотографии с экрана дисплея. В процессе обработки и анализа термограмм выполняются следующие операции.

Краевая корректура изображения. На этом этапе исправляются возможные ошибки, которые возникают при хранении на месте или при записи в системе. Это относится к смещению строк изображения, которое, например, может возникнуть из-за потери отдельных точек в строке.

Наложение изображений. В этом случае общее термоизображение связано с имеющимися в системе через среднее значение. Таким образом можно выравнивать статистические колебания содержания изображений.

Обработка частей изображений. На этом этапе для последующего анализа выделяется нужный участок (зона) изображения. При необходимости могут выполняться такие операции как:

- квантование и счет изотермических поверхностей;
- получение дискретных изотермических поверхностей на термограмме, соответствующих определенным интервалам температур;
- вычисление температур и теплофизических величин в соответствии с заданной программой;
- распечатка термограмм;
- получение термограммы в системе построения изображения.

Каждая имеющаяся в памяти системы термограмма может быть представлена на дисплее.

Проведенный обзор тепловизионной техники дает представление об аппаратуре, нашедшей применение в различных областях науки, техники, а также в медицине.

К тепловизорам, применяемым в строительстве, предъявляются следующие специфические требования:

диапазон измеряемых температур должен быть достаточным для термографирования как жилых, так и промышленных зданий и сооружений различного назначения и быть в пределах от -20° до 1000°C ;

чувствительность прибора в температурном диапазоне, используемом при обследованиях жилых и промышленных зданий (от -20° до 100°C), должна быть на уровне $0,5^{\circ}\text{C}$;

в высокотемпературной области, используемой при термографии промышленных объектов различного назначения, в частности сооружений металлургических производств, где температура исследуемых участков находится в пределах от 100° до 1000°C , допустимая чувствительность прибора составляет 1°C ;

в связи со значительной протяженностью исследуемых объектов, неравномерность чувствительности прибора по полю обзора не должна превышать 5%;

термографирование протяженных сооружений или фасадов зданий требует от прибора большого угла обзора, поэтому тепловизор должен быть снабжен легко заменяемыми инфракрасными объективами (рис. 2.18). Оптимальным, с точки зрения использования прибора в строительстве, является комплект из трех объективов с полем обзора 7° на расстоянии 10 м, обеспечивающий обследование квадрата со стороной 1,2 м; второй — с полем обзора 20° — квадрат

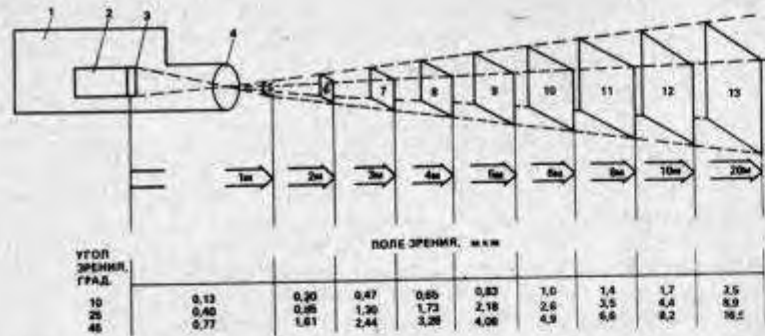


Рис. 2.18. Зависимость величины поля зрения радиометра от расстояния при различных углах зрения объектива
 1 – корпус радиометра; 2 – чувствительный элемент; 3 – приемная поверхность; 4 – объектив радиометра; 5–13 – площади поля зрения радиометра на определенных расстояниях от него

со стороной 3,5 м; третий – с полем обзора 40° – квадрат со стороной 7,3 м;

при обследовании строительных объектов стационарными тепловыми системами продолжительность сканирования может быть несколько секунд;

поскольку существующие способы воспроизведения тепловой картины не обеспечивают требуемого быстродействия и наглядности, в качестве устройства отображения рекомендуется применение только электронно-лучевой трубки. Фотографирование с экрана электронно-лучевой трубки является удобным способом регистрации и последующего размножения полученных термограмм;

количество строк развертки должно быть не менее 200 на 1 кадр, так как более редкая развертка не позволяет различать мелкие детали изображения;

для количественной оценки температуры исследуемого объекта, а также для наглядного выделения на его изображении обнаруженных дефектов необходимо наличие у прибора возможности высвечивания на экране изотермических линий;

воспроизведение цветного изображения не обязательна, так как оно значительно хуже поддается фотографированию, что усложняет количественную интерпретацию термограмм;

одним из решающих требований, которое предъявляется тепловизору при натуральных обследованиях строительных объектов, является относительно малая потребляемая мощность и возможность автономного питания от собственного или автомобильного аккумулятора;

по габаритам и весу прибор должен быть таким, чтобы для его переноски и подготовки к работе было достаточно два человека. Перечисленные требования дают необходимые критерии для вы-

бора тепловизионной системы, наиболее приемлемой для использования в строительстве. Этим требованиям отвечают тепловизоры типа АГА-782 и АГА-780.

Из разработанных в настоящее время систем – тепловизор конструкции МИРЭА марки АТП-44 в наибольшей степени отвечает условиям использования в строительстве. В табл. 2.4 приведены сравнительные характеристики отечественных и зарубежных тепловизоров.

2.6. ОСНОВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ПРИБОРОВ И ТРЕБОВАНИЯ К НИМ

Приемники теплового излучения. Наиболее распространенная схема прибора, регистрирующего тепловое излучение, состоит из объектива, приемника излучения, усилителя электрического сигнала и индикатора. Возможность и качество инфракрасных измерительных приборов в большей степени определяется свойствами применяемых в них приемников лучистой энергии.

Приемник лучистой энергии представляет собой устройство, предназначенное для регистрации и преобразования лучистой энергии в другие виды энергии. По виду преобразуемой энергии излучения, приемники делятся на тепловые, фотоэлектрические, люминесцентные и фотохимические.

Тепловой приемник – это такой приемник, в котором энергия излучения преобразуется в тепло. Регистрация излучения производится чувствительным элементом, путем фиксации его физических параметров, изменяющихся при нагреве выделяемым теплом. Например, в термоземле измеряется это изменение электродвижущей силы в месте спая двух металлов; в балометре – изменение электрического сопротивления чувствительного элемента и т.д.

Фотоэлектрический приемник преобразует лучистую энергию в электрическую. Если электроны, возбужденные излучением, покидают вещество, то явление носит название внешнего фотоэффекта, а приемник – фотоэмиссионным. Если электроны остаются в веществе, то явление носит название внутреннего фотоэффекта, а приемник – фотогальванического.

Люминесцентные приемники излучения преобразуют лучистую энергию одного спектрального состава в лучистую энергию другого спектрального состава. Разработанные до настоящего времени люминесцентные приемники инфракрасного излучения позволяют производить его преобразование в видимое, обычно зеленого цвета излучение с длиной волны до 1,6 мкм.

В фотохимических приемниках лучистая энергия вызывает химические превращения, определенным образом меняющие строение вещества. Это приводит к тому, что после соответствующей химической обработки становится возможным получить видимое изображение источника излучения.

В зависимости от спектрального состава регистрируемого излучения все приемники делятся на неселективные, которые имеют одинаковую чувствительность в достаточно широком участке спектра

Таблица 2.4. Сравнительные характеристики отечественных

Страна	Тип системы, фирма	Диапазон контролируемых температур, °С	Максимальная точность измерения температуры, °С
СССР	Тепловизор ИК-10П	10-200	0,3
	Тепловизор "Янтарь"	20-150	0,2
	Тепловизор ВЭИ	20-150	0,4
	Тепловизор "Рубин"	18-200	0,05
США	Тепловизор ИФ-10ТВ (НПО "Спектр")		0,5
	Тепловизор АТП-44 (МИРЭА)		0,2
	Тепловизор "Сирис" фирмы "Локхид"	-20-+20	0,2
	Тепловизор фирмы "Динарад"	-50-+450	0,1
	Термограф Т-900 фирмы "Барнес Инжиниринг"	77-120	4,5
Швеция	Тепловизор АГА-680	-30-850	0,2
	Тепловизор АГА-750	-20-900	0,2
	Тепловизор АГА-780	-20-900	0,1
	Термопрофиль	20-600	0,1

Примечание. Во всех системах используется одноэлементный JnSb, кроме тепловизора "Янтарь", в котором

и селективные, чувствительность которых зависит от длины волны, падающего на них излучения.

Более чувствительным является приемник излучения, обладающий большим отношением полезного сигнала к величине флуктуации напряжения на выходе приемника, которое может быть определено по измеренным величинам выходного сигнала и собственного шума приемника.

Для сравнения различных приемников пользуются так называемой пороговой чувствительностью D , которая равна отношению сигнала S к шуму N , приходящегося на единицу падающего излучения W . Для безинерционного приемника пороговая чувствительность характеризуется следующим соотношением:

и зарубежных тепловизоров

Траектория сканирования, число строк	Период сканирования, с	Наличие функциональных изо-терм	Угол полного визи-рования, град.	Принцип построения устройства отображения
100	1/10	-	5x5	ЭЛТ
100	1/25	-	7,5x5	ЭЛТ
200	6	-	10x10	ЭЛТ
-	60	-	20x10	ЭХБ
75	1/18	Две	7x4	ЭЛТ
200	1/50	Две	20x30	ЭЛТ
60	1/3	-	20x20	ЭЛТ само-писец
60	1-1/16	-	10x10,25x x25	ЭЛТ
150	1080	-	45x20	Поляриза-ционная пленка
100	1/16	Две	10x10,25x x40x40	ЭЛТ
280	1/25	Одна	7x7; 20x20	ЭЛТ
280	1/25	Две	3,5x3,5; 7x7	ЭЛТ
1	1/25	-	80	ЭЛТ

охлаждаемый приемник излучения на основе соединения применен многоэлементный приемник.

$$D(\lambda, f, \Delta f, A_d) = \frac{J(\lambda, f, A_d) d\lambda}{N(f, \Delta f, A_d)} = \frac{S(\lambda, f, A_d) d\lambda}{W(\lambda) N(f, \Delta f, A_d)}, \quad (2.27)$$

где λ — длина волны излучения, регистрируемого приемником; f — частота изменения потока излучения, частота модуляции; Δf — полоса пропускания частот приемного тракта; A_d — площадь чувствительной поверхности приемника; $S_{\text{пр}}$ — интегральная чувствительность приемника; S — величина сигнала на выходе приемника.

В некоторых случаях пороговую чувствительность оценивают по величине порогового потока. Пороговым потоком называется такой поток лучистой энергии, который вызывает на выходе прием-

ника эффективный сигнал, по величине равный эффективному значению собственных флуктуаций приемника на его выходе.

$$P_{\text{пор}}(\lambda, f, \Delta f, A_d) = \frac{1}{D} \cdot \frac{W(\lambda)N(f, \Delta f, A_d)}{S(\lambda, f, A_d)} \quad (2.28)$$

Важным параметром приемника является постоянная времени, которая связана с полосой чувствительности приемника:

$$\tau_{\text{вр}} = 1/4 \Delta f. \quad (2.29)$$

Для сравнения однотипных приемников с различными параметрами очень удобен метод, основанный на зависимости сигнала и шума от площади приемника и полосы пропускания. Эта характеристика носит название нормированной пороговой чувствительности D^* и имеет следующее выражение:

$$D^* = D(A_d)^{1/2} (\Delta f)^{1/2}. \quad (2.30)$$

Значение D^* должно сопровождаться ссылками на условия измерения, т.е. на длину волны излучения, частоту модуляции и температуру абсолютно черного тела. Характеристика D^* иногда встречается в литературе под названием детектирующей способности приемника. Детектирующая способность имеет максимальное значение у приемников с меньшей пороговой чувствительностью, большим коэффициентом преобразования и меньшей постоянной времени при максимальной величине приемной площадки. Излучение поверхности строительных объектов лежит в диапазоне $(2-14) \cdot 10^{-6}$ м. К приемникам этого диапазона относятся приемники, созданные на основе применения таких полупроводниковых соединений материалов, как PbS, PbSe, GeAu, GeCu, CeZn, JnSb, FeFe. При конструировании приемников регистрации излучения наиболее широкое распространение получили фотоспротивления, созданные на основе сернистого свинца PbS. Они имеют максимальную чувствительность при длине волны $2,8 \cdot 10^{-6}$ м. Охлаждение приемника жидким азотом до 77K расширяет диапазон чувствительности прибора до $3,7 \cdot 10^{-6}$ м. Имеют хорошую чувствительность также свинцовоселеновые фотоприемники PbSe, однако в них не обеспечивается необходимая стабильность характеристик во времени. К недостатку свинцовотеллуридных фотоспротивлений PbFe относится очень высокое из внутреннее сопротивление ($> 10^6$ Ом), что затрудняет согласование характеристик фотоспротивления с усилительным трактом. Фотогальванические приемники на основе индия и сурьмы ZnSb имеют высокую чувствительность и обладают небольшой постоянной времени. Тем не менее они не получили широкого распространения, так как по уровню шума они не отвечают требованиям, предъявляемым к усилителю. Эти приемники также имеют неодинаковую чувствительность вдоль всего чувствительного слоя. Фотоспротивления на основе ZnSb лишены этих недостатков.

Тепловые приемники – термисторы, термоэлементы, боломеры могут обеспечивать высокую чувствительность аппаратуры, однако они обладают значительной постоянной времени.

С энергетической точки зрения в качестве основного критерия эффективности использования энергии излучения в инфракрасной регистрирующей аппаратуре можно предложить произведение коэффициента использования энергии излучения приемником на его пороговую чувствительность

$$C_{\text{прл}} = K_{\text{исп}} D_{\text{max}}^* \quad (2.31)$$

$$K_{\text{исп}} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R_{\lambda} J_{\lambda} d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R_{\lambda} d\lambda} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R_{\lambda}' J_{\lambda}' d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R_{\lambda}' d\lambda} \quad (2.32)$$

где R_{λ} , R_{λ}' – спектральная и интегральная плотность излучения с поверхности в относительных единицах; J_{λ} , J_{λ}' – относительная спектральная и интегральная чувствительность приемника.

Охлаждение приемников излучения, кроме стабилизации рабочей температуры, приводит к увеличению чувствительности приемников, уменьшению тепловых шумов и расширению спектрального диапазона чувствительности приемника.

Охлаждение приемника излучения осуществляется путем размещения чувствительного элемента в тепловом контакте с внутренней полостью сосуда Дюара, на внешней стенке которого имеется окно для пропуска потока радиации. В сосуд Дюара заливается охлаждающая жидкость. Таким способом может поддерживаться установленная температура точки кипения сжиженных газов (азота – 77K, кислорода 83K, водорода – 20K, гелия – 40K). В реальных условиях, когда требуются небольшие размеры приемника, сосуд Дюара с жидкостью неудобен. В настоящее время решается проблема создания автономной холодильной установки для инфракрасных приемников. В подобных установках холодильное устройство полностью изолировано от окружающей среды.

Оптические системы аппаратуры, регистрирующей тепловое излучение. Оптические системы служат для фокусирования лучистого потока на чувствительный элемент приемника. В результате облученность чувствительного элемента может значительно превышать облученность оптической системы. Различают три группы оптических систем, применяемых в ИК технике.

1. Линзовые, когда лучистый поток перераспределяется в результате прохождения через преломляющие среды.

2. Отражательные, когда лучистый поток перераспределяется в пространстве в результате отражения от одного или нескольких зеркал различной формы.

3. Смешанные, которые сочетают в себе линзовые и отражательные системы.

В отечественных ИК приборах чаще применяются зеркальные оптические системы. Основное их преимущество по сравнению с лин-

зовыми — это отсутствие хроматической aberrации, связанной с прохождением потока через толщину стекла, а также меньшие потери энергии. Излучение от объекта, проходя через линзовую оптическую систему, изменяют свой спектральный состав и яркость. Особенно большое ослабление яркости имеет место в длинноволновой области спектра. Так, например, верхняя граница пропускания стеклянных линз составляет 10^{-6} м, кварцевых линз — $3 \cdot 10^{-6}$ м, а линз флюорита — 8 мк. Этого недостатка лишены зеркальные объективы, к тому же стоимость зеркальных объективов ниже стоимости линзовых. К основным недостаткам зеркальных объективов относятся зависимость качества отраженного потока излучения от состояния поверхности зеркала (загрязнения, влага, царапины и пр.) и невозможность получения широкого угла обзора. Зеркала, применяемые для объективов, должны отвечать двум основным требованиям: высоким коэффициентом отражения в нужном спектральном диапазоне и хорошим качеством изображения. Первое достигается подбором отражающего покрытия, второе — качеством изготовления подложки, на которую наносится отражающее покрытие. В качестве покрытий с высокой отражательной способностью в ИК технике применяются: серебро, золото, медь, радий и алюминий.

Серебро имеет коэффициент отражения 99%, однако с течением времени отражательная способность понижается, так как физическая прочность сцепления слоя серебра со стеклом незначительная. У золота коэффициент отражения в ИК области как и у серебра, но по физической и химической стойкости он не имеет себе равных. Кроме того, слой золота снижает коэффициент отражения видимого излучения. Алюминий имеет достаточно высокий коэффициент отражения, обладает хорошей механической прочностью, поэтому в строительной технике целесообразно применять более дешевые алюминиевые покрытия. Покрытия наносятся на стеклянные и металлические подложки. Стеклянные подложки позволяют получить отражающие поверхности высокого качества. Металлические подложки проще в изготовлении, дешевле, имеют меньший вес. Покрытия наносятся гальваностегическим и электрохимическим способом, более точные — электролитическим способом.

На рис. 2.19 приведены различные, наиболее употребительные в зеркальной оптике, отражательные системы. Одиночное сферическое зеркало обладает свойством собирать входящий пучок лучей, подобно простой линзе. Простые сферические зеркала часто применяются в инфракрасной аппаратуре с небольшим полем зрения. Блок приемника располагается обычно вблизи фокуса зеркала и экранирует определенную часть падающего на зеркало потока. Если это нежелательно, может быть применена схема Гермеля, в которой приемник располагается в стороне от входящих в объектив лучей. Это достигается применением эксцентричной части параболоида, наклоненного относительно входящего пучка. Такое зрение обрабатывается гораздо труднее, чем обычное сферическое. Недостатки системы преобладают над незначительными преимуществами и поэтому схема используется очень редко.

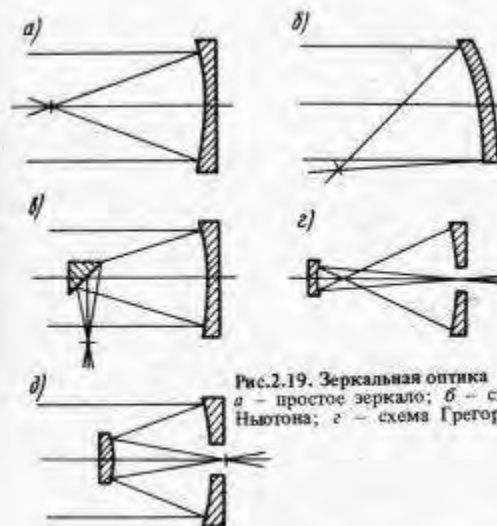


Рис. 2.19. Зеркальная оптика
 а — простое зеркало; б — схема Гермеля; в — схема Ньютона; г — схема Грегори; д — схема Кассегрена

Остальные системы относятся к системам с изломом хода лучей, что делается для выноса фокальной плоскости в более удобное место. Один из методов состоит в повороте луча на 45° с помощью призмы или простого зеркала. К системам с концентрическим изломом, когда фокальная плоскость выносится в подходящее место на оси первичного зеркала, относятся системы Кассегрена и Грегори. Они отличаются положением вторичного зеркала на оси относительно первого фокуса. Система Грегори обычно имеет вогнутое вторичное зеркало, а система Кассегрена — выпуклый. К тому же объектив Грегори длиннее. Наиболее широко применяется схема Кассегрена, обеспечивающая компактную конструкцию объектива. При этом экранировка входного потока достигает 25%. Изменение эффективного фокусного расстояния, и, соответственно, увеличение кратности достигается изменением расстояния между зеркалами.

Зеркально-линзовые системы, преимущества которых заключаются в применении линз и зеркал, появились сравнительно недавно. Особенно это относится к группе концентрических зеркально-линзовых систем с большой светосилой. Эти системы сложные и дорогостоящие. Они находят применение в инфракрасных системах, дающих высококачественное изображение теплового поля объекта.

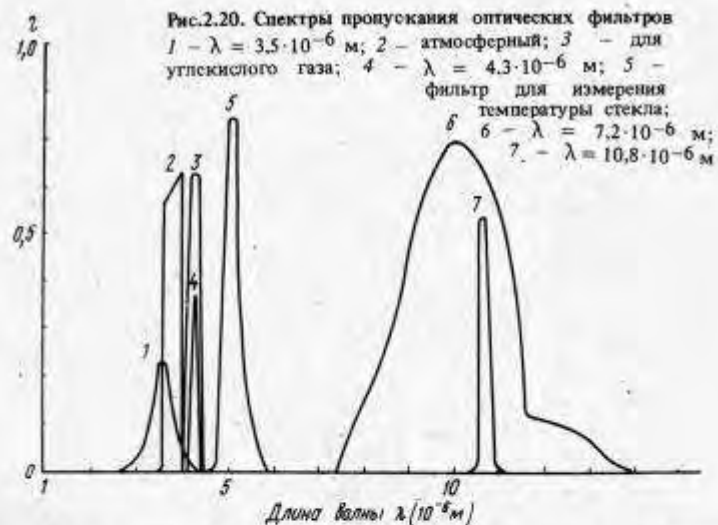
Кроме перечисленных оптических систем в инфракрасной технике применяются так называемые "коллективы", которые служат для уменьшения размеров изображения с помощью оптических средств. Это необходимо в том случае, если требуется высокая пороговая чувствительность приемников излучения, которая возрастает с уменьшением размеров чувствительной площади приемника. Вто-

рым достоинством использования системы "коллектив" является усреднение потока на действительной поверхности приемника, тогда как чувствительность приемника в разных точках поверхности обычно неодинакова.

В радиометрах применяются простые сферические зеркальные объективы. В сканирующих системах, где к качеству передачи изображения предъявляются повышенные требования, применяют более сложные оптические системы, обладающие большим разрешением по полю изображения. Кроме того, сложные оптические системы характеризуют не только по величине потерь передаваемой энергии излучения, но и линейностью передачи по кадру теплового изображения исследуемой поверхности. Выбор оптической системы определяет собой и качественную характеристику ИК регистрирующих приборов. Достоинства и недостатки зеркальных и линзовых оптических систем даны в табл. 2.5.

Таблица 2.5. Достоинства и недостатки зеркальных и линзовых оптических систем

Вид оптики	Достоинства	Недостатки
Зеркальная	Нет селективного поглощения ИК излучения, малые потери Большой коэффициент отражения металлических покрытий Нет хроматических aberrаций	Одиночное зеркало дает перевернутое изображение Фокальная поверхность искривлена
	Меньше сферические aberrации, чем у одиночной линзы Возможные большие фокусные расстояния при малых размерах оптики Осевые aberrации могут быть снижены правильным подбором диафрагм	Поле зрения ограничено внеосевыми aberrациями. Для исправления aberrаций требуется введение преломляющих элементов Затруднения, связанные с установкой и юстировкой, а также с устранением влияния климатических условий Трудно избавиться от рассеянного света Окна, применяемые для защиты зеркал, дают хроматическую aberrацию
Линзовая	Возможность устранения aberrаций при большей свободе выбора оптических элементов Нет экранировки центральной части оптики Возможно получение изображения лучшего качества в широком поле зрения Большая прочность Проще компоновка и сборка оптических деталей Не требуется защитных окон Меньше влияние температуры Проще наладка и юстировка системы	Больше отражающих поверхностей Возможно селективное поглощение Мало доступны оптические материалы с необходимым пропусканием ИК излучения Наличие хроматических aberrаций



Важное место в инфракрасной аппаратуре занимают оптические фильтры, применяемые для ослабления вредного влияния постороннего излучения и для выделения полезного сигнала с определенной длиной волны. Инфракрасные оптические фильтры можно разделить на три группы: коротковолновые, пропускающие излучение в диапазоне длины волны меньше граничных для данного фильтра; полосовые фильтры, выделяющие полосу определенной длины волны; длинноволновые, применяемые для диапазона длины волны больше граничных. На рис. 2.20 приведены спектры пропускания полосовых оптических фильтров.

Граница пропускания фильтра определяется физическими свойствами оптического материала, применяемого при изготовлении фильтра. К этим свойствам можно отнести адсорбционные эффекты, явления поглощения излучения за счет рассеяния, селективное отражение излучения материалами, явление интерференции. В качестве фильтров могут быть использованы как естественные материалы, пропускающие излучение в определенном диапазоне длины волны, так и многослойные фильтры, состоящие из диэлектрических слоев с разными показателями преломления. Эти многослойные фильтры называются интерференционными. Они получили наибольшее распространение для изготовления полосовых фильтров. Действие таких фильтров основано на интерференции лучистой энергии при многократном внутреннем отражении в прозрачном диэлектрическом слое, покрытом полупрозрачными металлическими слоями. Максимальный коэффициент пропускания таких фильтров из-за потерь в диэлектрике и отражения на полупрозрачных зеркальных слоях не может быть выше 40—45%.

Спектральные характеристики интерференционных пропускающих фильтров зависят от рабочей длины волны, отношения толщины пленок к длине волны, показателей преломления диэлектрических пленок и материала подложки, коэффициентов пропускания пленок, отражения на границе оптических сред. Кроме спектральной полосы максимального пропускания, у интерференционных фильтров наблюдаются боковые спектральные полосы пропускания. Это необходимо учитывать при их применении в приборах оптического контроля температуры и принимать меры для обеспечения высокого качества оптической фильтрации.

При выборе фильтра для решения конкретной технологической задачи необходимо обратить внимание на спектральную полосу пропускания и крутизну ее границ, величину искажения полезного сигнала, продолжительность работы и надежность, доступность в изготовлении и стоимость.

Оптические фильтры должны обладать крутой спектральной характеристикой на границе пропускания. Крутизна спектральной характеристики фильтра на границе пропускания определяется отношением интервала длины волн, на котором пропускание уменьшается от минимально допустимого на рабочем участке излучения (80%) до максимально допустимого на границе с пропусканием (3–5%), к длине волны границы пропускания λ_k . На практике это отношение не должно превышать одной десятой.

Основными характеристиками полосы пропускания являются длина волны, соответствующая ее середине, и ширина полосы. Ширина полосы пропускания $\Delta\lambda_n$ полосового фильтра определяется интервалом длины волн, на котором коэффициент пропускания превышает 3–5%:

$$\Delta\lambda_n = \lambda_k \cdot \frac{\beta}{\alpha} \cdot \frac{n}{k} \quad (2.33)$$

В некоторых случаях ширину полосы пропускания фильтра характеризуют интервалом длины волн 50%-го пропускания.

К получившим наибольшее распространение в настоящее время следует отнести фильтры, изготовленные на основе таких материалов, как германий и кремний, которые отражают и поглощают соответственно излучение до $1,1 \cdot 10^{-6}$ и $1,8 \cdot 10^{-6}$ м. Эти фильтры применяются для исключения коротковолнового солнечного излучения. Фильтры на основе натрия и фтористого теллура пропускают около 70% излучения при длине волны $2,7 \cdot 10^{-6}$ м, на основе фтористого кальция и фтористого висмута пропускают в диапазоне от 3 до 6 мкм. Многослойные интерференционные фильтры позволяют получать кривые пропускания с четкими границами в заданных диапазонах длины волн.

Особенности усиления сигналов. Наиболее простыми методами усиления и регистрации ИК излучения являются такие, в которых используется система постоянного тока. Измеряемое излучение генерирует электрический сигнал постоянного тока у приемника, который либо непосредственно регистрируется чувствительным

гальванометром ($U_c = 10^{-6} - 10^{-7}$ в), либо усиливается и затем регистрируется измерительным прибором. Наиболее часто такие системы имеют постоянные времена от 1 до 10 с.

Большие трудности при таком методе измерения вызывает усиление сигнала, возникновение паразитных сигналов, обусловливаемых медленными изменениями температуры окружающей среды и параметров приемника. Кривая зависимости шума от частоты ИК приемников и усилительных устройств имеет явно выраженный подъем в области низких частот. Физические причины этого явления весьма разнообразны. В полупроводниковых усилителях шума полупроводниковых триодов в полосе частот между 1 кГц и частотой спада характеристики триода (f_a) обусловлены в основном дробовыми шумами и шумами Найквиста. На более низких частотах появляются добавочные шумы, а на более высоких — становятся важными эффекты, связанные с временем накопления заряда. Шумы Найквиста или тепловые шумы обусловлены случайным тепловым движением электронов. Дробовой шум обусловлен флюктуациями в потоке носителей заряда полупроводника (дырками или электронами). Импульсы шума очень короткие, так что он имеет постоянный спектр плотности энергии в полосе пропускания предусилителя.

Для полупроводниковых триодов, работающих при малых токах эмиттера и при оптимальном сопротивлении источника питания, коэффициент шума имеет порядок 1 дБ. Коэффициентом шума называется частное от деления отношения сигнала к шуму, обусловленному только шумами приемника излучения, на действительное отношение сигнала к шуму после усиления. При частотах менее 1000 Гц триоды имеют тенденцию к генерации дополнительного шума. При частотах от 100 кГц до 1 мГц их усиление падает, появляются добавочные шумы. Выбор лучшего эмиттерного тока производится на основе компромисса между очень низкими значениями для обеспечения минимального дробового шума и более высокими значениями тока, обеспечивающими лучшую стабильность питания и более высокое значение коэффициента усиления.

Коэффициент шума полупроводникового триода является функцией сопротивления источника и тока эмиттера. Он будет ниже для триодов с малым омическим сопротивлением базы и эмиттера и высоким усилением по току при малых токах эмиттера. Практически в районе дробового шума зависимость от тока эмиттера слаба. Коэффициент шума полупроводниковых триодов обычно при частотах ниже 1 кГц сильно зависит от частоты. Однако нужно иметь в виду, что эти шумы уменьшаются при уменьшении тока эмиттера и разности напряжений между базой и коллектором. Выбор оптимального режима обычно производится для каждого триода экспериментально. Располагая полосу пропускания измерительного устройства в области 100 — 1000 Гц, можно получить значительно лучшую пороговую чувствительность ИК устройства, чем в области нулевой частоты (система постоянного тока).

Для исключения низкочастотного шума приемника применяют принцип модуляции сигнала. После модуляции уже переменный

сигнал усиливают электронным усилителем, детектируют и регистрируют измерительным прибором. Наиболее простой способ модуляции — периодическое прерывание электрической цепи. Из-за большого уровня помех, которые вносятся такими модуляторами, их применение допустимо для сигналов, значительно превышающих пороговые. Исключением является способ включения приемника в мост Уитстона и осуществление электрической модуляции питанием этого моста переменным током. В этом случае помехи, вносимые усилителем, уменьшаются, однако приемник фактически работает в режиме постоянного тока и все его низкочастотные шумы модулируются и усиливаются вместе с сигналом.

Широкое распространение получил метод, в котором модуляции подвергается измеряемое излучение, т.е. приемник регистрирует переменное излучение. Сигналы приемника усиливаются электронным усилителем, выпрямляются и регистрируются измерительным прибором. Такой метод позволяет почти полностью избавиться от низкочастотных шумов приемника и приблизить пороговую чувствительность к предельной. Но этот метод существенно повышает требование к постоянной времени приемников излучения. Приемники с большой постоянной времени не смогут обеспечить высокую частоту модуляции, в результате сигнал будет передаваться со значительными искажениями.

Следующей особенностью усиления сигналов в ИК регистрирующей аппаратуре является обеспечение линейности усилителя в динамическом диапазоне измерения. Температура поверхностей ограждений лежит в пределах от -20° до 100°C . Это приводит к тому, что диапазон интенсивности сигналов, поступающих на вход усилителя, достаточно велик. Величина этого диапазона определяется температурной чувствительностью регистрирующего прибора. На основе данных из опыта зарубежных фирм инфракрасные приборы способны перекрыть указанный температурный диапазон при точности измерения $0,2^{\circ}\text{C}$. При этих условиях величина динамического диапазона усилителя определяется следующим образом:

$$g = (T_2 - T_1) / \Delta t = [100^{\circ} - (-20^{\circ})] / 0,2^{\circ} = 600, \quad (2.34)$$

где T_2, T_1 — верхняя и нижняя границы температуры, регистрируемые прибором; Δt — температурная чувствительность ИК приборов.

Обеспечение такого динамического диапазона усилителя является сложной задачей. Кроме того, весьма существенное ограничение динамического диапазона имеет место и в индикаторном устройстве, поэтому обычно диапазон измеряемых температур разбивают на несколько поддиапазонов. При этом предусматривают грубую регистрацию температур во всем диапазоне, а более точную в поддиапазонах. Это приводит к значительному усложнению схемы усилителя. Следовательно, от качества усилителя сигнала, от его стабильности существенно зависит качество регистрации теплового сигнала и однозначность его измерения.

Кроме того, существует проблема выделения нужного теплового

сигнала от исследуемого объекта на фоне теплового излучения от окружающих предметов, который может быть определен как шумовой сигнал. Эта проблема может быть решена только на стадии обработки электрического сигнала после приемника излучения. Выделение теплового сигнала на фоне теплового шума посвящен следующий параграф.

Особо рассмотрим систему наведения тепловизора с помощью блока визирования. Можно сформулировать общие требования к выполнению блока визирования системы. С его помощью обеспечивают наведение системы на объект, т.е. совмещение траектории сканирования с определенными зонами объекта. Желательно, чтобы блок визирования работал без паралакса относительно канала измерения. Для этого оптическую ось канала визирования совмещают с оптической осью входного объектива. Если последний обеспечивает пропускание излучения в видимой части спектра излучения, то для визирования используют входной объектив, за которым устанавливают светоотбирающий элемент. В качестве светоотбирающего элемента могут быть использованы стационарные элементы — полупрозрачное зеркало или микрозеркальце, а также убирающееся зеркальце.

В большинстве случаев с помощью визира обеспечивают угол обзора, равный или немного больший угла полного визирования системы. При этом траекторию сканирования наносят на матовое или прозрачное стекло, которое совмещают с фокальной плоскостью объектива визира и с помощью окуляра рассматривают изображение объекта контроля совместно с траекторией сканирования.

В некоторых сканирующих оптико-электронных системах измерения температуры (ОЭСИТ), в частности в системах, построенных по второй схеме, блок визирования выполняют локальным, т.е. в глаз оператора проектируют только ту часть объекта, которая в данный момент времени контролируется системой (сканирующее пятно). Такое визирование возможно только при пропускании объективом и сканирующим блоком видимого глазом излучения. С помощью локального блока визирования труднее ориентироваться относительно всего объекта, однако можно более точно навести систему на локальные зоны объекта. Такое визирование устраняет неточности настройки блока визирования относительно сканирующего блока.

Глава 3. ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫМИ СИСТЕМАМИ

Температура относится к такой физической величине, непосредственное измерение которой невозможно, поэтому все существующие методы основаны на измерении какой-либо физической величины, однозначно или функционально связанной с температурой.

Измерение физических величин, в том числе и температуры, не является абсолютно точными и всегда выполняются с какой-то погрешностью. Отклонения результатов измерений от истинных

значений могут быть вызваны по разным причинам. Если погрешность зависит от конструкции и принципа действия самого прибора, то она относится к инструментальной, если от принятого метода измерения — к методической.

Широкое распространение при измерении температуры и поверхности твердых и жидких тел получили контактные методы, основанные на применении таких чувствительных элементов как термопары, термосопротивления, жидкостные стеклянные термометры и т.п. Находясь в непосредственном контакте с контролируемой средой, эти элементы измерителей, как бы они малы ни были, в той или иной степени нарушают температурное поле среды в месте их расположения. А так как измерительным прибором регистрируется собственная температура этих элементов, независимо от того на каком принципе они устроены, то по целому ряду причин измеряемая температура может отличаться от температуры среды в точке наблюдения до момента внесения в нее измерителя. К этим причинам относятся: неправильный монтаж измерителя, теплоотвод по соединительным проводам, теплообмен измерителя с окружающей средой, торможение потока газа, тепловая энергия и т.д. Эти погрешности являются методическими и присущи всем контактными методам измерения. Они вносят в результаты измерений температуры неопределенную погрешность, которая изменяется с изменением условий теплового состояния контролируемого объекта и окружающей среды. Для повышения точности измерения температуры следует рекомендовать оптические инфракрасные приборы.

Принцип работы этих приборов основан на регистрации теплового излучения, падающего на чувствительную пластинку приемного элемента (тепловизора). При этом не происходит нагрева измерительного элемента, так как падающее излучение изменяет лишь физическую характеристику приемника, например его электропроводность. На показания прибора оказывают влияние излучательные характеристики объекта измерений, характеристики промежуточной среды, поглощающей излучение, а также частично отраженное поверхностью объекта излучение сторонних источников.

Методы измерения температуры поверхности твердых тел и непрозрачных жидкостей с помощью инфракрасных приборов имеют много общего. Отличие заключается лишь в излучательных характеристиках этих поверхностей и в условиях, при которых проводятся измерения.

Уравнения энергетического баланса между приемником излучения тепловизора и участками поверхности объекта можно записать в виде

$$L = \alpha \epsilon J(T) + \alpha(1-\epsilon)J(T_p) - E(T_n), \quad (3.1a)$$

$$L_0 = \alpha \epsilon_0 J(T_0) + \alpha(1-\epsilon)J(T_\phi) - E(T_n), \quad (3.1б)$$

где L и L_0 — выходные сигналы тепловизора от двух участков поверхности объекта, имеющих температуру T и T_0 и коэффициенты черноты ϵ и ϵ_0 ; T_ϕ — средневзвешенная температура поверхностей окружающих объектов; T_n —

температура приемника излучения; T, T_0 — температура поверхности соответственно исследуемого и реперного участка; ϵ, ϵ_0 — коэффициенты излучения поверхности соответственно исследуемого и реперного участков; α — коэффициент ослабления излучения оптической средой, разделяющей объект и оптико-электронную систему измерения температуры ОЭСИТ; $E(T_n)$ — энергия собственного излучения приемника при температуре T_n .

Так здесь рассматриваются только тепловизоры с приемником излучения, охлаждаемым жидким азотом ($T_n = 77\text{K}$), то член $E(T_n)$ не берем во внимание. Вычитая уравнение (3.1б из 3.1a) получаем

$$L - L_0 = \alpha \epsilon J(T) - \alpha \epsilon_0 J(T_0) + \alpha(\epsilon_0 - \epsilon)J(T_\phi). \quad (3.2)$$

Решая полученное уравнение относительно температуры T , находим $T = j(L')$, а

$$L' = \frac{L - L_0}{\alpha \epsilon} + \frac{\epsilon_0}{\epsilon} J(T_0) - \left(1 - \frac{\epsilon_0}{\epsilon}\right) J(T_\phi). \quad (3.3)$$

Из уравнения (3.3) следует, что для измерения температуры с помощью тепловизора необходимо иметь следующие данные:

температуру T_0 и коэффициент черноты ϵ_0 участка, называемого в дальнейшем реперным;

коэффициент черноты ϵ участка, температура которого должна быть измерена;

разницу сигналов $L - L_0$ тепловизора;

средневзвешенную температуру T_ϕ поверхностей окружающих предметов;

коэффициент ослабления излучения оптической средой α . Коэффициенты черноты ϵ и ослабления излучения α принимаются средними по спектральному диапазону используемого тепловизора.

Отметим частный случай, когда реперный участок находится на исследуемой поверхности и коэффициент черноты реперного и исследуемого участков одинаков. Полагая, что в уравнении (3.3) $\epsilon = \epsilon_0$, получим:

$$T = j \left[J(T_0) + \frac{L - L_0}{\alpha \epsilon} \right]. \quad (3.4)$$

Используя найденную ранее аппроксимацию градуировочной зависимости, получаем

$$T = -B/\ln \left[\exp\left(-\frac{B}{T_0}\right) + \frac{L - L_0}{A \epsilon \alpha} \right], \quad (3.5)$$

или переходя к температурной шкале Цельсия

$$t = -B/\ln \left[\exp\left(-\frac{B}{t^0 + 273}\right) + \frac{L - L_0}{A \epsilon \alpha} \right] - 273. \quad (3.6)$$

В уравнениях (3.4) — (3.6) отсутствует средневзвешенная температура поверхностей окружающих предметов, определение которой на практике вызывает трудности. Именно поэтому реперный участок следует выбирать на поверхности фрагмента так, чтобы условия теп-

лообмена реперного и исследуемого участков с окружающей средой были одинаковы.

Как следует из (3.6), точность измерения температуры зависит от точности определения температуры T_0 , разницы сигналов $L-L_0$, коэффициентов ϵ и α и параметров A и B . На точность измерения существенное влияние оказывает стабильность параметров A и B , т.е. их неизменность в период между градуировками прибора. Величина параметра B должна быть стабильна для систем заданного спектрального диапазона, так как этот параметр зависит только от эффективной длины волны λ_0 и показателя нелинейности приемника излучения.

Величина же A прямо пропорциональна коэффициенту пропускания оптического тракта $K_1(\lambda)$ и поэтому может быть нестабильна. Причиной этой нестабильности является пыль, попавшая на поверхность объектива, которая не может быть удалена в полевых условиях. Для проверки выдвинутых гипотез был произведен анализ изменения коэффициентов A и B при изменении диафрагм (диафрагма моделировала запыленность объектива или какое-либо другое изменение коэффициента пропускания оптического тракта тепловизора). Для анализа использовались данные, которыми фирма АГА сопровождает модели тепловизоров АГА-780 и АГА-782.

Статистический анализ значений коэффициента B для различных диафрагм и типов инфракрасного детектора дал следующие результаты:

$$\text{среднее значение } B_{\text{ср}} = \sum_{i=1}^N B_i/N = 3093,82;$$

$$\text{оценка дисперсии } S = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (B_i - B_{\text{ср}})^2} = 159,84.$$

Можно определить, что с вероятностью 0,99 абсолютное отклонение коэффициента B от среднего значения не превышает 2,2%, т.е.

$$P(|B_i - B_{\text{ср}}| < 0,022 B_{\text{ср}}) = 0,99, \quad (3.7)$$

где $P(x < y)$ – вероятность события при $x < y$. Статистический анализ подтвердил гипотезу о стабильности параметра B . Коэффициент A монотонно изменяется с изменением диафрагмы, при изменении диафрагмы с 1,8 до 20 он уменьшается в 10–30 раз (в зависимости от типа инфракрасного детектора). Следовательно, в реальных условиях коэффициент A может оказаться нестабильным. Для компенсации нестабильности параметра A и с целью повышения точности измерения температуры предлагается метод "двух реперов", который заключается в следующем. Предположим, необходимо измерить температуру в различных точках поверхности, коэффициент излучения которой постоянен, т.е. не зависит от координат. Предположим, что нам известна температура T_0 и T_1 поверхности в двух различных точках. Запишем выражения для величин сигнала тепловизора от этих и одной из исследуемых точек

$$L_0 = \epsilon \alpha J(T_0) + \epsilon(1-\alpha)J(T_{\text{ф}}); \quad (3.8)$$

$$L_1 = \epsilon \alpha J(T_1) + \epsilon(1-\alpha)J(T_{\text{ф}}); \quad (3.9)$$

$$L = \epsilon \alpha J(T_1) + \epsilon(1-\alpha)J(T_{\text{ф}}). \quad (3.10)$$

Вычитая (3.8) из (3.9) и (3.10) и разделив полученные уравнения друг на друга, получим:

$$(L-L_0)/(L_1-L_0) = J_T - J(T_0)/J(T_1) - J(T_0). \quad (3.11)$$

Подставляя в уравнение (3.11) равенство $J_T = A \exp(-B/T)$ и решая полученное уравнение относительно T , находим:

$$T = -B/\ln \left\{ \exp\left(-\frac{B}{T_0}\right) + \left[\exp\left(-\frac{B}{T_1}\right) - \exp\left(-\frac{B}{T_0}\right) \right] \frac{L-L_0}{L_1-L_0} \right\}. \quad (3.12)$$

Уравнение (3.12) выгодно отличается от (2.19) тем, что в него не входит не только нестабильный параметр A , но и экспериментально определяемые коэффициенты ϵ и α . Метод "двух реперов" может быть приведен к упрощенной инженерной форме. Если в (3.11) градуировочную зависимость $J(T)$ линеаризовать в интервале (T_1, T_0) , то получим:

$$(L-L_0)/(L_1-L_0) = (T-T_0)/(T_1-T_0), \quad (3.13)$$

откуда следует:

$$t = t_0 + (t_1 - t_0)(L-L_0)/(L_1-L_0). \quad (3.14)$$

Инженерная форма метода "двух реперов" не зависит не только от коэффициентов ϵ и α , но и от коэффициентов градуировочной зависимости. Для расчета температуры по градуировочной кривой рекомендуется использовать программу, предлагаемую фирмой АГА, реализуемую на калькуляторе HP-67, или разработанную программу расчета температуры по формулам (3.6) и (3.12) для отечественного калькулятора БЗ-21. Для обработки большого объема информации разработаны программы для ЭВМ М-4030 и СМ-3, написанные на языке ФОРТРАН.

При измерении температуры открытой водной поверхности для оценки точности и достоверности полученных результатов необходимо учитывать наличие конечной величины отраженной от поверхности тепловой (длинноволновой) радиации неба, а также влияния воздушного слоя между поверхностью и радиометром. Без коррекции измерений с учетом отражений от водной поверхности теплового излучения нельзя получить правильных результатов, поэтому требуется произвести расчет этой коррекции. Основанием для расчетов служит следующая теория.

Закон Стефана–Больцмана справедлив только для излучения абсолютно черного тела. Излучательная способность большинства естественных поверхностей высокая, но меньше чем у абсолютно черного тела. Следовательно, некоторое количество длинноволнового теплового излучения отражается (чаще диффузно) поверхностью.

Для нечерных естественных поверхностей этот поток излучения записывается следующим образом:

$$W = \omega \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_{\lambda} \epsilon_{\lambda} E_{\lambda}(T) d\lambda + \omega \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_{\lambda} (1 - \epsilon_{\lambda}) \frac{G\lambda}{\pi} d\lambda, \quad (3.15a)$$

где ω – сферический угол зрения радиометра; λ_1, λ_2 – границы спектрального диапазона чувствительности радиометра; Φ_{λ} – спектральное распределение чувствительности радиометра; ϵ_{λ} – коэффициент излучения поверхности; E_{λ} – спектральная радиационная энергия, излучаемая черным телом; T – абсолютная температура черного тела; $G\lambda/\pi$ – длинноволновое тепловое излучение неба, приведенное к единичному сферическому углу.

Для поверхностей, спектральная излучательная способность которых в данном спектральном диапазоне известна, разность между действительной температурой поверхности и температурой, измеренной радиометром T_s , может быть подсчитана (если известна величина радиации неба) по следующей формуле:

$$\begin{aligned} & \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_{\lambda} E_{\lambda}(T) d\lambda - \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_{\lambda} E_{\lambda}(T_s) d\lambda = \\ & = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_{\lambda} (1 - \epsilon_{\lambda}) E_{\lambda}(T) d\lambda - \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_{\lambda} (1 - \epsilon_{\lambda}) \frac{G\lambda}{\pi} d\lambda, \quad (3.15b) \end{aligned}$$

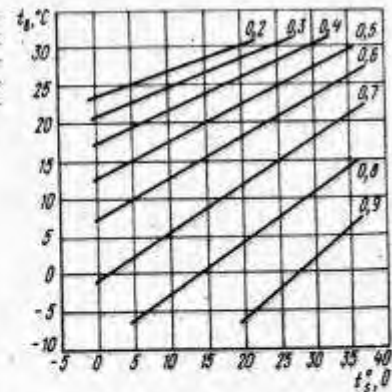
где T_s – абсолютная радиационная температура (значение температуры нечной поверхности, измеренное радиометром, откалиброванным по абсолютно черному телу).

На основе имеющихся значений спектральной излучательной способности поверхности воды в диапазоне $(8-14) \cdot 10^{-6}$ м были подсчитаны по формуле (3.15b) поправки к измеряемой радиометром величине температуры поверхности воды. Результаты расчетов представлены на диаграмме (рис.3.1). Для практического пользования диаграммой удобнее привязать радиационную температуру чистого неба к температуре воздуха около радиометра в момент проведения измерений. Температура воздуха может служить показателем радиационной температуры неба в том случае, когда влияние длинноволновой радиации не очень сильное.

Величина коррекции измеренной температуры поверхности может быть определена по величине этой температуры и температуры воздуха. Расчеты коррекции сделаны для спокойной поверхности воды (с зеркальным отражением) при безоблачном небе. Для негладкой водной поверхности (диффузное отражение) коррекция будет на $0,05-0,1^{\circ}\text{C}$ меньше.

В основном величина поправки не превышает 1°C и становится ниже при повышении температуры поверхности и воздуха и возрастает, когда температура воздуха $t_{\text{в}}$ постоянна (постоянна радиация неба), а $t_{\text{пов}}$ возрастает. Диаграмма рассчитана для вертикальных измерений, когда же радиометр установлен под углом к поверхности, то влияние отраженной составляющей растет, так как растет отражательная способность водной поверхности с возрастанием угла наклона от вертикали. При угле 45° от нормали коррекция возрастает

Рис.3.1. Диаграмма коррекции измеренной температуры радиометром поверхности воды ($t_s, ^{\circ}\text{C}$) в спокойном состоянии с учетом радиации безоблачного неба для различных температур воздуха $t_{\text{в}}, ^{\circ}\text{C}$



приблизительно в 1,5 раза, а при 60° – более чем в 2 раза. Качество измерения температуры поверхности воды может быть улучшено сужением полосы измеряемых радиометром частот.

Коэффициент отражения воды имеет минимум (0,8%) при длине волны 11 мк и возрастает до 3,5% при $14 \cdot 10^{-6}$ м. Если выбрать полосу пропускания радиометра $9-11 \cdot 10^{-6}$ м, то разность между истинной и измеренной температурами поверхности воды будет составлять одну треть от значений, приведенных в диаграмме.

В тех случаях, когда неизвестен спектральный коэффициент отражения поверхности, необходимо определить экспериментально интегральный коэффициент отражения во всем спектральном диапазоне радиометра, затем провести коррекцию описанным способом, считая отражательную способность постоянной. С увеличением отражательной способности величина необходимой коррекции растет.

Надо отметить, что дистанционное измерение температуры, проводимое из удаленной точки или с борта самолета или вертолета подвержены различным влияниям, ослабляющим и искажающим радиационный сигнал. Уровень ослабления зависит от поглощения, рассеивания и отражения радиации.

Радиационные измерения следует производить в интервале длины волны $8-14 \cdot 10^{-6}$ м ("атмосферное окно"). В этом интервале, кроме прозрачности для инфракрасного излучения, находятся минимум влияния солнечной радиации и максимум собственного излучения естественных поверхностей.

Следует отметить, что в этом интервале длины волны атмосфера не полностью прозрачна. Имеет место поглощение излучения водяным паром и диоксидом углерода. Но это влияние на радиометрические измерения температуры поверхности незначительно, если расстояние до цели меньше 150 м. Для большего расстояния могут быть сделаны поправки эмпирическим или расчетным путем, при этом наиболее важными факторами, влияющими на радиометрические измерения, будут температуры поверхности и окружающего воздуха, при этом изменение влажности и температурного градиента воз-

душного слоя между целью и радиометром менее важны. Таким образом, можно для расчетов использовать модель атмосферы с постоянной относительной влажностью порядка 60% и постоянным градиентом температуры 0,6°C на 100 м. Поправки будут малы, если мала разница между температурной поверхностью земли и воздуха. Когда температура поверхности выше, чем температура слоя воздуха между радиометром и поверхностью, то часть поверхностной радиации поглощается и поправки будут положительны. И наоборот, поправки отрицательны, если температура слоя воздуха выше, чем температура поверхности; в соответствии с этим дополнительное излучение от воздушного слоя прибавляется к излучению поверхности.

Другой метод нахождения поправок для устранения влияния воздушного слоя и отражательной способности применим только для водных поверхностей, но он является наиболее точным (порядка $\pm 0,2^\circ\text{C}$). Радиометрическое измерение поверхности воды производится под углом около 60° от нормального, при этом в 2 раза увеличивается влияние воздушного слоя и влияние отражательной способности. Разница между нормальным и 60° измерением есть общая требуемая поправка к измеренной величине при нормальном направлении.

Перечисленные способы коррекции измерений температуры естественных поверхностей радиационным методом пригодны для любых применяемых радиометров и приборов, регистрирующих инфракрасное излучение. Они позволяют проводить высокоточные измерения температур различных размеров водных поверхностей, находящихся в труднодоступных районах. При большом количестве измерений становится возможным строить термографические карты водоемов для различных метеорологических условий и времен года. По этим термограммам можно следить за различными (суточными, месячными и т.д.) колебаниями температуры поверхности водоемов.

Проводились воздушные измерения температуры поверхности озера Аммер в Верхней Баварии с помощью радиационного термометра. На рис. 3.2 в качестве примера приведены результаты измерений, проведенных 27 сентября 1967 г, между 14 ч 37 мин и 14 ч 53 мин по центральному европейскому времени. Самолет пересек озеро (45 км длиной и около 5,5 км шириной) по семи полетным дорожкам и была записана радиационная температура излучения. После исправления, из-за воздушного слоя и отражательной способности воды, были отложены изотермы поверхности воды.

Измерение температуры воды, набранной в ведро с лодки, показало разницу менее 1°C по сравнению с воздушными измерениями. Если бы лодка стояла немного по-другому, то ошибка, возможно, была бы меньше. Отсюда следует, что широкое применение инфракрасной техники при измерении температуры водных и естественных поверхностей позволяет решать сложные задачи теплового баланса водоемов, теплообмена водных поверхностей с окружающей средой.

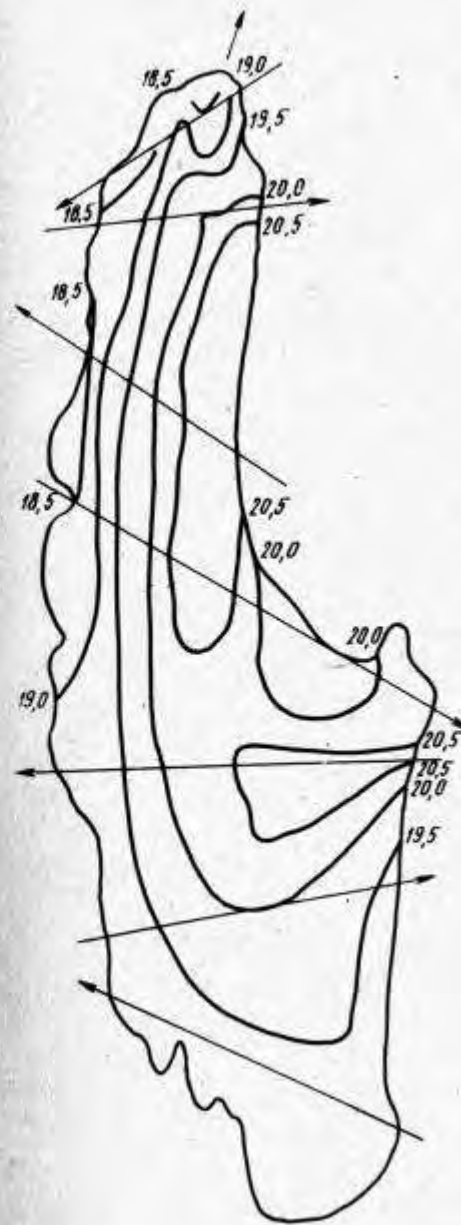


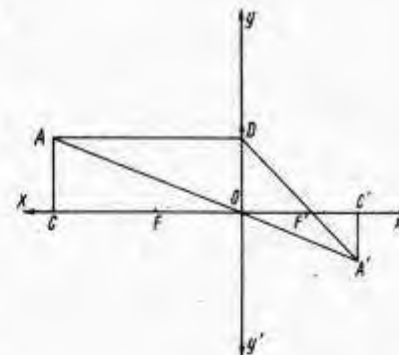
Рис.3.2. Распределение температур на поверхности озера Амерси (по данным США, стрелки обозначают направление облета)

3.1. ИСКАЖЕНИЕ ПЕРСПЕКТИВЫ В ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ

При использовании оптических приборов, в которых преобразование и фокусировка электромагнитного излучения от объекта осуществляются с помощью оптических элементов, изображение протяженных объектов может быть искажено. Эти искажения объясняются сферическими aberrациями в оптической системе, связанными со сферической формой фронта электромагнитной волны. Если обследуемая поверхность повторяет конфигурацию фронта волны, т.е. имеет тот же радиус кривизны и направление выгнутости, то искажения не будет. Чаще всего наблюдаются случаи, когда обследуемые объекты имеют разнообразную форму и излучение разных точек их поверхностей в связи с расстояниями до объектива прибора имеют разный коэффициент преобразования. Это явление особенно часто наблюдается при натуральных тепловизионных обследованиях строительных объектов, когда размеры объектов соизмеримы с расстоянием до них и имеют плоскую поверхность. В этом случае различные участки обследуемых поверхностей не будут перпендикулярны к оптической оси тепловизора. Такая ситуация встречается при обследовании наружной поверхности многостяжных зданий, когда съемка производится с небольших расстояний. В этих случаях на термограммах наблюдается искажение линейных размеров объекта, связанное с явлением перспективы. В результате этого явления измеренное температурное поле объекта отличается от реального температурного поля его поверхности. Для того чтобы учесть искажения температурного поля, возникающего за счет явлений перспективы в оптических системах, следует установить систематическое соответствие величины сигнала на выходе оптико-электронного устройства величине измеренной температуры и действительного ее значения для каждой точки поверхности. Соблюдение указанных соотношений имеет особое значение при обработке результатов термографирования на ЭВМ. Для этого нужно ввести систему координат, связанную с объектом, предполагая что поверхность объекта плоская (излагаемый метод может быть без затруднений применен для любой другой поверхности). Для поверхности, представляющей собой вертикальную плоскость, за оси координат имеет смысл выбрать горизонтальную и вертикальную линии. При термографическом обследовании протяженная поверхность обычно разбивается на фрагменты, когда размер всего объекта больше поля зрения тепловизора. Под фрагментом мы понимаем участок поверхности, который полностью находится в поле зрения тепловизора, поэтому за начало координат на каждом фрагменте условимся принимать точку поверхности, которая проектируется в левый нижний угол термограммы.

Для того чтобы определить положение объекта относительно тепловизора необходимо ввести еще одну систему координат, связанную с тепловизором. За ось X примем оптическую ось тепловизора. Ось Z проведем перпендикулярно оси X так, чтобы ось Z нахо-

Рис.3.3. Схема хода лучей в оптических системах



дилась в вертикальной плоскости, т.е. в плоскости, образуемой прямыми OV и $O'X$ (рис.3.3). Тогда связь между этими системами будет иметь вид:

$$\left. \begin{aligned} X &= X_0 + a_x u + b_x V, \\ Y &= Y_0 + a_y u + b_y V, \\ Z &= Z_0 + a_z u + b_z V. \end{aligned} \right\} \quad (3.16)$$

Эти уравнения называются параметрическим заданием плоскости. Так как для задания плоскости в пространстве достаточно знать три параметра (например, для плоскости $X/a + Y/b + Z/c = 1$ это точки a, b, c), то следует произвести три независимых измерения.

1. Расстояние от тепловизора до точки, принятой за начало координат на фрагменте, d .
2. Угол между оптической осью тепловизора и вертикальной линией на фрагменте α (на рис.3.3 это угол XOI).
3. Угол между оптической осью тепловизора и плоскостью фрагмента β (нормалью к поверхности).

Вычисление неизвестных коэффициентов производится следующим образом. Коэффициенты a_x, a_y, a_z — это координаты единичного вектора оси OU в системе $O'XYZ$.

Из компланарности векторов $OU, O'X, O'Z$ следует:

$$a_x = \cos \alpha, \quad (3.17)$$

$$b_x = \sin \alpha. \quad (3.18)$$

Из условия $a_x^2 + a_y^2 + a_z^2 = 1$ следует:

$$a_y = 0. \quad (3.19)$$

Коэффициенты b_x, b_y, b_z — координаты единичного вектора оси OV в системе координат $O'xyz$. Поскольку эти коэффициенты удовлетворяют условию

$$b_x^2 + b_y^2 + b_z^2 = 1, \quad (3.20)$$

то из ортогональности векторов получаем:

$$\vec{a} = \begin{pmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{pmatrix}; \quad \vec{b} = \begin{pmatrix} b_x \\ b_y \\ b_z \end{pmatrix}; \quad (\vec{a}, \vec{b}) = 0,$$

т.е. $a_x b_x + a_y b_y + a_z b_z = 0$,

откуда, учитывая (3.17) и (3.18),

$$b_x \cos \alpha + b_z \sin \alpha = 0, \quad (3.21)$$

или

$$b_x = -b_z \operatorname{tg} \alpha.$$

Угол между осью OX и плоскостью UOV равен β .

Для его определения найдем координаты нормали к плоскости UOV

$$\vec{n} = [\vec{a}, \vec{b}] = \det \begin{vmatrix} i & j & k \\ a_x & a_y & a_z \\ b_x & b_y & b_z \end{vmatrix} = \begin{pmatrix} -\sin \alpha b_y \\ b_x \sin \alpha - b_z \cos \alpha \\ b_y \cos \alpha \end{pmatrix}.$$

Теперь следует определить косинус угла между \vec{n} и OX

$$\cos(\hat{n}, \hat{OX}) = (\vec{n}, \vec{OX}) / \sqrt{(\vec{n}, \vec{n})} (\vec{OX}, \vec{OX}),$$

где \vec{OX} — единичный вектор оси.

Учитывая (3.17) — (3.19) имеем:

$$\cos^2(\hat{n}, \hat{OX}) = \sin^2 \alpha b_y^2 / [b_y^2 \sin^2 \alpha + (b_x \sin \alpha - b_z \cos \alpha)^2 + b_y^2 \cos^2 \alpha]. \quad (3.22)$$

Угол между OX и плоскостью является дополнительным к углу между нормалью к плоскости и OX . Следовательно,

$$\sin \beta = \cos(\vec{n}, \vec{OX}). \quad (3.23)$$

Подставляя в (3.22) $b_x = -b_z \operatorname{tg} \alpha$ и учитывая (3.23), имеем:

$$\sin^2 \beta = \sin^2 \alpha b_y^2 \left(b_y^2 + \frac{b_z^2}{\cos^2 \alpha} \right). \quad (3.24)$$

Подставляя в условие нормирования (3.20) выражение $b = -b_z \operatorname{tg} \alpha$, получаем:

$$b_z^2 / \cos^2 \alpha + b_y^2 = 1. \quad (3.25)$$

Из уравнения (3.25) выражение b_z^2 подставим в формулу (3.24)

$$\sin^2 \beta = \sin^2 \alpha b_y^2,$$

или

$$b_y = \pm \sqrt{\frac{\sin^2 \beta}{\sin^2 \alpha}} = \pm \frac{\sin \beta}{\sin \alpha}. \quad (3.26)$$

Из (3.25) получим:

$$b_z^2 = (1 - b_y^2) \cos^2 \alpha,$$

или

$$b_z = \pm \cos \alpha \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \beta}{\sin^2 \alpha}}. \quad (3.27)$$

Подставляя (3.27) в (3.25), имеем:

$$b_x = \pm \sin \alpha \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \beta}{\sin^2 \alpha}}. \quad (3.28)$$

Итак, окончательно получаем, при:

$$X_0 = d a_x = \cos \alpha, \quad b_x = \pm \sin \alpha \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \beta}{\sin^2 \alpha}};$$

$$Y_0 = 0 a_y = 0, \quad b_y = \pm \frac{\sin \beta}{\sin \alpha};$$

$$Z_0 = 0 a_z = 0, \quad b_z = \pm \cos \alpha \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \beta}{\sin^2 \alpha}}.$$

Чтобы определить какими уравнениями будет описываться изображение объекта, необходимо ввести еще одну систему координат, связанную с пространством изображений. Это $O'X'Y'Z'$ (рис. 3.4). Если координаты точки в пространстве объектов соответствовали X, Y, Z , то ее изображение будет иметь координаты X', Y', Z' . Эти соотношения получены из законов геометрической оптики при рассмотрении подобных треугольников (рис. 3.3).

Из подобия треугольников ACO и $A'C'O$ имеем:

$$X/X' = Y/Y', \quad (3.29)$$

а треугольников DOF и FCA'

$$Y/Y' = F/X' - F, \quad (3.30)$$

где F — фокусное расстояние оптической системы.

После вычислений получим

$$X' = YF/(X - F), \quad X = X'F/(X' - F); \quad (3.31)$$

$$Y' = YF/X - F. \quad (3.32)$$

Аналогично может быть получена и третья координата для трехмерного объекта

$$Z' = ZF/X - F. \quad (3.33)$$

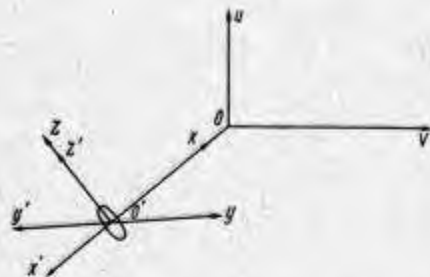


Рис.3.4. Схема координатных систем, связанных с оптическим прибором и исследуемой конструкцией. U, V — оси координат на объекте; X, Y, Z — оси координат тепловизионной системы; X', Y', Z' — оси координат пространства изображения в тепловизоре

Справедливость соотношений (3.31)–(3.33), выражающих связь точек координат в пространстве изображения и пространстве объекта подтверждается следующими показателями:

1. Формулы (3.31)–(3.33) подчиняются принципу взаимности:

$$X = X'F / X' - F; Y = Y'F / Y' - F; Z = Z'F / Z' - F.$$

2. При оптическом преобразовании отсутствуют нелинейные искажения.

3. Эти формулы отражают перспективные искажения (чем больше расстояние между объектом и оптической системой, тем меньше его изображение).

4. Если объект находится в фокальной плоскости, то изображение отсутствует.

Произведем некоторые упрощения. Так как $X \gg F$ (X измеряется в метрах, а F — в десятках сантиметров), подставляя их в формулы (3.33) и (3.34) получим $X' = F; Y' = YF/X; Z' = ZF/X$, тогда координаты точек изображения $X'(U, V), Y'(UV), Z'(U, V)$ будут иметь вид:

$$X' = F; Y' = \frac{(a_y U + b_y V) F}{a_0 + a_x U + b_x V}; Z' = \frac{(a_z U + b_z V) F}{X_0 + a_x U + b_x V}. \quad (3.34)$$

Хотя плоскость изображения в общем случае не ортогональна оптической оси, в данном случае изображение оказалось ортогональным к оптической оси. Это избавляет нас от процедуры проектирования изображения на плоскость.

Итак, если с термограммы снято температурное поле $T^{\theta} Y', Z'$ с координатами точек (Y', Z') на термограмме, то реальное температурное поле будет иметь вид:

$$T^{\theta}_{\text{реал}}(U, V) = T^{\theta} \left(\frac{a_y U + b_y V}{X_0 + a_x U + b_x V} F, \frac{a_z U + b_z V}{X_0 + a_x U + b_x V} F \right). \quad (3.35)$$

где U, V — координаты точки на фрагменте объекта; X_0 — расстояние между тепловизором и объектом; F — фокусное расстояние оптической системы.

3.2. НЕСТАЦИОНАРНЫЕ ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ПОЛЯ

В сложной технологии температурных измерений серьезные затруднения возникают при исследовании температур поверхностей тел, находящихся в условиях нестационарного теплообмена с окружающими телами и средой. В общем случае все строительные конструкции в той или иной степени эксплуатируются при нестационарных тепловых воздействиях. Следовательно, измерение температур в процессах остывания и нагрева конструкций является очень важной задачей. Из многих факторов, от которых зависит точность измерения нестационарных температур, особое значение приобретают тепловая и механическая инерция измерительного прибора. Механическая инерция измерительного прибора в основном определяется его передаточными и регистрирующими звеньями, например скоростью развертки изображения в тепловизорах. Тепловая инерция присуща чувствительному элементу прибора термодатчику и проявляется в том, что термодатчик не успевает мгновенно следить за изменениями температуры исследуемого тела. Во всех этих случаях приходится оценивать инерцию прибора и скорость изменения температур. В общем случае следует сравнивать время формирования кадра в тепловизорах и скорость изменения температуры объекта. Если температура объекта изменяет свою величину, равную температурной чувствительности измерителя за время, в несколько раз превосходящее продолжительность формирования кадра, то в этом случае порядок измерений такой же, как и при стационарных условиях. Этот случай является наиболее типичным при исследованиях в области строительной теплофизики.

В случае медленно меняющихся температур следует еще учитывать дрейф температурной чувствительности приемника излучения, что особенно характерно для охлаждаемых жидким азотом приемников.

Те же проблемы возникают и при измерении стационарных температурных полей на поверхности протяженных объектов с подвижного носителя, движущегося с определенной скоростью относительно исследуемого объекта. В качестве примера можно привести исследование с самолетов при изучении распределения температур водной и земной поверхности, контроля теплопотерь в промышленных и жилых районах, контроля качества теплоизоляции трубопроводов и т.д. При этих исследованиях скорость движения носителя (самолета, автомобиля и т.п.) адекватна скорости изменения нестационарных температур. Здесь возникают проблемы, связанные с особенностями измерения температур естественных поверхностей с воздуха.

Еще одной проблемой, связанной с регистрацией нестационарных температур, является выявление взаимосвязи теплофизических характеристик исследуемого тела с величинами поверхностных температур, фиксируемых прибором. Даже в простейшем случае охлаждение или нагревание тел в среде с постоянной температурой, предполагаемая независимость теплофизических свойств и коэффициентов теплообмена от температуры, решение задач теплообмена сопряжено с значительными трудностями.

Теоретические и экспериментальные исследования нагрева и охлаждения тел показывают, что с течением некоторого времени после начала теплообмена закономерности изменения температуры существенно упрощаются и наступает регулярный режим первого рода. Изменение температуры в любой точке тела $U(X, Y, Z, \tau)$ в регулярном режиме теплообмена выражается экспоненциальной зависимостью

$$U(X, Y, Z, \tau) - t = AUe^{-m\tau}, \quad (3.36)$$

где X, Y, Z — координаты точки; τ — текущий момент времени, t — температура окружающей среды.

Появляется возможность нахождения общей характеристики для оценки быстроты реакции тела или системы тел на воздействие окружающей среды. Такой величиной является темп регулярного режима m , который имеет одно и то же значение для всех точек системы в стадиях регулярного охлаждения или нагревания.

В практике строительной теплофизики встречаются и другие виды теплообмена. Например, при переменной температуре окружающей среды, в частности при изменении ее по прямолинейному закону, а также при периодических тепловых воздействиях. При упорядочении этих видов теплообменов возникает вопрос с регулярными режимами второго и третьего родов.

Простота закономерностей изменения температуры в стадиях регулярных режимов позволяет связать величину темпа охлаждения или нагревания тела с его физико-геометрическими параметрами и внешними условиями теплообмена, поэтому теория регулярных режимов может быть рекомендована для анализа температурных полей и тепловых потоков объектов в процессе их охлаждения и нагрева.

3.3. ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ С ПОДВИЖНОГО НОСИТЕЛЯ АППАРАТУРЫ

Наблюдение и регистрация температурных полей с подвижного носителя (автомашины, самолета, вертолета) значительно увеличивают объем получаемой информации и повышают эффективность проведения сравнительной оценки теплозащиты наружных ограждений зданий и сооружений при обследовании жилых массивов.

Дистанционные температурные измерения, проводимые из удаленной точки или с борта самолета или вертолета, подвержены ослаблению сигнала. Уровень ослабления зависит от поглощения сигнала, расстояния до исследуемого объекта и отражения радиации.

Многочисленные типы радиационной измерительной аппаратуры, разрабатываемой в настоящее время, можно разбить на чувствительные ко всему солнечному спектру излучения, только к видимому участку спектра и к заданному диапазону длины волны излучения, а также с узко направленным углом зрения и воспринимающим излучение во всей сфере излучения полностью.

Для измерения энергии теплового инфракрасного излучения естественных поверхностей применяют радиометр, который имеет ограниченный сферический угол зрения (конус), и измеренная определенная часть излучения поверхности в полусфере дает точный результат. Если известны поток радиации и длина волн излучения поверхности, то температура поверхности может быть рассчитана на основе закона Стефана-Больцмана с учетом параметров атмосферы.

Тепловизионные системы, установленные на подвижном наземном или воздушном носителе, позволяют воспроизводить на экране видеоконтрольного устройства тепловой рельеф местности.

Обзор местности осуществляется сканирующей по определенному закону оптической системой с узким мгновенным полем зрения. При аэросъемке для получения тепловых карт, обычно используются линейные сканирующие системы. Построчное сканирование осуществляется вращением зеркала вокруг оси, установленной параллельно продольной оси самолета. При повороте зеркала на угол 2β просматривается пространство на местности в виде полосы (линии), перпендикулярной направлению полета. Кадровая развертка осуществляется движением носителя. Ширина полосы захвата, как это видно из рис. 3.5, в направлении полета будет равна:

$$\Delta X = 2 \operatorname{tg} \frac{\Delta\beta}{2} H \text{ или } \Delta X \approx \Delta\beta H,$$

где $\Delta\beta$ — мгновенное поле зрения оптической системы; H — высота полета.

При сканировании зеркала со скоростью ω за единицу времени углом $\Delta\beta$ в боковом направлении будет просматриваться полоса длиной $\Delta Z = V \Delta\beta$, подставив в это выражение $V = \omega H$, получим $\Delta Z = \Delta\beta H \omega$.

Если вместо зеркала сканирующим элементом служит другое устройство, например призма с n -отражающими поверхностями, то

$$\Delta Z = \Delta\beta H \omega n. \quad (3.37)$$

Чтобы при просмотре местности не было смазывания изображения, обусловленного движением вперед носителя аппаратуры, время перемещения изображения местности по чувствительному приемнику должно быть в k -раз больше инерционности приемника τ .

Число разрешаемых элементов в единицу времени определяется из соотношения

$$N = 2\pi \frac{\omega t}{\Delta\beta}. \quad (3.38)$$

Следовательно, время перемещения изображения одного элемента ($N=1$) на угловую величину, соответствующую значению $\Delta\beta$, будет $t = \Delta\beta / 2\pi\omega$.

Отсюда следует, что для четкого обеспечения просмотра местности надо выполнить условие

$$k\tau \leq \frac{\Delta\beta}{2\pi\omega}. \quad (3.39)$$

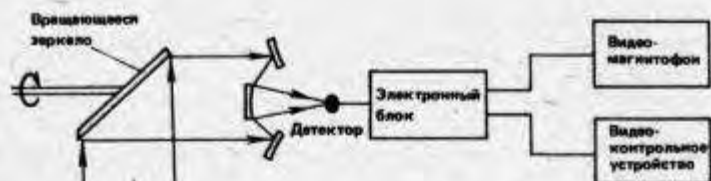
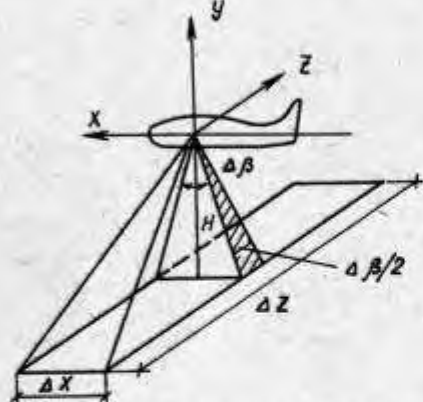


Рис.3.5. Схема обзора местности ИК системой с линейным сканированием с борта самолета



Кроме того, скорость сканирования зеркала V должна обеспечить просмотр местности без пропусков; для этого необходимо, чтобы $\Delta Z \geq V \leq \Delta\beta H \omega n$ (V – скорость полета носителя). Из этого соотношения и неравенства (3.39) следует, что скорость сканирования должна быть $\omega \geq V/Hn \Delta\beta$, в то же время

$$\Delta\beta/2\pi k\tau \geq \omega. \quad (3.40)$$

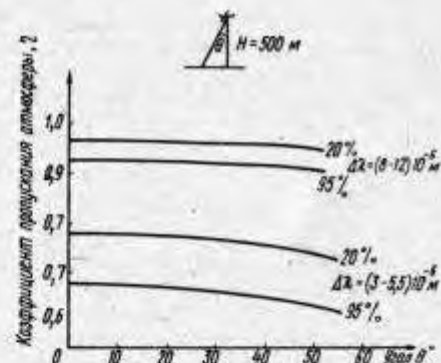
Из этих неравенств легко вывести соотношения для мгновенного угла и скорости сканирования в зависимости от условий полета и параметров приемника, рад,

$$\Delta\beta \geq \sqrt{\frac{2\pi k\tau V}{nH}}; \quad (3.41)$$

$$\omega \geq \sqrt{\frac{1}{2\pi k\tau n} \frac{V}{H}}. \quad (3.42)$$

Из формулы (3.41) следует, что мгновенный угол поля зрения прибора для снятия тепловой карты местности определяется отноше-

Рис.3.6. Среднее пропускание атмосферы в зависимости от угла обзора тепловизора и относительной влажности для различных спектральных диапазонов



нием V/H и постоянной времени приемника $K\tau$. Значения V и H определяются назначением аппаратуры, а n может быть вычислено по формуле $n = 360/2\beta$. Отношение V/H является важным параметром при расшифровке термоизображений, так как оно описывает угловую скорость, с которой точка на земле следует в направлении движения носителя. Поле зрения и расстояние до объекта определяются требуемой разрешающей способностью и размерами элементов ограждения.

Высокоскоростные тепловизионные системы с двумерным сканированием позволяют получать тепловое изображение местности в реальном масштабе времени. Данные записываются в ходе измерений на видеомагнитофон. Скорость движения изображения на видеоконтрольном устройстве при воспроизведении записи позволяет проводить анализ и регистрацию температурных полей объектов.

Для установления однозначной зависимости между контрастом изображения и разностью температур привязка изотермического уровня тепловизора в одной или двух точках осуществляется к объектам с известной его температурой или температурой воздуха. В некоторых случаях это может быть выполнено по чувствительности прибора, соответствующей выбранному диапазону измеряемых температур.

ИК система фиксирует не только излучение, испускаемое объектом, но и отраженную и рассеянную от объекта солнечную радиацию и излучение окружающих объектов. На тепловое изображение сильно влияют атмосферные явления. Эти факторы обуславливают дополнительные требования к аппаратуре и условиям измерений. Измерения проводятся не ранее чем через 3–6 ч после захода солнца, при отсутствии осадков. Скорость ветра должна быть не более 15 м/ч. Минимальная разность температур внутреннего и наружного воздуха во время проведения измерения и, по крайней мере, за 4 ч до их начала должна быть не менее 18°C.

Поверхность объектов не должна быть покрыта снегом, инеем, росой. При измерениях температуры на больших расстояниях до объекта используются обычно системы, работающие в диапазоне

8–14·10⁻⁶ м, так как коэффициент пропускания атмосферы в этом диапазоне выше, чем в диапазоне 3–5·10⁻⁶ м. На рис.3.6 показано, что в диапазоне 8–14·10⁻⁶ м коэффициент пропускания атмосферы на расстоянии 500 м равен 0,93 и 0,97 при относительной влажности соответственно 95 и 20% и в диапазоне 3–5,6·10⁻⁶ м, соответственно – 0,68 и 0,78%. Кроме того, из рис.3.6 видно, что увеличение длины пути при увеличении угла обзора вызывает меньшие изменения коэффициента пропускания атмосферы в диапазоне 8–14·10⁻⁶ м.

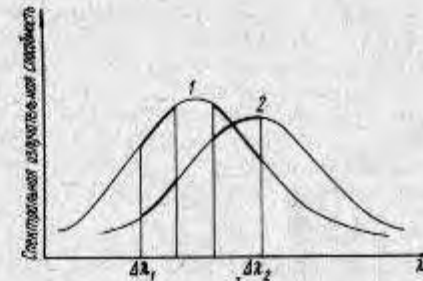
3.4. ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ В ДВУХ УЧАСТКАХ СПЕКТРА ТЕПЛОвого ИЗЛУЧЕНИЯ

Инфракрасное излучение объекта пропорционально его абсолютной температуре T_0 и излучательной способности ϵ_0 . Источники постороннего излучения (фон, небо, Солнце и т.д.) с температурой T_p и излучательной способностью ϵ_p могут вносить помехи в зависимости от характеристик их излучения и отражательной способности R_0 самого объекта. Таким образом, в тепловизоре происходит сложение всех этих излучений. При работе в одном спектральном диапазоне на результирующее изображение оказывают влияние параметры T_0 , ϵ_0 , R_0 , T_p и ϵ_p . Влияние этих параметров на формируемое тепловое изображение тепловизором различно, но в любом случае оценка влияния одного из них требует знания другого, поэтому при проведении измерений в одном участке спектра с помощью одноканальных систем имеет большое значение знания величин всех параметров, определяющих величину видеосигнала. Даже при наиболее благоприятных условиях, когда нет посторонних засветок, фактическая величина видеосигнала в спектральных диапазонах $\Delta\lambda_1$ и $\Delta\lambda_2$ объекта, имеющего постоянную излучательную способность во всем спектре зависит от двух величин ϵ_0 и T_0 . Измерительная система сводит их в один параметр, энергию излучения.

При использовании двухканальных систем или систем, работающих в двух или более участках спектров, можно определять отдельные неизвестные параметры, используя их соотношения. Тепловизор, работающий в двух спектральных диапазонах, позволяет определять температуру T_0 и излучательную способность ϵ_0 объекта по двум соотношениям, каждое из которых определяется в выбранном спектральном диапазоне. Так называемая двухцветная методика позволяет более оперативно определять тепловые характеристики объекта, если объект излучает тепловую энергию как серое тело, что справедливо для большинства строительных объектов.

В том случае, когда излучательная способность объекта является функцией длины волны $\epsilon_0(\lambda)$, двухцветный тепловизор позволяет получить информацию о взаимосвязи таких параметров, как излучательная способность и температура. При этом также можно определять области с различными тепловыми свойствами, которые не могут быть разделены при одноцветных измерениях, т.е. две области могут давать одинаковое излучение в одном спектральном

Рис.3.7. Спектральная излучательная способность поверхностей с разной температурой, определяемой в разных участках спектра
1 – излучение поверхности при температуре $T_0' [\epsilon_0 \cdot \frac{\partial R(\lambda, T_0')}{\partial \lambda}]$; 2 – излучение поверхности при температуре $T_0 [\epsilon_0 \cdot \frac{\partial R(\lambda, T_0)}{\partial \lambda}]$



диапазоне $\Delta\lambda_1$ даже если температура одной из них выше, чем у другой. Это бывает в том случае, когда проводятся сравнительные измерения области с более высокой температурой и более низкой излучательной способностью, и области с более низкой температурой и более высокой излучательной способностью. Использование второго спектрального диапазона $\Delta\lambda_2$ дает возможность разделить излучение этих областей, и, сравнивая их между собой, наблюдать тепловой контраст между исследуемыми областями во втором спектральном диапазоне (рис.3.7).

Этот вывод наглядно иллюстрируется следующим примером. Используя двухканальный тепловизор, имеющий два спектральных диапазона чувствительности $\Delta\lambda_1 = 3-5 \cdot 10^{-6}$ м и $\Delta\lambda_2 = 8-14 \cdot 10^{-6}$ м, будем исследовать два объекта. Первый – с температурой $T_1 = 300$ К и коэффициентом излучения $\epsilon_1 = 0,95$ и второй – с $T_2 = 330$ К и коэффициентом излучения $\epsilon_2 = 0,62$. Подсчитаем энергию излучения, фиксируемую тепловизором от этих объектов в разных участках спектра. В диапазоне $\Delta\lambda_1 = 3-5 \cdot 10^{-6}$ м

$$W_1' = \int_3^5 \epsilon_1 \frac{dR(\lambda, T_1)}{d\lambda} d\lambda = 0,95 \cdot 5,95 \cdot 10^{-4} = 5,67 \cdot 10^{-4} \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-2};$$

$$W_2' = \int_3^5 \epsilon_2 \frac{dR(\lambda_1, T_2)}{d\lambda} d\lambda = 0,62 \cdot 1,61 \cdot 10^{-3} = 1,0 \cdot 10^{-3} \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-2}. \quad (3.43)$$

В диапазоне $\Delta\lambda_2 = 8-14 \cdot 10^{-6}$ м

$$W_1^2 = \int_8^{14} \epsilon_1 \frac{dR(\lambda, T_1)}{d\lambda} d\lambda = 0,95 \cdot 1,49 = 1,42 \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-2};$$

$$W_2^2 = \int_8^{14} \epsilon_2 \frac{dR(\lambda, T_2)}{d\lambda} d\lambda = 0,62 \cdot 2,29 = 1,42 \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-2}. \quad (3.44)$$

Приведенный пример показывает, что в диапазоне $\Delta\lambda_2$ теплового контраста на экране тепловизора между рассматриваемыми объектами нет, а в диапазоне $\Delta\lambda_1$ – объекты различаются по тепловому контрасту более, чем в 5 раз.

Этот случай часто встречается в практике, когда нужно отделить тепловое изображение объекта от фона. Правда, могут встретиться случаи, когда характеристики объекта и фона совпадают в обоих используемых участках спектра. В этих случаях используют и большее количество диапазонов, разнося их как можно дальше друг от друга по спектру. На основе использования двух канальных и многоканальных оптических систем разрабатываются новые методики тепловых измерений с учетом различных уровней измеряемых температур.

В качестве примера можно привести использование информационного параметра Y , равного отношению спектральных потоков излучения в двух участках спектра Φ_1 и Φ_2 ,

$$Y = \Phi_1(\lambda) / \Phi_2(\lambda), \quad (3.45)$$

или двойное отношение потоков энергии в четырех ограниченных участках спектра

$$Y = [\Phi_1(\lambda) / \Phi_2(\lambda)] / [\Phi_3(\lambda) / \Phi_4(\lambda)]. \quad (3.46)$$

Чтобы ответить на вопрос о полноте использования тех или иных участков спектра, необходимо провести анализ зависимости $y = F(T)$ во всем заданном диапазоне температур. Для измерения низких температур более удобным является диапазон $8-13 \cdot 10^{-6}$ м; для измерения высоких температур — $3-5 \cdot 10^{-6}$ м. Таким образом, анализ одной и той же области наблюдения в двух цветах обеспечивает точную оценку температуры в представляющем интерес диапазоне.

Запись изображения и цифровая обработка сигнала являются важным этапом оценки данных, полученных с помощью двухцветной ИК системы. Возможно проведение математических или статистических оценок для каждого элемента в каждом диапазоне. В зависимости от распределения поля излучения в наблюдаемой области статистическое изучение взаимосвязи изображений в каждом спектральном диапазоне может дать совершенно различные результаты.

Например, фон морской поверхности с солнечным бликом при сканировании в спектральном диапазоне $3-5 \cdot 10^{-6}$ м дает такое отраженное излучение, которое по своим характеристикам очень хорошо соответствует истинному распределению температуры Солнца T_S .

В этом диапазоне наиболее яркие элементы изображения обусловлены гребнями волн, которые дают наиболее сильное отражение, а не собственным излучением воды. В противоположность этому в диапазоне $8-13$ мкм наиболее сильное излучение обусловлено тепловым излучением водной поверхности при наблюдении поверхностей волн, расположенных перпендикулярно к лучу зрения наблюдателя. Так как природа излучения каждого элемента изображения различна для различных длин волн, то наблюдается отсутствие спектральной корреляции у этих двух изображений.

Гораздо более сильная спектральная корреляция имеет место при наблюдении фона грунта или любого неотражающего объекта, так как процессы излучения в двух диапазонах связаны с температурой T_t , поэтому может быть значительное различие между разными фонами для соответствующих участков одной наблюдаемой области. Эти различия могут быть проанализированы с помощью системы, работающей в двух диапазонах (двухцветной), с применением статистических методов, основанных на цифровой обработке.

Другие виды цифровой обработки позволяют проводить анализ информации, поступающей по двум спектральным каналам в реальном масштабе времени. Для этого могут быть использованы микропроцессоры и мини-ЭВМ.

В последних исследованиях показано значение линейного совмещения двухцветных изображений одной области для повышения вероятности обнаружения объекта. При работе по этой методике используется цветной телевизионный монитор, на котором изображение, полученное в одном канале, представляется в одном цвете, а изображение, полученное в другом канале, в другом цвете. Такая форма представления изображений обеспечивает более точную визуализацию тепловых явлений.

Как теоретические, так и экспериментальные исследования показали полезность использования двухцветных (в двух спектральных диапазонах) наблюдений при анализе ИК изображений. С самого начала было признано большое значение таких измерений, в основном при анализе структуры объектов. В настоящее время используются двухканальные системы с выводом информации в дискретной форме. Потребителям поставляется как оборудование, так и математическое обеспечение. Широкое внедрение такого оборудования приведет к дальнейшему развитию методики двухцветных измерений.

3.5. ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ

Величина погрешности измерения температуры зависит от метода ее измерения. Применяя метод "одного репера" необходимо знать разницу выходных сигналов тепловизора ΔL , коэффициент излучения объекта ϵ , спорную (реперную) температуру T_p . Каждый из перечисленных параметров определяется экспериментально и, следовательно, с некоторой погрешностью, которая приводит к погрешности в определении температуры. В соответствии с методом полного дифференциала погрешность можно определить по формуле

$$\delta T = \sqrt{\left[\frac{\partial T}{\partial \Delta L} \delta(\Delta L) \right]^2 + \left[\frac{\partial T}{\partial \epsilon} \delta \epsilon \right]^2 + \left[\frac{\partial T}{\partial T_p} \delta T_p \right]^2}. \quad (3.47)$$

Величина результирующей погрешности зависит также и от неоднородности температурного поля предметов, окружающих объект. Однако при выводе основных расчетных формул было принято излучение, отраженное от объекта, равномерным. Учитывая это, ве-

личину частных погрешностей можно определить путем дифференцирования уравнения, определяющего температуру предмета,

$$T = j \left[j/T_p + \frac{\Delta L}{\epsilon} \right]. \quad (3.48)$$

В результате дифференциации формулы (3.48) выражения получаются громоздкие неудобные для анализа, поэтому разложим правую часть уравнения в ряд Тейлора и ограничимся линейным членом разложения.

$$T = T_p + \frac{\Delta L}{\epsilon} \frac{1}{j(T)}. \quad (3.49)$$

Дифференцируя (3.49), находим:

$$\delta(T_p) = \delta T_p. \quad (3.50)$$

$$\delta(T_{\Delta L}) = \frac{\delta L}{\epsilon} \frac{1}{j(T)}, \quad (3.51)$$

$$\delta(T_{\epsilon}) = \frac{\delta \epsilon}{\epsilon^2} \frac{\Delta L}{j(T)}. \quad (3.52)$$

Учитывая, что $\Delta L \approx \epsilon j(T) (T - T_p)$, подставим его в уравнение (3.52), получим

$$\delta T_{\epsilon} = -\frac{\delta \epsilon}{\epsilon} (T - T_p). \quad (3.53)$$

Подставляя (3.50), (3.51), (3.53) в (3.47), находим:

$$\delta T = \sqrt{(\delta T_p)^2 + [(T - T_p) \frac{\delta \epsilon}{\epsilon}]^2 + 1,77 \left(\frac{\delta L}{\epsilon}\right)^2}, \quad (3.54)$$

где 1,77 — коэффициент, представляющий величину $1/[j'(T)]^2$ при $A = 5 \cdot 10^5$, $B = 3 \cdot 10^3$; $T = 300\text{K}$.

Анализ уравнения (3.54) позволяет сделать вывод, что погрешность измерения температуры будет тем меньше, чем меньше погрешность измерения опорной температуры, степени черноты и выходного сигнала, а также, когда коэффициент излучения ближе к единице и когда опорная температура ближе к измеряемой.

В табл. 3.1 приведены некоторые результаты расчетов максимальной погрешности измерения температур, иллюстрирующие эти выводы.

Аналогично можно определить погрешность метода "двух реперов". В табл. 3.2 приведены результаты расчета температур по формулам (3.12) и (3.14), характеризующие метод "двух реперов". Расчет температуры проводился при $t_1 = 12,5^\circ\text{C}$; $t_0 = 8^\circ\text{C}$; $L_1 = 3,75\text{ В}$; $L = 1,25\text{ В}$.

Сопоставление результатов расчета позволяет сделать следующие выводы:

Таблица 3.1. Исходные данные и результаты расчета максимальной методической погрешности измерения температуры

$\delta T_{p1}, ^\circ\text{C}$	$T - T_{p1}, ^\circ\text{C}$	ϵ	$\delta \epsilon$	$\delta L_1, \beta$	$\delta T_1, ^\circ\text{C}$
0,1	2	0,9	0,1	0,1	0,24
0,1	5	0,9	0,1	0,1	0,56
0,1	2	0,9	0,1	0,2	0,38
0,5	2	0,9	0,1	0,1	0,54
0,1	2	0,9	0,1	0,5	0,78

Таблица 3.2. Результаты расчета температур по методу "двух реперов"

L	Расчетная температура, $^\circ\text{C}$, по			
	формуле (3.12) при B, равном			формуле (3.14)
	2000	2500	3000	
1	7,52	7,52	7,53	7,55
1,5	8,47	8,47	8,48	8,45
2	9,39	9,40	9,41	9,35
2,5	10,30	10,31	10,32	10,25
3	11,18	11,20	11,21	11,15
3,5	12,06	12,07	12,07	12,05
4	12,93	12,92	12,91	12,95
4,5	13,78	13,76	13,73	13,85

а) изменение в широких пределах коэффициента B слабо влияет на результат расчета;

б) температура, рассчитанная по формулам (3.12) и (3.14), от температур, характерных для задач строительной физики, отличаются не более чем на $0,1^\circ\text{C}$, поэтому погрешность метода "двух реперов" можно определять, применяя метод полного дифференциала к формуле (3.14).

Запишем выражение для погрешности:

$$\delta t = \sqrt{\left(\frac{\partial t}{\partial t_0} \delta t_0\right)^2 + \left(\frac{\partial t}{\partial t_1} \delta t_1\right)^2 + \left(\frac{\partial t}{\partial \Delta L} \delta \Delta L\right)^2 + \left(\frac{\partial t}{\partial \Delta L_0} \delta \Delta L_0\right)^2}. \quad (3.55)$$

Вычислим производные

$$\frac{\partial t}{\partial t_0} = 1 - \frac{\Delta L}{\Delta L_0}; \quad \frac{\partial t}{\partial t_1} = \frac{\Delta L}{\Delta L_0}; \quad \frac{\partial t}{\partial \Delta L} = \frac{t_1 - t_0}{\Delta L_0}; \quad \frac{\partial t}{\partial \Delta L_0} = -\frac{(t_1 - t_0)}{(\Delta L_0)^2} \Delta L.$$

Полагая $\delta t_0 = \delta t_1$ и $\delta(\Delta L) = \delta(\Delta L_0)$, находим:

$$\delta t = \sqrt{(\delta t_0)^2 \left[\left(\frac{\Delta L}{\Delta L_0}\right)^2 + \left(1 - \frac{\Delta L}{\Delta L_0}\right)^2 \right] + (\delta \Delta L)^2 \left(\frac{t_1 - t_0}{\Delta L_0}\right)^2} \times 1 + \left(\frac{\Delta L}{\Delta L_0}\right)^2 \leq \sqrt{\delta t_0^2 + 2(\delta \Delta L)^2 \left(\frac{t_1 - t_0}{\Delta L_0}\right)^2}. \quad (3.56)$$

Анализ формулы (3.56) свидетельствует, что погрешность измерения температуры растет, если растет погрешность измерения реперных температур и погрешность измерения выходных сигналов тепловизора. Отметим, что для снижения погрешности измерения выходного сигнала тепловизора оператору необходимо переключаться на более чувствительный диапазон.

Величина отношения $(t_1 - t_0) / \Delta L$ не зависит от работы оператора; при применении тепловизора она возрастает с убыванием коэффициента пропускания атмосферы и коэффициента излучения объекта, а также с убыванием измеряемой температуры. Измерения, проводимые в тумане или на объекте с небольшим коэффициентом излучения, дадут большую погрешность, нежели измерения, проводимые в ясную погоду на объекте с коэффициентом излучения, близким к единице, и при прочих равных условиях. В табл. 3.3 приведены исходные данные и результаты расчетов погрешности метода "двух реперов".

Таблица 3.3. Погрешность метода "двух реперов"

Исходные данные			Погрешность
$\delta t_0, ^\circ\text{C}$	$\delta \Delta L, \text{В}$	$\frac{t_1 - t_0}{\Delta L}, \text{OC/В}$	$\delta t_1, ^\circ\text{C}$
0,1	0,02	1,5	0,1
0,1	0,05	1,5	0,14
0,1	0,1	1,5	0,23
0,2	0,02	1,5	0,2
0,4	0,02	1,5	0,4
0,1	0,05	1	0,12
0,1	0,5	2	0,17
0,1	0,05	3	0,23

Сопоставляя результаты расчета погрешности для метода "одного репера" и метода "двух реперов", находим, что они приблизительно одинаковы. В то же время, как уже отмечалось, температуры предпочтительнее определять методом "двух реперов", так как в этом случае результаты расчета очень слабо зависят от погрешностей градуировки и вообще не зависят от погрешности коэффициентов излучения и пропускания. При выводе расчетных формул для определения температур было сделано предположение, что температурное поле окружающих предметов равномерно. В действительности это предположение практически никогда не выполняется и, следовательно, температура определяется с некоторой погрешностью. Для исследования этой погрешности рассмотрим модель реальной радиационной ситуации.

Пусть плоскость ω_0 моделирует поверхность исследуемого объекта, а плоскость ω — окружающие предметы. Требуется определить температуру T_B элементарной площадки B . Опорная температура, измеренная на элементарной площадке A , равна T . Если бы темпера-

тура во всех точках плоскости ω_0 была одинакова, то уравнение для определения T полностью совпало бы с уравнением (3.4). Чтобы смоделировать неравномерность температур окружающих предметов, выделим на плоскости ω_0 круг K_0 радиусом R . Предположим, что температура этого круга равна T_k , а температура точек плоскости вне круга T_0 .

Уравнения энергетического баланса между чувствительным элементом тепловизора и элементарными площадками A и B запишутся в виде

$$L_A = \epsilon J(T_A) + L_{\text{отр}}(A), \quad (3.57)$$

$$L_B = \epsilon J(T_B) + L_{\text{отр}}(B), \quad (3.58)$$

где $L_{\text{отр}}(A)$, $L_{\text{отр}}(B)$ — отраженный от поверхности объекта поток энергии, регистрируемый тепловизором.

Вычитая (3.57) и (3.58) находим, что

$$L_A - L_B = \epsilon [J(T_A) - J(T_B)] + [L_{\text{отр}}(A) - L_{\text{отр}}(B)]. \quad (3.59)$$

Приравнявая $L_A - L_B = \Delta L + \delta L$; $\Delta L = \epsilon [J(T_A) - J(T_B)]$;

$$\delta L = L_{\text{отр}}(A) - L_{\text{отр}}(B)$$

и разделив δL на ΔL , находим выражение для относительной методической погрешности

$$\delta L / \Delta L = [L_{\text{отр}}(A) - L_{\text{отр}}(B)] / \epsilon [J(T_A) - J(T_B)]. \quad (3.60)$$

На практике чаще всего встречаются два типа радиационной ситуации, когда расстояние H велико по сравнению с характерным размером предмета, имеющего температуру, отличную от температуры остальных окружающих предметов, и когда расстояние H мало. Радиационная ситуация первого типа возникает в том случае, если напротив исследуемого объекта находится человек или горит электрическая лампа. Если же на поверхности исследуемого объекта укреплен отопительный прибор, то можно говорить о радиационной ситуации второго типа. В первом случае разница $L_{\text{отр}}(A) - L_{\text{отр}}(B)$ будет максимальна, если одна из элементарных площадок, например A , будет иметь своей проекцией на плоскость ω_0 центр круга K_0 . Во втором случае измерение опорной температуры на элементарной площадке A (например, за отопительным прибором) заведомо неразумно. Площадку для измерения опорной температуры следует выбрать подальше от центра круга K_0 . Будем считать, что опорная температура в этом случае измеряется на элементарной площадке. Выражение для относительной методической погрешности в этом случае будет иметь вид:

$$\frac{\delta L}{\Delta L} = \frac{L_{\text{отр}}(C) - L_{\text{отр}}(B)}{\epsilon [J(T_C) - J(T_B)]} \quad (3.61)$$

Вычислим величины $L_{отр}(A)$, $L_{отр}(B)$, $L_{отр}(C)$. Для вычисления $L_{отр}(A)$ введем на плоскости ω_0 систему полярных координат с началом отсчета в центре круга K_0 . Тогда величина потока энергии, отраженного площадкой A (в спектральном диапазоне используемого тепловизора), может быть вычислена по формуле:

$$L_{отр}(A) = \frac{1-\epsilon}{\pi} \left[\int_0^{2\pi} \int_0^R J(T_1) \frac{\cos^2 \beta}{d^2} r dr d\varphi + \int_0^{2\pi} \int_0^R J(T_0) \frac{\cos^2 \beta}{d^2} r dr d\varphi \right] \quad (3.62)$$

где $\cos \beta = H/\sqrt{H^2+r^2}$; $d = \sqrt{H^2+r^2}$.

Вычисляя интегралы в правой части (3.62), находим

$$L_{отр}(A) = (1-\epsilon) J(T_0) + (1-\epsilon) [J(T) - J(T_0)] \frac{R^2}{R^2 + H^2} \quad (3.63)$$

Для вычисления $L_{отр}(B)$ заменим круг на сектор кругового кольца с центром в точке B_0 . Для того чтобы коэффициенты облученности сектора и круга были близки, произведем расчет:

$$R_3 - R_1 = 2R, \quad (3.64)$$

$$\varphi_0 (R_3^2 - R_1^2) = \pi R^2. \quad (3.65)$$

Введем полярные координаты с центром в точке B_0 и углом φ , отсчитываемым от луча $B_0 A_0$. Тогда для $L_{отр}(B)$ можно записать:

$$L_{отр}(B) = \frac{1-\epsilon}{\pi} \int_0^{\varphi_0} \int_{R_1}^{R_3} J(T_0) \frac{H^2}{(H^2+r^2)^2} r dr d\varphi + \frac{2(1-\epsilon)}{\pi} \int_0^{\varphi_0} \int_{R_1}^{R_3} J(T_1) \frac{rH^2}{(r^2+H^2)^2} r dr d\varphi + \frac{1-\epsilon}{\pi} \int_0^{\varphi_0} \int_{R_1}^{R_3} J(T_0) \frac{H^2 r}{(H^2+r^2)^2} r dr d\varphi + \frac{2(1-\epsilon)}{\pi} \int_0^{\varphi_0} \int_{R_1}^{R_3} J(T_0) \frac{rH^2}{(r^2+H^2)^2} r dr d\varphi. \quad (3.66)$$

После вычисления интегралов находим

$$L_{отр}(B) = (1-\epsilon) J(T_0) + (1-\epsilon) \frac{\varphi_0}{\pi} [J(T) - J(T_0)] \times \left[\frac{H^2}{H^2 + R_1^2} - \frac{H^2}{H^2 + R_3^2} \right]. \quad (3.67)$$

С учетом (3.64) и (3.65) преобразуем найденное выражение:

$$L_{отр}(B) = (1-\epsilon) J(T_0) + (1-\epsilon) [J(T_k) - J(T_0)] \frac{H^2 R^2}{(H^2 + R_1^2) [H^2 + (R_1 + 2R)^2]}. \quad (3.68)$$

Аналогично может быть найдено выражение для

$$L_{отр}(C) = \frac{(1-\epsilon) J(T_0) + (1-\epsilon) [J(T_k) - J(T_0)] \times}{H^2 R^2} \frac{1}{(H^2 + R_2^2) [H^2 + (R_2 + 2K)^2]}. \quad (3.69)$$

Подставляя найденные выражения в (3.61), находим окончательную формулу для расчета методической погрешности

$$\frac{\delta L}{\Delta L} = \frac{1-\epsilon}{\epsilon} \left| \frac{J(T_k) - J(T_0)}{J(T_A) - J(T_B)} \right| F, \quad (3.70)$$

где $F = R^2 \left[\frac{1}{R^2 + H^2} \frac{H^2}{(H^2 + R_1^2)(H^2 + (R_1 + 2R)^2)} \right]$ - для радиационной ситуации первого типа;

$F = H^2 R^2 \left\{ \frac{1}{(H^2 + R_1^2)(H^2 + (R_1 + 2R)^2)} - \frac{1}{(H^2 + R_2^2)(H^2 + (R_2 + 2R)^2)} \right\}$ - для радиационной ситуации второго типа.

Из анализа выражения (3.70) можно сделать следующий вывод, что методическая погрешность, вызванная неравномерностью температур окружающих предметов, будет минимальна, если:

- степень черноты объекта близка к 1;
- неравномерность температур окружающих предметов $(T_1 - T_0)$ - минимальна;
- размер предметов, вызывающих неравномерность температурного фона, R минимален;
- расстояние между реперной и исследуемой площадками $R + R_1$ минимально;
- расстояние между объектом и предметами, вызывающими неравномерность температурного фона H , максимально.

Для более детального изучения методической погрешности, вызванной неравномерностью температур окружающих предметов, провели ряд расчетов. Как уже отмечалось, что при натуральных измерениях неоднородность температур часто вызывается человеком, электрической лампой накаливания, отопительным прибором. При проведении расчетов каждый из указанных предметов моделировался кругами, радиусы которых соответственно равны 0,5; 0,005; 1 м. Исходная информация для расчета методической погрешности от неравномерности температуры окружающих предметов приведена в табл. 3.4.

Результаты расчета относительной методической погрешности, вызванной неравномерностью температуры окружающих предметов (радиационная ситуация 1 типа), приведены в табл. 3.5.

Таблица 3.4. Исходные данные для расчета методической погрешности от неравномерности температуры окружающих предметов

Параметр	Величина параметра для		
	человека	электролампы	отопительного прибора
$R, \text{ м}$	0,5	0,005	1
$t_{\text{о}}, \text{ }^{\circ}\text{C}$	18	18	18
$t_{\text{в}}, \text{ }^{\circ}\text{C}$	18	18	18
$t_{\text{с}}, \text{ }^{\circ}\text{C}$	13	13	13
$t_{\text{к}}, \text{ }^{\circ}\text{C}$	30	3000	60
ϵ	0,9	0,9	0,9
$R_2, \text{ м}$	—	—	var
$R_1, \text{ м}$	var	var	var
$H, \text{ м}$	var	var	0,1

Таблица 3.5. Относительная методическая погрешность, вызванная неравномерностью температуры окружающих предметов (радиационная ситуация I типа), %

Расстояние между объектом и предметом $H, \text{ м}$	Предмет, вызывающий неравномерность температуры окружающих предметов	
	человек	электролампа
1	6,72	3,13
2	1,92	0,76
3	0,81	0,31
4	0,43	0,16

Проведенное исследование методической погрешности вносит корректировку в разрабатываемую методику измерения температур, которая состоит в следующем:

во время измерений человек должен находиться на расстоянии не менее 1 м от объекта:

электрическая лампа накаливания, находясь на расстоянии более 1 м, практически не влияет на результаты измерения;

отопительный прибор, расположенный на поверхности исследуемого объекта, не влияет на результаты измерений, если исследования проводятся вне десятиметровой зоны, окружающей отопительный прибор.

Глава 4. МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ТЕПЛОВИЗИОННОЙ ИНФОРМАЦИИ

Тепловизионная информация может быть зарегистрирована на фотоносителе (фотопленке или фотобумаге) в виде термограммы, на электромагнитной ленте или электромагнитном диске, а также

может быть зафиксирована на электромагнитных или твердотельных запоминающих устройствах. В любом случае эта информация является промежуточной, так как основным результатом тепловизионного обследования объекта должно быть получение той или иной характеристики его теплового состояния. При этом следует различать качественную и количественную оценку полученной информации.

Качественная оценка результатов тепловизионного обследования объекта обеспечивает только функцию контроля тех или иных изменений в тепловом состоянии объекта по сравнению с другим аналогичным объектом, либо участками одного и того же объекта. Например, это может быть заключение о наличии какого-либо теплопроводного включения в обследуемой строительной конструкции, без анализа параметров этого включения, и оценки степени его влияния на общие и локальные характеристики этой конструкции. Обследование такого рода проводится при необходимости обнаружения различных дефектов в ограждающих конструкциях зданий, мест нарушения теплоизоляции, герметизации и уплотнения в стыковых соединениях элементов строительных конструкций, обнаружение протечек и промерзаний и т.д. Порядок и объем обработки данных зависит от целей и области использования метода.

При количественной оценке первым и основным требованием, предъявляемым к тепловизионной системе, является необходимость обеспечения измерения заданной характеристики теплового состояния обследуемого объекта, которая связана функциональной зависимостью с температурой поверхности объекта, измеряемого тепловизионным устройством. В первую очередь необходимо обеспечить достоверное измерение температуры объекта в отдельных точках или поля температур и привязки этих значений к пространственной координатной системе рассматриваемого объекта.

Затем необходимо определить градуировочную зависимость используемого прибора, то есть зависимость величины выходного сигнала от температуры поверхности эталонного излучателя — абсолютно черного тела.

Процесс обработки результатов в этом случае осложняется, поэтому его проведение требует от оператора определенных знаний и опыта. К тому же чем больше объем информации требуется определить, тем более трудоемким становится процесс ее обработки. И метод из оперативного может превратиться в долговременный и трудоемкий. Поэтому на этой стадии необходима автоматизация операции обработки информации, которая в свою очередь требует более детального изучения всего процесса измерений.

Общая система измерения инфракрасного излучения начинается с объекта (предмета) и заканчивается выходными данными ЭВМ. Инфракрасное излучение поверхности предмета проходит через атмосферу, систему линз, сканирующее устройство и фокусируется на детекторе инфракрасной камеры. Энергия инфракрасного излучения затем преобразуется в электрический сигнал, который или воспроизводится на экране, фотографируется, или вводится в аналоговое запоминающее устройство. Из аналогового запоминающего

устройства данные подаются в аналоговый цифровой преобразователь и затем накапливаются в буферном запоминающем устройстве; и, наконец, поступают в ЭВМ с последующим выходом данных. Это дает представление о работе системы в общих чертах, тем не менее с усложнением технологии в любом из направлений она может иметь более сложное устройство. Независимо от того как рассматривается система в ней всегда присутствуют два элемента: физический, связанный с природой излучения, и электрооптический, связанный с конструктивными особенностями прибора. Хорошее знание физики связано с хорошим знанием объекта. Физика инфракрасного излучения включает много переменных величин и их следует или принимать во внимание, или, по крайней мере, оценить степень их влияния на результаты измерений и убедиться, что они не являются определяющими.

Кратко ознакомимся с тем, какие данные и в каком количестве можно получить с помощью тепловизора. С помощью тепловизора за одну секунду можно получить данные о температуре 320 000 точек. Полное обследование поля обзора производится через каждую 1/25 с. За это время создается приблизительно 70 активных сканирующих линий. Так как эффективность сканирования составляет около 70%, то действительное время активного сканирования — только около $42 \cdot 10^{-3}$ с. В связи с наличием пустоты 30% времени сканирования используется неактивно. Кадр состоит из определенного количества отдельно сканируемых полей, наложенных одно на другое. В тепловизоре АГА-780 используется чередующаяся система развертки 4:1.

Все эти данные должны быть учтены оператором при выборе системы обработки данных и оценке их результативности.

4.1. ГРАДУИРОВКА ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ

Абсолютное значение температуры поверхности ограждения определяют по градуировочной кривой используемого тепловизора, представляющей собой зависимость сигнала тепловизора от температуры абсолютно черного тела. Согласно закону Планка и теории тепловизионной техники, градуировочная кривая аппроксимируется выражением:

$$L = -A / \exp\left(\frac{B}{T}\right) - 1, \quad (4.1)$$

где L — сигнал тепловизора; A, B — константы градуировки; T — абсолютная температура по шкале Кельвина.

Такая форма градуировочной кривой, рекомендованная фирмой АГА, представляется нам неудобной, потому что, во-первых, выражение (4.1) не может быть приведено к стандартной форме для определения констант A и B , во-вторых, температурная шкала Кельвина в прикладных задачах строительной физики не используется.

Поэтому при исследованиях в области строительной теплофизики целесообразно градуировочную кривую (4.1) представить в виде:

$$L = A \exp\left(-\frac{B}{\tau + 273}\right), \quad (4.2)$$

где τ — температура поверхности по шкале Цельсия.

Определение температур по градуировочной кривой, заданной в виде (4.2), производится по формуле:

$$\tau = -273 - B / \ln \exp\left(-\frac{B}{\tau_p + 273}\right) + \frac{L - L_p}{A \epsilon}, \quad (4.3)$$

где τ_p — температура поверхности в реперной точке; L — величина сигнала, соответствующая τ ; L_p — величина сигнала, соответствующая τ_p .

Градуировка тепловизора состоит из определения скорости дрейфа опорного уровня выходного сигнала тепловизора и определения коэффициентов A и B , которые входят в уравнение зависимости выходного сигнала тепловизора L от температуры T абсолютно черного тела (АЧТ)

$$L = A \exp\left(-\frac{B}{T}\right) + V d\tau^2. \quad (4.4)$$

Для определения скорости дрейфа опорного сигнала, тепловизор устанавливается на расстоянии 1 м от модели абсолютно черного тела (АЧТ). Температура АЧТ и температура окружающего воздуха поддерживаются постоянными. Тепловизор настраивается так, чтобы чувствительность его была наибольшей. Заливается азот, включается тепловизор. Измеряется величина выходного сигнала тепловизора. Эта процедура повторяется каждые пять минут до момента полного выкипания азота.

По результатам измерений строится график изменения опорного сигнала тепловизора. На рис. 4.1 представлены графики для случаев характерного дрейфа (кривая 1) и полного отсутствия дрейфа (кривая 2). Интервал времени (O_1Z_1) определяет время стабилизации выходного сигнала тепловизора после заливки азота. Интервал времени (Z_1Z_2) характеризуется линейным увеличением выходного сигнала. Тепловизионная скорость увеличения определяется как средний тангенс угла наклона кривой к оси абсцисс. Интервал времени ($Z_2 \infty$) характеризуется ускоряющимся ростом выходного сигнала: тепловизора и соответствует стадии выкипания азота.

Для определения постоянных A и B используются две модели АЧТ, которые устанавливаются на расстоянии 1 м от тепловизора.

На одной из моделей АЧТ устанавливается температура рабочей поверхности, равная температуре окружающего воздуха, на другой — температура на 1°C выше.

Затем измеряется разница выходных сигналов тепловизора, соответствующая температурам наблюдаемых АЧТ.

На АЧТ с низкой температурой устанавливается температура на 2°C выше прежней. Температура другого АЧТ остается неизменной. Эти операции повторяются до тех пор, пока не будет исчерпан исследуемый диапазон температур.

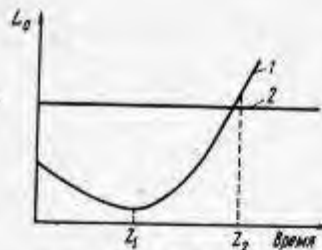


Рис.А.1. График изменения входного сигнала тепловизора во времени
1 — в отсутствие стабилизации; 2 — со схемой стабилизации

Значения A и B определяются по формулам:

$$A = \exp a/B, \quad (4.5)$$

$$\text{где } a = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N G_k D_k - \frac{1}{N^2} \sum_{k=1}^N G_k \sum_{k=1}^N D_k / \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N G_k^2 - \left(\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N G_k \right)^2,$$

$$B = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N G_k^2 \sum_{k=1}^N D_k - \frac{1}{N^2} \sum_{k=1}^N G_k \sum_{k=1}^N G_k D_k / \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N G_k^2 - \left(\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N G_k \right)^2,$$

$$G_k = \frac{2}{T_{k+1} - T_k}; \quad D_k = \ln \frac{L_{k+1} - L_k}{T_{k+1} - T_k} + 2 \ln \frac{T_{k+1} - T_k}{2},$$

N — число измерений.

Градуировку приборов, а именно определение коэффициентов A , B и C , следует провести для каждого используемого объектива и фильтра. Если измерения производят через толщину промежуточной среды с определяемыми характеристиками пропускания ИК излучения, например, специальные оптические стекла, слой газа постоянного состава и т.д., то имеет смысл отградуировать прибор с учетом этой среды. По результатам градуировки могут быть построены градуировочные зависимости, либо таблицы.

4.2. НАПРАВЛЕНИЕ АВТОМАТИЗАЦИИ ОБРАБОТКИ ТЕРМОГРАММ

Тепловизор при обследовании строительных конструкций применяется как измерительный прибор. Выходная информация имеет вид термограмм, т.е. изображения исследуемого объекта модулированы по яркости, причем степень серого тона в каждой точке изображения соответствует плотности ИК излучения. Для того чтобы оценить температуру поверхности, применяется квантование изображения с помощью изотерм. Однако этот метод имеет существенные недостатки: отнимает много времени, неудобен в обслуживании, а главное весьма сложен процесс анализа термограмм. Например, определить среднюю температуру участка поверхности или оценить температурные соотношения нескольких участков весьма сложно. Хотя некоторые (в основном, стационарные) тепловизионные системы и осна-

щаются в последнее время схемами для анализа изображения в реальном масштабе времени, тем не менее возможности анализа сильно ограничены. Для того чтобы существенно повысить выход информации о тепловом состоянии объекта исследования, расширить возможности анализа термограмм, а также в значительной степени избавить человека от рутинной работы, необходимо использовать ЭВМ.

Возможности использования ЭВМ для обработки информации во многом определяются возможностями используемого тепловизора, а также условиями исследований. Например, система тепловизор — ЭВМ при наличии аналого-цифрового преобразователя может работать в реальном масштабе времени, что часто применяется для медицинских исследований, но при термографировании строительных конструкций такой вариант работы, пожалуй, можно рассматривать лишь при испытании образцов в климатических камерах. Чаще всего необходимо обрабатывать информацию, полученную предварительно на каком-либо объекте.

В настоящее время для регистрации и хранения информации чаще всего применяются: фоторегистрация, аналоговая запись изображения на видеоманитовфон, запись изображения в цифровой форме на магнитной ленте, программируемые калькуляторы, специализированные и универсальные микро-ЭВМ и мини-ЭВМ.

Чаще всего применяется фоторегистрация. Тепловизор, оснащенный фотоприставкой, существенно дешевле и компактней, нежели при применении других способов хранения информации.

Для обработки на ЭВМ фотографий термограмм необходимо дополнительное оборудование, без которого возможны лишь простейшие операции.

Примером простейшей обработки фотографий (без дополнительного оборудования) является разработанная программа АГА, ДСП, написанная на языке ДИАСП. Программа работает в диалоговом режиме. По вводимым оператором данным ЭВМ рассчитывает температуру, соответствующую изотермам на каждом кадре и распечатывает на бумаге в удобной форме вместе с комментариями об исследуемом объекте.

Для обработки фотографий необходимо иметь устройство ввода в ЭВМ графической информации. Это может быть устройство типа фототелеграфа. Например, в ГДР в университете им. Мартина Лютера для обработки фотографий, полученных с тепловизора АГА-750, используется система Денситрон-3, выпускаемая центром научного приборостроения Академии наук в ГДР в Берлине. Система состоит из светового стола, телекамеры, электронного устройства обработки и цветного монитора. Система позволяет производить преобразование черно-белого изображения в цветное с произвольным выбором цветов; расчет площади, занимаемой каким-либо цветом (либо серым тоном); выбор зон изображения; подавление несущественных деталей; перевод информации в цифровую форму и запись на носитель; распечатку термограмм на принтере.

Как паллиатив можно использовать устройство для ввода в ЭВМ

графической информации по точкам ("сколка"). Применение подобного устройства будет создавать определенные трудности в обслуживании. Придется фиксировать отдельно с нескольких кадров координаты точек изотерм. При этом необходимо, чтобы все кадры были сняты с одной и той же точки, а также чтобы на столе устройства все кадры были зафиксированы одинаково. При подобном вводе анализ информации будет иметь большую погрешность.

Все проблемы ввода графической информации снимаются в случае регистрации ее в цифровой форме на магнитную ленту. Фирма АГА комплектует с этой целью тепловизоры моделей 780, 782 блоком ОСКАР для аналого-цифрового преобразования информации и цифровым магнитофоном. Для записи изображение разбивается на отдельные элементы ($128 \times 128 = 16384$). На каждый элемент отводится 8 бит, что соответствует 256 градациям серого тона — значительно большим, чем может различить глаз человека. Каждому изображению присваивается свой идентификационный номер. Запись может вестись либо по одному кадру, либо автоматически, с заданной частотой. Ленту с записью можно ставить на ЭВМ непосредственно в устройство ввода-вывода на магнитную ленту (МЛ) для обработки.

Фирмой АГА разработана программа для обработки на мини-ЭВМ типа РДР-11 или НР-1000 информации тепловых изображений. Программа написана на языке ФОРТРАН и предоставляет пользователю следующие возможности:

1) распечатку на печатающем устройстве изображения условными знаками;

2) калибровку;

3) выделение областей изображения для дальнейшего анализа (можно выделить до 9 областей в форме либо прямоугольника, либо произвольного выпуклого многоугольника);

4) определение для каждой заданной области следующих параметров: максимальную температуру T_{\max} , минимальную температуру T_{\min} ; диапазон температур $T_{\max} - T_{\min}$; "срединную" температуру, среднюю температуру, дисперсию, центральный момент 3-ей степени, площадь области (количество точек изображения A), периметр области P , показатель формы области P^2/A , геометрический центр области, процент, составляемый площадью области от площади всего изображения.

В случае, если калибровка не проводилась, температурные параметры соответствуют не температурам, а степеням серого тона в точках областей. Все рассчитанные параметры распечатываются в виде таблицы. Распечатываются также данные по всему изображению в целом (область 0);

5) проведение трех видов анализа параметров между областями:

а) анализ экстремальных значений. Определяются области, в которых каждый из перечисленных параметров принимает минимальное и максимальное значения;

б) анализ средних значений. Для анализа берутся средние температуры в каждой из заданных областей изображения и определяются

первые семь параметров п.4 (максимальная из средних, минимальная из средних и т.д.);

в) эталонный анализ. При этом виде анализа одна из областей принимается за эталон и все 12 параметров п.4 рассчитываются по отношению к эталонной области;

б) распечатка термоизображения в цифрах.

Каждая цифра при распечатке обозначает процент, который температура в данной точке составляет от диапазона температур всего изображения.

Фирмой АГА разработаны также программы ГАМОС 1 и 2, служащие для преобразования данных, полученных с блока ОСКАР и записанных на магнитной ленте в формат, пригодный для обработки программой ГАММА-11, разработанной фирмой "Диджител Эквипмент Корпорейшен" для обработки изображения. Программа ГАММА-11 позволяет производить различные операции с несколькими изображениями одновременно (сложение, вычитание из бражений и др.), а также построение различных графиков и гистограмм. Работа с этой программой особенно удобна, если рассматривается какой-либо процесс в динамике его развития.

Программа СОФТА была разработана как универсальная программа для обработки и анализа термоизображений, но поскольку тепловидение сейчас весьма широко применяется в различных отраслях применение термограмм накладывает свои специфические требования к обработке информации. В частности, для обработки термоизображений, получаемых при термографии строительных конструкций, программу необходимо существенно переработать и дополнить.

Как известно, получаемое изображение на бумагу при допустимом искажении не более информативно, чем обычная термограмма (фотография), однако при его получении впустую расходуется большое количество бумаги и машинного времени. Вместе с тем распечатка изображения нужна лишь для определения координат вершин областей. Поэтому в целях экономии бумаги и машинного времени вместо распечатки изображения на бумагу следует организовать вывод изображения на графический дисплей с вводом границ областей произвольной формы с помощью светового пера. При отсутствии графического дисплея изображение выводится на обычный дисплей по частям или в сокращенном виде (примерно одну строку из пяти и один элемент строки из четырех). Для исключения случайных искажений, существенно влияющих на определение максимальной и минимальной температуры, необходимо производить сглаживание массива данных (термоизображения) по методу наименьших квадратов.

Применение графического дисплея расширяет возможность обработки, корректировки и усиления термоизображений. С помощью его можно усилить контрастность изображения, сделать отчетливыми края, улучшить фокусировку или наложить на изображение какой-либо искусственный контур.

Например, для усиления контрастности можно растянуть карту интенсивности серого тона в одном интервале и сжать в другом, что

позволит усилить интересующие нас детали изображения. Улучшенное изображение можно снова записать на магнитную ленту.

При наличии графопостроителя удобно иметь возможность строить температурное поле на поверхности исследуемого объекта. При этом можно производить коррекцию геометрических искажений, возникающих в случае, если ось визирования сканера тепловизора при съемке была направлена не перпендикулярно поверхности исследуемого объекта. Вручную подобную работу провести весьма сложно.

Способность измерительного устройства представлять информацию в виде, пригодном для математической обработки, является одной из важных характеристик измерительных средств, а в некоторых случаях, когда задачи решаются при помощи ЭВМ, этот параметр является основным.

Одним из способов представления информации является аналого-цифровое преобразование (АЦП), которое позволяет осуществить обращение к ЭВМ, после некоторой обработки цифрового сигнала. Обработка заключается в представлении информации в нужном коде и преобразование электрических параметров в цифровые сигналы.

Портативные тепловизоры АГА-750, АГА-720, БТВ-0,3, ИФ-10ТВ являются малогабаритными приборами, позволяющими производить измерения температурных полей в полевых условиях. Но они представляют информацию только в аналоговой форме в виде телевизионного изображения на мониторе или сфотографированного с его экрана термоизображения на фотопленке. Для математической обработки этой информации на ЭВМ требуется представить ее в форме, пригодной для ввода в машину. Как известно, информация на кадре фотопленки, снятом с экрана тепловизора, является аналогом температурного поля, зарегистрированного тепловизором. Следовательно, соотношение между более или менее яркими участками кадра термограммы можно зарегистрировать при помощи светочувствительного элемента, а при наличии реперной точки, т.е. соответствия яркости и температуры, вывести абсолютные значения температур участков кадра. На этом принципе в НИИСФ было изготовлено устройство автоматической обработки термограмм.

В этом оптико-механическом устройстве кадр при помощи механической развертки и оптронной пары (оптронная пара — оптический преобразователь, состоящий из источника света и фотодиода ФД-2) раскладывается на 18 строк. Каждая строка в свою очередь раскладывается на 16 элементов. Раскладка (сканирование) по строкам осуществляется при перемещении ленты относительно оптронной пары с шагом на одну строку — $1/18$ ширины кадра. Сканирование по элементам осуществляется при помощи контактной планки, на которой расположено 16 контактных шин, по числу элементов в строке. По контактной планке передвигается контактная пружина, механически связанная с оптронной парой. Момент замыкания контактной пружины с контактом соответствует определенному местоположению на строке кадра, т.е. элементу строки. При помощи кон-

цевого выключателя, который включается в начале и конце каждой строки, ведется сканирование по строкам.

Общее количество элементов разложения $S = Nn = 288$.

Необходимая степень разрешения по температуре или количеству градаций контрастности выбирается из соображений разрешающей способности фотопленки и потери полутонов в связи с потерей разрешающей способности, а также искажения соотношений градаций контрастности при обработке фотопленки. В тепловизоре АГА-750 количество элементов разложения кадра — 10 000, в данном устройстве — 288.

Исходя из этих соображений было выбрано 10 градаций контрастности, что представляется одним разрядом десятичных чисел или четырьмя разрядами двоичных чисел в коде 1-2-4-8, т.е. 4 бит. Информация с одного полного кадра представляла 288×4 бит информации.

Определение абсолютных и относительных уровней возможно при введении в термограмму реперной точки, а также серой шкалы. Эта информация вводится в устройство перед началом обработки термограммы и по ней проводится калибровка.

Тип аналого-цифрового преобразователя (АЦП) выбирается из следующих соображений и требований. Время одного измерения АЦП должно быть меньше времени обработки одного элемента разложения термограммы, равного 0,25 с, АЦП должен иметь запуск от внешних устройств, результат должен быть представлен в двоично-десятичной форме, т.е. каждое десятичное число представлено тетрадой двоичного кода.

Исходя из этих требований в качестве АЦП может быть выбран электронно-цифровой вольтметр ВК2-20, а устройства ввода информации в ЭВМ — ленточный перфоратор 80, который может работать со многими типами машин. Скорость ввода информации в перфоратор 80 двоичных слов в минуту. Емкость одного слова составляет от 8 бит до 1 байта. Так как время сканирования устройства отличается от времени сканирования перфоратора ПЛ-80, требуется согласующее устройство, которое включает в себя матрицу запоминающего устройства, выполненную в виде полупроводниковой памяти и ячейки памяти емкостью 280×4 и 4 бит соответственно. В матрицу памяти записывается полная информация одного кадра, а ячейка памяти служит для согласования входов-выходов матрицы памяти и перфоратора ПЛ-80.

Устройство состоит из следующих блоков: блок оптико-механического преобразователя; блок-схема согласования и калибровки; блок АЦП-вольтметр ЭЦ ВК2-20; блок ЗУ и ячейки памяти; перфоратор ПЛ-80; блок-схема управления и синхронизации.

Блок оптико-механического преобразователя состоит из оптронной пары (источника света и светодиода). Оptrонная пара при помощи механической системы развертки осуществляет обход поля кадра, при котором информация о яркости различных участков термограммы выделяется в виде изменяющейся ЭДС на выводах свето-

диода ФД-2. Информация о пространственном расположении точек объекта выделяется на замыкающихся контактах контактной планки.

Блок-схема согласования и калибровки служит для согласования сопротивления фотодиода с АЦП и для фильтрации помех, которые могут появиться в виде фона частоты 50 Гц. В него входят также регулируемый высокостабильный источник напряжения для питания источника света в оптронной паре и схема калибровки.

Перед началом сканирования фотопленки с термограммами устанавливается серая шкала тепловизора, по которой при помощи регулируемого усилителя и функциональной схемы устанавливается нужная крутизна вольт-амперной характеристики фотодиода ФД-2. Этим обеспечивается постоянное относительное воспроизведение участков равной температуры. А при введении реперной точки яркость — температура каждый участок яркости термограммы будет соответствовать определенному диапазону температур, который определяется разрешающей способностью фотопленки и потерей информации во время обработки. Разрешающая способность определяется из следующего: оптронная пара непрерывно движется вдоль строки и во время движения проходит участки разной яркости, а аналоговая часть АЦП, в которой происходит измерение уровня, интегрирует это значение.

Исходя из изложенного видно, что количество градаций определено одной декадой, т.е. от 0 до 9. В двоичном виде цифры от 0 до 9 представлены 4 бит в коде 1-2-4-8. Таким образом, нулевому уровню будут соответствовать наиболее темные участки кадра, а уровню 9 — наиболее яркие.

Блок АЦП состоит из электронно-цифрового вольтметра ВК2-20. Наименьшее время одного такта измерения ВК2-20 с момента подачи сигнала "пуск" до появления импульсов напряжения в двоично-десятичном коде на выходном разъеме составляет $\tau_B = 40$ мс. Время обработки одного элемента разложения кадра определяется по формуле

$$Z_{эл} = Z_{стр} / n = 250 \cdot 10^{-3} \text{ с}, \quad (4.6)$$

где $Z_{эл}$ — время обработки одного элемента; Z_B — время одного такта измерения ВК2-20; $Z_{стр}$ — время одной строки разложения в кадре.

Отсюда следует, что применение ВК2-20 позволяет повысить скорость обработки кадра термограммы в 6 раз. Так как информация одного элемента представлена одним десятичным разрядом, то требуется предусмотреть возможность округления результатов до значащей цифры. Для округления используем два разряда измеренного значения: старший разряд — основной, младший — дополнительный. В младшем разряде устанавливается фиксированное значение 4. Тогда при значении, например, 8,6 — результат округляется до 9, а при значении от 7,6 до 8,5 результат представляется цифрой 8 значащего разряда.

С блока АЦП сигнал под действием тактовых импульсов тетра-

дами переносится в блок ЗУ, который состоит из матрицы памяти, выполненной на структуре МОП или МДП транзисторов. Емкость матрицы памяти соответствует емкости информации одного кадра и составляет 288×4 . Информация, хранящаяся в матрице памяти, не может сразу переноситься на перфоратор ПЛ-80, так как напряжение, полярность и временные характеристики не соответствуют рабочим параметрам сигналов перфоратора. Для нормальной работы перфоратора между матрицей памяти и входом перфоратора включена буферная ячейка памяти, выполненная на 4 триггерах. Управление блоком памяти производится при помощи тактовых импульсов, вырабатываемых перфоратором ПЛ-80.

Блок перфоратора ПЛ-80 предназначен для записи на ленту информации десятично-двоичным кодом. Записи производятся восемью битовыми словами за такт. Скорость записи — 83 слова в 1 мин. Перфоратор вырабатывает тактовые импульсы управления, посредством которых осуществляется перенос чисел из матрицы ЗУ в ячейку памяти и из ячейки памяти — на вход перфоратора.

Схема управления служит для формирования сигналов управления всем устройством. С помощью тактовых импульсов осуществляются следующие операции цикла сканирования. При нажатии кнопки "пуск" высвечивается индикатор "начало сканирования", запускается оптико-механическое устройство, устанавливаются на ноль счетчики количества элементов и количества кадров, стирается информация в матрице памяти и открывается вентильная схема. После окончания сканирования, когда на счетчике количества элементов установится число 288, схема вырабатывает импульс окончания работы, который прекращает допуск информации на АЦП и матрицу памяти и высвечивает индикатор "конец сканирования".

Перед началом работы все приборы, входящие в устройство, прогреваются в течение 15 мин. Затем, после установки пленки в оптико-механическое устройство, по серой шкале, которая предшествует каждой обрабатываемой термограмме, производится калибровка установки.

Вольтметр ВК 2-20 калибруется по инструкции при замкнутом входе. При этом оптронная пара подключается к входу операционного усилителя Д1.

После калибровки вольтметр ВК 2-20 ставят в положение "внешний пуск", устанавливается кадр термограммы, нажимается кнопка "пуск", расположенная на передней панели блока согласования и синхронизации, при этом светодиод V4 высвечивается индикатор "сканирование", срабатывает реле P₁, блокирующее кнопку "пуск", и включается система развертки оптико-механического устройства, в результате на дифференцирующую цепочку C_DR_D подается перепад напряжения. С выхода цепочки вырабатывается импульс, который устанавливает в положение "0" счетчики количества элементов разложения и матрицы памяти, на передней панели устройства высвечивается индикатор "начало сканирования". После окончания сканирования поступление информации в матрицу автоматически

прекращается и высвечивается индикатор "конец сканирования". Тогда начинается запись информации на перфоленту. Перед началом записи на перфоленту вручную записывается номер кадра и уровень реперной точки. После включения тумблера "считывание" начинается считывание информации из матрицы памяти на перфоленту, при этом на передней панели устройства высвечивается индикатор "начало сканирования", а после окончания считывания высвечивается индикатор "конец сканирования". Для нахождения нужной термограммы в конце информации вручную опять записывается номер кадра. Номер кадра и реперная точка записываются в коде, отличном от кода основной информации (термограммы).

Программируемые микрокалькуляторы используются, как правило, для оперативных расчетов непосредственно на месте обследования. Фирма АГА в комплекте с тепловизионными системами поставляет калькуляторы типа HP-41CV. Калькуляторы HP-41CV имеют ряд преимуществ по сравнению с ранее выпускавшимися моделями: большой объем памяти, возможность ввода и вывода не только цифровой, но и алфавитной информации, что позволяет организовать диалог; хранение информации в памяти при отключенном питании и др.; возможность записи информации на магнитные карты.

Такие возможности позволяют составить относительно большие программы, которые работают в диалоговом режиме и позволяют непосредственно в момент обследования рассчитывать температуру поверхности объекта, уровень выходного сигнала по заданной температуре, коэффициент излучения поверхности и т.п.

Для этих целей можно также использовать калькуляторы отечественного производства типа "Электроника" БЗ-21, БЗ-34. Однако работа с ними имеет ряд неудобств, основным из которых является необходимость каждый раз при включении вводить программу с клавиатуры. Калькуляторы, способные записывать информацию на магнитные носители, отечественной промышленностью не выпускаются.

Микро-ЭВМ, как специализированные, так и универсальные, применяются для обработки информации как в режиме реального времени, так и записанной предварительно на магнитные носители. Как пример специализированной микро-ЭВМ, предназначенной для обработки термоизображений, можно рассматривать систему АГА-Периколор. Эта система построена на базе микропроцессора Интел 8080А и предназначена для количественного анализа тепловизионной информации с выводом на цветной графический дисплей. Изображение поступает в память Периколор с блока ОСКАР, который работает либо непосредственно с тепловизором, либо с цифровым магнитофоном, где предварительно записано изображение.

В систему встроено стандартное матобеспечение, представляющее пользователю более ста команд. Основные программы обработки изображений следующие:

программа "формат" позволяет менять размеры и расположение изображения на экране;

программа режима дисплея позволяет варьировать используемые цвета;

программа "зона" позволяет выбрать на изображении зону произвольной формы (граница зоны вводится перемещением по экрану маркера либо с помощью следящей головки, либо с клавиатуры) и рассчитать различные параметры по зоне (площадь, средняя температура и др.);

программа построения гистограмм (может быть построена для всего изображения либо для заданной зоны);

программа выравнивания изменяет уровень в каждой точке изображения в соответствии с уровнями 8 соседних точек;

программа обработки изображений: сложение, вычитание, умножение, деление, взаимозамену, логические функции "И", "ИЛИ", сложение по модулю 2;

программа построения термопрофиля; калибровки.

Обработка изображений может вестись отдельно или в заранее заданной последовательности.

Фирмой АГА выпускаются также блоки для сопряжения тепловизионной системы с универсальным микрокалькулятором ДАТА — ЛИНК и ОСКАР — ЛИНК. Такой блок в комплекте с микрокомпьютером носит название ДИПС.

Блок ДАТА—ЛИНК предназначен для работы тепловизора совместно с микрокомпьютером в реальном масштабе времени. Посредством этого блока в компьютер поступают прямо с монитора тепловизора все данные по изображению (уровни сигнала в каждой точке изображения, начальный уровень сигнала, температурный диапазон), что позволяет получать на выходе компьютера информацию о температуре любых точек объекта в °С.

Блок ОСКАР—ЛИНК позволяет обрабатывать информацию не только в реальном времени, но и предварительно записанную на цифровой магнитофон. При этом уровни сигналов точек изображения с блока ОСКАР вводятся в компьютер через блок ОСКАР—ЛИНК, а начальный уровень сигнала и температурный диапазон вводятся вручную с клавиатуры компьютера в ходе работы.

Поставляемое совместно с компьютером ДИПС программное обеспечение позволяет:

определять температуру в любой точке изображения и площадь, занимаемую на изображении каким-либо температурным полем; строить термические профили; запоминать изображения и другие данные для последующего использования и т.д.

Информация выводится на цветной графический дисплей микрокомпьютера и по желанию печатается на цветном графическом печатающем устройстве, которое также включается в комплект.

При работе как с системой Периколор, так и с ДИПС пользователь может корректировать и дополнять программное обеспечение в соответствии со своими потребностями.

Для обработки термограмм, предварительно записанных на

магнитную ленту, на мини-ЭВМ типа АДП-11 или НР-100 фирмой АГА разработана программа СОФТА. Программа написана на языке ФОРТРАН и позволяет выполнять следующие операции:

распечатку термоизображения на печатающем устройстве условными знаками;

калибровку изображения или системы;

выделение зон изображения для последующего анализа (можно выделить до 9 зон прямоугольной формы, либо в форме произвольного выпуклого многоугольника);

определение для каждой выбранной зоны и для всего изображения в целом: максимальной, минимальной и средней температуры, диапазона температур, дисперсии, центрального момента 3-й степени, площади, периметра зоны и др.;

сравнительный анализ параметров зон изображения: анализ экстремальных значений (определяются зоны, в которых каждый из параметров принимает минимальное и максимальное значение); анализ средних значений (анализируются средние температуры каждой зоны, определяются некоторые параметры — максимальная из средних, минимальная из средних и т.д.); эталонный анализ (одна из зон выбирается эталонной, и определяется разность параметров каждой зоны и эталонной);

распечатку термоизображения в цифрах (каждая цифра на распечатке означает температуру в процентах от общего диапазона температур на изображении).

4.3. АНАЛОГОВАЯ ОБРАБОТКА ТЕПЛОВИЗИОННОЙ ИНФОРМАЦИИ

Плотность теплового потока, излучаемого поверхностью исследуемого объекта, преобразуется в тепловизоре в электрический сигнал. Этот сигнал усиливается и смешивается с электрическими импульсами, образуя видеосигнал, который обычно поступает на управляющие сетки электронно-лучевой трубки, видеоконтрольного устройства тепловизора. В результате на экране видеоконтрольного устройства появляется изображение температурного поля поверхности исследуемого объекта, называемое термограммой. На термограмме температурное поле представляется в виде черно-белого изображения, на котором интенсивность черно-белых полутонов определяется уровнем видеосигнала, и, следовательно, величиной температуры поверхности, т.е. участки более светлого тона на термограмме соответствуют участкам поверхности объекта с более высокой температурой. Это считается термограммой с обычным представлением температурного поля, в привычных для человеческого глаза соотношениях. В некоторых случаях удобно пользоваться инвертированным изображением, на котором более высоким температурам соответствуют более темные тона на термограмме.

Полученное таким образом изображение температурного поля может быть проанализировано на основе визуального анализа, либо зарегистрировано с экрана на обычные фотошленку и фотобумагу с помощью фотокамеры. Такая обработка тепловизионной информации дает качественное представление о температурном поле, так как связано с разделением черно-белых полутонов по их интенсивности. Разрешающая способность человеческого глаза позволяет надежно различать 6–8 полутонов одного цвета, поэтому для получения количественной оценки температурного поля следует увеличить разрешающую возможность системы.

При решении этой задачи возможны два направления. Первое — использование системы обработки фотоинформации с высокой разрешающей возможностью. В настоящее время такие системы выпускаются как у нас в стране, так и за рубежом. Они универсальны и основаны на использовании высокочувствительных светодатчиков, которые преобразуют интенсивность черно-белого изображения в дискретную форму. Затем эта информация обрабатывается с помощью ЭВМ.

Второе — усложнение электронной части тепловизора и включение систем преобразования видеосигнала. Рассмотрим подробнее это направление на примере тепловизионной системы АГА-780 шведской фирмы АГА.

Наиболее часто встречающаяся функция преобразования видеосигнала — выделение выбранного уровня сигнала и высвечивание на экране блока воспроизведения участков изображения, имеющих температуру, соответствующую выбранному уровню, носит название функции изотерм. Ширина выбранного уровня видеосигнала может быть различной и соответствовать разной градации температур объекта. Количество высвечиваемых одновременно изотермических уровней может колебаться от 1 до 10. Принцип преобразования функции изотерм во всех случаях одинаков. Различие заключается лишь в выделении уровней сигнала на экране блоков воспроизведения. Одна или две изотермы обычно выделяются одинаковым ярко-белым тоном. Участки, выделенные такими изотермами, отличаются от "горячих" участков поверхности тем, что они носят как бы дискретный характер, так как соответствуют отдельным элементам изображения, а не плавным контурам, как в обычном термоизображении. Поэтому изотермы на экране как бы состоят из отдельных ярко-белых точек.

Выделение 5-ти или 10-ти уровней изотерм уже невозможно без разделения характера высвечивания отдельных уровней. Можно разделить отдельные уровни разными цветами. В этом случае температурное поле представляет в виде цветных уровней так называемая цветная термограмма. В другом случае каждый уровень высвечивается определенным тоном одного цвета по черно-белой шкале. Как уже говорилось, для надежного разделения полутонов их количество не должно быть больше 5–6 уровней.

В тепловизоре АГА-780 функция выбора одной или двух изотерм осуществляется в блоке воспроизведения с плавным регулированием их уровня и ширины в пределах диапазона чувствительности тепловизора.

Выделение большого количества изотерм в этой системе тепловизоров осуществляется отдельными блоками: однотонные уровни выделяются на экране черно-белого монитора с помощью дополнительного блока — термоанализатора зоны (ТАЗ), цветные уровни выделяются с помощью специального цветного монитора. На экране цветного монитора могут быть выделены до 10-ти различных уровней с регулируемой шириной, которым соответствуют 10 цветов: от темно-голубого, через оттенки голубого, зеленого, красного, желтого к белому.

При анализе температурных полей по изотермам следует иметь в виду, что функция преобразования тепловизора нелинейна, поэтому при равномерном распределении градаций изотерм на экране тепловизора им соответствуют разные интервалы температур, повторяющие нелинейность функции преобразования. Для получения линейного распределения по температурной шкале необходимо градации изотерм на шкале тепловизора расположить по нелинейному закону, т.е. соответственно функции преобразования. Такая возможность имеется только при использовании цветного монитора.

В тепловизоре АГА-780 предусмотрена возможность наблюдения и измерения самого видеосигнала. Для этой цели используется термопрофилирующее устройство. Оно состоит из специального монитора и отдельного блока управления. На экране монитора можно высветить видеосигнал, соответствующий любой одной строке изображения изображения. Амплитуда сигнала измеряется в единицах шкалы тепловизора. Положение наблюдаемой строки отмечается на экране черно-белого монитора тепловизора высвечиванием выбранной строки ярко-белой линией. Такой режим работы несет название "термопрофиль". Также предусмотрена возможность высвечивания амплитуд сигналов по всем строкам изображения — "рельеф". При этом амплитуда этих сигналов калибрована и составляет 20% амплитуды сигнала при воспроизведении одного "профиля". Можно просматривать оба эти изображения одновременно, т.е. на изображение "рельефа" наложить изображение "профиля". Причем, амплитуда сигнала может быть представлена в непрерывном или дискретном виде. Кроме того, возможно представление термоизображения объекта не в амплитудной форме, а в черно-белых тонах, как на обычном черно-белом мониторе. Для получения более наглядного представления "рельефа" температурного поля его изображение может наклоняться относительно вертикальной оси.

Все перечисленные режимы работы термопрофилированного устройства осуществляются через отдельный блок управления. Регулировка яркости и контрастности изображения и изменения его

положения по вертикальной и горизонтальным осям находится на панели самого монитора.

Следующей функцией количественной оценки параметров термоизображения является определение максимальной, минимальной и средней величины сигнала внутри анализируемой зоны на поверхности объекта. Эти функции выполняются с помощью дополнительных блоков СЗИ (селектор зоны измерения), ТАА (термоамплитудный анализатор), ТАЗ (термоанализатор зоны), ИСС (индикатор считываемого сигнала), УДИ (устройство данных изображений), связанных с основным трактом усиления видеосигнала. Значение определяемых величин может быть высвечено в цифровой форме непосредственно на экране черно-белого монитора с помощью блока УДИ или на табло специального блока ИСС.

Зона анализа с помощью блока СЗИ может быть выбрана в виде прямоугольника или наклонного параллелепипеда со сторонами, равными от 1/10 до 8/10 линейного размера изображения на экране черно-белого монитора. Размеры зоны переключаются по вертикали и горизонтали ступенчато через каждые 1/10 размера изображения. Границы зоны анализа высвечиваются на экране черно-белого монитора тонкими ярко-белыми прямыми линиями.

Одновременно для анализа могут быть выбраны две зоны, размеры, формы и расположение которых независимы и могут перекрываться. Вычисление максимальной, минимальной и средней величины сигналов в выбранной зоне производится в блоке ТАА. Кроме того, предусмотрена возможность определения процентного отношения площади выбранной изотермы внутри анализируемой зоны ко всей площади этой зоны. Эта операция выполняется с помощью блока ТАЗ. Значение отношения в процентах высвечивается на экране монитора или на индикаторе блока ИСС.

При анализе результатов следует иметь в виду, что все полученные значения величины сигналов и уровней изотерм определяются в единицах шкалы тепловизора, т.е. в относительных уровнях электрических сигналов. Величина электрического сигнала зависит от плотности теплового излучения поверхности, которая пропорциональна произведению температуры объекта и коэффициента черноты его поверхности. Кроме того, измерения проводятся в ограниченном диапазоне сигналов. Причем чем этот диапазон уже, тем выше разрешающая способность системы, поэтому если исследуемый объект имеет большой диапазон температур на поверхности, то для повышения разрешающей способности системы следует разбить этот диапазон на поддиапазоны и проводить измерения последовательно внутри каждого диапазона.

Количественная обработка сигнала производится не одновременно, а последовательно, поэтому требуется определенное время на ее выполнение. Следовательно, при наблюдении нестационарных тепловых процессов, скорость последних будет ограничена временем выполнения необходимых операций анализа. Для снятия этого ограничения используют запись информации в процессе исследований на видеоманитофон или на измерительные магнитофоны с последующим воспроизведением записи и поккадровой обработкой.

4.4. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭВМ В ТЕРМОГРАФИИ

При использовании вычислительной техники для расшифровки информации теплового состояния объекта, полученной с помощью тепловизора, определенные требования предъявляются к программному обеспечению, которое в значительной степени зависит от точного выбора промежуточного устройства связи и оборудования ЭВМ, поэтому перед пользователем стоит одна из задач — разработать программу-формирователь, которая должна выполнять организующие функции ЭВМ, т.е. собирать информацию из внешнего мира и закладывать в память машины. В зависимости от действительных условий программы и от включенных в нее приоритетов, она может быть очень сложной. Это дает возможность переводить в цифровую форму до 19 600, обычно в среднем 16 384, элементов изображения через каждые 2 поля (приблизительно 0,1 с). Если умножить это число на 8 бит (разрешающая способность), то после преобразования в цифровую форму каждого кадра создается 156 800 или 131 072 бит информации. Таким образом, эффективное управление этими точками для поддержания минимального времени передачи ЭВМ является важной проблемой программирования.

Каждое устройство, присоединенное к ЭВМ, должно управляться задающей программой, чтобы освободить пользователя от операций ввода и вывода данных, управления внешним запоминающим устройством, контроль за согласованной работой приборов и устройств. Тем не менее, в большинстве систем, где применяются промежуточные аналоговые или цифровые запоминающие устройства, задающая программа в основном состоит из управления x - и y -координатами. Программа вначале запрашивает местоположение, затем принимает цифровое значение и передает ее в какое-либо устройство ЭВМ. В неавтономных системах x -, y -, z -данные могут представлять собой непрерывный поток информации, которая получается непосредственно из камеры, через какое-либо буферное цифровое запоминающее устройство.

Прежде чем приступить к изучению и подготовке системы обработки тепловизионной информации на ЭВМ необходимо ответить на очень важный вопрос, а именно, зачем преобразовывать данные в цифровую форму? Обработка данных инфракрасного излучения на ЭВМ может быть как сложной, так и требующей длительного времени. И аппаратное и программное обеспечение может быть очень сложным и дорогостоящим, поэтому вначале следует проанализировать все ли цифровые, т.е. аналоговые методы для быстрого решения поставленной проблемы были исчерпаны. Может быть можно было использовать аналого-цветное видеоконтрольное устройство, систему профилирования термоизображения, видеопланиметр, систему видеомангнитной записи и т.д. Все эти аналоговые системы накопления и обработки данных часто бывают достаточными для получения необходимой информации для решения поставленных специальных проблем. Почти во всех случаях аналоговое реше-

ние по сравнению с цифровым требует меньших затрат и бывает менее сложным.

В процессе преобразования температурных данных в цифровую форму необходимо иметь общее представление о всей системе получения, преобразования и обработки данных.

Обеспечение обработки тепловизионной информации рассмотрим на примере системы ОСКАР, разработанной фирмой АГА. ОСКАР — это автономная система выборки данных из запоминающего устройства и записи их с помощью ЭВМ. Она предназначена для преобразования в цифровую форму и запоминания изображений, которые создаются тепловизором, а также для обеспечения средств соединения аппаратного обеспечения с большинством ЭВМ.

Система ОСКАР может быть использована для запоминания изображений различными способами, Оператор может выборочно записывать изображения по своему усмотрению или установить определенный интервал для автоматической записи изображений. Для обеспечения поиска каждое изображение кодируется. Запись и воспроизведение производится либо с помощью метода поля, либо с помощью метода кадр. Может быть осуществлен дистанционный контроль за передней панелью. После записи отдельное изображение может воспроизводиться и анализироваться с помощью устройства обработки данных тепловизора АГА-780, включая устройство черно-белого изображения, контрольное устройство цветного изображения и приспособления для профилирования. Точность измерений реального времени сохраняется и изотермические функции могут применяться обычным образом. После того как тепловые изображения зарегистрированы в запоминающем устройстве на кристаллических веществах системы ОСКАР, они могут переноситься на цифровую ленту, и затем вводиться в ЭВМ. Таким образом, ОСКАР может служить переходным звеном между тепловизором и цифровой ЭВМ. Переходная система ЭВМ основана на автономном режиме работы, в ней используется лента, соответствующая промышленным стандартам, что дает возможность воспроизводить ее почти во всех моделях ЭВМ. Сигналы, исходящие из запоминающего устройства на кристаллических веществах могут использоваться для работы в неавтономном режиме.

Система ОСКАР состоит из устройства для запоминания изображений в цифровой форме, работающего на полупроводниках, соединенного с цифровым записывающим устройством, к которому могут присоединяться преобразователи из аналоговой формы в цифровую и наоборот, счетные устройства, контрольные карты. Самая простая схема ОСКАР одновременно преобразовывает в цифровую форму и запоминает отдельные изображения (одно поле или один кадр). Запоминающее устройство может запоминать 2 поля, каждое из которых имеет элементы изображения 128×64 и динамический диапазон в 8 бит, т.е. 256 уровней на элемент изображения. Обычно поля, полученные в камере тепловизора 680, преобразуются в цифровую форму в преобразователе данных из аналоговой формы в цифровую, затем накапливаются в памяти и воспроизводятся

в системе визуального воспроизведения. Это дает частоту корректировки воспроизведения в 16 Гц, используя метод поля, и 2,3 Гц при использовании метода кадра. Для того чтобы определить каким методом пользоваться, необходимо более подробно рассмотреть термодинамические требования, а также определить какая разрешающая способность должна соответствовать данным условиям применения системы. С одной стороны, если объект находится в движении или его температура быстро меняется, каждое поле необходимо рассматривать отдельно, используя метод поля. С другой стороны, если объект неподвижен и его температура изменяется медленно, следует использовать метод кадра.

Поскольку все изображения переводятся в численную форму и накапливаются в запоминающем устройстве, любое изображение может быть остановлено в первоначальном виде для дальнейших исследований. При необходимости изображение может передаваться из запоминающего устройства в устройство цифровой записи на ленте, которое непосредственно контролируется системой. Контрольное устройство системы цифровой записи на ленте дает возможность отыскивать изображения на ленте и помещать их в запоминающее устройство. Таким образом, любое изображение, записанное в численном виде на ленте, может быть найдено и возвращено в тепловизор.

Для точного контроля за изображениями, хранящимися в запоминающем устройстве система снабжена идентификатором. Благодаря этому каждое поле или каждый кадр идентифицируется с помощью четырехзначного кода, который выбирается оператором. Этот код в численной форме записывается на ленте вместе с соответствующим изображением. Он может использоваться для обозначения времени, номера события, регулировки уровня и других данных.

Устройство для записи цифровых данных на ленте является портативной и стандартной системой, дополненной встроенным устройством, для задания формата ленты. Формат ленты подходит почти ко всем системам ЭВМ, в которые можно закладывать данные, записанные на ленте.

После того как тепловое изображение преобразовано в цифровую форму и записано на цифровой ленте, оно может вводиться в ЭВМ. Далее лента заправляется в лентопротяжный механизм, установленный на панели ЭВМ.

Тепловые картины в численном виде можно анализировать различными способами и для различных целей. ЭВМ оказывает большую помощь (особенно в упрощении сложных данных) в преобразовании информации в наиболее компактную форму. Во-первых, ЭВМ могут использоваться для определения многих параметров по самому изображению таких, как: наибольшая, наименьшая и средняя температура; разница температур между двумя областями; различие между двумя зонами с разными температурными контурами, с разными геометрическими центрами массы или с разной геометрической формой и т.д. Во-вторых, и что наиболее важно, с помощью ЭВМ можно запрограммировать для анализа этих параметров и для того

чтобы представить их в виде контуров, изображения, выполненного в серых тонах или в виде изотермических карт. ЭВМ могут использоваться для конечного анализа параметров и полученных результатов, для решения сложных аналитических проблем или для автоматической расшифровки параметров. Для того чтобы воспользоваться преимуществами ЭВМ, необходимо написать программу и обеспечить средства программирования.

Программное обеспечение является новой проблемой при использовании систем с применением ЭВМ и находится в прямой зависимости от случая применения, а также от точного выбора переходного устройства и оборудования ЭВМ. Существует 3 типа программ:

- задающая и управляющая;
- для обработки изображения и выделения изображения;
- для истолкования изображения.

Задающая и управляющая программа в основном зависит от используемого оборудования, например системы инфракрасного излучения, электронных переходных устройств, системы для записи на ленте, устройства, задающего формат данных, устройства ввода-вывода и т.д. Первая ступень в написании программы — это создание задающей программы. Эта программа осуществляет контроль с помощью ЭВМ за многими элементами изображения, т.е. с помощью этой программы собираются сведения о различных точках окружающей среды и накапливаются в запоминающем устройстве ЭВМ.

Независимо от того каким образом получается информация позднее отдельные поля восстанавливаются в ЭВМ для индивидуального или совместного использования. Если поля чередуются, то первая линия первого поля всегда помещается выше первой линии второго поля. Для удобства линии первого поля обозначаются четными цифрами, а второго — нечетными.

Задающая и управляющая программа должна включать осуществление требуемой калибровки и исправлений, которые необходимо принять во внимание. Следует заметить, что компонент постоянного тока представляет средний температурный уровень в пределах выбранного диапазона чувствительности или температуры. В действительности, эта величина, которая подбирается оператором, является величиной напряжения постоянного тока, которое подается на вход предусилителя. Это наиболее важная величина, влияющая на абсолютную калибровку. Если в системе ЭВМ будет использоваться электронная калибровка, независимо от поля обзора, необходимо определить зависимость между уровнем контрастности изображения и температурой. Эта зависимость опытным путем определяется для каждой отдельной системы инфракрасного излучения.

Существует 2 основных подхода к этой проблеме: калибровка с эталоном в поле изображения и без установления эталона. Калибровка с эталоном в поле изображения является наиболее простым способом. В этом случае калиброванный уровень изображения, полученный при известной температуре, закладывается в программу и берется как эталон для определения неизвестных температур. Это является несложной процедурой, если измеряемые температуры

находятся в линейном диапазоне тепловизора, т.е. 20–40°C. Если нет, то программой должен быть предусмотрен поиск величины с поправками в таблице или вычисление этой величины по уравнению. Это значит, что сведения об эталонной температуре и чувствительности должны быть заложены в ЭВМ. Вышеупомянутые исправления, связанные с системой инфракрасного излучения, должны также приниматься во внимание при написании этой программы. Это исправления, связанные с коэффициентом излучения, формой и размером объекта, атмосферным поглощением и рассеиванием, влиянием окружающих предметов, поправками на используемые фильтры и кадровое окно и т.д.

Определение отдельных областей на изображении является другой проблемой, возникающей при написании управляющей программы. Как отыскать нужную область. Каким образом определить размеры и форму этой области. Как отыскать опорную точку в этой области. На все эти вопросы необходимо ответить, прежде чем продолжить знакомство с программным обеспечением.

В этой связи возникает еще один вопрос: как представить результат. Следует ли представлять его на экране или на бумажной ленте, выбитые на перфоленте или изображенными графически с помощью ЭЛТ или на бумаге. Существует несколько вариантов и в каждом отдельном случае надо выбирать наиболее подходящий вариант, соответствующий данным условиям применения.

На все эти вопросы необходимо ответить прежде, чем продолжить рассмотрение программного обеспечения, и перейти к вопросу обработки изображения.

Теперь все интересующие нас области в инфракрасном изображении полностью определены, т.е. определены их форма, размер, расположение и абсолютная температура в этих областях. Мы имеем большое количество данных для работы. Все эти данные должны быть как-то систематизированы. Их обработка может быть произведена статистическими методами и приемами. Этот процесс можно разделить на 2 части: внутрирегиональную и межрегиональную обработку изображения. Внутрирегиональная обработка — это расчет различных параметров внутри одной области. Позднее эти параметры используются для межрегиональной обработки, где параметры одной области сравниваются с соответствующими параметрами области, представляющей интерес. К внутрирегиональным параметрам относятся наибольшая, наименьшая и средняя величины температуры, диапазон температуры, среднее отклонение температуры, отклонение распределения, площадь и периметр области, геометрический центр тяжести, коэффициент формы, процентное соотношение общей термограммы.

После вычисления приведенных параметров во всех областях, представляющих интерес внутри одного изображения, они сравниваются с соответствующими параметрами других областей. Эта процедура называется межрегиональной обработкой изображения. В результате этой обработки определяются различия между сравниваемыми областями на термограммах, между параметрами срав-

ниваемых областей, средняя, наименьшая и наибольшая величины температуры и температурного диапазона, среднее отклонение. Затем устанавливается эталон для сравнения с другими областями.

Теперь все элементы инфракрасного изображения систематизированы определенным образом и мы получили информацию о картине инфракрасного излучения. Конечная ступень программного обеспечения — это истолкование изображения, т.е. решение проблемы как на основе полученной информации сделать соответствующие выводы, которые возникнут в процессе последнего этапа программирования, каждый специалист должен ответить самостоятельно, поэтому далее в работе этот вопрос рассматриваться не будет.

Для этой цели разработана программа построения изотермических проекций тепловых данных. Являясь одним из наиболее распространенных форматов выходных данных, изотермическая проекция обладает большой приспособляемостью. Любая из трех осей (x , y , z) может изменяться.

При некоторой доработке программы она позволит рассчитать реальные теплофизические параметры исследуемой конструкции. Достаточно просто, например, составить программу, которая сможет по термоизображению оценивать конструкцию по критерию выпадения конденсата при критических температурных условиях и в зависимости от влажности воздуха в помещении.

Весьма перспективным направлением является создание программы для расчета приведенного сопротивления теплопередаче конструкции. Точная оценка приведенного сопротивления теплопередаче затруднена тем, что конструкции работают в нестационарном тепловом режиме, поэтому необходимо осреднение термоизображения по времени.

Проблема определения приведенного сопротивления теплопередаче при помощи тепловизора в настоящее время разрабатывается. В частности, создана программа для оценки погрешности в зависимости от количества приведенных измерений и теплового режима.

Весьма важной задачей является определение размера дефекта. По изображению на экране тепловизора можно судить лишь о наличии температурной аномалии на поверхности исследуемого объекта, а размеры этой аномалии на изображении зависят, например, от положения регулятора яркости. Для определения действительных геометрических размеров дефекта необходимо знать температурное поле на поверхности исследуемого объекта, тип дефекта, тепловой режим работы объекта, а также его конструкцию.

При проведении многосуточных тепловизионных обследований сравнение теплового изображения в различные моменты времени с учетом колебаний температуры окружающей среды позволит устранить влияние нестационарности теплового режима конструкции, даст возможность прогнозировать тепловую картину на поверхности конструкции при различных климатических условиях, а следовательно, выявить слабые места конструкции. Вводя различные

варианты изменения конструкции, можно будет прогнозировать ее тепловую картину.

Конечно, реализация подобных мероприятий требует проведения большого объема исследовательских работ.

Последующим, высшим этапом работы является создание банка данных о различных типах дефектов строительных конструкций для автоматической их идентификации. В банк могут быть также включены сведения о способах устранения дефектов конструкции.

4.5. ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ

Для обработки тепловизионной информации, записанной в цифровой форме на магнитной ленте, можно использовать не только ЭВМ зарубежных фирм, но и отечественные электронно-вычислительные машины. Малые ЭВМ серии СМ по своим техническим возможностям и применяемой оперативной системе в определенной мере соответствуют компьютерам ПДП 11/04, рекомендуемым фирмой АГА для обработки тепловизионной информации, записанной на магнитной ленте. Естественно, для обработки такой информации необходимо иметь в составе ЭВМ устройство ввода-вывода данных на магнитной ленте. К сожалению, такое устройство не входит в базовый комплект ЭВМ СМ-3, что делает невозможными работы по освоению, доработке и развитию программного обеспечения, разработанного фирмой АГА, хотя в СМ-3 предусмотрена возможность подключения к базовому комплексу устройства ввода-вывода на МЛ. Поэтому для проведения работ по использованию отечественных ЭВМ для обработки тепловизионной информации необходимо закупить либо устройство ввода-вывода на МЛ для доукомплектования СМ-3, либо ЭВМ СМ-4, которая оснащена подобным устройством. Желательно иметь в комплекте ЭВМ графический дисплей, графопроектор, а также устройство ввода графической информации (для обработки фотографий).

Наличие указанных устройств позволило бы с гораздо большей эффективностью использовать имеющиеся у нас тепловизоры АГА-780 и АГА-750, а также отечественный тепловизор АТП-44М, разработанный МИРЭА.

В силу того, что технические характеристики отечественных ЭВМ соответствуют требованиям поставленных задач, возникает необходимость проведения детальных исследований в данной области, скорейшей разработки методов и приемов использования ЭВМ в работе с тепловизорами.

Описание программы. Программа написана на языке ДИАСП СМ/С и предназначена для расчета температур, соответствующих уровням изотерм на кадрах пленок, снятых при тепловизионном обследовании какого-либо объекта. Язык программирования обеспечивает возможность работы с ЭВМ в диалоговом режиме.

Работать с программой может любой оператор практически без какой-либо подготовки, поскольку ЭВМ выдает на дисплей все

вопросы, на которые следует отвечать, причем ввод данных производится без заданного формата. Работа программы осуществляется в соответствии с блок-схемой. Порядок работы следующий:

1. ЭВМ выводит на дисплей и на устройство печати "пленка 1", после чего на дисплей выводится запрос: *введите местонахождение и наименование объекта, дату, ф.и.о. исполнителя, номер темы и пр.* Под "объектом" может подразумеваться, например, обследованный жилой дом или спецоборудование. Вводимый комментарий может содержать любое количество строк. Для перевода строки следует нажать клавишу ВК. Ошибочно набранный символ можно устранить клавишей ЗБ. При этом на дисплее появляется символ забор/. По окончании ввода комментария следует нажать клавишу ПС, после чего комментарий выводится на печать. При вводе комментария запрошено применять буквы латинского алфавита.

2. ЭВМ выдает запрос: *обследование проводилось тепловизором модели*, после чего следует ввести модель тепловизора. Признаком окончания ввода числа может служить пробел ВК, запятая или точка с запятой, и ЭВМ продолжает: *с объективом*: на что следует ввести угол обозрения объектива 20°, 40°, 71 или 72 (71 – 7° объектив № 1, 72 – №2). Если отсутствуют коэффициенты градуировочной кривой данного тепловизора с данным объективом на дисплее выдается обобщение: *нет данных по градуировке и работа программы прекращается*. В противном случае на печать выдается *обследование проводилось тепловизором... с объективом...*

3. Далее ЭВМ запрашивает: *введите характеристику фрагмента*. Под "фрагментом" понимается снятая на данных кадрах часть сооружения – например, стена, или труба и т.п.

Ввод осуществляется так же, как и в п.1.

4. ЭВМ запрашивает: *введите количество реперов (1 или 2)*. В случае ответа 1, следует запрос: *введите репер (температуру, уровень, диапазон, степень "черноты")*.

T : < ввод > : < ввод > D : < ввод > EPS < ввод >.

В случае ответа 2 запрос: *введите реперы (температуры, уровни)*
 T_1 : < ввод > L_1 : < ввод > T_2 : < ввод > L_2 : < ввод >.

5. Далее на дисплее выдается инструкция по вводу, а затем запрос кадр 1. Если использовался тепловизор АГА-750 и на кадре высвечена одна изотерма, то вводится уровень этой изотермы в произвольной форме, например: 0,1 или .1, 1,0 или 1.

Если же использовался тепловизор АГА-780 и на кадре две изотермы, уровни их вводятся через запятую, либо точку с запятой, либо через пробел.

Если при использовании АГА-750 на очередном кадре нет изотермы (а), или при использовании АГА-780 одна изотерма (б) или нет изотерм (в), вводится соответственно:

а) кадр 1: < N >;

б) кадр 1: < уровень > < N >;

в) кадр 1: < N >.

Ввод производится таким образом, пока не закончатся кадры, снятые с данным репером, либо данного фрагмента, либо объекта,

либо пленки. Если какой-либо параметр сменился, следует ввести: кадр 1: $\langle F \rangle$, после чего на печать выводятся номера обработанных кадров и рассчитанные температуры. На бумаге оставляется место для вклейки контактов с обработанной пленки.

6. Затем ЭВМ задает вопросы для выяснения, какой именно параметр сменился. Ответы могут быть: да — $\langle D \rangle$ или нет — $\langle N \rangle$. В зависимости от ответов ЭВМ требует ввода изменившихся параметров.

7. Работа программы заканчивается, если на вопрос:

есть ли еще пленка?

следует ответить: $\langle N \rangle$.

В приведенном образце диалога с ЭВМ все запросы для наглядности выведены на печать. На самом деле они выводятся на дисплей.

Остановимся кратко на основных возможностях и направлениях развития вычислительных функций отечественных тепловизоров. Разработанный НИИСФ совместно с МИРЭА специализированный тепловизор АТП-44, единственный из всех моделей тепловизоров, разрабатываемых в СССР, имеет встроенный аналого-цифровой преобразователь (АЦП). Преобразование аналогового сигнала осуществляется непосредственно после видеосигнала, поэтому все дальнейшие операции с видеосигналом производятся уже в цифровой форме. Эта особенность схемного решения тепловизора АТП-44 раскрывает новые возможности при обработке тепловизионной информации путем закладки ряда математических функций в схему тепловизора. Осуществление математических преобразований в этом случае производится с помощью дискретных электронных элементов, что значительно упрощает схему тепловизора и повышает ее надежность.

В этой связи можно провести сравнение тепловизора АТП-44 с тепловизором АГА-780 производства Шведской фирмы АГА.

Шведский тепловизор также снабжен аналого-цифровым преобразователем ОСКАР, который выполнен в виде отдельного блока, поэтому целый ряд математических операций в тепловизоре АГА-780 осуществляется в аналоговой форме. АЦП используется только для осуществления возможности автоматического ввода тепловизионной информации в ЭВМ.

Вычислительные функции тепловизора АГА-780 достаточно полно описаны в гл. 9. Следует отметить, что они предусматривают разностороннее его применение, поэтому математическое обеспечение этого тепловизора, предлагаемое фирмой, ограничено программой СОФТА. Далее пользователь сам развивает программное обеспечение.

Учитывая специфику использования тепловизоров для решения задач строительной теплофизики для расширения вычислительных функций отечественных тепловизоров в них следует предусмотреть выполнение следующих преобразований:

1. Обязательным является стабилизация опорной величины сигнала, что необходимо для идентичности отчетов при автоматической записи изображений.

2. Выбор зоны автоматического анализа информации на термограммах.

3. Введение изотермической функции с возможностью выделения зон на поверхности исследуемого объекта, имеющих температуру выше или ниже определенного уровня.

4. Автоматическое вычисление максимального, минимального и среднего значения температур на поверхности объекта в пределах выбранной зоны анализа.

5. Ввод значения температуры в реперной точке и определение величины контраста температуры в исследуемой точке по сравнению с ней.

6. Обеспечение записи около 100 кадров изображения в долговременную память. Запоминающее устройство может быть выполнено на твердых электронных элементах, или электромагнитных дисках или ленте.

7. Запись изображения в запоминающее устройство должно быть осуществлено в такой форме, чтобы обеспечить возможность ввода информации в ЭВМ. Для этой цели могут быть рекомендованы машины типа: СМ-4; М-4030, системы ЕС.

8. При вводе информации в ЭВМ должна быть предусмотрена возможность автоматического ввода дополнительных данных. Это в первую очередь значения уровня, диапазона измеряемых температур, связанных с режимами работы самого тепловизора. Кроме того, может быть необходима следующая информация: время и дата проведения обследований, номер кадра, основные характеристики объекта исследований. Эти данные могут быть введены в кодовой форме на выбранный носитель информации, а также высвечены на экране тепловизора при фоторегистрации термоизображений.

9. Обеспечение постоянства градуировочной зависимости или градуировочных коэффициентов. Определение необходимой периодичности поверки тепловизора.

10. Определение величины погрешности измерения температур в связи с неравномерностью усиления сигнала по полю изображения, учета геометрических и итерационных искажений.

11. Очень удобной формой обработки изображения может быть возможность сложения или вычитания последовательно снятых кадров. Например, вычитание теплового фона для более надежного выделения информативного изображения при малых контрастах.

4.6. РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММИРУЕМЫХ КАЛЬКУЛЯТОРОВ

Наряду с обработкой информации, получаемой при тепловизионных исследованиях, с помощью ЭВМ целесообразно во многих случаях использовать программируемые калькуляторы, выпускаемые как отечественной промышленностью (БЗ-21, БЗ-34), так и зарубежными фирмами (НР-65, НР-67, НР-96, НР-41). Несмотря на то, что возможности для обработки информации, предъявляемые каль-

куляторами, несравненно меньшие, чем ЭВМ, их применение имеет смысл в силу того, что их малые размеры позволяют брать их на исследуемый объект для оперативного получения информации. Программируемый калькулятор позволяет производить вычисление различных величин по заранее составленным программам.

Калькулятор "Электроника БЗ-21" может работать в двух режимах: "работа" и "программирование". В режиме "работа" калькулятор позволяет: выполнять арифметические действия; вычислять функции; записывать информацию в 7 адресуемых регистрах памяти и вызывать из них; выполнять вычисления по введенной заранее программе.

В режиме "программирование" калькулятор позволяет вводить программу с клавиатуры, редактировать и корректировать ее. Для программы имеется специальная память объемом в 60 шагов. Для расширения возможностей программирования предусмотрены команды условного и безусловного переходов, а также возможности обращения к подпрограмме внутри программы.

Калькулятор "Электроника БЗ-34" имеет ряд преимуществ перед "Электроникой БЗ-21". Для записи информации имеется 14 адресуемых регистров памяти. Память для программы имеет объем 98 шагов. Предусмотрены возможности организации циклов, косвенной адресации при записи информации, а также при переходах.

Основные неудобства при работе с калькуляторами БЗ-21 и БЗ-34 возникают из-за отсутствия устройства для записи программы и данных на какие-либо носители, поэтому каждый раз при включении калькулятора необходимо заново вводить программу с клавиатуры, а затем проводить тестирование для выявления ошибок.

Фирма "Хьюлет пакарт" выпускает калькулятор HP-41CV, который лишен данного недостатка и обладает многими другими полезными функциями. Этот калькулятор имеет блочную конструкцию. К калькулятору через разъемы могут быть присоединены блок ввода-вывода на магнитные карты, печатающее устройство, дополнительная память и многие другие устройства.

Программа, записанная на магнитных картах, вводится в память в течение нескольких минут. Кроме того, записанные в память калькулятора программы и данные не стираются при выключении калькулятора, поэтому при постоянном использовании программы вообще отпадает необходимость ввода ее с магнитных карт. Магнитные карты используются, если программа была удалена из памяти, чтобы освободить память для других программ.

Среди особенностей калькулятора HP-41CV следует отметить: возможность перераспределения памяти (общий объем — 319 регистров) между программой памятью и памятью для данных. Например, если всю память отвести под программу, можно ввести программу объемом более 2200 шагов;

возможность ввода и вывода алфавитной информации, что позволяет выводить на дисплей различные сообщения и запросы и организовывать диалог;

возможность привязки к любым клавишам калькулятора функ-

ций и пользовательских программ, что позволяет организовать клавиатуру в соответствии с запросами пользователя.

Все перечисленные и многие другие особенности калькулятора HP-41CV позволяют создавать максимально удобные для пользователя программы. Порядок работы с отечественным калькулятором БЗ-21 следующий:

включить калькулятор;

перейти в режим программирования (нажатием клавиш Р, РП);

ввести программу (т.е. по заранее подготовленным записям набрать ее на клавиатуре);

ввести в регистр памяти тестовые данные, запустить программу (В/О, С/П);

в случае, если результат не совпадает с тем, который должен получиться, перейти снова в программный режим, найти ошибку в программе, устранить ее и еще раз повторить тест;

ввести действительные данные, запустить программу.

Тестирование программы необходимо проводить поскольку при вводе программы нередко случаются ошибки. Гораздо удобнее работать с калькулятором HP-67, так как программа заранее записана на магнитной карте и ввод программы производится мгновенно. В этом случае необходимость в тесте отпадает.

Тем не менее в основном следует ориентироваться на применение отечественных калькуляторов, так как они существенно дешевле и доступнее, нежели импортные. Для калькулятора БЗ-21 в настоящее время составлены нижеследующие программы.

1. Расчет температуры по одному реперу.

Программа предназначена для расчета температур, соответствующих изотермическим уровням на шкале тепловизора, при наличии одного температурного репера. Расчетная формула следующая:

$$t = -B/\ln \left[\exp \left(-\frac{B}{\tau_p + 273} \right) + \frac{(L - L_p)D}{\epsilon A} \right] - 273. \quad (4.7)$$

Для удобства ввода и уменьшения времени счета программа составлена так, что перед началом счета в регистры памяти вручную заносятся коэффициенты градуировки A и B , диапазон D и степень черноты поверхности ϵ . Температура и уровень репера заносятся в регистры памяти автоматически в ходе работы программы от шага 00, после чего рассчитываются величины $Q = D/\epsilon A$ и $M = \exp \left(\frac{-B}{(\tau_p + 273)} \right)$, неизменные для данного репера. Дальнейший

счет после ввода уровня L идет по формуле:

$$t = \frac{-B}{\ln [M + (L - L_p) N]} - 273. \quad (4.8)$$

Для дальнейшего расчета температур при том же репере достаточно ввести новое значение L и запустить программу. Если же репер

сменился, следует вернуться к началу программы (нажатием клавиши В/О) и ввести новые значения τ_p и L_p . Естественно, если сменились D или ϵ , новые значения следует вручную ввести в соответствующие регистры памяти.

2. *Расчет температуры по двум реперам.* Программа предназначена для расчета температур при наличии двух температурных реперов. Расчетная формула:

$$t = -B/\ln \left\{ \exp \left(\frac{-B}{\tau_{p2} + 273} \right) + \left[\exp \left(\frac{-B}{\tau_{p1} + 273} \right) - \exp \left(\frac{-B}{\tau_{p2} + 273} \right) \right] \frac{L - L_{p2}}{L_{p1} - L_{p2}} \right\} - 273. \quad (4.9)$$

В данном случае отпадает необходимость ввода коэффициента A , а также D и ϵ , поэтому вручную вводится только коэффициент B . Программа работает аналогично предыдущей. В ходе работы программы с шага 00 автоматически заносятся в регистры памяти значения температур и уровней репера τ_{p1} , L_{p1} , τ_{p2} , L_{p2} и рассчитываются величины

$$Q = \left(\exp \frac{-B}{\tau_{p1} + 273} - \exp \frac{-B}{\tau_{p2} + 273} \right) / (L_{p1} - L_{p2}), \quad (4.10)$$

$$M = \exp \frac{-B}{\tau_{p2} + 273}. \quad (4.11)$$

Дальнейший счет идет по формуле

$$t = -B/\ln [M + (L - L_{p2}) Q] - 273. \quad (4.12)$$

3. *Расчет степени черноты поверхности.* Программа предназначена для расчета степени черноты поверхности исследуемого объекта в специальном диапазоне используемого тепловизора при наличии двух температурных реперов (предполагается, что реперы снимались на участках поверхности с одинаковой степенью черноты, но разной температурой).

Расчетная формула:

$$\epsilon = D (L_1 - L_2) / A \left[\exp \left(\frac{-B}{\tau_1 + 273} \right) - \exp \left(\frac{-B}{\tau_2 + 273} \right) \right]. \quad (4.13)$$

Ввод коэффициентов A и B , диапазона D осуществляется вручную, ввод температур и уровней — автоматически в ходе выполнения программы.

4. *Расчет изотермических уровней по методу "одного репера".* Часто при проведении тепловизионных обследований возникает необходимость получения таких изотерм на поверхности исследуе-

мого объекта, которые соответствовали бы температурам, отличающимся друг от друга на равную величину. Для этой цели предназначены программы. Их удобно использовать также, если исследуемый объект не входит полностью в поле обзора объектива и поэтому разбивается на отдельные фрагменты с целью последующего построения общего температурного поля. Расчетная формула:

$$L_i = \left[\exp \left(\frac{-B}{\tau_i + 273} \right) - \exp \left(\frac{-B}{\tau_p + 273} \right) \right] \frac{\epsilon A}{D} + L_p, \quad (4.14)$$

где $\tau_i = \tau_{i-1} + \Delta t$.

Вручную осуществляется занесение в регистры памяти коэффициентов A и B , после чего в ходе выполнения программы автоматически заносятся ϵ , D , t_p , L_p и рассчитываются величины

$$Q = \exp \left(\frac{-B}{\tau_p + 273} \right) \text{ и } M = \frac{\epsilon A}{D}. \quad (4.15)$$

После этого в регистры y и x вводятся начальная температура τ_0 и интервал изменения температуры Δt и по программе рассчитывается значение изотермического уровня по формуле:

$$L_i = \left[\exp \left(\frac{-B}{\tau_i + 273} \right) - Q \right] M + L_p. \quad (4.16)$$

При следующем запуске программа автоматически увеличивает значение температуры на величину Δt и рассчитывает новое значение уровня.

Для ввода новых значений τ_0 и Δt при неизменном репере необходимо перейти к шагу 45 (БП). При смене репера следует перейти к началу программы (В/О).

5. *Расчет изотермических уровней по методу "двух реперов".* Программа организована аналогично предыдущей. Расчетная формула:

$$L_i = \left[\exp \left(\frac{-B}{\tau_i + 273} \right) - \exp \left(\frac{-B}{\tau_{p1} + 273} \right) \right] (L_{p2} - L_{p1}) / \left[\exp \left(\frac{-B}{\tau_{p2} + 273} \right) - \exp \left(\frac{-B}{\tau_{p1} + 273} \right) \right] + L_{p1}, \quad (4.17)$$

где $\tau_i = \tau_{i-1} + \Delta t$.

Вручную заносится в память коэффициент B , затем автоматически температуры и уровни реперов и рассчитываются

$$Q = \exp \left(\frac{-B}{\tau_{p1} + 273} \right), \quad (4.18)$$

$$M = (L_{p2} - L_{p1}) / \left[\exp \frac{-B}{\tau_{p2} + 273} - Q \right]. \quad (4.19)$$

Дальнейший расчет идет по формуле

$$L_i = \left[\exp \left(\frac{-B}{\tau_i + 273} \right) - Q \right] M + L_{p1}. \quad (4.20)$$

Программы 4 и 5 удобно применять при фотографировании термомизображений. После ввода начальных данных достаточно нажать клавишу С/П, чтобы получить новое значение изотермического уровня, после чего можно делать фотографию.

Универсальная программа для калькулятора HP-67. Прежде чем перейти к описанию созданной универсальной программы, следует подробнее рассмотреть некоторые существенные различия в идеологии программирования на отечественных и фирменных калькуляторах.

Поскольку в отечественных калькуляторах не предусмотрена возможность записи программ и данных на внешние носители информации, то не имеет смысла создавать для них универсальные программы для расчета различных значений. Дело в том, что такая программа состоит из нескольких малых, и поэтому будет, естественно, иметь большой объем, и придется фактически каждый раз, когда необходимо, пользоваться одной программой, вводить несколько. Это потребует много времени для ввода программы и увеличит вероятность возникновения ошибок. Иное дело с калькулятором HP-67, когда пользователь имеет готовую универсальную программу, записанную на магнитную карту, а также, если это нужно, дополнительную карту, на которой записаны числовые данные. Ввод программы и данных практически не отнимает времени, и не возникает ошибок.

В отечественных программируемых калькуляторах запуск программы может осуществляться лишь нажатием клавиши С/П, причем программа начинает выполняться с шага, номер которого в настоящий момент записан в счетчике адреса. Поэтому, если мы хотим, например, в ходе выполнения программы ввести ряд данных в регистры памяти, они должны вводиться одно за другим в строгой последовательности, в противном случае они будут записаны не в те регистры, которые для них предназначены. В калькуляторе HP-67 помимо клавиши (РАН — СТОП), действие которой аналогично С/П в отечественных калькуляторах, предусмотрено десять точек входа в программу (метки А, В, С, D, E, a, b, c, d, e). Это позволяет разбить программу на отдельные блоки, каждый из которых может работать самостоятельно. Например, одни блоки программы осуществляют автоматическое занесение данных в регистры памяти, другие — расчет каких-либо величин.

Эти особенности калькулятора HP-67, а также большой объем программной памяти и большое количество адресуемых регистров памяти создали условия для разработки универсальной программы, которая позволяет выполнять все, что делают пять описанных программ для БЗ-21.

Программа снабжена картой данных, на которой записаны градуировочные коэффициенты А и В для имеющихся в НИИСФ тепловизио-

ров АГА-750 и АГА-780 и объективов с углом обзора 40, 20 и двух — 7° во всех возможных сочетаниях, а также начальное значение степени черноты ϵ и коэффициента затухания τ , равные 1.

Работа с программой начинается с ввода карты с программой и карты данных. После этого пользователь должен набрать номер используемой модели тепловизора и угол обзора объектива, например 7° — (71 или 72, где 1 или 2 — условный номер объектива), и нажать клавишу А, в результате чего соответствующие коэффициенты А и В будут извлечены из регистра памяти, где они хранятся в виде $(A + B \cdot 10^{-4})$, отделены один от другого и записаны в регистры RA и RB. В случае, если на карте данных отсутствуют значения коэффициентов А и В для данного сочетания объектива и тепловизора, на индикаторе появится сообщение "Error" (ошибка). Дальнейшие действия оператора определяются тем, что он хочет рассчитать.

1. Рассчитать температуру по одному реперу. Для этого вводятся: значения ϵ (клавиши f_a), τ (клавиши f_b), диапазон D (клавиша В), уровень репера L_p (клавиша С), температура репера τ_p (клавиша D), значение уровня L и рассчитывается значение температуры t (клавиша E).

Ввод производится в произвольном порядке. Если не введены значения ϵ и (или) τ , они считаются равными 1. Если не введено значение D, при нажатии клавиши E появится сообщение "Error". При смене каких-либо входных параметров следует ввести новые их значения.

2. Надо рассчитать температуру по двум реперам. Для этого вводятся: уровень первого репера L_{p1} (клавиша С), температура первого репера τ_{p1} (клавиша D), уровень второго репера L_{p2} (клавиши f_c), температура второго репера τ_{p2} (клавиши f_d), уровень L и рассчитывается температура t (клавиша E).

Ввод также производится в произвольном порядке, но уровень первого репера обязательно должен быть введен прежде, чем уровень второго репера. При попытке ввести сначала уровень второго репера появляется сообщение "Error". Это сделано во избежание ошибок при вводе. Если после уровня первого репера введен уровень второго репера, расчет ведется по двум реперам, в противном случае — по одному реперу.

3. Рассчитать степень черноты поверхности ϵ . Для этого так же, как и для расчета температур, вводятся температуры и уровни двух реперов (если они не вводились). Затем вводится диапазон D (клавиша В) и рассчитывается ϵ (клавиши f_a). В случае, если не введено значение диапазона, появляется сообщение "Error".

4. Рассчитать изотермические уровни по одному или по двум реперам. Для этого так же, как и при подсчете температур, вводятся данные (если они не были введены ранее) для одного репера ϵ , τ , D, L_p , τ_p и для двух реперов L_{p1} , τ_{p1} , L_{p2} , τ_{p2} . Затем вводятся начальная температура t и интервал изменений Δt (t_0 ЕНТЭ R \uparrow Δt) и рассчитывается значение изотермического уровня (клавиши f_e). Последующие значения уровня рассчитываются при нажатии клави-

ши RS. В случае расчета по одному реперу так же, как и ранее, если не был введен диапазон, появится сообщение "Error". Необходимо отметить, что сообщение об ошибке появляется только в том случае, если значение диапазона не вводилось ни разу с начала работы; в противном случае будет использовано предыдущее значение.

Таблица 4.1. Программа расчета температур по методу "одного репера"

Адрес	Команда	Код операции	Адрес	Команда	Код операции
00	P7	71	5	Cx	76
1	C/П	78	40	C/П	78
2	P6	61	1	↑	06
3	F4	42	2	F6	62
4	↑	06	3	-	86
5	F2	22	4	-	06
10	+	36	5	F8	82
1	↑	06	50	x	26
2	F5	52	1	↑	06
3	-	36	2	F7	72
4	P8	81	3	+	96
5	F7	72	4	P In	13
20	2	24	5	↑	06
1	7	74	60	F3	32
2	3	34	1	↔	16
3	+	96	2	+	36
4	↑	06	3	/-/	56
5	F3	32	4	2	24
30	↔	16	5	7	74
1	/-/	56	70	3	34
2	Pe*	33	1	-	86
3	P7	71	2	БП	58
4			3	P4	41

Назначенные регистры памяти для введения исходной информации:

P2 - A, P3 - B, P4 - D, P5 - ε, P6 - L_p, P7 - τ_p, P8 - оперативный

Таблица 4.2. Порядок работы по программе расчета температур по методу "одного репера"

Номер операции	Операция	Набрать	Выполнить	Результат	Тест	Результат
1	Ввести программу	P/PP ввод P/PP				
2	Ввести коэффициенты градуировки	A	P2	A	5 ВП 5	500 000
3	Ввести диапазон	B	P3	B	3 ВП 3	3000
4	Ввести ε	D	P4	D	5	5
5	Ввести температурный репер (°C)	ε	P5	ε	1	-1
		τ _p	В/О C/П	τ _p	10	10

Продолжение табл. 4.2

Номер операции	Операция	Набрать	Выполнить	Результат	Тест	Результат
6	Ввести уровень репера	L	C/П	0	0	0
7	Ввести уровень, определить температуру	L	C/П	τ	-1	19,31
8	Если репер тот же - выполнить п. 7, если репер сменился - начинать с п. 5					

Таблица 4.3. Программа расчета температуры по методу "двух реперов"

Адрес	Команда	Код операции	Адрес	Команда	Код операции
00	P3	31	50	-	86
1	C/П	78	1	↑	06
2	P4	41	2	F4	42
3	C/П	78	3	x	26
4	P5	51	4	↑	06
5	C/П	78	5	F5	52
10	P6	61	60	+	96
1	↑	06	1	P In	13
2	F4	42	2	↑	06
3	-	86	3	F2	22
4	/-/	56	4	↔	16
5	P4	41	5	+	36
20	F5	52	70	/-/	56
1	ПП	68	1	2	24
2	F8	82	2	7	74
3	P5	51	3	3	34
4	F3	32	4	-	86
5	ПП68	68	5	БП	58
30	F8	82	80	4	44
1	↑	06	1	2	24
2	F5	52	2	7	74
3	-	86	3	3	34
4	↑	06	4	+	96
5	F4	42	5	↑	06
40	+	36	90	2	22
1	P4	41	1	↔	16
2	Cx	76	2	+	36
3	C/П	78	3	/-/	56
4	↑	06	4	Pe*	33
5	6	62	5	В/О	-

Назначенные регистры памяти для введения исходной информации:

P2 - B, P3 - τ_{p1}, P4 - L_{p1}, P5 - τ_{p2}, P6 - L_{p2}.

Таблица 4.4. Порядок работы по программе расчета температур по методу "двух реперов"

Но-мер опера-ции	Операция	Набрать	Выпол-нить	Ре-зультат	Тест	Результат
1	Ввести программу	P/PP ввод P/PP				
2	Ввести коэффициент градуировки	B	P2	B	$3 \cdot 10^3$	3000
3	Ввести температуру 1-го репера	τ_{P1}	В/О С/П	τ_{P1}	10	10
4	Ввести уровень 1-го репера	L_{P1}	С/П	L_{P1}	0	0
5	Ввести температуру 2-го репера	τ_{P2}	С/П	τ_{P2}	20	20
6	Ввести уровень 2-го репера	L_{P2}	С/П	0	1	0
7	Ввести уровень, определить температуру	L	С/П	τ	0,5	15,36
8	Если репер тот же — выполнить п. 7, если репер сменился — начинать с п. 3					

Таблица 4.5. Программа расчета коэффициента излучения

Адрес	Команда	Код операции	Адрес	Команда	Код операции
00	P5	51	4	5	54
1	С/П	78	5	†	06
2	P6	61	40	5	52
3	С/П	78	1	-	86
4	P7	71	2	†	06
5	С/П	78	3	F8	82
10	†	06	4	∞	16
1	F6	62	5	+	36
2	-	86	50	С/П	78
3	†	06	1	ВП	58
4	F4	42	2	PO	01
5	x	26	3	2	24
20	†	06	4	7	74
1	F2	22	5	3	34
2	+	36	60	+	96
3	P8	81	1	†	06
4	F5	52	2	F4	42
5	П/П	68	3	∞	16
30	5	54	4	+	36
1	P5	51	5	/-/	56
2	F7	72	70	Pe*	33
3	П/П	68	1	В/О	48

Назначенные регистры памяти для введения исходной информации:
P2 — A, P3 — B, P4 — D, P5 — τ_1 , P6 — L_1 , P7 — τ_2 , P8 — оперативный.

Таблица 4.6. Порядок работы по программе расчета коэффициента излучения

Но-мер опера-ции	Операция	Набрать	Выпол-нить	Ре-зультат	Тест	Результат
1	Ввести программу	P/PP ввод P/PP				
2	Ввести коэффициенты	A B	P2 P3	A B	5 НП 5 3 НП 3	500 000 3000
3	Ввести диапазон		P4	τ_1	5	5
4	Ввести τ_1 (°C)	τ_1	В/О С/П	τ_1	10	10
5	Ввести L_1	L_1	С/П	L_1	0	0
6	Ввести τ_2	τ_2	С/П	τ_2	19,31	19,31
7	Ввести ϵ	ϵ	С/П	ϵ	1	0,9988
8	Для следующего счета ввести новое значение τ_1 , перейти к п. 5					

Таблица 4.7. Программа расчета уровней температур по методу "одного репера"

Адрес	Команда	Код операции	Адрес	Команда	Код операции
00	P5	51	50		16
1	С/П	78	1	2	24
2	P4	41	2	7	74
3	С/П	78	3	3	34
4	P7	71	4	+	96
5	С/П	78	5	P5	51
10	P6	61	60	†	06
1	F7	72	1	F3	32
2	2	24	2	∞	16
3	7	74	3	+	36
4	3	34	4	/-/	56
5	+	96	5	Pe*	33
20	†	06	70	†	06
1	F3	32	1	F7	72
2	∞	16	2	-	86
3	+	36	3	†	06
4	/-/	56	4	F8	82
5	Pe*	33	5	x	26
30	P7	71	80	+	06
1	F2	22	1	F6	62
2	†	06	2	+	96
3	F5	52	3	С/П	78
4	x	26	4	F5	52
5	†	06	5	†	06
40	F4	42	90	F4	42
1		36	1	+	96
2	P8	81	2	БП	58
3	Cx	76	3	/-/	56
4	С/П	78			
5	P4	41			

Назначенные регистры памяти для введения исходной информации:
P2 — A, P3 — B, P4 — D, P5 — ϵ , P6 — L_p , P7 — τ_p , P8 — оперативный.

Таблица 4.8. Порядок работы по программе расчета уровней температуры по методу "одного репера"

Но-мер опера-ции	Операция	Набрать	Выпол-нить	Ре-зультат	Тест	Результат
1	Ввести программу	P/PP ввод P/PP				
2	Ввести коэффициенты, град.	A	P2	A	5 БП 5	500 000
3	Ввести ϵ	B	P3	B	3 РП 3	7000
4	Ввести диапазон	ϵ	B/O C/П	ϵ	1	1
5	Ввести температуру репера ($^{\circ}\text{C}$)	D	C/П	D	5	5
6	Ввести уровень репера	τ_p	C/П	τ_p	10	10
7	Ввести начальную температуру и интервал изменения ($^{\circ}\text{C}$)	L_0, \uparrow Δt	C/П	0	0	0
8	Определить следующие значения уровня		C/П	L_i	-	$1,92 \cdot 10^{-1}$
9	Если сменился фрагмент, но репер тот же - выполнить и перейти к п. 7		БП			
10	Если репер сменился - начать с п. 3					

Таблица 4.9. Программа расчета уровней температур по методу "двух реперов"

Адрес	Команда	Код операции	Адрес	Команда	Код операции
00	P3	31	51	ПП	68
1	C/П	78	2	F8	82
2	P4	41	3	↑	06
3	C/П	78	4	F7	72
4	P5	51	5	-	86
5	C/П	78	60	↑	06
10	P6	61	1	F8	82
1	↑	06	2	x	26
2	F4	42	3	↑	06
3	-	86	4	F4	42
4	P8	81	5	+	96
5	3	32	70	C/П	78
20	ПП	68	1	F5	52
1	F8	82	2	↑	06
2	P7	71	3	F6	62
3	F5	52	4	+	96
4	ПП	68	5	БП	58
5	F8	82	80	P5	51
30	↑	06	1	2	24
1	F7	72	2	7	74
2	-	86	3	3	34
3	↑	06	4	+	96
4	F8	82	5	↑	06
5	↔	16	90	F2	22
40	+	30	1	↔	16

Продолжение табл. 4.9

Адрес	Команда	Код операции	Адрес	Команда	Код операции
1	P8	81	2	+	36
2	Cx	76	3	/-/	56
3	C/П	78	4	Re*	33
4	P6	61	5	B/O	48
5	↔	16			
50	P5	51			

Назначенные регистры памяти для введения исходной информации:

P2 - B, P3 - τ_{p1} , P4 - L_{p1} , P5 - τ_{p2} , τ_u , P6 - L_{p2} , Δt ,

P7 - $\exp\left(\frac{-B}{T_{p1}}\right)$, P8 - оперативный.

Таблица 4.10. Порядок работы по программе расчета уровней температур по методу "двух реперов"

Но-мер опера-ции	Операция	Набрать	Выпол-нить	Ре-зультат	Тест	Результат
1	Ввести программу	P/PP ввод P/PP				
2	Ввести коэффициент	B	P2	B	3 ВП 3	3000
3	Ввести температуру 1-го репера ($^{\circ}\text{C}$)	τ_{p1}	B/П C/П	τ_{p1}	10	10
4	Ввести уровень 1-го репера	L_{p1}	C/П	L_{p1}	0	0
5	Ввести температуру 2-го репера	τ_{p2}	C/П	τ_{p2}	20	20
6	Ввести уровень 2-го репера	L_{p2}	C/П	0	1	0
7	Ввести начальную температуру и интервал изменения ($^{\circ}\text{C}$), определить 1-е значение уровня	t_u, \uparrow Δt	C/П	L_1	11 ↑ 1	$8,72 \cdot 10^{-2}$
8	Определить следующие значения уровня		C/П	L_i	-	$1,77 \cdot 10^{-1}$
9	Если сменился фрагмент, но репер тот же выполнить и перейти к п. 7		БП F	-		
10	Если репер сменился - начинать с п. 3					

Глава 5. ТЕРМОГРАФИРОВАНИЕ НАРУЖНЫХ ОГРАЖДЕНИЙ ЗДАНИЙ

Наибольший удельный вес среди строительных конструкций индустриального изготовления занимают ограждающие конструкции, от состояния которых в основном зависят показатели сооружаемых зданий и величина теплопотерь. За последние годы на предприятиях стройиндустрии, выпускающих ограждающие конструкции, и в системе строительства осуществляются мероприятия по разработке и внедрению комплексной системы управления качеством. Однако в реализации этой программы есть недостаток — это недооценка значений и теплофизических характеристик ограждающих конструкций, которые в силу сложившейся практики не являются обязательными при приемке готовых изделий службами технического контроля.

Основные теплофизические характеристики (сопротивление теплопередаче и воздухопроницанию, влажность материалов и др.), регламентируемые СНиП, отсутствуют, как правило, в стандартах на конкретные виды изделий. И контроль их сводится в лучшем случае к определению объемной массы и влажности ограждающих конструкций в заводских условиях и визуальному контролю при строительстве зданий и вводе их в эксплуатацию.

Одной из основных причин сложившегося положения является отсутствие оперативных и объективных методов контроля теплофизических характеристик на всех стадиях индустриального строительства и эксплуатации зданий, поэтому в НИИСФ разрабатываются предложения по системе и методам контроля теплофизических качеств элементов ограждающих конструкций жилых и общественных зданий. Потери энергии, расходуемой на отопление зданий, могут быть разделены на теплопотери через ограждающие конструкции, определяемые их теплофизическими качествами; теплопотери через вентиляционные системы, а также связанные со случаями дополнительной вентиляции (например, теплопотери через форточки); теплопотери в местах повышенной воздухопроницаемости элементов конструкций, в основном вызванные некачественным монтажом изделий; теплопотери через подполья и чердачные перекрытия и крыши.

Следует количественно оценить удельный вес каждого вида теплопотерь в общем тепловом балансе здания. Ограничимся рассмотрением теплопотерь, определяемых качеством ограждающих конструкций зданий.

Расчет удельных теплопотерь через ограждающие конструкции, выполненный на основе учета характеристик, нормируемых СНиП П-3-79 для условий Москвы, показывает, что величина теплопотери существенно зависит от коэффициента остекления. В качестве примера приведем результаты упрощенного расчета теплопотерь через глухую наружную стену и стену с окнами без учета их тепловой теплопотери через отдельные элементы ограждений за счет теплопроводности и воздухопроницаемости.

Нормируемые значения используемых для расчета величин взяты для условий Москвы.

Требуемое сопротивление теплопередаче для стены $R_{00}^{mp} = 1,1$, для окна $R_{00} = 0,4 \text{ м}^2 \cdot \text{°С}/\text{В}$. Допустимое значение воздухопроницания за счет инфильтрации для стены $G_0 = 0,5$, для окна $G_{00} = 10 \text{ м}^2 \cdot \text{°С} \cdot \text{Па}^{2/3} / \text{кг}$.

Результаты расчетов показывают, что относительная величина теплопотерь меняется в зависимости от вида и особенностей конструкции. Эти расчеты основаны на требованиях СНиП. Здесь не учитываются реальные условия тепловлажностного режима, в которых работает конструкция, например изменение температуры и перепад давления по высоте здания, а также возможные повышения отдельных составляющих теплопотерь из-за некачественного выполнения отдельных элементов конструкций или неудачных конструктивных решений и т.д.

На основе выполненных расчетов можно сделать следующие выводы:

1. Для глухих стен при условии выполнения качественных стыков между панелями основные потери обусловлены теплопроводностью материалов стены (до 80%), а для теплопотерь за счет фильтрации воздуха ничтожна (около 11%). При наличии керамической облицовочной плитки или поправки панели водостойкими красками этой величиной теплопотерь (за счет воздухопроницаемости) можно пренебречь. Основное внимание в этом случае следует обратить на соответствие действительных и расчетных нормативных характеристик теплопроводности строительных материалов и их однородности по всему объему конструкции.

2. Для стен с оконными проемами основные потери тепла (60–75%) обусловлены теплопроводностью и воздухопроницаемостью оконных заполнений. При этом особое внимание надо уделять качеству проектирования и установки оконных заполнений. Общая величина теплопотери увеличивается в зависимости от величины коэффициента остекления (при $\eta = 0,3$ в 2,5 раза, а при $\eta = 0,5$ в 3,5 раза по сравнению с глухой стеной), равного отношения площади остекления к площади всей стены.

3. По расчетам теплопотери через стыковые соединения панелей при качественном их выполнении составляют около 8–10% общей величины теплопотерь. На практике же повышенные теплопроводность и воздухопроницаемость стыков могут в корне изменить баланс теплопотерь через ограждающие конструкции и являются одной из основных причин снижения теплозащитных характеристик наружных стен. Величина теплопроводности материалов не остается постоянной с течением времени, она изменяется в зависимости от влажности материалов, их объемной массы, от выбора используемых комплектов при изготовлении конструкций, а также в связи со старением материалов.

Использование термографии позволяет в той или иной степени ответить на большинство поставленных вопросов:

оценить качества новых и экспериментальных зданий для определения и обеспечения оптимальных тепловых характеристик и усовершенствования методов научной экспертизы при их проектировании и строительстве;

определить целесообразность и объем профилактического или капитального ремонта здания путем оценки степени дефектности и состояния отдельных его элементов;

осуществить контроль за уровнем теплопотерь через отдельные элементы ограждений и зданий в целом. Однако результаты термографической съемки не могут являться средством окончательной оценки всех перечисленных показателей, но на их основе и при использовании других существующих методов диагностики зданий (визуальный осмотр, опрос жителей и специалистов эксплуатационников, анализ проектной документации и т.д.) может быть все же получена достоверная информация. При этом термография используется для оперативности диагностики качества теплоизоляции и воздухопроницаемости ограждений зданий.

Существуют три способа термографического контроля зданий: аэротермография — тепловая съемка отдельных зданий или комплексов с самолета или вертолета; наземная термография — тепловая съемка наружной поверхности ограждений здания, внутренняя термография — тепловая съемка внутренней поверхности наружных ограждений зданий и их элементов.

Каждому способу присущи свои специфические особенности, связанные с целями и методами обследования. При этом в различной степени приходится учитывать влияние внешних источников излучения и характеристик промежуточной среды. При всех способах термографии зданий оператору для правильной интерпретации полученных данных необходимо учесть влияние основных внешних факторов на результаты тепловой съемки и проанализировать конструктивные особенности обследуемых объектов. В некоторых случаях могут быть использованы как отдельные способы термографических обследований, так и их сочетания.

Аэротермография позволяет достаточно быстро получить данные о большом количестве зданий и определить относительное тепловое состояние отдельных зданий. Наземная термография предназначена для определения теплового состояния отдельных зданий и качественной оценки состояния отдельных элементов их ограждений. Внутренняя термография позволяет определить параметры обнаруженных теплопроводных дефектов в ограждениях и получить количественную оценку их теплозащитных качеств.

Перед проведением обследований специалист должен тщательно ознакомиться с проектной документацией, материалами, использованными при строительстве, характером и сроком эксплуатации обследуемого объекта, целями проведения обследований. Исходя из этих данных и на основе своего опыта он выбирает способ проведения обследований, определяет необходимые климатические условия для обеспечения решения поставленных задач и способы регистрации и представления результатов.

Одна из наиболее развитых областей использования термографии в строительстве — выявление дефектов теплоизоляции и случайных теплопроводных включений. В этих случаях не требуется определять абсолютные значения температуры на поверхности ограждения,

а только относительное изменение. Локальные изменения температуры на поверхности ограждения вызываются рядом факторов: различием термических сопротивлений включения и самого ограждения, размерами и глубиной залегания неоднородности, величиной теплового потока, проходящего через ограждение, воздухопроницаемостью и т.д. Эти обследования, как правило, проводятся в отапливаемый период эксплуатации зданий.

При обследовании уникальных зданий и памятников архитектуры ставится задача определения состояния внутренних стен. Эту задачу можно решить путем создания нестационарных тепловых потоков в виде одностороннего охлаждения ограждения либо его нагрева.

Для получения количественной оценки теплозащитных качеств ограждений необходимо решать обратную задачу — по температурному полю на поверхности рассчитывать теплотехнические характеристики обследуемого ограждения. При этом должны быть оценены инерционные свойства ограждения и изменения параметров ограждающей их тепловой среды как во время обследования, так и до их проведения.

5.1. РАДИАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОВЕРХНОСТЕЙ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Для построения температурного поля поверхности ограждающей конструкции здания по данным тепловизионных измерений, а также для оценки радиационной составляющей теплообмена здания с окружающей средой необходимо знать излучательную способность поверхности. Излучательная способность поверхности данного тела характеризуется коэффициентом излучения ϵ , т.е. отношением плотности потока энергии излучения поверхности данного тела к плотности потока энергии излучения абсолютно черного тела при одинаковых температурах поверхностей

$$\epsilon = W(T)/W_0(T), \quad (5.1)$$

где ϵ — функция температуры T и длины волны излучения λ .

Для строительных материалов в диапазоне температур от -30 до 30°C допустима гипотеза о независимости коэффициента излучения от температуры. Для измерения излучательной способности необходимо знать плотность потока лучистой энергии. Методическая погрешность измерения температурных полей в основном зависит от точности определения излучательной способности исследуемого объекта и величины излучения окружающей среды.

Относительная методическая погрешность температуры δT в зависимости от ϵ определяется по формуле:

$$\delta T = 1 - \sqrt[m]{\epsilon}, \quad (5.2)$$

где m — коэффициент, характеризующий степенную зависимость энергетической яркости излучения b от температуры ($b = q T^m$).

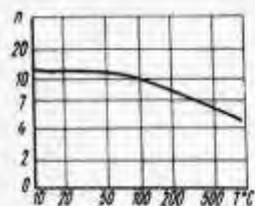


Рис.5.1. Зависимость коэффициента ϵ от температуры T

На рис. 5.1 приведена зависимость коэффициента ϵ от температуры T . Если излучательная способность объекта известна, то его температура может быть определена и при неизвестной температуре окружающей среды путем измерения суммарного потока от объекта и окружающей среды.

Важно иметь в виду, что независимое измерение ϵ во время эксперимента позволяет также обойти вопрос об определении угловых координат прибора по отношению к исследуемой поверхности. Во многих случаях геометрия излучаемой поверхности достаточно сложная, а излучательная способность в значительной мере зависит от угла визирования поверхности.

Существующие тепловизоры работают в определенном интервале длины волны. Например, для тепловизоров, где в качестве чувствительного элемента используется термоприемник из актиноида индия $JnSb$, этот интервал колеблется от 3 до $5,7 \cdot 10^{-6}$ м. К таким тепловизорам относятся тепловизоры АГА-750, АГА-780, АТП-44, БТВ-03 и др. Поэтому при работе с ними следует определять интегральные значения коэффициента излучения исследуемой поверхности в этом интервале. Кроме того, в каждом тепловизоре используются различные оптические элементы, которые изменяют границы рабочего интервала длины волн, причем эти изменения, как правило, не известны, поэтому желательно проводить измерения коэффициента излучения поверхностей с использованием имеющегося тепловизора.

Коэффициент излучения поверхности в спектральном диапазоне тепловизора может быть определен различными способами, в том числе и по абсолютно черному телу (АЧТ). Он сводится к сопоставлению выходных сигналов тепловизора L и исследуемой поверхности и абсолютно черного тела $L_{АЧТ}$, при условии равенства температур поверхностей образца и АЧТ:

$$\epsilon = L/L_{АЧТ}. \quad (5.3)$$

Эта формула является приближенной, так как не учитывает отраженного от поверхности образца излучения и обеспечивает небольшую погрешность лишь при условии, что температура поверхности образца на много больше температуры окружающих предметов.

Более широкое применение нашел способ, заключающийся в измерении выходных сигналов тепловизора L_1, L_2, L , которые соответствуют излучению от эталонов, коэффициент излучения которых

известен и от исследуемого образца, которые имеют одинаковую температуру:

$$\epsilon = \epsilon_1 \frac{L - L_2}{L_1 - L_2} + \epsilon_2 \frac{L_1 - L}{L_1 - L_2}, \quad (5.4)$$

где ϵ_1 и ϵ_2 — коэффициенты излучения эталонов.

Однако при известной простоте перечисленных способов измерения коэффициента излучения их применение для исследования зависимости $\epsilon(\varphi)$ невозможно, так как они предполагают наличие диффузного излучения поверхностей образца и эталонов.

Известны способы, реализация которых не предполагает диффузности излучения, одним из них является способ "стороннего излучателя". В этом случае измеряют температуру поверхности образца T_2 , температуру стороннего излучателя T_1 , облучающего образец, и выходной сигнал тепловизора L при термографировании образца

$$\epsilon = L - J(T_2) / (J(T_1) - J(T_2)), \quad (5.5)$$

где $J(T)$ — градуировочная характеристика тепловизора.

Реализация этого способа достаточно сложна, так как требует полной изоляции системы тел из стороннего излучателя и образца от теплового излучения посторонних предметов.

Для определения значений коэффициента излучения и исследования зависимости $\epsilon(\varphi)$ наиболее приемлем способ "радиометра", который, как и способ "стороннего излучателя", не предполагает диффузности излучения и он не требует полной изоляции системы тел вместе с образцом. Единственным условием применения этого способа является равенство интенсивности теплового излучения посторонних предметов в пределах поверхности образца. Рассмотрим метод определения коэффициента излучения исследуемых поверхностей строительных конструкций, основанный на тепловизионных измерениях.

Представим излучающую поверхность тела, как совокупность множества элементарных площадок, излучение каждой из которых E складывается из собственного излучения $E_{соб}$ и отраженного излучения окружающих поверхность сторонних источников $E_{отр}$:

$$E = E_{соб} + E_{отр}$$

Тепловизор регистрирует величину L , пропорциональную плотности излучения поверхности E ,

$$L = K (E_{соб} + E_{отр}), \quad (5.6)$$

где K — коэффициент преобразования, используемого тепловизора.

Для выделения части сигнала, пропорциональной величине $E_{соб}$, рассмотрим две элементарные площадки, температуры которых различны и соответственно равны T_1 и T_2 , а их коэффициенты излучения одинаковы и равны $\epsilon_1 = \epsilon_2 = \epsilon$ (рис. 5.2).

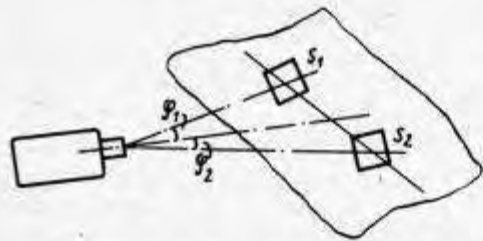


Рис.5.2. Геометрические характеристики процесса измерения излучательной способности

Плотность излучаемой ими энергии в направлении нормали к площадке в общем случае составляет

$$E_1 = E_{\text{соб}1} + E_{\text{отр}1} = \epsilon E_{L1} + E_{\text{отр}1}, \quad (5.7)$$

$$E_2 = E_{\text{соб}2} + E_{\text{отр}2} = \epsilon E_{L2} + E_{\text{отр}2}, \quad (5.8)$$

где E_{L1} и E_{L2} — плотности излучения абсолютно черного тела при T_1 и T_2 .

Если для обеих площадок условия радиационного теплообмена идентичны, и если они расположены в одной плоскости и расстояние между ними меньше расстояния до ближайшего источника теплового излучения, то

$$E_{\text{отр}1} = E_{\text{отр}2}. \quad (5.9)$$

При этом разность плотности излучения этих площадок можно представить как:

$$\Delta E = E_1 - E_2 = \epsilon (E_{L1} - E_{L2}), \quad (5.10)$$

или как

$$K \Delta E = D(l_1 - l_2) = L_1 - L_2, \quad (5.11)$$

где D — используемый диапазон тепловизора; l_1, l_2 — изотермический уровень по шкале тепловизора, пропорциональный температурам 1-й и 2-й площадок; L_1, L_2 — абсолютный изотермический уровень, пропорциональный температурам 1-й и 2-й площадок.

Для нахождения изотермических уровней, соответствующих излучению абсолютно черного тела при T_1 и T_2 , воспользуемся градуировочной кривой тепловизора $J(T)$, которая устанавливает соответствие между температурой абсолютно черного тела и той частью его излучения, которая воспринимается тепловизором

$$KE = J(T_{\text{АЧТ}}). \quad (5.12)$$

Разность плотностей излучения двух абсолютно черных тел, имеющих температуры выбранных площадок, составляет:

$$K \Delta E_L = J(T_1) - J(T_2). \quad (5.13)$$

Преобразуем отношение выражений (5.10) и (5.11), используя (5.13):

$$\begin{aligned} K \Delta E / K \Delta E_L &= (L_1 - L_2) / [J(T_1) - J(T_2)] = \\ &= K \epsilon (E_{L1} - E_{L2}) / (K(E_{L1} - E_{L2})) = \epsilon, \end{aligned} \quad (5.14)$$

получим

$$\epsilon = \frac{D(l_1 - l_2)}{J(T_1) - J(T_2)}. \quad (5.15)$$

Таким образом, для расчета коэффициента излучения необходимо: измерить температуры площадок T_1 и T_2 , определить с помощью тепловизора изотермические уровни площадок l_1 и l_2 ; по градуировочной кривой найти $J(T_1)$ и $J(T_2)$. Если при определении истинной температуры не учитывается излучательная способность поверхности ϵ , возникает погрешность. Оценим зависимость этой погрешности от величины ϵ .

Введем функцию $J [I(T_0) + \frac{\Delta L}{\epsilon}]$, обратную функции $J(T)$, тогда

$$T_n = J [I(T_0) + \frac{\Delta L}{\epsilon}], \quad (5.16)$$

$$T_L = J [I(T_0) + \Delta L], \quad (5.17)$$

$$\begin{aligned} (T_n - T_L) / (T_n - T_0) &= (J [I(T_0) + \Delta L / \epsilon] - J [I(T_0) + \Delta L]) / \\ &= (J [I(T_0) + \Delta L / \epsilon] - T_0 - J [I(T_0) + \Delta L] + T_0) / \\ &= (T_0 + J [I(T_0) + \Delta L / \epsilon] - T_0) / (T_0 + J [I(T_0) + \Delta L] - T_0) = 1 - \epsilon, \end{aligned} \quad (5.18)$$

где $J [I(T_0)]$ — уровень сигнала от реперной точки, определенный по градуировочной кривой; ΔL — разность изотермических уровней, пропорциональная разности температур реперной и исследуемой точек; T_0 — температура реперной точки, определенная контактным методом; T_n — температура, определенная по градуировочной кривой с учетом излучательной способности; T_L — температура, определенная по градуировочной кривой без учета излучательной способности; $(T_n - T_L) / (T_n - T_0) = (\delta T / \Delta T)_\epsilon$ — относительная погрешность определения температуры, возникающая вследствие неучета ϵ ,

$$\Delta T = T_n - T_0.$$

Разложив выражения (5.16) и (5.17) в ряд в малой окрестности точки $J [I(T_0)]$ и учитывая, что $J [I(T_0)] = T_0$, получим (5.18) в виде

$$\begin{aligned} (\delta T / \Delta T)_\epsilon &= (T_0 + J [I(T_0) + \Delta L / \epsilon] - T_0 - J [I(T_0) + \Delta L] + T_0) / \\ &= (T_0 + J [I(T_0) + \Delta L / \epsilon] - T_0) / (T_0 + J [I(T_0) + \Delta L] - T_0) = 1 - \epsilon. \end{aligned} \quad (5.19)$$

Или окончательно величина погрешности определения температуры вследствие неучета ϵ составит

$$(\delta T/\Delta T)_\epsilon = 1 - \epsilon. \quad (5.20)$$

Из формулы (5.15) следует, что погрешность величины ϵ определяется погрешностями определения величин T_1 , T_2 и соответствующих им l_1 и l_2 , которые в свою очередь зависят от углов визирования φ_1 и φ_2 тепловизором выбранных участков. Исходя из этого запишем выражение для оценки погрешности измерения ϵ :

$$\delta \epsilon/\epsilon = 2\epsilon'_T \delta T/\epsilon + 2\epsilon'_l \delta l/\epsilon + 2\epsilon'_\varphi \delta \varphi/\epsilon. \quad (5.21)$$

Множитель 2 в правой части (5.21) показывает, что измерения проводятся на двух площадках. Рассмотрим каждую из составляющих погрешности и проанализируем возможность уменьшения их.

Из формулы (5.15) получим выражение для оценки погрешности, возникающей при наиболее выгодной геометрии измерений, т.е. при перпендикулярности оптической оси объектива к поверхности. Эта ошибка имеет место из-за погрешности определения T и l и соответствует сумме 1-го и 2-го членов правой части (5.21):

$$(\delta \epsilon/\epsilon)_1 = 2\delta l / [D(l_1 - l_2)] + 2\delta T / (T_1 - T_2), \quad (5.22)$$

где δl — ошибка определения изотермического сигнала по шкале тепловизора, $\delta \epsilon = 0,03$; δT — ошибка в определении температур площадок термощупами, $\Delta T = 0,2$; ΔT — разница между температурами двух площадок.

Из формулы (5.22) видно, что для уменьшения ошибки определения ϵ необходимо повысить точность измерения температуры площадок и выбирать площадки с максимально возможной разностью температур. Оценим возможную величину этой погрешности, имеющей место в практике тепловизионных обследований строительных конструкций. Пусть $D = 5$; $l_1 - l_2 = 0,8$, $\Delta T = 5^\circ\text{C}$. Эти данные получены для тепловизора АГА-750 при обследовании экструзионных панелей в климатической камере. В этом случае величина погрешности будет равна

$$\left(\frac{\delta \epsilon}{\epsilon}\right)_1 = \frac{2 \cdot 0,03}{5 \cdot 0,8} + \frac{2 \cdot 0,2}{5} = 9,5\%. \quad (5.23)$$

Найдем далее величину погрешности определения коэффициента излучения ϵ , возникающей вследствие отклонения углов визирования φ объектива тепловизора от перпендикуляра к плоскости рассматриваемых площадок. Примем, что разность углов визирования φ много меньше каждого из углов φ_1 и φ_2 :

$$\varphi_1 - \varphi_2 \ll \varphi_1. \quad (5.24)$$

Согласно закону Ламберта, $L_\varphi = L_0/\cos \varphi$,

где L_0 — регистрируемый тепловизором сигнал при $\varphi = 0$, а L_φ — при $\varphi \neq 0$.

Тогда

$$(\delta \epsilon/\epsilon)_\varphi = \frac{L_{1\varphi}/\cos \varphi_1 - L_{2\varphi}/\cos \varphi_2 - (L_{1\varphi} - L_{2\varphi})}{(L_{1\varphi}/\cos \varphi_1 - L_{1\varphi}/\cos \varphi_2)} \quad (5.25)$$

или

$$(\delta \epsilon/\epsilon)_\varphi = \frac{[1 - (L_{1\varphi} - L_{2\varphi})](\cos \varphi_1 \cos \varphi_2)}{(L_{1\varphi}' \cos \varphi_2 - L_{1\varphi} \cos \varphi_1)}. \quad (5.26)$$

Обозначим $\theta = (\varphi_1 + \varphi_2)/2$; $\Delta = (\varphi_1 - \varphi_2)/2$ и, считая, согласно (5.24), что $\Delta \ll \theta$, разложим $\cos \varphi_1$ и $\cos \varphi_2$ в ряд в малой окрестности θ :

$$\cos \varphi_1 = \cos(\theta + \Delta) = \cos \theta - \sin \theta \Delta \approx \cos \theta; \quad (5.27)$$

$$\cos \varphi_2 = \cos(\theta - \Delta) = \cos \theta + \sin \theta \Delta \approx \cos \theta. \quad (5.28)$$

Тогда из (5.25) получим

$$(\delta \epsilon/\epsilon)_\varphi = 1 - \cos \theta. \quad (5.29)$$

Из (5.29) следует, что величина $(\delta \epsilon/\epsilon)_\varphi$ тем меньше, чем углы визирования ближе к нулю. Следовательно, для увеличения точности определения ϵ оптическую ось объектива нужно направлять перпендикулярно исследуемой поверхности.

Формула (5.16) представляет собой аналитическую запись графического метода определения температуры по градуировочной кривой тепловизора при учете ϵ , причем верна, если при измерении температуры ось объектива перпендикулярна поверхности. Разложим (5.16) в ряд в окрестности $I(T_0)$ и найдем дифференциал δT :

$$\delta T \approx \delta T_0 + J'_{I(T_0)} \frac{\Delta L}{\epsilon^2} \delta \epsilon + J'_{I(T_0)} \frac{1}{\epsilon} \delta(\Delta T). \quad (5.30)$$

Заменив производную в точке ΔT ее средним значением в интервале

$$J'_{I(T_0)} = \Delta T \epsilon / \Delta L, \quad (5.31)$$

получим (5.29) в виде

$$\delta T/\Delta T = \delta \Delta L/\Delta L + \delta T_0/\Delta T + \delta \epsilon/\epsilon. \quad (5.32)$$

Первые два члена в правой части (5.31) аналогичны правой части выражения (5.22). Оценив так же, как и в выражении (5.22), сумму этих двух членов, получим величину их вклада в ошибку, она составляет $\approx 5\%$. Итак,

$$\delta(\Delta L)/\Delta L + \delta T_0/\Delta T \approx 5\%. \quad (5.33)$$

5.2. АНАЛИЗ ВНЕШНИХ ФАКТОРОВ, ОКАЗЫВАЮЩИХ ВЛИЯНИЕ НА РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕРМОГРАФИРОВАНИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

При термографировании температурных полей на поверхности строительных конструкций необходимо определить соответствие между действительными значениями температур и величиной регистрируемого электрического сигнала. При различных условиях их соотношение может быть определено с некоторой погрешностью. Возникает вопрос, при каких реальных условиях погрешность, с которой регистрируется температурное поле поверхности ограждающей конструкции, находится в допустимых пределах. Методические погрешности регистрации температурного поля могут быть вызваны изменением состава регистрируемого инфракрасного излучения и отклонением температурного поля на поверхности от температурного поля, определяемого установившимся режимом теплопереноса.

В первом случае при термографировании оптическая ось оптической системы тепловизора нередко оказывается не ортогональной к обследуемой поверхности. Плотность энергии излучения поверхности прямо пропорциональна косинусу угла между нормалью к поверхности и направлением оптической оси:

$$W = \frac{\epsilon}{\pi} C_0 \left(\frac{T}{100}\right)^4 \cos \varphi \quad (5.35)$$

В силу этого закона, известного как закон Ламберта, из двух поверхностей с одинаковой температурой меньшую радиационную температуру будет иметь та, у которой угол φ больше, поэтому, если репер снимался на поверхности с ориентацией φ_p , а измерения проводились на поверхности с ориентацией φ_0 , абсолютный изотермический уровень I_0 необходимо пересчитывать по формуле, выведенной на основе расчетных формул для тепловизора

$$I_0 = \Delta I + I_p \epsilon_p \cos \varphi_p / \epsilon_0 \cos \varphi_0,$$

где ΔI — разность изотермических уровней; I_p — абсолютный изотермический уровень излучения поверхности репера; ϵ_p — излучательная способность поверхности, с которой снимается репер; φ_p — ориентация поверхности репера; ϵ_0 — излучательная способность объекта; φ_0 — ориентация объекта.

На измеряемое излучение поверхности исследуемого объекта в значительной степени оказывает тепловое воздействие посторонних источников тепла. При этом учесть влияние излучения посторонних тепловых источников крайне трудно. В ряде случаев этот фактор удается исключить: например, если солнечная радиация, проникая через окно, облучает исследуемую поверхность, то достаточно закрыть окно непрозрачным экраном. Если же солнце освещает поверхность объекта, пусть даже кратковременно, например, периодически скрываясь за облаками, то термографирование проводить нецелесообразно.

Во втором случае при наличии конденсата на поверхности ограж-

дения в виде влаги или инея меняется теплопроводность поверхностного слоя ограждения. Температурное поле становится более изотермичным. Кроме того, ввиду испарения с поверхности температура ее может колебаться в значительных пределах, а также может меняться и коэффициент черноты. Перечисленные факторы учесть крайне сложно в реальных условиях. Следовательно, при наличии конденсата в виде инея или влаги на поверхности объекта проводить термографирование нецелесообразно. Другой причиной возникновения погрешностей является флуктуация скорости ветра. Изменение скорости ветра приводит к изменению условий теплообмена между наружным воздухом и поверхностью объекта.

Как правило, оценка качества теплоизоляции объекта проводится на основе гипотезы о стационарности режима теплопереноса. Изменение скорости ветра приводит к отклонению процесса теплопереноса от стационарного. В каких же пределах допустимо изменение скорости ветра, при которой температура поверхности меняется не более, чем на $0,5^\circ\text{C}$. Оценка степени влияния порывов ветра на достоверность термограмм проводится на математической модели. Будем считать, что температурное поле ограждающей конструкции одномерно. Сформулируем математическую задачу. Ограждающая конструкция схематично представлена на рис. 5.3. Запишем условия построения модели.

Уравнение теплопереноса:

$$x \in [\delta_{i-1}, \delta_i] / C_i \rho_i \frac{\partial U_i}{\partial t} = \lambda_i \frac{\partial^2 U_i}{\partial x^2}.$$

Условие контакта:

$$x = \delta_i; \lambda_{i-1} (\partial U_{i-1} / \partial x) = \lambda_i (\partial U_i / \partial x).$$

Начальные условия:

$$t = 0; U(x, 0) = V(x).$$

Граничные условия:

$$x = 0; \lambda_1 (\partial U_1 / \partial x) = a_1 (\theta_1 - u);$$

$$x = H; \lambda_3 (\partial U_3 / \partial x) = a_2 (\theta_2 - u),$$

где i — номер слоя (1, 2, 3); $U_i(x, y)$ — температурное поле в i -ом слое ограждения; C_i — теплоемкость; ρ_i — объемный вес; λ_i — теплопроводность; a_1, a_2 — коэффициенты теплообмена на внутренней и внешней поверхностях соответственно; θ_1, θ_2 — температура воздуха у внутренней и наружной поверхностей ограждения; $V(x)$ — температурное поле ограждения, соответствующее стационарному режиму.

С целью моделирования порыва ветра рассмотрим следующую функцию. График этой функции представлен на рис. 5.4.

$$V(t) = \frac{V}{\pi} [\arctg \delta / (t - \epsilon) - \arctg \delta / (t - \tau - \epsilon)] + V_0, \quad (5.36)$$

где V — величина, на которую возрастает скорость воздуха во время порыва ветра, м/с; $\pi = 3,14$; V_0 — стационарная скорость ветра, м/с; τ — длительность

5.2. АНАЛИЗ ВНЕШНИХ ФАКТОРОВ, ОКАЗЫВАЮЩИХ ВЛИЯНИЕ НА РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕРМОГРАФИРОВАНИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

При термографировании температурных полей на поверхности строительных конструкций необходимо определить соответствие между действительными значениями температур и величиной регистрируемого электрического сигнала. При различных условиях их соотношение может быть определено с некоторой погрешностью. Возникает вопрос, при каких реальных условиях погрешность, с которой регистрируется температурное поле поверхности ограждающей конструкции, находится в допустимых пределах. Методические погрешности регистрации температурного поля могут быть вызваны изменением состава регистрируемого инфракрасного излучения и отклонением температурного поля на поверхности от температурного поля, определяемого установившимся режимом теплопереноса.

В первом случае при термографировании оптическая ось оптической системы тепловизора нередко оказывается не ортогональной к обследуемой поверхности. Плотность энергии излучения поверхности прямо пропорциональна косинусу угла между нормалью к поверхности и направлением оптической оси:

$$W = \frac{\epsilon}{\pi} C_0 \left(\frac{T}{100}\right)^4 \cos \varphi \quad (5.35)$$

В силу этого закона, известного как закон Ламберта, из двух поверхностей с одинаковой температурой меньшую радиационную температуру будет иметь та, у которой угол φ больше, поэтому, если репер снимался на поверхности с ориентацией φ_p , а измерения проводились на поверхности с ориентацией φ_0 , абсолютный изотермический уровень I_0 необходимо пересчитывать по формуле, выведенной на основе расчетных формул для тепловизора

$$I_0 = \Delta I + I_p \epsilon_p \cos \varphi_p / \epsilon_0 \cos \varphi_0,$$

где ΔI — разность изотермических уровней; I_p — абсолютный изотермический уровень излучения поверхности репера; ϵ_p — излучательная способность поверхности, с которой снимается репер; φ_p — ориентация поверхности репера; ϵ_0 — излучательная способность объекта; φ_0 — ориентация объекта.

На измеряемое излучение поверхности исследуемого объекта в значительной степени оказывает тепловое воздействие посторонних источников тепла. При этом учесть влияние излучения посторонних тепловых источников крайне трудно. В ряде случаев этот фактор удается исключить: например, если солнечная радиация, проникая через окно, облучает исследуемую поверхность, то достаточно закрыть окно непрозрачным экраном. Если же солнце освещает поверхность объекта, пусть даже кратковременно, например, периодически скрываясь за облаками, то термографирование проводить нецелесообразно.

Во втором случае при наличии конденсата на поверхности ограж-

дения в виде влаги или инея меняется теплопроводность поверхностного слоя ограждения. Температурное поле становится более изотермичным. Кроме того, ввиду испарения с поверхности температура ее может колебаться в значительных пределах, а также может меняться и коэффициент черноты. Перечисленные факторы учесть крайне сложно в реальных условиях. Следовательно, при наличии конденсата в виде инея или влаги на поверхности объекта проводить термографирование нецелесообразно. Другой причиной возникновения погрешностей является флуктуация скорости ветра. Изменение скорости ветра приводит к изменению условий теплообмена между наружным воздухом и поверхностью объекта.

Как правило, оценка качества теплоизоляции объекта проводится на основе гипотезы о стационарности режима теплопереноса. Изменение скорости ветра приводит к отклонению процесса теплопереноса от стационарного. В каких же пределах допустимо изменение скорости ветра, при которой температура поверхности меняется не более, чем на $0,5^\circ\text{C}$. Оценка степени влияния порывов ветра на достоверность термограмм проводится на математической модели. Будем считать, что температурное поле ограждающей конструкции одномерно. Сформулируем математическую задачу. Ограждающая конструкция схематично представлена на рис. 5.3. Запишем условия построения модели.

Уравнение теплопереноса:

$$x \in [\delta_{i-1}, \delta_i] / C_i \rho_i \frac{\partial U_i}{\partial t} = \lambda_i \frac{\partial^2 U_i}{\partial x^2}.$$

Условие контакта:

$$x = \delta_i; \lambda_{i-1} (\partial U_{i-1} / \partial x) = \lambda_i (\partial U_i / \partial x).$$

Начальные условия:

$$t = 0; U(x, 0) = V(x).$$

Граничные условия:

$$x = 0; \lambda_1 (\partial U_1 / \partial x) = a_1 (\theta_1 - u);$$

$$x = H; \lambda_3 (\partial U_3 / \partial x) = a_2 (\theta_2 - u).$$

где i — номер слоя (1, 2, 3); $U_i(x, y)$ — температурное поле в i -ом слое ограждения; C_i — теплоемкость; ρ_i — объемный вес; λ_i — теплопроводность; a_1, a_2 — коэффициенты теплообмена на внутренней и внешней поверхностях соответственно; θ_1, θ_2 — температура воздуха у внутренней и наружной поверхностей ограждения; $V(x)$ — температурное поле ограждения, соответствующее стационарному режиму.

С целью моделирования порыва ветра рассмотрим следующую функцию. График этой функции представлен на рис. 5.4.

$$V(t) = \frac{V}{\pi} [\arctg \delta / (t - \epsilon) - \arctg \delta / (t - \tau - \epsilon)] + V_0, \quad (5.36)$$

где V — величина, на которую возрастает скорость воздуха во время порыва ветра, м/с; $\pi = 3,14$; V_0 — стационарная скорость ветра, м/с; τ — длительность

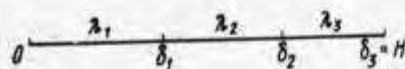


Рис.5.3. Схематическое представление модели ограждающей конструкции λ_i ($i = 1, 2, 3$) — теплопроводность слоев; δ_i — координаты правых границ слоев; H — толщина ограждения

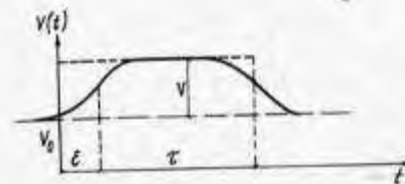


Рис.5.4. График функции, используемой для моделирования порывов ветра

порыва ветра, ϵ ; δ — параметр, изменение которого позволяет изменить скорость нарастания и спада порыва ветра; t — время, с.

Связь между $V(t)$ и a_2 примем в виде:

$$Nu = 0,032 Re^{0,8},$$

где Nu — критерий Нуссельта; Re — критерий Рейнольдса. Далее определяем:

$$a_l / \lambda = 0,032 (Vl/\nu)^{0,8},$$

где l — характерный размер объекта, м (для девятиэтажного здания $l = 30$ м); λ — теплопроводность воздуха ($\lambda = 2,28 \cdot 10^{-2}$ Вт/м); ν — кинематическая вязкость воздуха ($\nu = 11,61 \cdot 10^{-6}$ м²/с).

Подставляя указанные значения, получим

$$a(t) = CV(t)^{0,7},$$

где $C = 7 \cdot 10^{-5}$ ($8,6 \cdot 10^5$)^{0,8}.

Итак, математическая задача поставлена.

Метод решения задачи. Для решения поставленной задачи применим метод Бубнова-Галеркина. Заменяем производную $\partial U / \partial t$ на ее конечно-разностный аналог:

$$\frac{\partial U}{\partial t} \approx \frac{U_{n+1} - U_n}{\Delta t}.$$

Применим неявную схему с весами:

$$C_i \rho_i \frac{U_{n+1} - U_n}{\Delta t} = \lambda \frac{\partial^2}{\partial x^2} [\sigma U_{n+1} + (1-\sigma) U_n],$$

где σ — вес разностной схемы.

Умножим обе части уравнения на произвольную кусочно-гладкую функцию $V(x)$, непрерывную при переходе через точки δ_i и проинтегрируем от 0 до H .

$$\sum_{i=1}^3 c_i \rho_i \int_{\delta_{i-1}}^{\delta_i} \frac{U_{n+1} - U_n}{\Delta t} V dx = \sum_{i=1}^3 \lambda_i \int_{\delta_{i-1}}^{\delta_i} \frac{\partial^2}{\partial x^2} \times$$

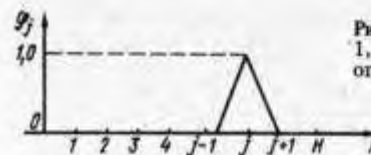


Рис.5.5. График базисной функции $\varphi_\gamma(x)$ 1, 2, 3, ..., J, ... — номер слоя; H — толщина ограждения

$$\times [U_{n+1} \sigma + (1-\sigma) U_n] V dx. \quad (5.37)$$

Интегрируя правую часть уравнения по частям, учитывая условия идеального контакта и граничные условия, получим новое уравнение, решение которого будем определять по методу Бубнова-Галеркина:

$$U_n(x) = \sum_{k=1}^K C_k^n \varphi_k(x). \quad (5.38)$$

Базисные функции $\varphi_k(x)$ выберем согласно методу конечных элементов (рис.5.5). Разобьем отрезок $(0, H)$ на K частей. Функция $\varphi_\gamma(x)$ является кусочно-линейной функцией, удовлетворяющей условиям:

$$\varphi_\gamma(x) = \begin{cases} 1 & k=\gamma \\ 0 & k \neq \gamma \end{cases}.$$

Теперь очевиден физический смысл искомых коэффициентов C_k^n . Это значение функции $U(x, t)$ в момент времени $n \Delta t$ в точке x_k . В результате подстановки $U_n(x) = \sum_{k=1}^K C_k^n \varphi_k(x)$ и $V(x) = \varphi_\gamma(x)$ ($\gamma = 1, \dots, K$) в уравнение (5.37) получим систему алгебраических уравнений $A \bar{x} = B$. Компонентными \bar{x} являются искомые коэффициенты C_x^n . Матрицы системы A и правая часть B определяются по формулам

$$A_{jk} = \sum_{i=1}^3 \int_{\delta_{i-1}}^{\delta_i} F c_i \rho_i \varphi_k \varphi_j + \Delta t \lambda_i \sigma \varphi_k' \varphi_j' dx + \Delta t \sigma a_1 \varphi_k \varphi_j /_{x=0} + \Delta t \sigma a_2 \varphi_k \varphi_j /_{x=H};$$

$$B_j = \tau a_1 \theta_1 \varphi_j /_{x=0} + \tau a_2 \theta_2 \varphi_j /_{x=H} + \sum_{k=1}^{n-1} C_k^{n-1} B_{jk}, \quad (5.39)$$

$$\text{где } B_{jk} = \sum_{i=1}^3 \int_{\delta_{i-1}}^{\delta_i} [C_i \rho_i \varphi_k \varphi_j - \Delta t \lambda_i (1-\sigma) \varphi_k' \varphi_j'] dx -$$

$$- \Delta t (1-\sigma) a_1 \varphi_k \varphi_j /_{x=0} - \Delta t (1-\sigma) a_2 \varphi_k \varphi_j /_{x=H}.$$

Следует отметить, что матрица системы является симметричной с одной побочной диагональю. Исходной информацией для программы

являются толщина, теплопроводность, объемный вес, удельная теплоемкость каждого слоя конструкции, температура воздуха, коэффициенты теплообмена, максимальная скорость ветра и длительность ее воздействия.

5.3. ОБСЛЕДОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ КРЫШ ЗДАНИЙ

Первостепенная функция кровельной конструкции — создавать тепловую защиту и влагонепроницаемость. Давно установлено, что влага, попадающая внутрь ограждения зданий, не только наносит большой ущерб и нарушает функциональность самого здания, но также неблагоприятно влияет на долговечность кровельной системы, так как влага нарушает целостность термоизоляции и повреждает кровельный ковер, поэтому необходимы надежные методы диагностики состояния кровли и обнаружения мест скопления и проникания влаги в конструкциях.

В настоящее время используются визуальные методы контроля, а также радиоизотопный и электроконденсаторный. Эти методы хотя и относятся к неразрушающим, однако работают в основном по контактному принципу, что значительно ограничивает область их применения.

Термография позволяет определить и наглядно представить места скопления влаги в кровельных слоях и обещает сыграть важную роль в развитии неразрушающих методов обследования кровельных систем. Использование инфракрасной камеры позволяет увеличить возможность определения и точного фиксирования местоположения увлажненного участка. Термографические съемки помогают обследовать каждый участок кровельного ковра, давая детальную информацию о состоянии кровли. При обследовании кровель используются портативные переносные инфракрасные камеры. Диагностика основана на различии теплофизических характеристик увлажненных и неувлажненных участков кровли. Термограммы в сочетании с обычными фотографиями, сделанными одновременно с термограммой, позволяют точно установить местоположение поврежденной зоны.

Обследование крыш зданий может проводиться с более высокой точки, например с крыши соседнего высокого здания, или с вертолета. Если площадь кровли невелика, то обследование проводится оператором путем последовательной съемки всей поверхности, фрагмент за фрагментом. Выбор метода зависит от конструкции кровли, климатических условий, размеров кровли, проблемы исследования и необходимой информации.

Поврежденные влагой участки кровли на термограммах проявляются в виде темных или белых контрастных пятен, цвет которых зависит от условий съемки, состояния теплофизических характеристик и дефектного и недефектного участков. Хотя поврежденные влагой места обычно изображаются на экране термографической камеры, как правило, яркими пятнами, но не все подобные яркие пятна могут быть отнесены к участкам застоя влаги. Отводы вмонти-

рованных в крышу вентиляторов и нагреватели, расположенные под кровлей, небольшие изменения в конструкции, такие как замена материалов, частичный ремонт и обновление кровли очень часто на термограмме напоминают скопление влаги. Необходимо постоянно иметь в виду, что термографическая аппаратура определяет изменения температуры поверхности и фиксирует только наличие влаги и ее влияние на температуру поверхности кровельного ковра. Надо признать, что все элементы ограждений, включая потолки и воздушные проемы, влияют на термические характеристики всей кровельной конструкции. Попадание влаги в изоляционный слой уменьшает эффективность изоляции.

Место скопления влаги в зимние месяцы изображается на термограмме в виде термических мостиков или теплых зон на поверхности кровли.

В летние месяцы, в хорошую погоду, днем, кровля играет роль большого термического коллектора и может нагреваться до температуры 160°C. Любая изоляция с накопленной влагой поглощает радиацию и играет роль тепловой раковины. Она регенерирует нагрев кровли, образуя тепловые зоны, когда воздействие солнечной энергии прекращается.

Температурный контраст в зонах скопления влаги может достигать от 2° до 4°C. При этом следует всегда принимать во внимание возможное изменение коэффициента излучения поверхности за счет ее увлажнения, а также отражение поверхностью излучения солнца. Часто термографические обследования приходится проводить в ночное время, когда отдача тепла кровлей в атмосферу приводит к остыванию кровли, температура кровли может понизиться на 10°C ниже температуры воздуха. Количество энергии, накопленной кровлей, зависит прямо пропорционально от массивности конструкции и объема влаги, попавшей в кровельную систему. Есть целый ряд других факторов, влияющих на охлаждение и нагрев кровли. Некоторые из них экзогенные, зависящие от условий окружающей среды, другие — эндогенные, зависящие от характеристик конструкции. К примеру, величина солнечной адсорбции меняется в зависимости от цвета кровельной поверхности. Черный цвет имеет коэффициент солнечной адсорбции 95%, светлые цвета — 65%, белый — 45%.

Температурные колебания также зависят от кровельной конструкции. К примеру, температурные изменения на наружной поверхности кровли от максимума до минимума могут быть более 50°C, при этом внутренняя температура кровли может колебаться всего на 2°C. При диагностике бывает очень важно установить, проникает ли скопляющаяся влага в конструкцию снаружи или изнутри. Для этого необходимо знать особенности возведения и эксплуатации кровли.

При строительстве в зимнее время на основание кровли попадает снег. При отделочных операциях для высушивания цемента и пластиков используются газовые нагреватели, которые способствуют испарению влаги. Кровельная изоляция, поглощая ее, конденсатом выделяется на кровельном ковре. Когда имеются условия для конденса-

ции паров влаги, в теплой части кровли наносят слой пароизоляции. Если пароизоляция монтируется при температуре выше точки росы, конденсация может быть полностью предупреждена. Если водяные пары проникают в кровлю при плохо устроенной пароизоляции или при ее отсутствии, они попадают на холодную часть кровли, конденсируются и абсорбируются изоляцией или другими материалами. Пароизоляция может также задерживать влагу и способствовать ее распространению в случае протекания кровли.

Каждый тип изоляции реагирует на влагу по-разному и различно влияет на характеристики системы в целом. К примеру, содержание влаги в фибролите может увеличиться до 20% и, хотя термические величины изоляции уменьшатся, это не отразится отрицательно на характеристиках кровельной системы. С другой стороны, даже минимальное количество влаги, попавшее в кровельную систему с полистиролом, может вызвать частичное или полное разрушение кровли. Хотя кровля имеет тенденцию аккумулировать влагу в зимнее время, летом происходит обратный процесс, когда изоляция высыхает. Если потеря влаги равна ее накоплению, то увеличение влаги в течение нескольких лет не ожидается. В таких ситуациях состояние кровли во многом зависит от абсорбционной способности кровельной системы и ее основных элементов.

В случае гидроскопичных материалов наличие в них влаги мало влияет на теплопроводность до тех пор, пока капилляры не заполнятся полностью влагой. Термическое изменение, вызванное этим фактом, может быть запечатлено термосканированием, однако, результаты трудно назвать правильными, так как даже минимальное количество воды при одних и тех же обстоятельствах представляет собой состояние полной насыщенности. Это состояние усугубляется и тем, что влага перемещается к холодной стороне кровли, замерзает в холодное время и, следовательно, проводит большое количество энергии.

Отсюда следует, что для эффективной интерпретации результатов термографии очень важно знать материал конструкции и условия работы кровли, а также предусмотреть те моменты, когда протечки могут быть в скрытых местах. Например, в кровельных проемах, стыках изоляции или в местах, где изоляция перекрывается пароизоляционным слоем, как правило, не отражаются на термограмме. Количество влаги, форма ее размещения в конструкции кровли, водоабсорбционные характеристики изоляции, масса конструкции, факторы окружающей среды — все это играет важную роль для правильного получения и интерпретации результатов сканирования.

Изучать термограммы необходимо с большей осторожностью, учитывая все возможные факторы (скорость ветра, воздействие радиации, колебания температуры воздуха и др.).

5.4. ОБЛУЧЕННОСТЬ ВНУТРЕННИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ОГРАЖДЕНИЙ

При расчете лучистого теплообмена в помещениях со сложной системой неизотермических поверхностей наибольшие трудности связаны с определением коэффициентов облученности. Примером указанных помещений могут быть сочетания поверхностей ограждающих конструкций и технологического оборудования ряда промышленных зданий, а также помещения для содержания сельскохозяйственных животных. Определение коэффициентов облученности поверхностей таких систем аналитическим методом отличается значительными трудностями, а порой и невозможностью получения решения. Методы графо-аналитической, поточной алгебры, светового моделирования и др. требуют введения упрощенной модели процесса и потому дают решения с различной, часто не приемлемой степенью приближения.

Предлагаемый метод основан на возможности дифференциального измерения интенсивности инфракрасного излучения методом термографии и определении фактического распределения энергии, излучаемой источником, между другими характерными поверхностями пространственной системы.

Суммарное излучение источника распределяется между поверхностями ограждающих конструкций пропорционально величинам соответствующих коэффициентов облученности этих поверхностей. Коэффициенты облученности поверхностей $\varphi_{\text{пов}}$ могут быть определены как отношение величин падающего на отдельные излучаемые поверхности излучения от источника $E_{\text{пад}}$ к суммарному излучению источника $E_{\text{сум}}$:

$$\varphi_{\text{пов}} = E_{\text{пад}}/E_{\text{сум}} \quad (5.40)$$

где $E_{\text{сум}}$ — общее излучение источника на характерные поверхности системы, равное сумме энергий, падающих на отдельные характерные поверхности; $E_{\text{пад}}$ — энергия падающего излучения при определении коэффициентов облученности на отдельные характерные поверхности системы, определяемая по формуле

$$E_{\text{пад}} = eF, \quad (5.41)$$

где e — плотности падающего излучения на отдельные поверхности; F — площади отдельных поверхностей облучения.

Вследствие сложного расположения поверхностей излучения в пространстве и неизотермичности этих поверхностей энергию излучения их в заданных направлениях, так же как и общую, определить затруднительно. При решении поставленной задачи излучение реальных поверхностей можно заменить излучением проекцией этих поверхностей на сферу единичного радиуса с центром на поверхности облучения и с радиационной температурой реальных поверхностей. Энергия излучения этих проекций по величине пропорциональна энергии излучения реальных поверхностей. Эта расчетная энергия излучается определенной площадью на полусфере*.

* Рассматривается сферическая поверхность единичного радиуса.

Чтобы перейти от излучаемой расчетной энергии сферической поверхности к плотности энергии, падающей на излучаемую поверхность, предварительно определяют эквивалентную температуру полусферы $T_{\text{экв}}$ из условия равенства расчетной энергии проекции поверхности излучения $E_{\text{пр}}$ и энергии, излучаемой полусферой $E_{\text{сф}}$,

$$E_{\text{пр}} = E_{\text{сф}}, \quad (5.42)$$

где

$$E_{\text{пр}} = C_0 \left(\frac{\tau_{\text{р}}^{\text{ср}} + 273}{100} \right)^4 F_{\text{пр}};$$

$$E_{\text{сф}} = C_0 \left(\frac{\tau_{\text{экв}}}{100} \right)^4 F_{\text{сф}},$$

получаем

$$T_{\text{экв}} = (\tau_{\text{р}}^{\text{ср}} + 273) \sqrt[4]{F_{\text{пр}}/F_{\text{сф}}}, \quad (5.43)$$

где $F_{\text{пр}}$ — площадь проекции поверхности излучения на плоскость, нормальную к радиусу сферы; $F_{\text{сф}}$ — площадь поверхности полусферы; $\tau_{\text{р}}^{\text{ср}}$ — измеренная средневзвешенная радиационная температура излучающих поверхностей в заданном направлении, равная температуре абсолютно черного тела, имеющего такую же плотность излучения, °С.

Плотность энергии, падающей от полусферы на ее основание, лежащее в плоскости изучаемой поверхности облучения, определяется из выражения

$$e = C_0 \left(\frac{\tau_{\text{экв}}}{100} \right)^4 \frac{F_{\text{сф}}}{F_{\text{осн}}} \varphi, \quad (5.44)$$

где $F_{\text{осн}}$ — площадь основания полусферы; φ — коэффициент облученности основания, равный 0,5.

Подставив полученные значения e в направлении каждой изучаемой поверхности в формулу (5.41), определяем энергию падающего излучения на отдельные изучаемые поверхности $E_{\text{пад}}$ и общую энергию излучения $E_{\text{сум}}$. Используя формулу (5.40), определяем коэффициенты облученности φ отдельных поверхностей. Таким образом, цель натурного эксперимента заключается в определении площадей проекций поверхностей излучения $F_{\text{пр}}$ и дифференциальных, а по ним и средневзвешенных радиационных температур $\tau_{\text{р}}^{\text{ср}}$ всех поверхностей, излучающих энергию в заданную точку на исследуемой поверхности.

Дифференциальное измерение радиационных температур в заданном направлении более нагретых или охлажденных поверхностей независимо от других поверхностей (фона) стало возможным с появлением тепловизоров, регистрирующих инфракрасное излучение и позволяющих получать изображение температурного поля поверхностей. Для получения значений радиационных температур проводится термографирование поверхностей излучения в последовательных

изотермах. Определить средневзвешенные радиационные температуры $\tau_{\text{р}}^{\text{ср}}$ можно, зная температуры изотерм и площади поверхностей, ограниченные этими изотермами. Площади проекций поверхностей излучения $F_{\text{пр}}$ определяются по термограммам планиметрированием или другим методом.

По изложенной методике было выполнено исследование коэффициентов облученности в помещениях для крупного рогатого скота с помощью тепловизора шведской фирмы АГА-750. При термографировании поверхностей животных приемно-передающая камера тепловизора устанавливалась в характерных местах: у поверхности пола, покрытия, стен продольных и торцевых. Обработка результатов термографирования позволила получить коэффициенты облученности φ ограждающих конструкций коровников в зависимости от ширины здания (табл. 5.2).

Таблица 5.2. Коэффициенты облученности φ внутренних поверхностей ограждающих конструкций коровников

Ширина помещения, м	Значения φ			
	пола	покрытия	стен	
			продольных	торцевых
41	0,52	0,38	0,06	0,04
24	0,51	0,38	0,07	0,04
21	0,50	0,37	0,09	0,04
18	0,50	0,36	0,10	0,04

Полученные значения коэффициентов облученности характеризуют относительное распределение лучистой энергии между поверхностями ограждающих конструкций и животных с учетом взаимного затенения.

Но так как предлагаемые коэффициенты облученности получены непосредственно в реальных условиях путем фиксации реального процесса теплообмена, то это дает основание рекомендовать их для использования в расчетах лучистого теплообмена. Разработанный и теоретически обоснованный метод позволяет без сложных математических расчетов, затрат на моделирование определять коэффициенты облученности разных по сложности поверхностей, встречающихся в строительстве, технике, пространственных систем излучения в реальных условиях, не упрощая при этом физических процессов лучистого теплообмена.

Глава 6. ДЕФЕКТОСКОПИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

В настоящее время накоплен многолетний опыт эксплуатации жилых и гражданских зданий, смонтированных из элементов заводского изготовления. В целом они характеризуются сравнительно

неплохими теплозащитными свойствами. Вместе с тем наблюдаются случаи некоторого снижения этих свойств. Они вызваны наличием таких локальных теплопроводных дефектов как промерзание стен, продуваемость окон и стыков, различного рода протечки, преждевременное разрушение ряда элементов конструкций от попеременного воздействия влаги и отрицательных температур.

Различные виды дефектов, снижающие теплозащитные качества ограждающих конструкций, вызывают искажение температурного поля на их поверхности. Характер этого искажения зависит от формы, размеров, расположения и теплотехнических характеристик дефектов, нарушающих нормальное распространение тепловой энергии в конструкции. Дефекты ограждающих конструкций могут возникать на разных этапах, т.е. при проектировании, изготовлении, в процессе монтажа и неправильной эксплуатации. Наиболее часто встречаются дефекты в стыках, панелях, оконных блоках и местах их сопряжений.

В многослойных панелях встречаются нарушения толщины и расстановки утеплителя, ведущие к потере их теплозащитных качеств. Эти нарушения являются следствием неправильной или некачественной технологии изготовления панелей, при проведении обследований домов они встречались в сериях К-7, 1-605АМ. На термограммах расстановка утеплителя в панели выделена темным контуром в виде прямоугольника (исследование проводилось с улицы).

Для керамзитобетонных панелей основным дефектом является завышение объемного веса керамзитобетона по сравнению с проектом, он характерен для домов серий П-18, П-57, I-515 и др. В результате некачественной технологии производства и неправильной транспортировки в панелях возникают трещины и раковины, ведущие к потере теплозащитных свойств и значительному понижению температуры на внутренней поверхности панели, которые легко обнаруживаются тепловизором (как участки низких температур при обследовании в помещении). Неправильная эксплуатация влечет за собой резкое повышение влажности, что также является дефектом, распространенным в панелях.

При проведении тепловизионных обследований жилых зданий был сделан вывод, что для домов серий К-7, П-32, П-57, П-49, П-605 АМ, П-18 характерны теплопотери через стыки. Наиболее часто встречающимися дефектами в стыках, снижающими теплозащитные качества, являются дефектная зачеканка швов с наружной стороны, отслоение пленки мастики от бетонной поверхности, недостаточное обжатие гермита и трещины в растворе и мастике. На термограммах внутренней поверхности наружных углов дефектным участкам соответствуют темные участки, т.е. имеющие пониженную температуру по сравнению с гладью стен. Темному контуру соответствует расположение дефектных участков, причем, в зависимости от размеров дефекта меняется размер участков с низкими температурами. Здесь по термограммам видно, что в случае обследования наружного угла значительный дефект находится внизу, так как к низу область понижения температур расширяется, кроме того, самая

низкая температура зафиксирована также внизу угла. Для вертикального стыка наружных однослойных керамзитобетонных панелей по термограмме выявлено, что размер дефекта уменьшается сверху вниз, так как темная область сужается в том же направлении.

Остановимся еще на одном выводе, полученном при исследовании зданий. Он состоит в следующем, что помимо теплопотерь через дефектные участки панелей и стыков, происходят теплопотери через дефекты оконных блоков и мест их сопряжений. К этим дефектам относятся некачественное уплотнение стенок замазкой, сквозные щели в соединениях нижних элементов коробки, прерывистость мастики в устье стыка защелки оконного блока. Все они являются следствием некачественного изготовления и монтажа. На термограммах они выглядят как участки, имеющие темный фон, причем, в данных случаях, температура на поверхностях остекления и дефектных участках сопряжения оконных блоков со стеной может быть одинаковой. Кроме того, для термограмм воздухопроницаемых конструкций характерно неравномерное распространение повышенных температур вдоль дефекта, их линия может прерываться или преломляться.

Результатом проведенной работы явилась подготовка классификации типовых дефектов крупнопанельных зданий. Из анализа термограмм этих дефектов можно сделать вывод, что разные дефекты отличаются местом расположения, размерами и конфигурацией участков повышенных температур.

В первые годы эксплуатации домов случаи промерзания и протечек наружных стен в процентном отношении от общего числа обследованных неблагополучных квартир составляют: промерзание глады стены — 17,5%, промерзание вертикальных и горизонтальных стыков — 82,5%, протечка стыков — 60%, протечка по панели — 4%, протечки через окна — 20%.

Частично дефекты могут быть обнаружены визуально по отсыреению отделочных слоев, появлению иеи, плесени, но могут не проявиться в ходе эксплуатации. Однако их наличие всегда приводит к локальному повышению теплопотерь через отдельные элементы ограждений.

Как показали исследования, вероятность появления дефектов в трехслойных панелях наружных стен полносборных жилых домов следующая: изменение толщины ребер панелей — 10%, адсорбция влаги в утеплителе — 40%, дефекты утеплителя — 20%, трещины в панелях — 20%, оседание утеплителя — 70%, незаделка стыков панелей — 25%, скол края панели — 5%.

Перечисленные дефекты могут проявиться на разных стадиях строительства и эксплуатации зданий, поэтому очень важно организовать своевременное их выявление.

Наибольшие трудности возникают при попытках оценить влияние каждого дефекта на эксплуатационную надежность ограждающих конструкций и величину теплопотерь через них.

Но если своевременно выявить и оперативно устранить ряд дефектов, то часть этой проблемы может быть снята. Еще хуже обстоит

дело с контролем теплозащитных качеств строительных конструкций в заводских условиях. А ведь именно на заводах легче всего устранить ряд дефектов, которые в последующем приведут к значительным потерям тепла. В настоящее время на заводах в основном контролируются геометрические размеры изделий, их внешний вид, качество поступающего сырья, поэтому контроль теплозащитных качеств ограждающих конструкций, как правило, находится вне поля зрения технических служб, из-за отсутствия надежных и удобных методов контроля.

Несмотря на то, что основные положения теории теплопроводности и лучистого теплообмена являются общими для окружающей среды, однако разнообразие теплофизических характеристик и свойств различных материалов и изделий, используемых в технике, особенности их эксплуатации приводят к разнообразию методических решений вопросов диагностики, а следовательно, разработке специфических методов исследований для различных областей техники: авиации, космонавтики, строительства, машиностроения, металлургии и т.д. Поэтому важной проблемой в настоящее время является разработка методик и средств для теплового радиационного контроля, определение области его применения, а также выбора критериев оценки контролируемых параметров.

Различными авторами проведены многочисленные теоретические и экспериментальные исследования с целью получения информации о дефектности материалов и изделий по температурному полю на их поверхности. В настоящее время уже разработаны средства и методы для активного и пассивного теплового контроля качества материалов и изделий в процессе их производства и эксплуатации. Внутренние дефекты и явления могут быть обнаружены только в тех пределах, которые вносят возмущение в поле температур на поверхности изделия. В этом кроются очевидные ограничения и необходимость проведения предварительных оценок и методических экспериментов. Обнаружен может быть не всякий дефект, а лишь такой, у которого размеры, глубина залегания и теплофизические характеристики создадут на поверхности тела возмущение поля температур, соизмеримое с температурной чувствительностью прибора. Измерения должны производиться в момент проявления наибольшего температурного контраста на поверхности.

Обследование зданий с целью обнаружения дефектов теплоизоляции и мест утечек тепла основано на том, что, зная распределение температуры на поверхности конструкции, можно получить качественную картину распределения теплового потока внутри конструкции. Причем тепловизоры позволяют фиксировать распределение температур как на внутренней, так и на наружной поверхности ограждающих конструкций зданий.

Для разработки методики дефектоскопии ограждающих конструкций зданий необходимо определить степень влияния различных дефектов на температурное поле поверхности, оценить величину искажения регистрируемого тепловизором температурного поля при различных условиях съемки, разработать методику обработки термограмм.

6.1. МЕТОД ТЕРМОГРАФИЧЕСКОЙ АНАЛОГИИ

Тепловое изображение, переданное при помощи устройства обнаружения инфракрасным излучением, представляет собой распределение температур на поверхности.

Тепловое изображение (термограмма) может быть совмещено с изотермическим изображением. Изотерма в этом случае будет представлять собой линию, семейство линий или плоскостей, объединяющих точки равных температур или точки, плотность теплового излучения которых одинакова.

Термография частей здания состоит из следующих операций: определение поверхностной температуры на какой-то части покрытия здания с помощью устройства обнаружения инфракрасного излучения;

выявление аномального распределения поверхностной температуры, не являющейся характерной для данного участка здания; установление типа и размеров неоднородностей, вызывающих обнаруженные аномалии.

Для осуществления этих операций необходимо изучить проектную документацию на обследуемые конструкции и составить представление об ожидаемом распределении температур на их поверхности.

Для оценки дефектности конструкции следует полученное с помощью тепловизора распределение температур на ее поверхности сравнить с типовым распределением температур на поверхности бездефектной конструкции данного типа.

Типовое распределение температур определяется на основе расчета температурного поля на поверхности исследуемой конструкции на основе конструктивных чертежей, теплотехнических характеристик, входящих в конструкцию материалов и параметров внутреннего и наружного воздуха. Типовое распределение температур также может быть получено путем съемки типовых термограмм заведомо бездефектных элементов конструкций исследуемого типа как в климатических камерах, так и в реальных условиях на эксплуатируемых объектах. При этом обязательно должно быть указано, при каких разностях температур и давления между внутренним и наружным воздухом была проведена съемка.

Из сравнения полученной при исследованиях термограммы поверхности элемента конструкции с типовой термограммой этого же участка поверхности определяют местонахождение, форму и температурный контраст искажений температурного поля. Под температурным контрастом ΔT_B искажения температурного поля следует понимать разность температур между температурой поверхности бездефектного участка конструкции T_B^I и температурой поверхности дефектного участка T_B^P .

$$\Delta T_B = T_B^I - T_B^P / \text{при } t_B - t_H = \Delta t.$$

Если температура поверхности дефектного участка конструкции (участка искажения температурного поля) неодинакова, то за тем-

пературу дефектного участка принимается минимальная температура этого участка

$$T_{в}^{\theta} = T_{в \min}^{\theta}$$

Общий принцип для обработки термограмм схематически представлен на рис. 6.1.

Обследования проводятся таким образом, чтобы влияние внешних климатических факторов было сведено к минимуму. В большинстве случаев обследования проводятся с внутренней стороны ограждения, а с наружной могут быть выявлены общие места возможных отклонений и ярко выраженные дефекты.

Термографирование осуществляется по возможности при постоянных перепадах температур и при постоянном давлении. Не следует проводить термографирование, когда температура внутреннего или наружного воздуха поддается сильным изменениям, обследуемые участки ограждения подвержены солнечному воздействию, а скорость ветра очень сильно меняется.

Для обнаружения тепловых неоднородностей перепад температуры через ограждения должен быть достаточно высоким. Необходимые условия выявления тепловых неоднородностей зависят от вида и характеристики конструкции, нормативных требований к ним, характеристик используемой аппаратуры. В течение 24 ч до начала и во время испытания перепад температуры воздуха через конструкцию должен быть равен 10°C . Во время испытания изменение перепада температуры не должно превышать $\pm 30\%$ действительной начальной величины. Во время испытания температура воздуха внутри помещения не должна изменяться больше чем $\pm 2^{\circ}\text{C}$.

В течение 12 ч до начала и в ходе испытания поверхности конструкции не должны подвергаться солнечному воздействию. Минимальная и максимальная температура в месте измерения должны быть выявлены за 24 ч до проведения обследований путем ее измерения или по данным метеослужбы; условия солнечного воздействия — за 12 ч до начала обследований. Должны быть зарегистрированы температура наружного воздуха, облачность, осадки, влажность вне здания, характеристики ветра, географическая ориентация здания. Перед измерением температуры в конструкции необходимо понизить в здании давление, определить воздействие на температуру исследуемой конструкции, производимое источниками тепла, находящимися в здании, по возможности отключить их до начала измерения. Термографию следует производить на той стороне конструкции, где давление является наиболее низким.

До начала испытаний температура воздуха внутри и снаружи здания должна быть измерена с точностью до $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$, на ветровой и безветренной сторонах перепад давления для каждого этажа — с точностью до ± 2 Па.

Все обнаруженные аномалии отмечаются на плане здания.

Аналізу подвергаются лишь те, которые не могут быть объяснены особенностями эксплуатации ограждений и климатическими воздействиями. Поверхность ограждений следует осмотреть визуаль-



Рис.6.1. Схема процедуры интерпретации тепловых изображений при термографическом обследовании

но, чтобы уточнить не вызваны ли аномалии на термограммах нарушением целостности поверхностного слоя или изменением его коэффициента излучения.

Для сравнения фиксируются на термограмме участки с аномальным и нормальным распределением температуры, выявляется разность температуры между ними.

Следует отметить, что опытный оператор по виду теплового изображения дефектного участка может определить характер дефекта. Например, участки с теплопроводными дефектами имеют ровные края аномалий, а в местах повышенной воздухопроницаемости края аномалий имеют зубчатую неровную границу, при изменении перепада давления контраст температур в зоне аномалии быстро изменяет-

ся. Теплопроводные дефекты более инерционны и величина аномалий длительное время не меняется при изменении внешних условий.

Если термограммы указывают на утечку воздуха, то ее следует проверить путем измерения скорости ветра, перепада давлений и скорости утечки воздуха, затем определить факторы, которые влияют на коэффициент передачи тепла внутренней поверхности конструкции (движение воздуха, тепловое излучение, испарение воды).

Полученные в процессе замеров термограммы должны отражать действительную картину распределения температуры на исследуемом участке и характер излучения в момент измерения, все отклонения должны быть зафиксированы.

Если отклонения не объяснены проектом конструкции, изменениями излучения или величины коэффициента теплопередачи, то такая неоднородность должна рассматриваться как дефект.

Дефект может быть определен с помощью расчетов, исследований, на основе опыта оператора или путем сравнения действительных термограмм со стандартизированными для данной конструкции, имеющей известные дефекты теплоизоляции и утечку воздуха. Подобные сравнения должны быть полностью описаны в протоколе отчета замеров.

Для частей здания, в которых обнаружены дефекты теплоизоляции и утечки воздуха, необходимо сделать краткий анализ по типу и размеру дефекта, и если устранение этих дефектов требует принятия каких-либо мер, их необходимо также записать в протокол (отчет).

Протокол (отчет) термографического метода должен содержать последовательно пронумерованные справки:

- а) краткое описание характеристик конструкции здания (эти данные должны опираться на чертежи или другие документы);
- б) типы используемых материалов на поверхности структуры и определенные величины излучения этих материалов;
- в) географическая ориентация здания относительно основных точек (план) и описания окрестностей (здания, растительность, рельеф);
- г) время и дата испытания;
- д) температура наружного воздуха, ее минимальные и максимальные величины, измеренные за 24 ч до начала и во время испытания;
- е) общая информация о солнечном излучении за 24 ч до начала испытания и во время испытания;
- ж) осадки, скорость и направление ветра во время испытания;
- з) температура внутреннего воздуха и перепад температуры между наружным и внутренним воздухом;
- и) разница давления воздуха на стороне, направленной к ветру, и с подветренной стороны для каждого этажа;
- к) другие важные факторы, имеющие влияние на результаты испытания, как, например, быстрые климатические изменения;
- л) справки по условиям измерения;

м) эскизы (чертежи) здания, показывающие местонахождение термограммы;

н) термограммы, полученные в результате испытания с указаниями их относительного положения и с комментариями тепловых изображений;

о) результаты анализа, относящиеся к типу и размеру каждого замеченного дефекта конструкции;

п) результаты измерений и дополнительные исследования.

Обработка термограмм требует от персонала опыта и знаний в области технологии строительства, строительной физики, вентиляции и измерений.

Результаты измерений могут быть проверены путем визуального осмотра предполагаемой дефектной части здания.

Стандартизированные термограммы должны регистрироваться и быть представлены в двух видах: первый под видом нормального теплового изображения и второй под видом одного или нескольких изображений с изотермами, которые ясно показывают распределение температуры, характерной для объекта измерения и для того или иного вида дефекта. Для того чтобы получить типичные термограммы, необходимо выбрать некоторое количество комбинаций с температурой и перепадом давления в типовой конструкции, чтобы они соответствовали величинам, встречающимся на практике.

Перепады температуры принимаются в пределах от 10°C до 25°C , температура теплой стороны — около 20°C .

При расчете необходимого перепада температур между внутренним и наружным воздухом (Δt) учитывается соотношение термических сопротивлений подлежащего контролю участка конструкции с теплопроводным включением и без него.

Расчет Δt производится по формуле:

$$\Delta t = (1/P - 1) \Delta \tau R a_{\text{в}} / \eta, \quad (6.1)$$

где $P = (R - R_{\text{д}})/R$; R , $R_{\text{д}}$ — термическое сопротивление стены без теплопроводного включения и с включением; $a_{\text{в}}$ — коэффициент теплоотдачи поверхности $8,7 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$; $\Delta \tau$ — разрешающая способность тепловизора; η — коэффициент, учитывающий двумерность температурного поля (допускается принять равным 1).

6.2. СЛУЧАЙНЫЕ ТЕПЛОПРОВОДНЫЕ ВКЛЮЧЕНИЯ НАРУЖНЫХ ОГРАЖДЕНИЙ

Одна из наиболее развитых сфер использования тепловизоров в строительстве — обследование зданий различного назначения с целью выявления дефектов теплоизоляции и теплопроводных включений в ограждающих конструкциях. При этом не требуется определения абсолютных значений температуры, а необходимы лишь данные об их относительном изменении, при этом дефекты теплоизоляции и теплопроводные включения выявляются по локальному изменению температуры на поверхности ограждения при наличии теплового по-

ся. Теплопроводные дефекты более инерционны и величина аномалий длительное время не меняется при изменении внешних условий.

Если термограммы указывают на утечку воздуха, то ее следует проверить путем измерения скорости ветра, перепада давлений и скорости утечки воздуха, затем определить факторы, которые влияют на коэффициент передачи тепла внутренней поверхности конструкции (движение воздуха, тепловое излучение, испарение воды).

Полученные в процессе замеров термограммы должны отражать действительную картину распределения температуры на исследуемом участке и характер излучения в момент измерения, все отклонения должны быть зафиксированы.

Если отклонения не объяснены проектом конструкции, изменениями излучения или величины коэффициента теплопередачи, то такая неоднородность должна рассматриваться как дефект.

Дефект может быть определен с помощью расчетов, исследований, на основе опыта оператора или путем сравнения действительных термограмм со стандартизированными для данной конструкции, имеющей известные дефекты теплоизоляции и утечку воздуха. Подобные сравнения должны быть полностью описаны в протоколе отчета замеров.

Для частей здания, в которых обнаружены дефекты теплоизоляции и утечки воздуха, необходимо сделать краткий анализ по типу и размеру дефекта, и если устранение этих дефектов требует принятия каких-либо мер, их необходимо также записать в протокол (отчет).

Протокол (отчет) термографического метода должен содержать последовательно пронумерованные справки:

- а) краткое описание характеристик конструкции здания (эти данные должны опираться на чертежи или другие документы);
- б) типы используемых материалов на поверхности структуры и определенные величины излучения этих материалов;
- в) географическая ориентация здания относительно основных точек (план) и описания окрестностей (здания, растительность, рельеф);
- г) время и дата испытания;
- д) температура наружного воздуха, ее минимальные и максимальные величины, измеренные за 24 ч до начала и во время испытания;
- е) общая информация о солнечном излучении за 24 ч до начала испытания и во время испытания;
- ж) осадки, скорость и направление ветра во время испытания;
- з) температура внутреннего воздуха и перепад температуры между наружным и внутренним воздухом;
- и) разница давления воздуха на стороне, направленной к ветру, и с подветренной стороны для каждого этажа;
- к) другие важные факторы, имеющие влияние на результаты испытания, как, например, быстрые климатические изменения;
- л) справки по условиям измерения;

м) эскизы (чертежи) здания, показывающие местонахождение термограммы;

н) термограммы, полученные в результате испытания с указаниями их относительного положения и с комментариями тепловых изображений;

о) результаты анализа, относящиеся к типу и размеру каждого замеченного дефекта конструкции;

п) результаты измерений и дополнительные исследования.

Обработка термограмм требует от персонала опыта и знаний в области технологии строительства, строительной физики, вентиляции и измерений.

Результаты измерений могут быть проверены путем визуального осмотра предполагаемой дефектной части здания.

Стандартизированные термограммы должны регистрироваться и быть представлены в двух видах: первый под видом нормального теплового изображения и второй под видом одного или нескольких изображений с изотермами, которые ясно показывают распределение температуры, характерной для объекта измерения и для того или иного вида дефекта. Для того чтобы получить типичные термограммы, необходимо выбрать некоторое количество комбинаций с температурой и перепадом давления в типовой конструкции, чтобы они соответствовали величинам, встречающимся на практике.

Перепады температуры принимаются в пределах от 10°C до 25°C , температура теплой стороны — около 20°C .

При расчете необходимого перепада температур между внутренним и наружным воздухом (Δt) учитывается соотношение термических сопротивлений подлежащего контролю участка конструкции с теплопроводным включением и без него.

Расчет Δt производится по формуле:

$$\Delta t = (1/P - 1) \Delta t R a_{\text{в}} / \eta, \quad (6.1)$$

где $P = (R - R_{\text{д}}) / R$; R , $R_{\text{д}}$ — термическое сопротивление стены без теплопроводного включения и с включением; $a_{\text{в}}$ — коэффициент теплоотдачи поверхности $8,7 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$; Δt — разрешающая способность тепловизора; η — коэффициент, учитывающий двумерность температурного поля (допускается принять равным 1).

6.2. СЛУЧАЙНЫЕ ТЕПЛОПРОВОДНЫЕ ВКЛЮЧЕНИЯ НАРУЖНЫХ ОГРАЖДЕНИЙ

Одна из наиболее развитых сфер использования тепловизоров в строительстве — обследование зданий различного назначения с целью выявления дефектов теплоизоляции и теплопроводных включений в ограждающих конструкциях. При этом не требуется определения абсолютных значений температуры, а необходимы лишь данные об их относительном изменении, при этом дефекты теплоизоляции и теплопроводные включения выявляются по локальному изменению температуры на поверхности ограждения при наличии теплового по-

тока через него. При этом обнаруживаются такие включения, которые вызывают изменение температуры Δt , достаточное для его регистрации используемым тепловизором (рис. 6.2),

$$\Delta t = (1/P - 1) \Delta \tau R \alpha_w / \eta, \quad (6.2)$$

где $P = (R - R_{\text{д}}) / R$ — безразмерный коэффициент; $R, R_{\text{д}}$ — термическое сопротивление стейм без включения и с включением; $\Delta \tau$ — разрешающая способность тепловизора; η — коэффициент, учитывающий двумерность температурного поля, принят равным 1; $\alpha_w = 8,7 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$.

Изменение температуры на поверхности ограждения в месте включения обусловлено рядом факторов: различием термических сопротивлений включения и самого ограждения, размерами и глубиной залегания включения, величиной теплового потока через ограждение, его воздухопроницаемостью и т.п. Поэтому заключение о состоянии конструкции делается на основе качественного анализа распределения температуры на поверхности. Для идентификации вида дефектов и теплопроводных включений обычно используют типовые температурные поля аналогичных конструкций, находящихся в таких же условиях теплообмена. Типовые поля получают различными способами: расчетными методами, в результате исследований на моделях и опытных образцах конструкций, на основе тепловизионной съемки в реальных условиях.

При анализе полученных тепловизионной съемкой термограмм и сравнении их с типовыми температурными полями отмечают места температурных аномалий, которые не могут быть объяснены конструктивными особенностями ограждения и условиями тепловизионной съемки. Окончательное решение о характере включения может быть принято после вскрытия конструкции.

Порядок и объем работ по термографированию зданий и сооружений в зависимости от целей и задач исследований могут быть различны. Однако имеется ряд операций, выполнение которых обязательно во всех случаях. К таким общим операциям относятся: ознакомление с объектом исследований, изучение конструктивных особенностей теплофизических характеристик ограждающих конструкций исследуемых объектов;

выбор круга задач, которые могут быть решены с использованием методов термографирования;

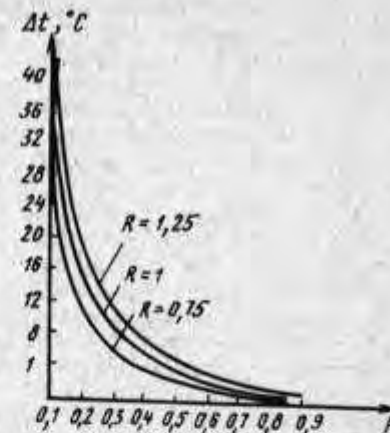
подготовка объекта к проведению термографических обследований, определение параметров конструкции и внешних факторов, влияющих на результаты термографирования, выбор методики, времени и объема проведения обследований;

расчет ожидаемого распределения температур на поверхностях исследуемых конструкций с учетом их теплового состояния во время проведения обследований.

Выбор круга задач, которые могут быть решены методом термографии зависит от общих целей исследований, а также от ряда характеристик объекта и условий внешней среды.

Термографирование ограждающих конструкций в зданиях, в которых имеются действующие системы отопления и охлаждения,

Рис. 6.2. График для определения перепада температуры, необходимой для выявления включения



проводится в период, когда перепад температур, создаваемый этими системами между внутренним и наружным воздухом, достигает требуемой величины. Величина перепада температур, минимально необходимого для проведения исследований, определяются размерами конструкций, условиями их эксплуатации, влажностью материала и должна быть такая, чтобы температурное поле на поверхности отдельных элементов было количественно связано с их термическими характеристиками. Исследования должны проводиться в период установившихся атмосферных условий, описанных в п. 6.1. Внутренние мощные источники лучистой энергии на время испытаний должны быть отключены или экранированы. Следует избегать проведения термографических обследований поверхностей при наличии на них конденсата как в жидкой, так и в твердой фазе. При проведении обследований наружных поверхностей зданий при наличии таких метеорологических условий, как дождь, снег, туман, а также ветер, скорость которого больше 5 м/с, термографирование поверхности производить не следует. В течение 24 ч до начала проведения испытаний следует определить минимальные и максимальные температуры на исследуемых поверхностях, ход изменения температур и влажность воздуха, условия солнечного воздействия. Перед термографированием производят внешний осмотр состояния здания, отмечают его ориентацию, розу ветров в этом месте. Знакомятся с системами отопления и вентиляции и с нормируемыми параметрами воздуха внутри помещения, среднемесячными температурами наружного воздуха. Все полученные данные заносятся в карту осмотра объекта.

Прежде чем приступить к обследованию поверхность конструкции должна быть по возможности очищена от наледи, грязи, отслоившейся штукатурки, краски, отклеившихся обоев. Обследуемые участки следует освободить для прямого обзора. Исследования следует начинать с холодной зоны. Тепловизор устанавливают на расстоянии 30–50 м от объекта и производят осмотр его поверхнос-

тока через него. При этом обнаруживаются такие включения, которые вызывают изменение температуры Δt , достаточное для его регистрации используемым тепловизором (рис. 6.2),

$$\Delta t = (1/P - 1) \Delta \tau R \alpha_w / \eta, \quad (6.2)$$

где $P = (R - R_{\text{д}}) / R$ — безразмерный коэффициент; $R, R_{\text{д}}$ — термическое сопротивление стены без включения и с включением; $\Delta \tau$ — разрешающая способность тепловизора; η — коэффициент, учитывающий двумерность температурного поля, принят равным 1; $\alpha_w = 8,7 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$.

Изменение температуры на поверхности ограждения в месте включения обусловлено рядом факторов: различием термических сопротивлений включения и самого ограждения, размерами и глубиной залегания включения, величиной теплового потока через ограждение, его воздухопроницаемостью и т.п. Поэтому заключение о состоянии конструкции делается на основе качественного анализа распределения температуры на поверхности. Для идентификации вида дефектов и теплопроводных включений обычно используют типовые температурные поля аналогичных конструкций, находящихся в таких же условиях теплообмена. Типовые поля получают различными способами: расчетными методами, в результате исследований на моделях и опытных образцах конструкций, на основе тепловизионной съемки в реальных условиях.

При анализе полученных тепловизионной съемкой термограмм и сравнении их с типовыми температурными полями отмечают места температурных аномалий, которые не могут быть объяснены конструктивными особенностями ограждения и условиями тепловизионной съемки. Окончательное решение о характере включения может быть принято после вскрытия конструкции.

Порядок и объем работ по термографированию зданий и сооружений в зависимости от целей и задач исследований могут быть различны. Однако имеется ряд операций, выполнение которых обязательно во всех случаях. К таким общим операциям относятся: ознакомление с объектом исследований, изучение конструктивных особенностей теплофизических характеристик ограждающих конструкций исследуемых объектов;

выбор круга задач, которые могут быть решены с использованием методов термографирования;

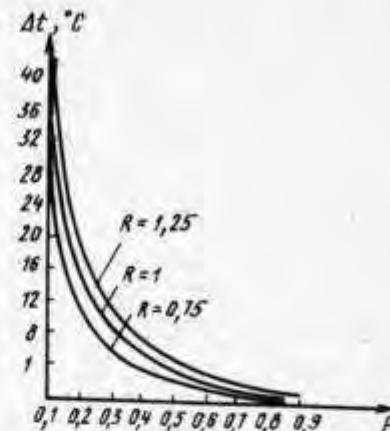
подготовка объекта к проведению термографических обследований, определение параметров конструкции и внешних факторов, влияющих на результаты термографирования, выбор методики, времени и объема проведения обследований;

расчет ожидаемого распределения температур на поверхностях исследуемых конструкций с учетом их теплового состояния во время проведения обследований.

Выбор круга задач, которые могут быть решены методом термографии зависят от общих целей исследований, а также от ряда характеристик объекта и условий внешней среды.

Термографирование ограждающих конструкций в зданиях, в которых имеются действующие системы отопления и охлаждения,

Рис. 6.2. График для определения перепада температуры, необходимой для выявления включения



проводится в период, когда перепад температур, создаваемый этими системами между внутренним и наружным воздухом, достигает требуемой величины. Величина перепада температур, минимально необходимого для проведения исследований, определяются размерами конструкций, условиями их эксплуатации, влажностью материала и должна быть такой, чтобы температурное поле на поверхности отдельных элементов было количественно связано с их термическими характеристиками. Исследования должны проводиться в период установившихся атмосферных условий, описанных в п.6.1. Внутренние мощные источники лучистой энергии на время испытаний должны быть отключены или экранированы. Следует избегать проведения термографических обследований поверхностей при наличии на них конденсата как в жидкой, так и в твердой фазе. При проведении обследований наружных поверхностей зданий при наличии таких метеорологических условий, как дождь, снег, туман, а также ветер, скорость которого больше 5 м/с, термографирование поверхности производить не следует. В течение 24 ч до начала проведения испытаний следует определить минимальные и максимальные температуры на исследуемых поверхностях, ход изменения температур и влажность воздуха, условия солнечного воздействия. Перед термографированием производят внешний осмотр состояния здания, отмечают его ориентацию, розу ветров в этом месте. Знакомятся с системами отопления и вентиляции и с нормируемыми параметрами воздуха внутри помещения, среднемесячными температурами наружного воздуха. Все полученные данные заносятся в карту осмотра объекта.

Прежде чем приступить к обследованию поверхность конструкции должна быть по возможности очищена от наледи, грязи, отслоившейся штукатурки, краски, отклеившихся обоев. Обследуемые участки следует освободить для прямого обзора. Исследования следует начинать с холодной зоны. Тепловизор устанавливают на расстоянии 30–50 м от объекта и производят осмотр его поверхнос-

ти, обращая внимание на места, которые подлежат съемке на пленку и более детальному анализу. Съемку с экрана следует сопровождать обычным фотографированием исследуемых ограждающих конструкций. Для определения температурного поля ограждающих конструкций необходимо снять репер. Съемка репера — это определение температуры некоторого участка ограждения и уровня изоляции, соответствующего этому участку. Участки для репера должны быть не только доступными, но и иметь однородное температурное поле. В реальных условиях, как правило, неизвестен коэффициент черноты обследуемой конструкции. Для определения этого коэффициента необходимо снять два репера, причем чем больше будет разница их изотермических уровней, тем точнее возможно определить коэффициент черноты. При обследовании конструкции на расстоянии 30–60 м выявляются дефектные участки, которые далее обследуются детально с близкой дистанции (5–10 м). Обнаруженные дефекты теплоизоляции со стороны холодной зоны (они, как правило, на экране более светлые) необходимо детально обследовать со стороны теплой зоны (дефекты на экране проявляются темными контурами). Исключением являются воздухопроницаемые стыки. В случае инфильтрации холодного воздуха поверхность стыка становится более холодной и, следовательно, более темной. Аналогичная картина наблюдается в теплой зоне для стыков, через которые происходит эксфильтрация теплого воздуха.

Различные виды дефектов, снижающих теплозащитные качества ограждающих конструкций, вызывают изменение температурного поля на их поверхности. Характер этого искажения зависит от формы, размеров, расположения и теплотехнических характеристик дефектов, нарушающих нормальное распространение тепловой энергии в конструкции, от разности температур между внутренним и наружным воздухом, а для воздухопроницаемых элементов конструкций — от перепада и величины давлений наружного и внутреннего воздуха.

При анализе термограмм с целью получения информации о характере и степени дефектности конструкции в качестве критериев оценки служат конфигурация и величина искажения температурного поля на поверхности в месте расположения предполагаемого дефекта. Пример распределения температур на фасаде здания приведен на рис. 6.3. Если обнаруженное искажение температурного поля на поверхности исследуемого участка конструкции не может быть объяснено какими-либо внешними или внутренними факторами (воздействие лучистого тепла от солнца, радиаторов отопления и других источников тепла, наличие непредусмотренных в конструкции теплопроводных элементов, изменение излучательной способности участка исследуемой поверхности и др.), то принимается решение о наличии не предусмотренного конструкцией теплопроводного включения. Это теплопроводное включение относится к разряду дефектов, снижающих теплозащитные качества ограждающих конструкций, при условии, если температура внутренней поверхности дефектного участка ниже, чем температура поверхности бездефект-

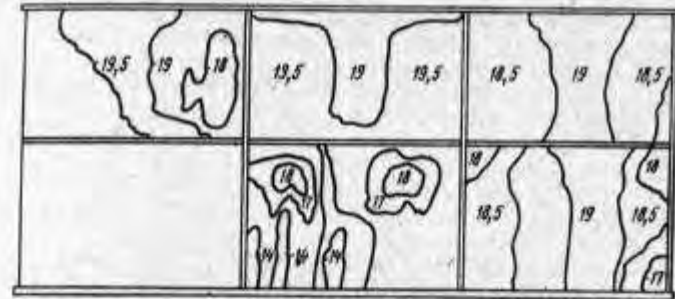


Рис. 6.3. Распределение температуры ($^{\circ}\text{C}$) по внутренней поверхности фасада здания

ного участка на типовой термограмме. При съемке наружной поверхности ограждения в зимнее время температура дефектного участка будет выше, чем бездефектного. По форме, размерам и расположению искажения температурного поля на поверхности конструкции могут быть выявлены следующие дефекты: отсутствие или повреждение слоя теплоизоляции; некачественная заделка горизонтальных и вертикальных стыков; пониженные теплозащитные качества узлов применения конструкций; протечки, являющиеся следствием плохой гидроизоляции стыковых соединений; наличие щелей в оконных коробках; промерзания вследствие пониженных теплозащитных качеств отдельных элементов конструкций и т.д.

Для определения характера дефекта необходимо провести анализ конструктивных особенностей данного участка ограждения с выявлением предполагаемых причин появления температурных аномалий. При этом следует учесть величину температурного контраста в месте предполагаемого дефекта, а также наличие факторов, влияющих на величину теплоотдачи исследуемой поверхности. К этим факторам относятся вынужденное или естественное движение воздуха у исследуемой поверхности и его температура, лучистый теплообмен этой поверхности с окружающей средой, увлажнение поверхности ограждения. В случае значительной разницы между величиной теплоотдачи во время измерения и во время определения типовых термограмм это обстоятельство должно быть отмечено и принято во внимание при проведении анализа термограмм.

В случаях, когда не допускается выпадение конденсата на поверхности ограждения, следует провести расчет минимальной температуры поверхности в месте дефекта $T_{\text{imin}}^{\text{D}}$ на расчетную зимнюю температуру наружного воздуха и сравнить полученное значение с возможным значением температуры точки росы внутреннего воздуха. На основе проведенного сравнения оценивают степень снижения теплозащитных качеств конструкции в месте дефекта. Проведением анализа определяют предполагаемый размер и расположение дефекта, а также степень его влияния на снижение теплозащитных качеств участка ограждения.

При термографировании воздухопроницаемых элементов ограждающих конструкций следует учитывать направление и величину разности давлений между внутренним и наружным воздухом, так как фильтрация воздуха будет также изменять температурное поле на поверхности ограждения. Причем, это изменение не всегда будет совпадать с температурными аномалиями, определяемыми теплозащитными качествами этих участков. Особое внимание следует уделять этому явлению при обследовании многоэтажных зданий, где разность давлений воздуха меняет знак и величину по высоте здания. Такое же влияние на распределение температур на поверхности воздухопроницаемых элементов оказывает величина ветрового напора. Поэтому при проведении термографических обследований необходимо фиксировать направление и скорость ветра, а также ориентацию здания. Таким образом, выявляются трещины и щели в соединениях оконных коробок, местах заделки балконных плит в стену, горизонтальных и вертикальных стыках.

Кроме термографической съемки участков ограждений, через которые происходит фильтрация воздуха, следует дополнительно определить термоанемометром скорость воздушного потока в этом месте. Для всех участков поверхности ограждений, в которых были обнаружены дефекты, следует сфотографировать их тепловые черные изображения, а также термограммы с изотермами. Изотермы следует нанести на недефектную часть конструкции с характерной температурой, на часть конструкции, которая имеет самую низкую температуру в месте дефекта и, если это возможно, на часть конструкции, окаймляющую область дефекта, т.е. область искажения температурного поля. Положения сфотографированных частей ограждений должны быть нанесены на эскиз здания.

Кроме определения дефектов, снижающих теплозащитные качества ограждающих конструкций, на основе анализа термограмм могут быть проведены исследования по сравнительной оценке теплозащитных качеств отдельных ограждающих конструкций зданий или всего здания в целом. Для этого следует сравнить термограммы отдельных однотипных конструкций одного здания или соседних зданий одной серии, снятых в одинаковых условиях как с внутренней, так и с наружной сторон. При этом целесообразно одновременно провести измерения теплового потока, проходящего через исследуемые ограждения. Оценку приведенного термического сопротивления исследуемых ограждений произвести по методике, указанной в СНиП II-3-79.

Подобные тепловизионные обследования жилых домов проводились в г. Тольятти с 28 января по 4 февраля 1979 г. Целью обследования было определение причин неудовлетворительного состояния ограждающих конструкций зданий. Наряду с термографированием проводились визуальные наблюдения и измерялись температура и влажность наружного и внутреннего воздуха. Тепловизором АГА-750 были обследованы ограждающие конструкции семи жилых домов из трехслойных железобетонных панелей с утеплителем из минеральной ваты серии П-60. Помимо обследования ограждений сна-



Рис.6.4. Термограммы ограждений торцевой стены жилого дома (выделены изотермические уровни на поверхности неутепленных ограждений верхних этажей)



Рис.6.5. Термограмма наружной поверхности торца жилого дома

ружи были сняты тепловые поля стеновых панелей со стороны помещений в 200 квартирах. Температура наружного воздуха в период проведения обследований колебалась от -3° до -7°C .

Проведенное обследование позволило оценить теплозащитные качества ограждений домов серии П-60 из трехслойных панелей. Несмотря на то, что не во всех домах имели место жалобы жильцов, в результате термографического обследования были выявлены дефекты, характерные для всех домов серии П-60. Эти дефекты не приводят к промерзаниям и протечкам в домах с улучшенным теплообеспечением и в помещениях с низким уровнем влажности, но сразу же проявляются там, где эти условия отсутствуют.

Ниже приводятся термограммы фрагментов ограждений и фасадов обследованных домов, в которых были обнаружены характерные для этой серии дефекты. Более светлым местам на термограммах соответствуют более теплые участки поверхности объекта, темным — более холодные участки. Ярко-белыми точками на термограммах показаны изотермы, очерчивающие области разных температур.

При термографировании здания снаружи более светлый тон участка конструкции указывает на то, что через него происходят повышенные теплопотери. На термограммах, снятых изнутри, наоборот, темные места соответствуют местам с повышенными теплопотерями, т.е. местам протечек и промерзаний стеновых панелей.

При термографировании фасадов со стороны улицы оценивались общие теплоизоляционные свойства здания в целом, сравнивались отдельные конструкции, выявлялись участки повышенной теплопроводности.

На рис. 6.4 и 6.5 представлены термограммы наружной поверхности ограждений двух средних этажей глухой торцевой стены жилого дома серии П-60. На первых десяти этажах этого дома было устроено дополнительное утепление стеновых панелей. Верхние шесть этажей



Рис.6.6. Термограмма наружной поверхности двух этажей фасада жилого дома

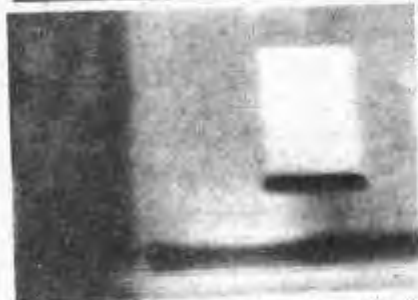


Рис.6.7. Термограмма наружной поверхности стеновой панели с окном (светлый участок свидетельствует о теплопотерях в месте установки радиатора отопления)

оставлены неутепленными. Термограммы наглядно показывают резкое различие теплоизоляционных качеств утепленных и неутепленных панелей на этих этажах. Температура наружной поверхности по глади утепленных панелей на $1,5-2^{\circ}\text{C}$ ниже температуры по глади неутепленных панелей.

На термограммах видно, что через горизонтальные и вертикальные стыки наблюдаются значительные теплопотери (крупная светлая решетка). Контраст температур между стыками и гладью утепленных панелей составляет $0,7^{\circ}\text{C}$, а неутепленных — 1°C . При обследовании помещений изнутри, стеновые панели которых не были утеплены, были обнаружены многочисленные промерзания и протечки.

На рис. 6.6 представлена термограмма панелей 2-го и 3-го этажей этого же здания, снятая крупным планом. На ней видны места закладки утеплителя 1 (темные полосы) и межслойные бетонные связи 2. Причем, ширина светлых полос равна или даже больше ширины темных, хотя действительная ширина бетонных связей, согласно конструктивным чертежам, должна быть равна 10 см, а слоя утеплителя — 70 см.

Значительная неоднородность температурного поля указывает на низкое качество трехслойных панелей данного фрагмента. Кроме того, на термограмме видно, что через горизонтальный и вертикальный стыки происходят повышенные теплопотери. Контраст температур между стыками и гладью панели, где располагается утеплитель, достигает $1,5^{\circ}\text{C}$.

Рис.6.8. Термограмма внутренней поверхности промерзающего участка стены



Рис.6.9. Термограмма наружной поверхности ограждений жилого дома



Термограмма иллюстрирует значительную неоднородность закладки утеплителя в панелях, и, как следствие, большой разброс температур по их поверхности, достигающий $\tau_{н1} - \tau_{н2} = 2,5^{\circ}\text{C}$.

На термограмме, кроме дефектов, о которых уже говорилось выше, заметны горизонтальные светлые полосы, соответствующие местам затекания бетонной смеси в разрывы слоев утеплителя.

На рис. 6.7 представлена термограмма еще одного фрагмента фасада. На ней видны утечки на улицу тепла отопительных приборов 1 и некачественная панель в простенке второго этажа 2. В ходе термографического обследования домов серии П-60 проводилось их термографирование как снаружи, так и изнутри (выборочно). Ниже приводятся термограммы фрагментов внутренних поверхностей ограждений, в которых имели место протечки или промерзания.

На термограмме (рис. 6.8) наружная стена комнаты, в которой из-за низкого качества панели и стыков произошло промерзание в правом верхнем углу. Разница температур в углу и на глади стены достигает 4°C .

На рис. 6.9 показана термограмма наружной поверхности фасада жилого дома. Поверхность окон имеет разный тон, что говорит о разной степени утепления оконных коробок в этом доме, а следовательно, различия и теплопотери через окна. Поверхность вертикальных стыков темная, что свидетельствует о хороших их теплозащитных качествах. Слева темные прямоугольники соответствуют ограждениям лоджий. Углубленные наружные ограждения лоджий на термограмме более светлые, чем ограждения свободной стены дома. Это

может быть объяснено не столько повышенными теплопотерями через эти ограждения, сколько отсутствием конвективного теплообмена наружного воздуха и поверхностей ограждений лоджий. Светлый прямоугольник в правом нижнем углу — проем входной двери, которая во время съемки была открыта.

Использование тепловизора при обследовании тепловизионных качеств ограждений позволило значительно сократить сроки и стоимость работ, выявить внутренние теплопроводные дефекты без нарушения целостности конструкции.

На основе проведенных термографических обследований было установлено, что промерзание ограждений связано с нарушением их конструктивных параметров. К ним относятся: увеличение ширины ребер жесткости, уменьшение толщины слоя утеплителя, появление дополнительных поперечных ребер, некачественная заделка стыков.

Отрицательное воздействие на состояние ограждающих конструкций оказывают также нарушение в работе систем вентиляции и неудовлетворительный тепловлажностный режим внутри помещения. Так, особо неблагоприятные условия наблюдались в квартирах, которые плохо проветриваются и влажность воздуха в помещениях выше нормы. В домах с нормально работающими вентиляционными системами и усиленным режимом отопления протечек или промерзаний не было выявлено.

Тепловизионное обследование жилых домов серии П-60 выявило ряд непродуманных проектных решений. Так, неудачно выбрано место расположения ванных комнат в торцах зданий. В результате повышенной влажности в них имеет место наибольшее количество случаев промерзаний наружных ограждений.

Тепловизионные обследования позволили выявить характерные для данной серии домов дефекты и установить причины их возникновения.

6.3. СКРЫТЫЕ ДЕФЕКТЫ ОТДЕЛОЧНЫХ СЛОЕВ ОГРАЖДЕНИЙ

Одним из способов увеличения долговечности строительных конструкций является их облицовка, которая не только увеличивает срок службы строительных конструкций, но и является элементом архитектурного оформления зданий, повышает функциональную пригодность помещений. Однако в настоящее время, несмотря на быстрый рост объемов производства облицовочных работ, методы контроля их качества остаются на низком уровне.

В настоящее время в нормативных документах практически отсутствуют требования, которые надо предъявлять к качеству облицовок. Так, например, в СНиП III-21-73 основное внимание уделено правилам производства работ, а требования к конструкции облицовочного слоя предъявляются только в п. 8.39, в котором сказано, что толщина раствора под плитами должна быть в пределах 7–15 мм, и не должно быть пустот. Остальные 5 подпунктов предъявляют требования к эстетическим качествам облицовок.

Существующие в настоящее время направления исследований долговечности ограждающих конструкций и их лицевых слоев сводятся к следующим:

длительные натурные наблюдения за состоянием исследуемых конструкций;

определение в лабораторных условиях стойкости образцов конструкций при воздействии на них различных климатических факторов и механических нагрузок;

поиск теоретических закономерностей (в конечном итоге методов расчетов сроков службы) на основе анализа зависимостей между долговечностью и воздействующими факторами.

Старение материала облицовочного слоя ограждения под влиянием климатических условий рассматривается как постепенное неравномерное разрушение его микрообъемов. Процесс разрушения отделочного слоя является следствием изменения его физико-технических характеристик. По их изменению можно судить о его долговечности.

При колебании температуры наружного воздуха в облицовке возникают температурные напряжения, оказывающие существенное влияние на долговечность облицовки и надежность сцепления с облицованной конструкцией.

Исследования показали, что в случае охлаждения облицовки напряжения σ_u по подошве облицовочной плитки достигают максимальных значений по краям. Конфигурация эпюр дает возможность предположить, что разрушение материала в месте сцепления облицовки с конструкцией будет происходить от краев к центру без сквозного разрушения плитки и от места сквозной трещины к краям.

При исследованиях изменений физико-технических свойств отделочных слоев в натуральных условиях возможно применение таких методов неразрушающего контроля, как акустический, радиоизотопный и тепловой. Наибольший интерес из них представляет тепловой метод, который основан на исследовании температурного поля поверхности облицовок, получаемого с помощью тепловизора. По величине аномалий этого температурного поля оценивают количество и характер дефектов в облицовочном слое.

В НИИСФ ведется разработка тепловизионного метода контроля дефектов облицовочного слоя путем анализа изменения температурных полей на их поверхности. Для выявления и классификации дефектов облицовочных слоев при помощи тепловизора необходимо, чтобы исследуемая поверхность находилась в нестационарном тепловом режиме, так как в стационарном режиме аномалии температурного поля появляются за счет неоднородности массива конструкции. Нестационарный тепловой режим имеет место, когда во время измерения температура воздуха около исследуемой поверхности достаточно быстро изменилась от величины T_0 до T_c .

Такое изменение температуры может наблюдаться в реальных условиях при суточных колебаниях температур или при периодическом нагреве поверхности солнечной радиацией. Измерения проводят-

ся непосредственно после прекращения воздействия теплового фактора на исследуемую поверхность. В лабораторных условиях для этих целей используются различные климатические камеры, обеспечивающие прогрев или охлаждение фрагментов ограждений. При этом на поверхности конструкции в месте расположения дефектов облицовки возникают температурные аномалии, которые представляют собой разность температур поверхности дефектного и бездефектного участков облицовок ΔT . Величина возникающей разности определяется по формуле:

$$\Delta T = (T_0 - T_c) h \left(\operatorname{erf} \left[\frac{(2 - 1/Bi_3) / 2 \sqrt{Fo_3}}{1 + 1/Bi_3} \right] - \operatorname{erf} \left[\frac{(2 + 1/Bi_3) / 2 \sqrt{Fo_3}}{1 + 1/Bi_3} \right] \right), \quad (6.3)$$

$$\text{где } h = \frac{2 \sqrt{\lambda_3 c_3 \rho_3} (\sqrt{\lambda_2 c_2 \rho_2} - \sqrt{\lambda_1 c_1 \rho_1})}{(\sqrt{\lambda_3 c_3 \rho_3} + \sqrt{\lambda_2 c_2 \rho_2}) (\sqrt{\lambda_3 c_3 \rho_3} + \sqrt{\lambda_1 c_1 \rho_1})}; \quad T_0 - \text{температура}$$

конструкции и окружающей среды в начальный момент времени; T_c — температура окружающей среды в момент измерения; λ — теплопроводность, Вт/(м·°С); c — теплоемкость, Дж/(кг·°С); ρ — плотность, кг/м³; Bi — критерий Био; Fo — критерий Фурье.

В формуле теплофизические характеристики приведены с индексами, которые обозначают: 1 — материал конструкции; 2 — материал области на границе облицовки и конструкции с теплофизическими характеристиками, отличными от всего массива (область дефекта); 3 — материал облицовки.

Из формулы следует, что величина ΔT зависит от вида и характера дефекта (отслоений облицовочного слоя, скопления влаги, льда и т.д.) облицовочного слоя.

В ходе проведенных во ВНИИтеплоизоляция лабораторных испытаний образцов облицованных конструкций, изготовленных на Вильнюсском ДСК из бетона, идущего на изготовление панелей и имеющего плотность 1200 кг/м³, с облицовкой из ковровой керамики с размером плиток 46x46x4 мм Дворченского завода стройматериалов, были проведены их тепловизионные исследования.

Образцы подвергались искусственному старению методом одностороннего воздействия (ГОСТ 7025-78). Непосредственно после извлечения образца из климатической камеры с интервалом в 20 мин в течение 1 ч тепловизором АГА-750 фотографировался температурный рельеф исследуемой поверхности.

Анализ температурного поля и его аномалий по формуле (6.3) показал, что участки с пониженной температурой соответствуют местам деструкции облицовочного слоя. Эти результаты были подтверждены вскрытием исследованных образцов.

Проведенные исследования показали, что области деструкции расположены в основном по краям плиток и имеют различную величину, которая определяет долговечность облицовки.

Качественный анализ термограмм позволил обнаружить керамические плитки, наиболее склонные к отслаиванию. Интерес представляет количественная оценка состояния облицовочного слоя. Из

формулы (6.2) следует, что такая оценка облицовок, находящихся в натуральных условиях, возможна. Подобная оценка состояния облицовки в лабораторных условиях была сделана в НИИМосстрое совместно с НИИСФ. Испытания фрагмента строительной конструкции, облицованной керамической глазурованной плиткой типа "кабанчик" (размером 65x120x6 мм) проводились по методике ГОСТ 7025-78. На основе тепловизионной съемки исследуемого фрагмента в нестационарном тепловом режиме была выявлена аномалия температурного поля (разность температур в месте предполагаемого дефекта составила 0,4°С при скорости остывания 7°С/ч). Расчет по формуле (6.3) позволил определить, что плотность бетона под плитками в месте аномалии в 2 раза меньше, чем по всему массиву. Учитывая, что плотность бетона линейно зависит от его пористости, были проведены исследования плиток прибором ГПНВ-5, для этого по форме плиток были изготовлены металлические штампы, которые приклеивались к плиткам в областях, имеющих и не имеющих аномалий. Испытания плиток на отрыв показали, что в области аномалии прочность сцепления плиток с бетоном оказалась в 2 раза меньше, чем в местах, не имеющих аномалий. Вскрытие отделочного слоя показало, что глубина дефектного (имеющего пониженную плотность) слоя достигала 15 мм. Эти испытания подтвердили возможность количественной оценки состояния облицовочного слоя тепловизионным методом.

Для получения критериев количественной оценки необходим анализ результатов длительных лабораторных испытаний для каждого вида облицовок. После чего на основе полученных критериев тепловизионным методом может быть оценена долговечность облицовочного слоя в конструкции в реальных условиях.

6.4. ДЕФЕКТЫ СТЫКОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПАНЕЛЬНЫХ ЗДАНИЙ

Стыковые соединения стеновых панелей полносборных зданий относятся к наиболее сложным и ответственным конструктивным элементам. Особенно велика роль стыков в обеспечении теплозащитных качеств ограждений, так как теплопотери через них в современных зданиях достигают 20% теплопотерь через глухую часть стены.

В настоящее время диагностика теплотехнического состояния стыковых соединений полносборных зданий осуществляется на основе контактных и разрушающих методов. Обследования проводятся в основном при поступлении жалоб жильцов или при подготовке зданий к капитальному ремонту. Обследование ограждающих конструкций традиционными методами с целью обнаружения дефектных участков в стыковых соединениях является сложным и трудоемким процессом. Кроме того, иногда неоправданно возрастает объем ремонтных работ, так как при обследовании приходится вскрывать дефектные и бездефектные участки стыков.

Важнейшим показателем, характеризующим теплозащитные качества стыка в зимних условиях, является температура внутренней

поверхности стыка, которая при других известных исходных данных характеризует процессы теплопередачи в элементах конструкции. Эта характеристика может быть получена в результате экспериментальных исследований в лабораторных, естественных условиях или же путем расчета температурного поля на ЭВМ. Расчеты температурных полей на ЭВМ могут проводиться на стадии проектирования, однако в них не учитываются особенности изготовления и монтажа стыкового соединения. Метод натуральных обследований является наиболее достоверным при оценке теплотехнических качеств стыков и пока единственным для подтверждения необходимости в их восстановительном ремонте.

В последние годы тепловизионный метод получил широкое применение в исследованиях НИИСФ при дефектоскопии теплозащитных качеств ограждающих конструкций. Для однородных элементов конструкций, например стеновых панелей, разработаны методы количественной оценки теплозащитных качеств по результатам дешифровки термограмм. Своевременное выявление и устранение дефектов стыковых соединений панелей позволяет снизить теплопотери в зданиях, увеличить уровень комфортности, повысить долговечность ограждающих конструкций.

Требования главы СНиП II-3-79 "Строительная теплотехника" сводятся к необходимости обеспечить такую конструкцию стыкового соединения, чтобы при расчетной зимней температуре наружного воздуха температура внутренней поверхности ограждения в зоне стыка не понижалась до температуры точки росы.

Температурное поле поверхности конструкции в зоне стыкового соединения всегда имеет аномалию при наличии перепада температур между внутренним и наружным воздухом. При рассмотрении распределения температур на поверхности стыка в отсутствие инфильтрации следует отметить, что оно является строго симметричным, так как определяется только параметрами теплопередачи отдельных материалов ограждения и геометрией конструкции стыка. А так как эти показатели симметричны, то и температурное поле, образованное только теплопередачей через ограждение без учета фильтрации воздуха через щель, так же симметрично.

Однако не всегда это условие соблюдается. В общем случае могут встретиться различные теплопроводные включения с несимметричной геометрией и параметрами теплопередачи. Кроме того, характер температурных аномалий также может сильно варьироваться, поэтому следует разделять при диагностике изменения температур поверхности, вызванные теплопроводными включениями, т.е. несимметричностью условий теплопередачи и инфильтрацией воздуха через щели.

Такое разделение может быть выполнено путем повторной съемки температурных полей при отсутствии фильтрации воздуха $G = 0$, т.е. при нулевом перепаде давлений и при определенной его величине, вызывающей появление фильтрации воздуха через щели.

Полученное распределение температур также свидетельствует о довольно резком понижении температуры около щели при усло-

вии инфильтрации холодного воздуха через нее. Следовательно, наиболее достоверное выявление дефектов герметизации по температурному полю на поверхности ограждения производится при встречном направлении фильтрующегося холодного воздуха через щель и теплового потока через материал ограждения, поэтому следует рекомендовать проведение контроля с внутренней стороны обогреваемого помещения и при создании условия разрежения воздуха в нем. Причем можно предположить, что обследования могут быть проведены не только в зимний период, когда имеет место естественный перепад температур между внутренним и наружным воздухом, а и в летний период, когда необходимый перепад температур может быть создан за счет дополнительного нагрева воздуха в помещении.

Анализ различных конструкций показывает, что выведенные соотношения для выбранной конструкции аналогичны и настоящие методические рекомендации применимы для большинства типов зданий.

Методика предназначена для оперативного выявления дефектов стыковых соединений панельных стен жилых зданий, приводящих к снижению теплозащитных качеств ограждающих конструкций и для использования строительными организациями при проведении выборочных ремонтов элементов ограждающих конструкций.

При проведении обследований по данной методике используется следующая аппаратура: тепловизор с чувствительностью не ниже $0,2-0,3^{\circ}\text{C}$; контактный термощуп (чувствительность не ниже $0,1^{\circ}\text{C}$); электронный влагомер типа ВСКМ-12; фотоаппарат; бинокль.

Кроме того, для удобства обследования и повышения точности измерений, желательно использовать подъемную кабину на автомобильном шасси при проведении обследований стыков на верхних этажах зданий.

Обследования должны проводиться при наличии перепада температур между внутренним и наружным воздухом не менее $20-25^{\circ}\text{C}$, т.е. при температуре наружного воздуха не выше $0-5^{\circ}\text{C}$.

Перед обследованием требуется получить следующую информацию об обследуемом объекте: чертежи стыковых соединений; план фасадов дома с ориентацией по сторонам света; данные по жалобам жильцов на увлажнение и промерзание участков ограждающих конструкций и т.п.

Перед проведением обследования следует произвести оценку минимальной величины дефекта, который может быть обнаружен при тепловизионной съемке температурных полей в зоне стыкового соединения. На основании решения уравнения одномерной теплопередачи получена следующая формула:

$$\frac{R_0 - R_{\partial}}{R_0 R_{\partial}} = \frac{\tau_{\partial} - \tau_0}{t_{\text{в}} - t_{\text{н}}} a_{\text{н}} = P, \quad (6.4)$$

где $\tau_0 - \tau_{\partial}$ — разность температур наружной поверхности между нормальными и дефектными участками стыкового соединения, $^{\circ}\text{C}$; $a_{\text{н}}$ — коэффициент теп-

площади наружной поверхности ограждающей конструкции, Вт/(м²·°С); R_0 – локальное значение сопротивления теплопередаче в зоне реперного стыка, м²·°С/Вт; R_d – локальное сопротивление теплопередаче в зоне дефектного стыка, м²·°С/Вт.

Формула (6.2) устанавливает связь между изменением сопротивления теплопередаче и температурной аномалией на поверхности стыка.

Если принять $\theta = \tau_d - \tau_0$ в качестве характеристики температурной чувствительности тепловизора и подставив ее в формулу (6.4), получим следующее условие обнаружения дефекта на обследуемом участке стыка при существующем перепаде температур:

$$P \geq \frac{\theta}{t_B - t_H} \rightarrow a_H. \quad (6.5)$$

При проведении обследований следует зафиксировать: дату и время проведения каждого этапа обследования; температуру атмосферного воздуха; скорость и направление ветра; отметить на схемах участки дефектных стен, выявленные по жалобам.

На первом этапе проводят тепловизионный осмотр стыковых соединений всех стен здания с расстояния, при котором в поле зрения тепловизора попадают 3–4 панели с прилегающими стыками. На этом этапе обследования на схему стены наносят температурные аномалии с указанием их размеров и величины отклонения температур.

Затем проводится более подробное тепловизионное обследование фрагментов стыковых соединений с выявленными температурными аномалиями. Обследование проводят либо с земли с использованием тепловизионного объектива с достаточно малым углом зрения, либо с использованием подъемного устройства. В местах температурных аномалий производят фотографирование термического изображения фрагмента с одновременным измерением температуры реперных точек. Для проведения сравнительного анализа необходимо также зафиксировать термические изображения участков стыков, примыкающих к квартирам с нормальными условиями.

На участках панелей, примыкающих к стыковым соединениям (на расстояниях 20–30 см от края стыка), следует провести измерение влагосодержания при помощи дельтметрического влагомера. Полученное поле влагосодержания материала панели в зоне дефектного стыка следует сравнивать с полем влагосодержания панелей в зоне реперных стыков.

По возможности следует проводить обследование в квартирах, примыкающих к стыкам с выявленными температурными аномалиями, и в квартирах с дискомфортными условиями внутренней среды. При этом фиксируется температура и влажность воздуха, а также температура приборов центрального отопления. Проводят тепловизионную съемку и измерение влагосодержания на участках конструкции, примыкающей к стыковым соединениям.

Сравнительную оценку теплозащитных качеств стыковых соединений стеновых панелей производят путем пересчета результатов

тепловизионных обследований. При этом определяется перепад температуры ΔT на поверхности дефектного и реперного участков стыка по формуле:

$$\Delta T = (\tau_0 - t_H) / (\tau_d - t_H). \quad (6.6)$$

Кроме того, рассчитывается отношение приращения тепловых потоков, обусловленных температурной аномалией в зоне стыка,

$$\Delta Q = (\bar{\tau}_0 - t_H) / (\bar{\tau}_d - t_H), \quad (6.7)$$

где $\bar{\tau}_d$ и $\bar{\tau}_0$ – среднеинтегральные температуры в зоне температурных аномалий дефектного и реперного стыков.

Величина интегральной температуры в зоне температурных аномалий определяется по формуле

$$\bar{\tau}_i = \int_{x_i}^{x_i^*} \tau_i(x_i) dx_i / (x_i^* - x_i). \quad (6.8)$$

Наряду с обработкой информации, получаемой при тепловизионных исследованиях с помощью ЭВМ, целесообразно во многих случаях использовать программированные калькуляторы, выпускаемые как отечественной промышленностью (БЗ-21, БЗ-34), так и зарубежными фирмами (НР-65, НР-67, НР-45). Несмотря на то, что возможности для обработки информации, представляемые калькуляторами несравненно меньше, чем ЭВМ, их применение целесообразно потому, что они имеют небольшие размеры, которые позволяют использовать при обследовании в полевых условиях. В настоящее время разработаны программы расчета характеристик дефектов по данным тепловизионной съемки для отечественного калькулятора БЗ-21.

Обследования проводились при помощи тепловизора АГА-720 с использованием термошупа и дельтметрического влагомера ВСКМ. Температура наружного воздуха в период обследования изменялась в пределах от -2° до 5° С, т.е. обследования проводились при перепадах температур, лежащих на границе допустимых значений. Для удобства жильцов проводилась тепловизионная съемка только наружных поверхностей ограждающих конструкций.

Во время обследований были выявлены дефекты стыковых соединений, вызывающие ухудшение теплозащитных качеств. Результаты обследований заносились на карту обследований и в дефектную ведомость, которые ведут в строительной лаборатории Каунасского РСУ, и в дальнейшем использовались при проведении ремонтов. До обследования ремонт ограждающих конструкций и стыковых соединений не проводился. Обследования проводились на основе тепловизионной съемки наружной поверхности ограждающих конструкций здания. Среди квартир, жильцы которых жаловались на дискомфортные условия внутренней среды, особо выделялись четыре



Рис.6.10. Термограмма фрагмента стены

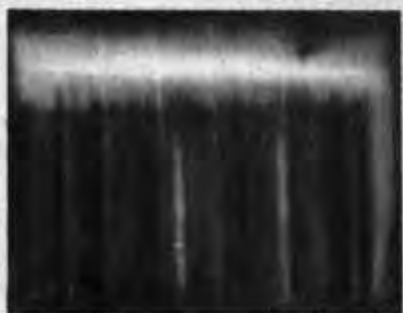


Рис.6.11. Термограмма внутренней поверхности участка ограждения производственного помещения

квартиры, примыкающие к северо-западному фасаду дома. Температура воздуха в этих квартирах составляла $16,5-18^{\circ}\text{C}$ при относительной влажности $74-78\%$. При проведении обзорной тепловизионной съемки фасада было обнаружено, что по виду тепловой картины вблизи стыков торцевую стену можно условно разделить на "дефектную" и "реперную" зоны. Термограммы отдельных фрагментов приведены на рис. 6.10. На термограмме показан фрагмент зоны стены, на которой температура стыковых соединений отличалась от температуры на глади панелей на $1,2-2^{\circ}\text{C}$. Причем часть зоны стены занимают стыки, примыкающие к квартирам с дискомфортными условиями внутренней среды.

В данном примере температура поверхности стыков ниже температуры панелей, что объясняется инфильтрацией наружного холодного воздуха через некачественно выполненные стыковые соединения.

По данным более подробной тепловизионной съемки, были получены термограммы отдельных участков стыковых соединений. При помощи термограмм стыковых соединений, полученных в крупном масштабе (использовался объектив с углом зрения 7°) был произведен расчет критериев: P — по формуле (6.4), ΔT — по формуле (6.6) и ΔQ — по формуле (6.7). Величина рассчитанных критериев для сравниваемых стыков, расположенных в "нормальной" и "дефектной" зонах, изменялась в следующих пределах $P = 1,4-2,5$, $\Delta T = 0,35-0,6$, $\Delta Q = 0,5-1,0$.

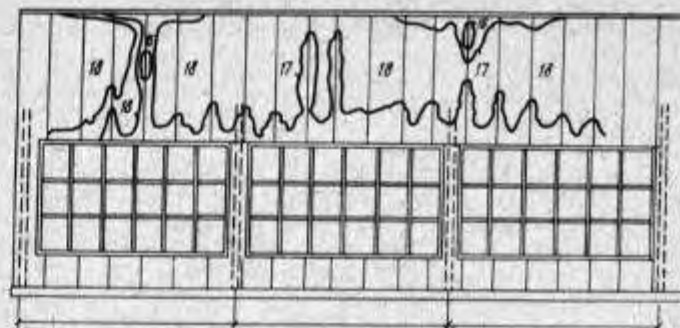


Рис.6.12. Схема температурного поля на внутренней поверхности ограждений производственного помещения

Сравнение критериев с результатами, полученными при вскрытии стыков, показало, что их значение коррелирует с количеством и размерами дефектов в стыке, причем при ухудшении состояния стыков (отслоения герметика, отсутствие утеплителя, повышение влажности материалов) значение критериев ΔT и ΔQ уменьшается, а значения критерия P возрастает.

Сравнение данных обследований, проведенных при помощи тепловизора (в том числе критериев P , ΔT и ΔQ) и дизъюнкметрического влагомера, с результатами, полученными при вскрытии стыков и при измерении температуры и влажности воздуха в обследуемых помещениях, позволяет сделать вывод о наличии корреляции между данными, получаемыми при помощи тепловизора, и теплозащитными свойствами стыков.

Относительное влагосодержание панелей в зоне стыков и на глади панелей определялось при помощи влагомера ВСКМ без его градуировки по робам на влажность. Разность в показаниях влагомера для нормальных "реперных" участков стыков и дефектных участков составляла $30-40\%$ шкалы прибора. В апреле 1983 г. производился частичный ремонт стыковых соединений стеновых панелей в этом доме. Во время ремонта были взяты пробы материала панели вблизи стыковых соединений и на глади панелей. Анализ образцов, проведенный в лаборатории РСУ, показал, что влажность образцов колеблется от $8-13\%$ вблизи "реперных" стыков, от $24-30\%$ вблизи "дефектных" стыков. Отмеченное совпадение результатов измерений влажности при помощи влагомера и разрушающим методом позволяет сделать заключение о возможности применения дизъюнкметрического влагомера для неразрушающего качественного контроля состояния стыковых соединений.

На рис.6.11 и 6.12 приведены термограмма и построенное на ее основе температурное поле на внутренней поверхности ограждений производственного здания, выполненных из легких конструкций типа "сэндвич". Температурное поле свидетельствует о недостаточном качестве герметизации стыковых соединений отдельных панелей.

6.5. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕРМОГРАФИИ ПРИ РЕСТАВРАЦИИ И РЕКОНСТРУКЦИИ ЗДАНИЙ И ПАМЯТНИКОВ АРХИТЕКТУРЫ

В ряде случаев при обследовании уникальных зданий и памятников архитектуры ставится задача определения состояния внутренних стен, через которые обеспечить стабильный тепловой поток не представляется возможным. При проведении реконструкции необходимо знать состояние этих конструкций, так как в них располагаются скрытые дымоходы, ниши, пустоты, которые при длительной эксплуатации зданий подвергались частой перестройке.

До настоящего времени выявление всех изменений проводилось на основе визуального осмотра, простукивания, опускания шаров в дымоходные и воздушные каналы и т.д. Безусловно работа эта трудоемка, дает субъективные результаты и требует больших затрат времени.

Проведенная работа позволила для выявления различных дефектов использовать тепловизионный метод исследований. На основе анализа температурного поля на поверхности ограждений, получаемого с помощью тепловизора, можно определить тепловое состояние ограждений, характер теплообмена с окружающей средой, а также различные неоднородности в них, приводящие к изменению теплового состояния.

Следует отметить, что выявление различных теплопроводных включений внутри конструкций на основе анализа температурного поля на их поверхности возможно только при наличии теплового потока через исследуемый участок. Тепловой поток может возникнуть при создании перепада температур, создаваемого условиями внешней среды, либо тепловым источником.

При обследовании кирпичных зданий следует сначала определить состояние наружных ограждений при наличии естественного перепада температуры между внутренним и наружным воздухом в отапливаемый период эксплуатации здания. Затем определить состояние внутренних перегородок зданий и наружных ограждений при отсутствии естественного перепада температур с использованием для создания теплового напора дополнительного источника тепла или холода.

В процессе исследований были выполнены следующие работы: определено влияние параметров теплопроводных включений на температурное поле поверхности конструкций в местах их расположения в зависимости от величины теплового воздействия;

проведен анализ возможности использования существующих методов измерения температуры на поверхности ограждений с помощью тепловизионных систем и произведена оценка погрешности этих измерений;

выполнены натурные исследования ограждений кирпичных зданий в Ленинграде, позволившие разработать практические рекомендации по применению тепловизионных систем для выявления дефектов в реставрируемых зданиях.

Рассмотрим первый случай, когда тепловой поток образуется за счет воздействия естественных условий внешней среды в отапли-

ваемый период эксплуатации зданий. Такой случай возникает при выявлении дымоходов и вентиляционных каналов во внутренних ограждениях отапливаемых зданий, когда температура воздуха в них ниже температуры воздуха в помещении. Создаваемый тепловой поток через толщу ограждения приводит к локальному изменению температуры на поверхности ограждения в месте расположения теплопроводного включения или воздушного канала.

Важно определить при каком максимальном перепаде температур их изменение на поверхности ограждений в местах теплопроводных включений будет достаточным для надежного выявления с помощью тепловизоров. При этом следует принимать во внимание величину термических сопротивлений ограждения и теплопроводного включения, а также температурную чувствительность тепловизора.

Для обнаружения теплопроводного включения необходимо зафиксировать разность температур на поверхности участков ограждения с теплопроводными включениями τ_d и без него τ . При этом эта разность температур должна быть больше чем минимальная разрешающая способность тепловизора по температуре $\Delta\tau$.

$$\tau - \tau_d > \Delta\tau.$$

Расчет распределения температур на поверхности ограждений в местах расположения вентилируемых воздушных каналов был выполнен по программе расчета двумерных стационарных температурных полей с помощью ЭВМ. При расчете не была учтена температурная зависимость теплофизических характеристик материалов. Полученные результаты показали, что понижение температуры воздуха в воздушном канале на 5 К по сравнению с температурой внутреннего воздуха в помещении приводит к температурному контрасту на поверхности около 1 К. Причем геометрический размер этой температурной аномалии составляет примерно три линейных размера выявленного воздушного канала, поэтому, если несколько каналов расположены достаточно близко, т.е. расстояние между ними меньше размеров самих каналов, то понижение температуры происходит непрерывно по ширине всей группы каналов. Следовательно, зная примерно размеры отдельного канала, можно по ширине температурной аномалии определить общее количество каналов.

Сложнее обстоит дело с обследованием состояния внутренних стен зданий, когда требуется искусственно создать условия для возникновения теплового потока. При этом из-за массивности кирпичных стен, имеющих большую величину тепловой инерции, требуется много времени (несколько десятков часов), чтобы тепловой поток через ограждение стал стабильным. Поэтому целесообразно проводить обследование в условиях нестационарного теплового потока. Например, во время резкого ступенчатого теплового одностороннего воздействия на конструкции, т.е. когда температура воздуха достаточно резко изменяется. Такие условия можно создать в зимнее время путем открытия окон в исследуемом помещении. При этом фрагмент ограждения с дымоходом имеет более высокую теплоотдачу, чем фрагмент без дымохода.

Здесь следует четко определить насколько должна быть понижена температура воздуха в помещении и сколько времени потребуется на это охлаждение, чтобы температура на поверхности ограждения имела достаточный для диагностики температурный контраст.

Для ответа на этот вопрос рассмотрим следующую физическую задачу. Представим конструкцию, как неограниченную пластину толщиной δ , на одной стороне которой ($x = 0$) происходит теплообмен по закону Ньютона, а на другой ($x = \delta$) поддерживается постоянная температура, равная температуре внутреннего воздуха.

Местонахождение воздушных пустот и металлических включений выявляют по разнице температуры поверхности в зоне включения (или пустоты) и температуры остальной части поверхности ограждения. При обследовании кирпичной кладки эту разницу можно рассчитать по формуле, связывающей глубину залегания объекта, его теплофизические характеристики, перепад температур и время нагрева или охлаждения конструкции, достаточное для обследования необходимой для измерения разницы температур на поверхности:

$$h \left(\operatorname{erfc} \left[\frac{(1-1/2Bi)/Fo}{\sqrt{t}} \right] - \operatorname{erfc} \left[\frac{(1-1/2Bi)/Fo}{\sqrt{t}} \right] \right) \geq \Delta\theta, \quad (6.9)$$

где h — параметр, характеризующий соотношение теплофизических параметров включения, для воздушных каналов $h = 1$; $\Delta\theta = \Delta t / (T_0 - T_c)$ — безразмерная разность температур на поверхности ограждения.

Для металлических включений h определяется по формуле:

$$h = \left(1 - \sqrt{\frac{\lambda_1 c_1 \rho_1}{\lambda_2 c_2 \rho_2}} \right) / \left(1 + \sqrt{\frac{\lambda_1 c_1 \rho_1}{\lambda_2 c_2 \rho_2}} \right), \quad (6.10)$$

где λ_1 ; c_1 ; ρ_1 ; λ_2 ; c_2 ; ρ_2 — теплофизические характеристики материала конструкции и включения; Bi , Fo — безразмерные параметры Био и Фурье; $\operatorname{erfc}(x) = 1 - \operatorname{erf}(x)$, $\operatorname{erf}(x)$ — функция ошибок Гауса; Δt — разрешающая способность тепловизора по температуре; T_c — начальная температура конструкции до охлаждения.

При наличии металлических включений, находящихся в 6 см от поверхности ограждения, контраст температур, достаточный для выявления включения, составляет $0,5^\circ\text{C}$, снижение температуры воздуха на 20°C достигается через 10–20 мин с момента ее понижения. При наличии металлических включений на глубине 10–15 см необходимый контраст возникает через 1 ч, при наличии воздушных пустот — через 30 мин. Таким образом, в конструкциях могут быть обнаружены деревянные или металлические балки перекрытий, вентилируемые и неventedлируемые воздушные каналы, участки обновленной кладки. Для облегчения расчетов по формуле (6,9) изменение величины безразмерной разности температур в зависимости от глубины залегания объекта и времени достижения этой разницы приведены в табл. 6.1.

Таблица 6.1. Изменение величины безразмерной разности температур в зависимости от глубины залегания объекта

Глубина залегания объекта, м	Время достижения измеряемого значения Δt , ч	Безразмерная разность температур $\Delta\theta$
0,06	0,25	0,38
	0,5	0,53
	1,0	0,66
0,12	0,25	0
	0,5	0
	1,0	0,02

6.6. ТЕПЛОВИЗИОННЫЙ КОНТРОЛЬ ПЛОСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ЗДАНИЙ В ЗАВОДСКИХ УСЛОВИЯХ

Организация контроля теплозащитных качеств элементов ограждающих конструкций зданий в заводских условиях диктуется необходимостью своевременного выявления и устранения различного рода дефектов теплозащиты, возникающих в процессе изготовления этих конструкций, до их отправки на строительные площадки. В настоящее время отсутствуют оперативные методы, позволяющие проводить контроль без нарушения ритма производства и отгрузки готовой продукции. В связи с этим нами были проведены исследования по оценке возможности использования в заводских условиях тепловизионного метода контроля теплозащитных качеств, нашедшего широкое применение в лабораторных и натуральных условиях испытаний как в нашей стране, так и за рубежом. При этом в отличие от традиционной постановки задачи, заключающейся в разработке метода контроля теплозащитных качеств в отдельной области панели, ставилась задача оценки равномерности распределения по всему телу панели и выявления отдельных тепловых дефектов теплозащиты с целью их последующего устранения путем своевременной корректировки технологического процесса изготовления.

За основу был принят разработанный ранее способ тепловой дефектоскопии изделий. В качестве примера практической реализации этого способа рассматривается контроль массивных крупноразмерных стеновых панелей (средний размер $6 \times 3 \times 0,3$ м), основанный на тепловом возбуждении контролируемого изделия посредством его нагревания или охлаждения и регистрации температурного поля поверхности тепловизионной системы. Тепловое возбуждение панелей достигается путем их нагрева в камере тепловлажной обработки (операция технологического процесса изготовления) и последующего охлаждения в воздушной среде цеха (воздушная среда большого объема). На основе предложенного способа может быть разработана методика тепловой дефектоскопии крупноразмерных элементов строительных ограждающих конструкций и оценки их неоднородности непосредственно в производственных условиях.

Однако для этого необходимо предварительно исследовать закономерности тепловизионного контроля крупноразмерных объектов, т.е. выяснить условия качественного выявления тепловых неоднородностей по тепловому изображению панели и особенности количественного восстановления температурного поля на ее поверхности.

Примем, что контролируемая панель является однослойной, ее охлаждение происходит при симметричных граничных условиях третьего рода, и тепловизионный контроль проводится с одной стороны панели. Для исключения влияния неравномерности начального прогрева, связанной со спецификой подачи тепловой энергии в камеры тепловлажностной обработки, выберем время контроля исходя из условий $Fo \geq 0,3$. Принятому значению числа Фурье для керамзитобетонных панелей соответствует время, равное 3–5 ч. Следовательно, началу проведения тепловизионного контроля должна предшествовать выдержка панелей в воздушной среде не менее приведенного времени, что можно считать достижимым в условиях заводского производства. Область панели, подверженную влиянию краевых эффектов, исключим из рассмотрения. Введем следующие ограничения:

температура окружающей воздушной среды является величиной постоянной, $T_c = \text{const}$;

источники фонового излучения являются диффузными, статистическими абсолютно черными излучателями с яркостной температурой T_ϕ ;

направление наблюдения панели совпадает с направлением нормали к ее поверхности;

излучение поверхности панели в направлениях, близких к нормали, подчиняется закону Ламберта.

Проведем аппроксимацию градуировочной кривой тепловизионной системы экспоненциальной функцией. Тогда с учетом принятых ограничений и уравнения радиационного теплообмена "серого тела" для элементарного выходного сигнала тепловизионной системы $L_i(T_i, \epsilon_i)$ в области применимости закона Вина будет справедлива следующая формула:

$$L_i(T_i, \epsilon_i) = \epsilon_i A \exp\left(\frac{-B}{T_i}\right) + (1 - \epsilon_i) A \exp\left(\frac{-B}{T_\phi}\right), \quad (6.11)$$

где T_i – абсолютная температура элементарной площадки; ϵ_i – излучательная способность поверхности панели, включающей рассматриваемую площадку; A, B – градуировочные постоянные тепловизионной системы; i – индекс элементарной площадки.

Рассмотрим следующие наиболее часто встречающиеся в практике случаи.

Случай 1. Излучательная способность поверхности постоянна и определена. Примем в качестве модели дефектной конструкции однородную изотропную пластину со сквозным цилиндрическим дефектом, имеющим радиус r , значительно превышающий толщину пластины $2R$. В областях одномерного температурного поля выберем две элементарные площадки, одна из которых (1) расположена

на поверхности дефектного участка, а другая (2) – на участке основного материала.

Математическим описанием модели в области элементарных площадок является соотношение:

$$(T - T_c) / (T_0 - T_c) = P_1(Bi) \exp(-\mu_1^2 Fo), \quad (6.12)$$

где T – абсолютная температура поверхности в момент времени; T_0 – абсолютная температура пластины в момент $\tau=0$; $P_1(Bi)$ – амплитуда температурного поля на поверхности пластины для регуляризованного процесса теплообмена; μ – первый корень характеристического уравнения $\mu/Bi = \text{ctg}\mu$; Bi – критерий Био; Fo – число Фурье.

С учетом формул (6.9) и (6.10) зависимость выходного сигнала тепловизионной системы от элементарной площадки дефектного участка $L(T_1, \epsilon)$ и основного материала $L(T_2, \epsilon)$ можно записать:

$$L(T_1, \epsilon) = \epsilon A \exp[-B/(T_0 - T_c) P(Bi_1) \exp(-\mu_1^2 Fo_1) + T_c] + (1 - \epsilon) A \exp(-B/T_\phi), \quad (6.13)$$

$$L(T_2, \epsilon) = \epsilon A \exp[-B/(T_0 - T_c) P(Bi_2) \exp(-\mu_2^2 Fo_2) + T_c] + (1 - \epsilon) A \exp(-B/T_\phi), \quad (6.14)$$

Условием выявления дефекта на тепловом изображении является неравенство $L(T_1, \epsilon) \neq L(T_2, \epsilon)$. Предположим, что $L(T_1, \epsilon) = L(T_2, \epsilon)$. В этом случае после несложных преобразований получим

$$\tau = \frac{[\ln P(Bi_1) - \ln P(Bi_2)] R^2}{a_1 \mu_1^2 - a_2 \mu_2^2}, \quad (6.15)$$

где a_1, a_2 – теплопроводность материала в области дефекта и основного материала.

При нестационарном теплообмене панели в определенный момент времени τ температурное поле на поверхности не отражает внутренней структуры ее материала и тепловой дефект на тепловом изображении неразличим в сравнении с бездефектными участками (основной материал). Этот вывод подтверждается также результатами математического моделирования, проведенного для рассмотренной модели и для модели с цилиндрическими дефектами различной толщины при их перемещении по толщине пластины (двухслойный и трехслойный цилиндр в области дефекта). Решение указанной задачи было реализовано в цилиндрической системе координат методом конечных разностей по программе расчета двумерных осесимметричных нестационарных полей на ЭВМ М4030.

При проведении тепловизионного контроля количество дефектных областей, их размеры и расположение в теле панели заранее неизвестны и поэтому оценить закономерности изменения темпера-

турного поля на поверхности, а также время τ , при котором дефекты неразличимы, не представляется возможным. В связи с этим для повышения качества контроля сравнение тепловых изображений охлаждающейся панели необходимо проводить два раза через определенный промежуток времени.

В рассматриваемом случае теплового контроля керамзитобетонных панелей величина интервала времени между двумя последовательными съемками тепловых изображений панели с типичными дефектами теплоизоляции, проводимыми тепловизионной системой, с чувствительностью $0,1^{\circ}\text{C}$ составляет в среднем 1–2 ч.

Для количественной оценки температурного поля на поверхности панели может быть использован относительный метод, согласно которому при помощи устройства управления тепловизионной системы регистрируется излучение в интересующих участках поверхности L_i и при помощи контактных средств измерения действительная температура T_p в одном из таких участках ("реперная точка"). Тогда, согласно принятой аппроксимации градуировочной кривой (6.11), неизвестная температура i -го участка может быть определена по формуле:

$$T_i = -B / \ln \left[\frac{L_i L_p}{\epsilon A} + \exp \left(\frac{-B}{T_p} \right) \right], \quad (6.16)$$

где L_p – излучение от участка с температурой T_p .

Случай 2. Излучательная способность поверхности постоянная и неопределенная. Условия качественного выявления дефектов в этом случае не отличаются от изложенных выше. Для количественной оценки температурного поля необходимо предварительно определить излучательную способность поверхности. Для этого предположим, что в момент τ' температура некоторой площадки на поверхности панели равняется T_p' , а в момент τ'' – T_p'' . Будем считать, что в рассматриваемом интервале температур $T_p' - T_p''$ излучательная способность не зависит от температуры, т.е.

$$\frac{\partial \epsilon(T)}{\partial T} / T_p'' < T < T_p' = 0 \quad \text{и} \quad \epsilon(T) = \epsilon.$$

Определяя выходной сигнал тепловизионной системы от рассматриваемой площадки в моменты τ' и τ'' , согласно соотношениям (6.9), и решая совместно два уравнения относительно неизвестной величины ϵ , получим:

$$\epsilon = (L_p' - L_p'') / A \exp \left(\frac{-B}{T_p'} \right) - \exp \left(\frac{-B}{T_p''} \right), \quad (6.17)$$

где L_p', L_p'' – излучение от площадки на поверхности панели в моменты τ' и τ'' .

Следовательно, для определения излучательной способности поверхности ϵ необходимо 2 раза с интервалом времени τ' и τ'' при помощи контактных средств измерить истинную температуру рассмат-

риваемой площадки T_p' и T_p'' и при помощи устройств управления тепловизионной системы соответствующую ей величину выходного сигнала L_p' и L_p'' .

Решение задачи оценки температурного поля при рассчитанном значении излучательной способности не отличается от рассмотренного ранее и неизвестные температуры могут быть определены по формуле (6.16). При этом, в качестве L_p и T_p используются L_p' и T_p' при оценке температурного поля в момент τ' и L_p'' и T_p'' при оценке температурного поля в момент τ'' .

Случай 3. Излучательная способность определена и имеет неравномерное распределение на поверхности. Качественное выявление дефектов по тепловому изображению панели в пределах участков с постоянной излучательной способностью проводится аналогично случаю 1. Сравним между собой области панели, поверхности которых имеют постоянную, но различную излучательную способность. Для этого определим выходной сигнал тепловизионной системы от участков поверхности с различной излучательной способностью.

Проведя несложные преобразования, получим

$$\begin{aligned} \frac{L_1}{\epsilon_1} - \frac{L_2}{\epsilon_2} = A \exp \left(\frac{-B}{T_\Phi} \right) \left[\left(\frac{1-\epsilon_1}{\epsilon_1} \right) - \left(\frac{1-\epsilon_2}{\epsilon_2} \right) \right] + \\ + A \left[\exp \left(\frac{-B}{T_1} \right) - \exp \left(\frac{-B}{T_2} \right) \right], \end{aligned} \quad (6.18)$$

где 1 и 2 – индексы, соответствующие участкам поверхности с различной излучательной способностью.

Предположим, что тепловой дефект отсутствует, т.е. $T_1 = T_2$ и момент равенства температур не совпадает с моментом, определенным по формуле (6.15). Тогда

$$\left(\frac{L_1}{\epsilon_1} - \frac{L_2}{\epsilon_2} \right) = \text{const} \quad \text{и} \quad \partial \left(\frac{L_1}{\epsilon_1} - \frac{L_2}{\epsilon_2} \right) / \partial \tau = 0.$$

В противном случае, согласно (6.10), $\partial \left(\frac{L_1}{\epsilon_1} - \frac{L_2}{\epsilon_2} \right) / \partial \tau = f(\tau)$.

Следовательно, для качественного выявления тепловых дефектов необходимо проводить сравнение тепловых изображений поверхности охлаждающейся панели и тепловых изображений отдельных участков поверхности с различной излучательной способностью между собой 2 раза с определенным интервалом времени.

Для количественной оценки температурного поля может быть использована формула (6.16). Однако область ее применения ограничивается участками поверхности с постоянной излучательной способностью.

Выберем на поверхности панели две площадки, одна из которых расположена на участке с излучательной способностью ϵ_p , а другая с ϵ_i . Пусть первая площадка имеет температуру T_p и ей соответ-

вует величина выходного сигнала L_p , а вторая площадка — температуру T_i и соответствующий сигнал L_i . Определяя величину выходного сигнала тепловизионной системы от рассматриваемых площадок, согласно соотношению (6.11), и решая исходные уравнения относительно неизвестной температуры T_i , получим:

$$T_i = -B/\ln \left\{ \frac{1}{\epsilon_i A (1 - \epsilon_p)} [(1 - \epsilon_p)L_i - (1 - \epsilon_i)L_p + \epsilon_p (1 - \epsilon_i) A \exp(\frac{-B}{T_p})] \right\}. \quad (6.19)$$

Эта формула позволяет оценивать температурное поле при наличии одной реперной точки на произвольно выбранном участке поверхности панели.

Случай 4. Излучательная способность неопределена и имеет неравномерное распределение по поверхности. Примем математическую модель дефектной панели, аналогичную изложенной в случае 1. Дополнительно предположим, что излучательная способность поверхностей дефектного участка и основного материала различная, т.е. $\epsilon_1 \neq \epsilon_2$. Тогда, согласно (6.11), для выходного сигнала тепловизионной системы от элементарной площадки дефектного участка $L(T_1, \epsilon_1)$ и основного материала $L(T_2, \epsilon_2)$ будут справедливы следующие соотношения:

$$L(T_1, \epsilon_1) = L(T_\Phi) [(1 - \epsilon_1) + \epsilon_1 \exp(B/T_\Phi - B/T_1)], \quad (6.20)$$

$$L(T_2, \epsilon_2) = L(T_\Phi) [(1 - \epsilon_2) + \epsilon_2 \exp(B/T_\Phi - B/T_2)], \quad (6.21)$$

где $L(T_\Phi)$ — выходной сигнал тепловизионной системы, обусловленной влиянием фонового излучения.

Предположим, что $L(T_1, \epsilon_1) = L(T_2, \epsilon_2)$ и определим условия такого равенства. Для этого разложим $\exp(B/T_\Phi - B/T)$ в ряд по степеням $(B/T_\Phi - B/T)$ и ограничимся двумя первыми членами ряда. После проведения несложных преобразований получим, что тепловой дефект на тепловом изображении неразличим, если

$$\epsilon_1 \frac{(T_1 - T_\Phi)}{T_1} = \epsilon_2 \frac{(T_2 - T_\Phi)}{T_2}. \quad (6.22)$$

Заменим температуры T_1 и T_2 их аналитическими выражениями, согласно формуле (6.12). После перегруппировки членов в выражении (6.22) получаем формулу:

$$\frac{\epsilon_1 (T_0 - T_c) P(Bi_1) \exp(-\mu_1^2 Fo_1) + T_c - T_\Phi}{\epsilon_2 (T_0 - T_c) P(Bi_2) \exp(-\mu_2^2 Fo_2) + T_c - T_2} =$$

$$= \frac{(T_0 - T_c) P(Bi_1) \exp(-\mu_1^2 Fo_1) + T_c}{(T_0 - T_c) P(Bi_2) \exp(-\mu_2^2 Fo_2) + T_c}. \quad (6.23)$$

Если $(T - T_c) \rightarrow 0$, то правая часть равенства (6.23) будет близка к единице, тогда τ будет равна:

$$\tau = \frac{[\ln \epsilon_1 P(Bi_1) + \ln \epsilon_2 P(Bi_2)] R^2}{a_1 \mu_1^2 - a_2 \mu_2^2}. \quad (6.24)$$

Таким образом, в момент времени τ тепловой контраст между дефектом и основным материалом равен нулю и дефект на тепловом изображении не выявляется. В этом случае для 100%-го выявления тепловых аналогий на изображении панели необходимо проводить сопоставление термограмм, полученных после двух замеров через определенный интервал времени. Однако выявление тепловых аномалий, согласно (6.24), может быть обусловлено как влиянием температурных аномалий, так и неравномерным распределением излучательной способности на поверхности панели. Следовательно, качественное выявление тепловых дефектов по тепловому изображению в общем случае невозможно.

Для количественной оценки температурного поля на поверхности панели необходимо определить излучательную способность на отдельных участках, обуславливающих тепловые аномалии на изображении. С этой целью может быть использована формула (6.17). Последующий расчет температурного поля проводится по формулам (6.16) или (6.19).

Исходя из метрологических характеристик тепловизионной системы ограничим область применения условий, рассмотренных в случаях 1–4. Для этого проведем дифференцирование выражения (6.11) по T и ϵ . Переходя к конечным приращениям, соответственно получим:

$$\Delta L(T) = \Delta T \epsilon A \frac{B}{T^2} \exp(\frac{-B}{T}); \quad (6.25)$$

$$\Delta L(\epsilon) = \Delta \epsilon A [\exp(\frac{-B}{T}) - \exp(\frac{-B}{T_\Phi})], \quad (6.26)$$

где $\Delta L(T)$ — приращение выходного сигнала, обусловленное приращением ΔT ; $\Delta L(\epsilon)$ — приращение выходного сигнала, обусловленное приращением $\Delta \epsilon$.

Введем коэффициент относительного изменения выходного сигнала K , определив его по формуле:

$$K = \Delta L(T) / \Delta L(\epsilon) = (\Delta T / \Delta \epsilon) \langle \epsilon B / T^2 [1 - \exp(B/T - B/T_\Phi)] \rangle, \quad (6.27)$$

где $\epsilon B / T^2 [1 - \exp(B/T - B/T_\Phi)] \rangle = K_T / K_\epsilon$ — относительное разрешение тепловизионной системы, равное отношению разрешения системы по температуре R_T к ее разрешению по излучательной способности R_ϵ .

Из (6.27) следует, что на тепловом изображении панели дефект не вызывает теплового контраста в случае, когда $\Delta L(T) = \Delta L(\epsilon)$ или $K = 1$. Если $K > 1$, то тепловой контраст на изображении будет обусловлен температурным контрастом на поверхности, если $K < 1$ — то изменением излучательной способности по поверхности.

Влияние конкретных условий теплового контроля на относительную чувствительность тепловизионной системы зависит от конструктивных параметров самой системы (значение градуировочного коэффициента B) и определяется средними значениями температуры поверхности T и излучательной способности ϵ , а также значением яркостной температуры сторонних источников излучения $T_{\text{ф}}$.

Анализ рассмотренных условий был проведен на следующем практическом примере, типичном при заводском контроле однослойных панелей толщиной 0,3 м. Средняя температура поверхности панели при достижении регулярного решения теплообмена составляет $t = 40^\circ\text{C}$ и средняя по поверхности излучательная способность $\epsilon = 0,75$. Яркостная температура источников фонового излучения равняется $T_{\text{ф}} = 293\text{ K}$ и близка к температуре окружающей воздушной среды. Данным условиям контроля соответствует относительная чувствительность тепловизионной системы АГА-780 с объективом $7 \times 7^\circ$ и $R_T/R_\epsilon = 0,48 \times 10^{-1}$. Так как тепловые дефекты в

однослойных панелях вызваны в основном отклонениями технологического режима от проектного (неравномерность распределения плотности бетона, образующаяся при формировании панели; неоднородность бетонной смеси, обусловленная недостаточно качественным ее перемешиванием при приготовлении; скрытые и явные трещины по телу бетона, вызванные усадочными явлениями, и др.), то резкое отличие теплофизических характеристик в различных областях панели, как правило, отсутствует и максимальный температурный контраст на поверхности, определяемый по горизонтали, не превышает $2,5\text{--}3^\circ\text{C}$. Согласно формуле (6.27), коэффициент относительного изменения выходного сигнала для приведенных условий может быть записан в виде:

$$K = \frac{3,0}{\Delta\epsilon} 0,48 \cdot 10^{-1}. \quad (6.28)$$

Отсюда следует, что при колебаниях излучательной способности по поверхности, превышающих 0,14, коэффициент $K < 1$ и проведение качественной тепловой дефектоскопии по тепловому изображению панели не представляется возможным. В реальных условиях средняя величина излучательной способности поверхности панели в спектральном диапазоне работы тепловизионной системы близка к 0,75 и ее колебания за счет неоднородности поверхностного слоя и его фактуры, шероховатости, увлажнения, наличия масляных пятен и др. могут быть равны $\pm 0,15$. Следовательно, в большинстве случаев следует рассматривать условия, изложенные в случае 4. Однако участки поверхности с пониженной или повышенной излучательной способностью, при ее существенных отклонениях, часто

могут быть обнаружены визуально и учтены на фиксируемом тепловом изображении. При анализе удобно применять упрощенные модели, приведенные в случаях 1–3.

Глава 7. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЛИЧЕСТВЕННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ КАЧЕСТВ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ЗДАНИЙ

Определение теплотехнических характеристик ограждающих конструкций в эксплуатируемых зданиях и сооружениях методом тепловизионного контроля дает возможность своевременно выявить скрытые дефекты, являющиеся причиной понижения теплозащитных качеств ограждающих конструкций.

Главным достоинством тепловизионного метода контроля является его высокая оперативность и возможность обнаружения скрытых дефектов.

На первых этапах применения тепловизионной техники как за рубежом, так и в наших исследованиях, первостепенное внимание уделялось получению по термограммам качественных характеристик ограждений и распознаванию видов различных теплопроводных включений. По мере накопления опыта удалось осуществить постепенный переход к получению количественных характеристик теплозащитных качеств ограждающих конструкций, что неизмеримо повысило значение тепловизионных обследований. Заметим, что в зарубежных исследованиях до сих пор преобладают направления, связанные с использованием тепловизионной аппаратуры в строительной теплотехнике для качественной оценки ограждений (международный стандарт ИСО, разработанный специалистами Швеции).

Одной из проблем является разработка методов контроля теплозащитных качеств стыковых соединений и выявления различного рода дефектов в них, приводящих к ухудшению их теплозащитных качеств. Своевременное выявление и устранение этих дефектов позволит снизить теплопотери в зданиях, увеличить уровень комфортности, повысить долговечность ограждающих конструкций. Одним из основных факторов, влияющих на снижение теплозащитных качеств стыковых соединений, является их повышенная воздухопроницаемость.

На основе проведенных в НИИСФ исследований разработана в 1980–1982 гг. методика определения теплозащитных качеств ограждающих конструкций, в которой впервые показаны приемы определения при дешифровке термограмм одной из главнейших теплотехнических характеристик — сопротивления теплопередаче. Этот метод может быть отнесен к числу научных достижений в области применения тепловизионной аппаратуры для определения теплозащитных качеств ограждающих конструкций. Метод определения по термограммам температуры обследуемой поверхности, в том числе при определении точки росы, был также впервые разработан в НИИСФ.

Указанная методика широко используется ныне в тепловизионных обследованиях состояния ограждений жилых и промышленных зданий, а также, например, сооружений тепловых электростанций.

В 1983 г. было намечено подготовить рекомендации по применению тепловизора для комплексной, в том числе количественной оценки, теплозащитных качеств ограждающих конструкций заводского изготовления и зданий в целом. Определение состояния теплозащитных качеств ограждающих конструкций зданий проводилось по методике оперативного тепловизионного контроля. При количественной оценке теплозащитных качеств ограждающих конструкций зданий с использованием тепловизоров, как основного средства контроля, была использована теоретическая оценка сопротивления теплопередаче и минимальных температур на внутренней поверхности ограждений в расчетных условиях по результатам непродолжительных по времени натурных обследований зданий в условиях нестационарного теплообмена с окружающей средой.

Для оценки состояния теплозащиты здания в целом было разработано два способа.

Первый — это выборочное исследование отдельных ограждений в характерных частях зданий: верхних, средних и нижних этажах для различных фасадов с последующим обобщением результатов на все здание в целом.

Второй — это сравнение двух однотипных зданий, находящихся в одинаковых условиях теплообмена с окружающей средой.

Следует отметить, что оба пути позволяют получить относительную оценку. Их применение на практике зависит от целей и задач проводимых обследований. Первый способ более подходит при оценке конструктивных решений здания, а второй — при оценке величины теплопотерь в здании.

Теоретической основой при изучении влияния фильтрации воздуха на теплозащитные качества стыковых соединений (СтС) являются решения систем уравнений тепло- и воздухопереноса для СтС. Граничными условиями для решений этих уравнений могут являться перепады давлений и температуры воздуха по обе стороны ограждения, а также температурные поля на поверхности стыков и участков ограждающих конструкций зданий (ОКЗ), примыкающих к СтС. Если измерение перепадов давления и температур воздуха является достаточно простым, то измерение температурных полей поверхности представляет собой более трудную задачу. Эти трудности значительно возрастают при проведении измерений температуры в районе СтС, где температурные поля поверхности характеризуются сложной формой и большими градиентами. С помощью тепловидения можно достаточно точно измерять эти температурные поля.

В настоящее время контроль теплозащитных качеств СтС проводится редко, что объясняется большой трудоемкостью и неоперативностью используемых для этих целей контактных методов и средств. Применение тепловизора позволит организовать оперативный контроль теплозащитных свойств СтС.

Основной задачей проведенных исследований было нахождение

математической модели процесса теплопередачи, с помощью которой можно было бы с достаточной степенью приближения установить взаимосвязь температурного поля на поверхности ограждения в районе стыка, фиксируемого тепловизором, и параметров, характеризующих качества теплоизоляционных свойств стыков. Все методы решения этой задачи можно свести к двум методам — численным и экспериментальным. Анализируя численные методы расчета теплопередачи через стыки, следует отметить, что они достаточно точно отражают реальные процессы теплопередачи и в результате дают значения температур на поверхности ограждений и тепловых потоков с достаточно высокой степенью точности. Однако для их использования требуется подробная и точная информация о краевых условиях теплообмена и геометрии исследуемого стыка. Кроме того, эти методы не позволяют оценить состояние теплозащитных свойств ограждений в реальных условиях.

Существующие экспериментальные методы исследования стыковых соединений основаны на непосредственном измерении расхода воздуха, проходящего через стыковые соединения. Для этого необходим доступ к исследуемым стыкам, поэтому в основном производят выборочный контроль, что исключает выявление и оценку различного рода дефектов в стыковых соединениях всего здания в целом.

Результаты расчетов по указанным методам, приведенные в различных работах, имеют значительные расхождения, что может быть связано с различиями конструкций стыков и условий их исследования. Неоднозначность результатов может быть вызвана и расхождением в самих методических решениях.

7.1. ОПЕРАТИВНЫЙ МЕТОД СРАВНИТЕЛЬНОЙ ОЦЕНКИ ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ КАЧЕСТВ ОГРАЖДЕНИЙ ЗДАНИЙ В РЕАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ

Тепловизионный метод оценки теплозащитных качеств зданий и сооружений в последние годы получил широкое применение в зарубежной и отечественной практике теплофизических исследований. В основном тепловизоры применяют в строительстве для выявления скрытых дефектов теплоизоляции, которые на термограммах выглядят в виде резко контрастных аномальных участков, свидетельствующих о наличии перепадов температур на исследуемых участках ограждающих конструкций. Имеются сведения о разработке количественных методов термографирования при съемке объектов с воздуха. В строительстве при теплотехнической дефектоскопии ограждений эксплуатируемых зданий и сооружений известен метод шведских специалистов, в основу которого положено сравнение отснятых термограмм с эталонными, полученными при съемке в климатических камерах фрагментов типовых конструкций с искусственно созданными дефектами теплоизоляции. Такой метод позволяет приблизительно определить вид дефекта, площадь и место его расположения в конструкции, но не дает возможности оценить количест-

венно на сколько снижается термическое сопротивление ограждения. Кроме того, при съемках фрагментов в климатических камерах, как правило, соблюдается стационарный режим теплообмена, что большей частью не соответствует условиям термографирования при реальных обследованиях объектов.

В НИИСФ разработан метод, который позволяет оценить в количественном отношении изменения сопротивления теплопередаче при нестационарном режиме теплообмена обследуемого в натуре ограждения. Суть этого метода состоит в следующем. На основе дешифровки термограмм натуральных обследований вычисляют значения условного сопротивления теплопередаче участками ограждений \bar{R}_0 , тогда погрешность измерений за счет нестационарного процесса теплообмена δ_R может быть определена:

$$\delta_R = (\bar{R}_0 - R_0) / R_0, \quad (7.1)$$

где R — истинное значение сопротивления теплопередаче того же участка ограждения.

Из (7.1) следует, что

$$\bar{R}_0 = (1 + \delta_R) R_0. \quad (7.2)$$

Для исследования свойств погрешности δ_R были смоделированы различные варианты натуральных наблюдений при помощи ЭВМ. Исходными данными для моделей служили изменения температур внутреннего и наружного воздуха, а также коэффициентов теплообмена во времени, наблюдавшиеся в реальных условиях. По программе рассчитано изменение температуры внутренней поверхности ограждения во времени, для чего использовалась неявная двухслойная шеститочечная схема.

Имитация натуральных наблюдений проводилась для трех вариантов трехслойного ограждения, из керамзитобетона (50 мм), слоя минеральной ваты (100 мм) и деревянного щита (20 мм). Варианты ограждения различались теплопроводностью слоя утеплителя (0,08; 0,1; 0,12 Вт/(м·°C) для первого, второго и третьего вариантов соответственно. В первом варианте теплопроводность минеральной ваты соответствовала ее нормальному значению для плотности 200 кг/м³. Во втором и третьем вариантах теплопроводность соответствовала различным дефектам утеплителя. Термическое сопротивление ограждения при этом составляло 1,42; 1,17 и 1,00 м²·°C/Вт. Так как источником погрешности является изменение температур внутреннего и наружного воздуха во времени, то эту погрешность следует классифицировать как систематическую.

Расчет систематической погрешности для трех вариантов ограждения показал, что ее значения изменяются во времени относительно центра распределения приблизительно симметрично и отклонения отдельных значений достигают 50%. Однако эти вариации сопротивления теплопередаче оказывают незначительное влияние на относительное изменение указанной погрешности во времени. Отсюда следует, что для двух участков ограждения с различными величинами

сопротивления теплопередаче, находящихся при одинаковом нестационарном тепловом воздействии, величины этой погрешности имеют близкие значения, а следовательно, отношение приближенных оценок сопротивлений теплопередаче этих участков, полученных одновременно, равно отношению истинных сопротивлений теплопередаче

$$R_0^{(1)} / \bar{R}_0^{(2)} = R_0^{(1)} (1 + \delta_R) / (R_0^{(2)} (1 + \delta_R)) = R_0^{(1)} / R_0^{(2)}. \quad (7.3)$$

Результаты статистической обработки полученных данных приведены в табл. 7.1.

Т а б л и ц а 7.1. Результаты статистической обработки расчетных отношений приближенных значений сопротивлений теплопередаче различных участков ограждений

Статистический показатель	$\bar{R}_0^{(2)} / R_0^{(1)}$	$\bar{R}_0^{(3)} / R_0^{(1)}$
Среднее значение	0,85	0,75
Дисперсия экспериментальных данных	0,038	0,030
Коэффициент вариации	0,045	0,04
Доверительный интервал при вероятностной обеспеченности 0,95	0,85 ± 0,08 9%	0,75 ± 0,06 8%

Проведенные вычисления показывают, что отношение приближенных оценок сопротивления теплопередаче сохраняет свою величину с достаточной точностью независимо от момента измерений. Следовательно, эта величина может быть использована в качестве относительной оценки снижения теплозащитных качеств отдельных участков ограждающих конструкций зданий. Аналогичным образом может быть введена оценка относительного уровня теплопотерь отдельных участков ограждения, основанная на использовании однократных измерений температуры на их поверхностях.

Рассмотрим два участка ограждения. Плотности тепловых потоков q_1 и q_2 на этих участках определяются следующими зависимостями:

$$q_1 = a_1 (t_1 - \tau_1); \quad (7.4)$$

$$q_2 = a_2 (t_2 - \tau_2), \quad (7.5)$$

где a_1 ; a_2 — коэффициенты теплоотдачи поверхности участков ограждения; t_1 ; t_2 — температура воздуха около поверхности ограждений; τ_1 ; τ_2 — температура поверхности участков ограждений.

Допустим, что проводятся исследования наружной поверхности ограждений и выбранные участки имеют одинаковую ориентацию, то можно считать, что $a_1 = a_2$ и $t_1 = t_2 = t_n$, тогда, разделив (7.4) на (7.5), получаем:

$$q_1 / q_2 = (t_n - \tau_1) / (t_n - \tau_2). \quad (7.6)$$

Это отношение также может быть использовано при оперативных тепловизионных обследованиях зданий в реальных условиях. Предложенная методика оценки относительного снижения теплозащитных качеств ограждающих конструкций рассчитана на проведение оперативных массовых тепловизионных обследований зданий и сооружений различного назначения. Отличительной особенностью методики является то, что для анализа используются данные одно-разовых тепловизионных измерений температурных полей на поверхности ограждающих конструкций. Методика проверена при проведении зимних обследований объемного блочного дома усадебного типа производства Калининского экспериментального сельского строительного комбината. Тепловизионные обследования проводились одновременно с многосуточными теплофизическими испытаниями согласно отраслевому стандарту. Для сравнения были выбраны два участка ограждений с нормальной (1-й) и нарушенной (2-й) теплоизоляцией. Эти участки определены на основе предварительной тепловизионной съемки температурных полей на их поверхности. На основе многосуточных измерений были определены истинные значения сопротивлений теплопередаче этих участков $R_0^{(1)} = 1,72$; $R_0^{(2)} = 1,00 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$, а их отношение равно $\bar{R}_0^{(2)}/\bar{R}_0^{(1)} = 0,58$. В табл. 7.2 для различных моментов времени приведены результаты теплоизоляционных измерений приближенных значений этих величин соответственно $\bar{R}_0^{(1)}$ и $\bar{R}_0^{(2)}$, их отношения $\bar{R}_0^{(2)}/\bar{R}_0^{(1)}$ и температуры наружного воздуха t_H .

Таблица 7.2. Отношения приближенных оценок сопротивлений теплопередаче для равных моментов тепловизионных обследований экспериментальных панелей в течение суток

Время суток, ч	Приближенная оценка сопротивления теплопередаче		Отношение $\bar{R}_0^{(2)}/\bar{R}_0^{(1)}$	Температура наружного воздуха $t_H, \text{°C}$
	$\bar{R}_0^{(1)}$	$\bar{R}_0^{(2)}$		
0	2,26	1,03	0,46	-15,3
3	2,59	1,22	0,47	-18,8
6	1,99	0,89	0,50	-17,7
9	2,13	1,09	0,50	-20,6
12	1,35	0,70	0,52	-10,5
15	0,93	0,57	0,61	-2,4
18	1,70	1,17	0,69	-8,3
21	2,00	1,08	0,54	-15,8

Для примера даны одни сутки, когда колебания наружного воздуха имели наибольшие значения от $-2,4^{\circ}$ до $-20,6^{\circ}\text{C}$.

Отдельные значения приближенных оценок сопротивлений теплопередаче в этот день для первого участка имели колебания в пределах от 0,93 до 2,59, а для второго — от 0,57 до 1,22, что составляет от среднего значения более 50%. В то же время отклонения отношения этих величин от среднего значения в самый неблагоприятный мо-

мент времени составляет менее 15%. При этом отношении этих оценок для других участков ограждений для тех же моментов времени имеют отклонения от средних значений с тем же знаком и приблизительно на ту же относительную величину.

Проведенные экспериментальные исследования подтвердили основные положения методики. В зависимости от колебаний температуры наружного воздуха приближенные оценки сопротивлений теплопередаче отдельных участков ограждений имеют существенные отклонения от истинных значений. Отношения этих величин имеют незначительные колебания по сравнению со средними их значениями и могут быть использованы для относительной оценки снижения теплозащитных качеств отдельных участков ограждений или ограждения в целом.

7.2. КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ КАЧЕСТВ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ

Главной задачей при разработке методики количественной оценки теплозащитных свойств являются определение и учет систематической погрешности, вызванной отсутствием в реальных условиях как стационарного, так и квазистационарного режимов теплопроводности. При использовании известной формулы для оценки сопротивления теплопередаче вместо истинного значения R_0 будет рассчитана некоторая другая величина \bar{R}_0 :

$$\bar{R}_0 = (t_B - t_H) / \bar{a}_B (\bar{t}_B - \bar{t}_B). \quad (7.7)$$

Систематическая погрешность при этом составит:

$$\Delta R = (\bar{t}_B - \bar{t}_H) / \bar{a}_B (\bar{t}_B - \bar{t}_B) - R_0. \quad (7.8)$$

Погрешность определения температуры t_B^P внутренней поверхности в расчетных условиях эксплуатации для участка ограждения истинным сопротивлением теплопередаче R_0 можно выразить через погрешность

$$\Delta \tau = \frac{t_B^P - t_H^P}{a_B^P R_0} - \frac{t_B^P - t_H^P}{a_B^P R_0} = \frac{t_B^P - t_H^P}{a_B^P R_0} \frac{(-\Delta R)}{\bar{R}_0}. \quad (7.9)$$

Соотношения (7.2) и (7.9) принципиально решают поставленную задачу. Однако для практического их применения необходимо задать теплофизические характеристики конструкции, так как для реального ограждения они неизвестны. Воспользуемся модельным методом. Заменяем реальную конструкцию ее моделью — многослойной пластиной, теплофизические характеристики которой определим согласно проекту исследуемой конструкции. Решая в этой пластине нестационарную задачу теплопроводности с граничными условиями, определенными на основании натуральных наблюдений $\{t_B(z), t_H(z)\}$,

$\alpha_B/z, \alpha_H/z]$, найдем усредненную по времени температуру внутренней поверхности \bar{t}_B . Подставляя ее и экспериментально найденные $\bar{t}_B, \bar{t}_H, \bar{\alpha}_B$ в формулу (7.8), рассчитаем значение методической погрешности ΔR . Однако на этом пути имеется одно препятствие: начальное распределение температур, необходимое для решения нестационарной задачи теплопроводности, неизвестно. Найдем начальное условие следующим образом: зададим произвольное начальное распределение температур, например равномерное, и решим задачу теплопроводности на временном интервале, для которого выполняется неравенство:

$$Fo > 1. \quad (7.10)$$

Здесь следует отметить, что число Фурье Fo для многослойных пластин классическим способом не может быть определено. В литературе предложен эквивалент числа Фурье для многослойных пластин

$$Fo' = z \cdot 2\pi/z_0 \cdot D^2, \quad (7.11)$$

где z — время; D — тепловая инерция конструкции при гармоническом воздействии с периодом z_0 .

Для проверки свойства числа Fo была составлена программа расчета одномерных нестационарных температурных полей. Проведенные численные эксперименты для случая мгновенного изменения температуры воздуха показали, что за интервал времени, которому соответствует $Fo' > 1$ переходный процесс в пластине практически заканчивается и устанавливается новое стационарное распределение температур.

Таким образом, для определения начального распределения температур, близко к реализуемому в натуральных условиях, необходимо решать нестационарную задачу теплопроводности с произвольным начальным распределением температур на временном интервале Δz , который определяется из (7.10) с учетом (7.11):

$$\Delta z \geq D^2 z_0 / 2T. \quad (7.12)$$

Систематическую погрешность, рассчитанную по формуле (7.12), можно было бы использовать как поправку к оценке сопротивления теплопередаче (7.7). Однако расчет абсолютного значения погрешности ΔR проведен для проектного значения сопротивления теплопередаче R_0^H , поправка же к оценке сопротивления теплопередаче реального ограждения будет несколько иная. Чтобы учесть ее, предположим, что погрешность ΔR связана с сопротивлением R_0^H в первом приближении линейным образом. Тогда относительная погрешность

$$\delta_R = \Delta R / R_0^H \quad (7.13)$$

не будет зависеть от сопротивления теплопередаче.

Из (7.13) следует, что истинное значение сопротивления тепло-

передаче связано с оценкой (7.7) через относительную систематическую погрешность следующим образом:

$$R_0 = \bar{R}_0 / (1 + \delta_R). \quad (7.14)$$

Величину \bar{R}_0 , рассчитываемую по формуле (7.7), условно назовем грубой оценкой сопротивления теплопередаче, а величину, рассчитываемую по формуле (7.14), — уточненной оценкой сопротивления теплопередаче.

Кроме сопротивления теплопередаче важным показателем теплозащитных свойств является температура внутренней поверхности ограждения в расчетных условиях эксплуатации. С учетом (7.14) для участка ограждения с истинным сопротивлением теплопередаче R_0 температуру можно выразить:

$$t_B^P = t_B^P - (t_B^P - t_H^P) / (1 + \delta_R) / \alpha_B^P \bar{R}_0. \quad (7.15)$$

Подставляя вместо \bar{R}_0 его выражение (7.7), находим

$$t_B^P = t_B^P - (t_B^P - t_H^P) (\bar{t}_B - \bar{t}_B) / (1 + \delta_R) / (\bar{t}_B - t_H^P). \quad (7.16)$$

Формула пересчета (7.16) отличается от известной множителем $(1 + \delta_R)$, который учитывает систематическую погрешность.

Теперь можно перечислить основные положения методики оценки теплозащитных свойств наружных стен зданий:

перед началом измерений за период Δz , рассчитанный по формуле (7.12), по метеосводке определяется часовой ход наружных температур;

в течение не менее чем двух суток, производятся измерения всех величин, требуемых отраслевым стандартом (если необходимо провести оценку приведенного сопротивления теплопередаче, следует добавить измерение средней температуры внутренней поверхности соответствующего фрагмента);

грубая оценка сопротивления теплопередаче и минимальной температуры производится за все интервалы времени наблюдения, длительность которых кратна 24 ч (при длительности наблюдений, равной двум суткам и интервале между измерениями в 3 ч, их число составит 10);

часовой ход температур внутреннего и наружного воздуха, а также коэффициентов теплообмена используется для расчета относительной систематической погрешности;

рассчитывается уточненная оценка сопротивления теплопередаче и минимальной температуры t_B^P ;

для оценки истинного значения сопротивления теплопередаче, минимальной температуры и их погрешности уточненные оценки, рассчитанные для различных интервалов времени наблюдения, обрабатываются стандартными статистическими методами.

Отсюда следует, что тепловизор не является единственно необходимым аппаратным обеспечением этой методики. Измерение температуры, конечно, может быть проведено традиционными сред-

ствами, однако окончательный выбор средств измерения температуры должен быть проведен на основании сравнительного технико-экономического анализа применения для этой цели тепловизора и традиционных средств.

Экспериментальная проверка этой методики проводилась в три этапа. Первый этап представлял собой имитацию натуральных наблюдений при помощи ЭВМ. В задачи этого этапа входило изучение зависимости относительной систематической погрешности δR от сопротивления теплопередаче (согласно сделанному предположению δR не зависит от него). Имитация наблюдений при помощи ЭВМ имеет то преимущество перед непосредственным наблюдением, что она дает возможность воспроизвести одно и то же нестационарное тепловое воздействие на различные ограждающие конструкции. Провести такие наблюдения в реальных условиях представляется сложным. Их можно было бы осуществить в лабораторных условиях, однако воспроизведение хода температур наружного и внутреннего воздуха близко к реализующемуся в натуральных условиях представляет собой технически очень сложную задачу. Кроме того, имитация наблюдений свободна от случайных погрешностей измерительных средств и, следовательно, предоставляет возможность для определения систематической погрешности оценок показателей теплозащитных свойств.

На втором этапе проводились имитация реальных условий в климатической камере и сравнение оценок показателей теплозащитных свойств, полученных стандартным способом при стационарном режиме и по вновь разработанной методике. Так как в климатической камере затруднительно реализовать все многообразие изменения температуры воздуха, то на третьем этапе производилась оценка показателей теплозащитных свойств в реальных условиях, полученных по методике отраслевого стандарта и по вновь разработанной методике.

Имитация натуральных наблюдений представляла собой оценку сопротивления теплопередаче к ее систематической погрешности по формулам (7.7) и (7.13) для ограждения, подверженного нестационарным тепловым воздействием, характерным для натуральных условий. Для моделирования таких воздействий использовались результаты реальных наблюдений, проведенных 25.02.81–05.03.81 в п. Сахарово Калининской области. Выбор данных именно этих наблюдений был обусловлен тем, что нестационарные тепловые воздействия, описываемые ими, носят весьма общий характер; здесь встречаются изменения как суточной амплитуды температур воздуха, так и их среднесуточных значений. Полученные в этих наблюдениях часовая ход температур наружного и внутреннего воздуха, а также изменения коэффициентов теплообмена во времени использовались как исходные данные для имитирующей программы. Эта программа состояла из двух основных блоков. Первый блок был предназначен для определения часового хода температуры внутренней поверхности ограждения. Для этого было использовано представление уравнения теплопроводности в виде системы конечно-разностных уравне-

ний по схеме Краунка–Николса с последующим их решением методом прогонки.

Следующий блок программы предназначен для осреднения температур внутреннего и наружного воздуха, а также внутренней поверхности с последующим расчетом систематической погрешности по формуле (7.13).

Имитирующая программа была использована для определения необходимой длительности натуральных наблюдений. В соответствии с этим были имитированы натурные наблюдения, длительность которых варьировалась от одних до пяти суток. Кроме длительности варьировалось также и начало наблюдений – от одних до пяти суток. Так как характер изменения систематической погрешности может существенно зависеть от тепловых характеристик ограждения (например, от тепловой инерции), то имитация натуральных наблюдений была проведена для пяти различных вариантов наружных стен. Первый вариант уже был описан в данном разделе, второй вариант представлял собой кирпичную стену; третий – стену из экструзионных панелей; четвертый – трехслойную конструкцию из железобетона с утеплителем из стиропора ПСБ (такая конструкция наружных стен используется в зданиях серии II 44/16); пятый вариант – трехслойную конструкцию из железобетона с утеплителем из целесинтиго фибролита (используется в тех же зданиях). Интервал между измерениями был принят равным трем часам.

Анализ результатов позволяет сделать следующие выводы:

1. Погрешность δR , как правило, отрицательна, следовательно, оценка сопротивления теплопередаче R_0 меньше истинного значения.
2. Для ограждений с тепловой инерцией меньше 2,5, систематическая погрешность оценки сопротивления теплопередаче, полученной всего за одни сутки наблюдений не превосходит 15%.
3. Увеличение длительности наблюдений далеко не всегда приводит к уменьшению систематической погрешности.
4. При фиксированном нестационарном тепловом воздействии систематическая погрешность тем больше, чем больше тепловая инерция ограждения.
5. Для всех видов ограждений систематическая погрешность достигает своего максимального значения в том случае, если среднесуточный температурный перепад имеет резкий скачок.

Проверка и отработка основных положений методики проводилась в климатической камере. Целью этого эксперимента являлось сравнение оценок сопротивления теплопередаче участка ограждения, полученных в стационарном и нестационарном режимах теплопроводности. На первом этапе эксперимента в теплом и холодном отделениях климатической камеры поддерживалась постоянная температура, обеспечивающая стационарный режим теплопроводности. На втором этапе эксперимента холодильная установка отключалась, при этом возникал нестационарный режим. В ходе эксперимента каждый час измерялись температуры воздуха t_B и t_H в теплом и холодном отделениях камеры, внутренней поверхности участка ограждения τ_B , а также плотность теплового потока q . Кроме того, для

оценки приведенного сопротивления теплопередаче на участке панели размером 0,4x0,4 м измерялась средняя температура внутренней поверхности. Результаты измерений, проведенных на первом этапе эксперимента, обрабатывались стандартно. Результаты измерений, проведенных на втором этапе, обрабатывались согласно разработанной методике: определялась грубая оценка сопротивления теплопередаче R_0 , рассчитывалась погрешность оценки сопротивления теплопередаче δR и находилась уточненная оценка сопротивления теплопередаче R_0 . Эта величина сопоставлялась с оценкой сопротивления теплопередаче R_0 , полученной в стационарном режиме. Путем сопоставления оценки приведенного сопротивления теплопередаче $R_0^{ПР}$, полученной в стационарном режиме, и уточненной оценки $R_0^{ПР}$ проверялась точность определения приведенного сопротивления теплопередаче в нестационарном режиме. Осуществлялось это для того, чтобы убедиться, что оценка приведенного сопротивления теплопередаче, полученная по разработанной методике, правильно отражает процессы теплопроводности, расчетное и экспериментальное значения сопротивления, коэффициенты приведения τ .

Фрагмент ограждения, исследованный в климатической камере, был выполнен из экструзионных панелей. Выбор именно такой ограждающей конструкции был связан с тем, что она имеет конструктивно обусловленные мостики холода с известными размерами, это необходимо для сопоставления расчетного и экспериментального значений коэффициента приведения τ . Экструзионные панели были выполнены из асбестоцементного каркаса с одним рядом ячеек, заполненных минеральной ватой. Толщина этих панелей составляла 160 мм, размер ячейки 80x112 мм, толщина стенок каждой ячейки 12 мм. Проектные значения теплотехнических характеристик материалов экструзионной панели сведены в табл. 7.3.

Таблица 7.3. Теплотехнические характеристики материалов экструзионной панели

Материал	Теплопроводность, Вт/(м·°С)	Теплоемкость, Дж/(кг·°С)	Плотность, кг/м ³
Асбестоцемент	0,41	840	1650
Минеральная вата	0,09	840	300

На основании данных табл. 7.3 были рассчитаны термическое сопротивление "по глади" $R_k = 1,57 \text{ м}^2/\text{Вт}$ и приведенное термическое сопротивление $R_0^{ПР} = 1,26 \text{ м}^2/\text{Вт}$.

Для проведения эксперимента использовалась следующая аппаратура: термометры медь-константан (для измерения реперных температур и температур внутреннего и наружного воздуха); тепломеры (для измерения плотности теплового потока и последующего определения коэффициента теплоотдачи); вольтметр цифровой В7-21; тепловизор АГА-780.

Обработка данных первого этапа эксперимента (стационарный

режим) показала, что сопротивление теплопередаче в месте установки тепломера составляет $1,52 \text{ м}^2 \cdot \text{°С}/\text{Вт}$.

Обработка данных второго этапа эксперимента (нестационарный режим) проводилась следующим образом. Для расчета грубой оценки сопротивления теплопередаче выделялись периоды накопления экспериментальных данных. Для выделения периодов рассчитывались средние значения температур t_B , t_H и плотности теплового потока q . Полученные средние значения использовались для расчета грубой оценки сопротивления теплопередаче R_0 . Для выделенных периодов накопления данных на ЭВМ СМ-3 по разработанной программе рассчитывалась систематическая погрешность. Значения грубых оценок сопротивления теплопередаче и систематической погрешности использовались для расчета уточненной оценки сопротивления теплопередаче R_0 .

Анализируя полученные данные, можно констатировать, что, как и в численном эксперименте, грубая оценка сопротивления теплопередаче сильно отличается от значения оценки R_0 , полученной в стационарном режиме. Учет систематической погрешности, вызванной нестационарным режимом, позволил значительно уточнить эту оценку. Статистическая обработка уточненных оценок R_0 , получаемых в различные периоды накопления экспериментальных данных дала следующие результаты:

среднее значение уточненных оценок сопротивления теплопередаче составляет $1,53 \text{ м}^2 \cdot \text{°С}/\text{Вт}$;

экспериментальная дисперсия составляет $0,065 \text{ м}^2 \cdot \text{°С}/\text{Вт}$.

Результаты статистической обработки позволяют определить, с какой точностью оценивается сопротивление теплопередаче в нестационарном режиме. Предполагая ошибку оценки R_0 , распределенной по нормальному закону, находим, что для уточненной оценки сопротивления теплопередаче, проведенной в любой из выбранных периодов накопления данных с надежностью 0,95, выполняется неравенство

$$|\bar{R}_0 - 1,53| < 0,13, \quad (7.17)$$

т.е. погрешность не превышает 8,5%.

Аналогично изложенной схеме определялось приведенное сопротивление теплопередаче.

Обработка экспериментальных данных первого этапа эксперимента (стационарный режим) показала, что приведенное сопротивление теплопередаче выбранного фрагмента составляет: $R_0^{ПР} = 1,10 \text{ м}^2 \cdot \text{°С}/\text{Вт}$.

Статистическая обработка результатов второго этапа эксперимента показала, что среднее значение оценок $R_0^{ПР}$, полученных в различные периоды накопления экспериментальных данных, составляет $1,08 \text{ м}^2 \cdot \text{°С}/\text{Вт}$, а экспериментальная дисперсия — $0,052 \text{ м}^2 \cdot \text{°С}/\text{Вт}$. Следовательно, для уточненной оценки сопротивления теплопередаче в любой из выбранных периодов накопления данных с надежностью 0,95 выполняется неравенство

$$|R_0^{np} - 1,08| < 0,1, \quad (7.18)$$

т.е. погрешность не превышает 9,7%.

Оценки сопротивления теплопередаче, полученные в стационарном и нестационарном режимах, сопоставлены в табл. 7.4.

Таблица 7.4. Сравнение оценок сопротивления теплопередаче, полученных в стационарном и нестационарном режимах

Теплотехнический показатель	Условия получения экспериментальных данных		Расчетные значения
	стационарный режим	нестационарный режим	
Максимальное сопротивление теплопередаче, $m^2 \cdot ^\circ C / Wt$	1,52	1,53 ($\pm 8,7\%$)	1,73
Приведенное сопротивление теплопередаче, $m^2 \cdot ^\circ C / Wt$	1,10	1,08 ($\pm 9,7\%$)	1,26
Коэффициент приведения	0,72	0,71	0,73

Анализируя данные табл. 7.4, можно сделать следующие выводы: проведенный по разработанной методике учет систематической погрешности, обусловленной нестационарным режимом теплопроводности, позволил получить хорошее совпадение оценок сопротивления теплопередаче, полученных в стационарном и нестационарном режимах;

различие расчетного значения сопротивления теплопередаче и его экспериментальной оценки можно объяснить повышенной теплопроводностью утеплителя в панели по сравнению с расчетными данными; совпадение же расчетного и экспериментального значений коэффициента приведения свидетельствует о том, что предлагаемый способ оценки приведенного сопротивления теплопередаче правильно отражает процесс теплопроводности.

Для проверки разработанной методики были проведены натурные наблюдения за температурами и тепловыми потоками наружных стен здания. Целью наблюдений являлось определение температуры внутренней поверхности ограждения в расчетных условиях эксплуатации и сопротивления теплопередаче по стандартной и вновь разработанной методикам, а также сравнение полученных результатов.

Наблюдения проводились 26.02–5.03. в п. Сахарово Калининской области. В качестве объекта наблюдений был выбран усадебный дом, выполненный из объемных блоков производства Калининского ЭССК. Такой выбор обеспечивал отсутствие участков наружных стен с пониженными за счет сквозной фильтрации воздуха теплозащитных свойств. Наружные стены исследуемого дома представляли собой трехслойную конструкцию из керамзитобетона толщиной 50 мм, слоя минеральной ваты – 100 мм и деревянного щита – 20 мм. Для повышения сопротивления воздухопроницанию утеплитель снаружи защищен двумя слоями рубероида. Проектные значе-

ния теплотехнических характеристик материалов этой конструкции сведены в табл. 7.5.

Таблица 7.5. Теплотехнические характеристики материалов наружных стен (согласно проекту)

Материал	Теплопроводность, $Wt / (m \cdot ^\circ C)$	Теплоемкость, $Dж / (кг \cdot ^\circ C)$	Плотность, $кг / m^3$
Сосна	0,174	2300	500
Минеральная вата	0,07	840	200
Керамзитобетон	0,92	660	1800

На основе предварительного тепловизионного контроля температурного поля внутренней поверхности ограждения для наблюдений были выбраны два фрагмента: с нормальной и с нарушенной теплоизоляцией (№ 1 и 2 соответственно). Для того чтобы оператор тепловизионной аппаратуры мог однозначно выделить эти фрагменты на плоскости стены при повторных измерениях, границы этих фрагментов были оконтурены лентами алюминиевой фольги, фрагмент № 1 был выделен для того, чтобы сопоставить оценки теплотехнических качеств, полученные по стандартной и вновь разработанной методикам. Фрагмент № 2 был выделен для того, чтобы проверить точность оценки приведенного сопротивления теплопередаче, получаемую при использовании тепловизора. Однако структура участка с нарушенной теплоизоляцией была неизвестна, а значит, неизвестно было и истинное значение приведенного сопротивления теплопередаче. Поэтому проблема оценки истинного значения приведенного сопротивления была решена методически. Термомер на фрагменте № 2 устанавливался на таком его участке, температура которого была равна средней температуре всего фрагмента. Такое расположение термомера позволило считать, что оценка сопротивления теплопередаче по этому сечению является одновременно оценкой истинного значения приведенного сопротивления теплопередаче фрагмента № 2.

Результаты наблюдений за температурным режимом ограждения приведены на рис. 7.1. Стандартная обработка результатов наблюдений показала, что сопротивление теплопередаче с наружной теплоизоляцией составляет $1,66 m^2 \cdot ^\circ C / Wt$, а с нарушенной – $0,94 m^2 \cdot ^\circ C / Wt$; температуры внутренней поверхности этих участков в расчетных условиях эксплуатации составляют соответственно 14,5 и 11,8 $^\circ C$.

Обработка результатов наблюдений, приведенная по новой методике, включала в себя следующие этапы:

- выделение периодов накопления данных для расчета грубых оценок сопротивления теплопередаче;
- расчет средних за выделенные периоды значений температур и плотности теплового потока;
- расчет грубой оценки сопротивления теплопередаче;
- расчет систематической погрешности для грубой оценки сопротивления теплопередаче на ЭВМ СМ-3;

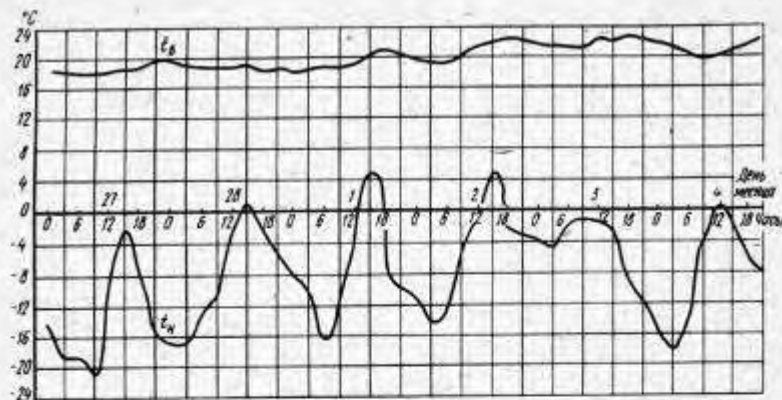


Рис.7.1. Результаты наблюдений за температурой воздуха

расчет уточненной оценки сопротивления теплопередаче.

Статистическая обработка грубой и уточненной оценок сопротивления теплопередаче, получаемых в различные периоды накопления экспериментальных данных, показала, что, например, для фрагмента №1 среднее значение грубой оценки сопротивления теплопередаче составляет $[\bar{R}_0]_{\text{ср}} = 1,64 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт}$, а уточненной оценки $[\bar{R}_0]_{\text{ср}} = 1,72 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт}$; экспериментальные дисперсии составляют соответственно 0,107 и 0,088 $\text{м}^2 \cdot \text{°C/Вт}$.

Из результатов статистической обработки следует, что для грубой и уточненной оценок сопротивление теплопередаче в любой из выбранных периодов накопления данных с надежностью 0,95 выполняется, $\text{м}^2 \cdot \text{°C/Вт}$,

$$|\bar{R}_0 - 1,64| < 0,21 \text{ или } \bar{R}_0 = 1,64 (\pm 12,8\%), \quad (7.19)$$

$$|\bar{R}_0 - 1,72| < 0,17 \text{ или } \bar{R}_0 = 1,72 (\pm 9,9\%). \quad (7.20)$$

Из (7.19) и (7.20) следует, что случайная погрешность определения уточненной оценки сопротивления теплопередаче меньше, чем погрешность грубой оценки, проще говоря, уточненная оценка точнее, нежели грубая оценка \bar{R}_0 . Этот факт отчасти подтверждает, что предложенные термины правильно отражают физическую сущность величин \bar{R}_0 и \bar{R}_0 . Так как экспериментальная дисперсия является мерой точности проведенной оценки, то ее расчет необходимо также включить в методику. Однако такие периоды накопления данных нивелируют основное достоинство новой методики — возможность проведения наблюдений за одни — двое суток. Поэтому, если необходимо определить погрешность оценки \bar{R}_0 или τ_B^P , то наблюдение за температурами и тепловыми потоками необходимо продолжать в течение двух суток, а для определения среднего значения и экспериментальной дисперсии оценки \bar{R}_0 или τ_B^P необхо-

димо выбрать все периоды накопления данных длительностью в 24 ч и отличающихся интервалом между измерениями в 3 ч.

Для определения температуры внутренней поверхности фрагмента №1 в расчетных условиях эксплуатации необходимо вычислить отношение $(\bar{t}_B - \bar{t}_H) / (\bar{t}_B - t_H)$. Учитывая, что оно равно $1/\bar{R}_0 a_B$, находим, что в данном случае формула пересчета (7.16) принимает вид:

$$\tau_B^P = t_B^P - \frac{t_B^P - t_H^P}{\bar{R}_0 a_B^P}. \quad (7.21)$$

Отсюда следует, что для фрагмента №1 при условиях $t_B^P = 18^\circ\text{C}$; $t_H^P = -33^\circ\text{C}$; $a_B^P = 9,7 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$, температура внутренней поверхности составляет $14,6^\circ\text{C}$. Поэтому с надежностью 0,95 выполняется условие:

$$14,2 \leq \tau_B^P \leq 14,9 (\text{°C}). \quad (7.22)$$

Сопоставление оценок сопротивления теплопередаче, полученных по стандартной и вновь разработанной методикам для фрагментов №1 и 2, проводится в табл. 7.6. Такое же сопоставление оценок температуры внутренней поверхности в расчетных условиях эксплуатации производится в табл. 7.7.

Таблица 7.6. Оценки сопротивления теплопередаче, полученные по стандартной и вновь разработанной методикам.

Фрагмент отражения	Методика оценки, $\text{м}^2 \cdot \text{°C/Вт}$		
	Стандартная	Новая с использованием	
		термопар	тепловизора
1	1,66	1,72 ($\pm 10,2\%$)	1,69 ($\pm 11,2\%$)
2	0,94	1,00 ($\pm 15,6\%$)	0,92 ($\pm 5,4\%$)

Таблица 7.7. Оценки температуры внутренней поверхности в расчетных условиях эксплуатации, полученные по стандартной и новой методикам

Фрагмент отражения	Методика оценки, $^\circ\text{C}$				
	Стандартная	Новая, с использованием			
		термопар	тепловизора		
1	14,5	14,2	14,0	14,1	14,8
2	11,8	11,0	12,9	11,1	12,0

Анализируя данные табл. 7.6 и 7.7, можно сделать следующие выводы:

вновь разработанная методика в отличие от стандартной дает возможность определить погрешности оценок R_0 и τ_B^P ;

оценки R_0 и τ_B^P , полученные при применении стандартной методики, попадают в доверительный интервал, построенный с надежностью 0,95 для оценок, полученных по новой методике.

Таким образом, экспериментальная проверка разработанной методики, проведенная в натуральных условиях, показала, что оценки показателей теплозащитных свойств, полученных по стандартной и новой методикам, хорошо согласуются между собой; новую методику можно считать развитием стандартной методики.

В качестве примера применения тепловизионного метода дефектоскопии приведем результаты обследования наружных стен дома №3 в поселке Поваровка. Измерения были приведены в ночь с 16 на 17.03. Температура наружного воздуха составляла в момент обследования $+1^{\circ}\text{C}$. Тепловизионный контроль температурного поля наружной поверхности не выявил локальных температурных аномалий, поэтому было проведено сравнение температурных полей наружных поверхностей двух соседних зданий: дома №2 и дома №3. На термограмме слева находится тепловое изображение западного фасада дома №2, слева — северный фасад дома №3. Тепловизионные измерения показали, что на уровне третьего этажа температура наружных стен составляет $+1,3^{\circ}\text{C}$ и $2,2^{\circ}\text{C}$ соответственно. Рассчитывая отношение теплопотерь наружных стен дома №3 и дома №1, находим $q_3/q_2 = 4$.

Повышенные теплопотери могут быть вызваны как повышенной температурой внутреннего воздуха в помещениях дома №3, так и пониженными теплозащитными свойствами его ограждения. Для выявления причины повышенных теплопотерь были измерены температуры внутреннего воздуха в квартирах третьего этажа. В обоих домах они составляли 19°C . Отношение сопротивлений теплопередаче этих зданий составляет $R_{0,3}/R_{0,2} = 0,25$.

Следовательно, сопротивление теплопередаче наружных стен дома №3 в четыре раза ниже, чем сопротивление теплопередаче наружных стен дома №2. Опрос жильцов дома №3 показал, что в 40% общего числа квартир на наружных стенах имеет место отсыревание обоев и образование плесени, что свидетельствует о недопустимо низкой температуре внутренней поверхности наружных стен.

Помимо оценки отношения сопротивлений теплопередаче, разработанная методика предоставляет возможность для выявления участков ограждения, внутренняя поверхность которых в расчетных условиях эксплуатации имеет температуру ниже точки росы. Проверка методики проводилась в натуральных условиях при определении теплозащитных качеств стеновых панелей ЭНС 17,5 (3x6 м) телятника на ферме села Горбово совхоза "Клинский" Московской области. Проверка состояла в сопоставлении зоны образования конденсата, выявленной по стандартной методике и по разработанной методике. Наружные стены выполнены из трехслойных железобетонных

панелей с утеплителем из листового пенополистирола. Эти панели имеют сквозные железобетонные ребра связи и железобетонные вставки для крепления монтажных петель. Схема панели и температурное поле на ее внутренней поверхности представлены на рис. 7.2. Все упомянутые теплопроводные включения панели наблюдаются при теплофизическом контроле ее внутренней поверхности.

Тепловизионная съемка внутренней поверхности ограждения телятника осложнена тем, что с одной позиции не удается провести панорамное фотографирование поверхности всей панели, так как в поле зрения тепловизора образуются многочисленные мертвые зоны обзора. Меняя позицию, оператор получает возможность контролировать температурное поле всей панели, однако при этом восстановление панорамы температурного поля исключается.

На рис. 7.3 представлены соответственно температурные поля, построенные по результатам однократного тепловизионного измерения и по результатам стандартных наблюдений. Пересчет температурного поля позволил выделить зону ограждения, температура которой в расчетных условиях эксплуатации будет ниже точки росы. Эта зона выделена на рис. 7.4 пунктиром. На этом же рисунке представлены изолинии показателя распределения теплозащитных свойств $r_a(x, y)$, рассчитанного согласно (7.23). Учитывая, что проектное значение сопротивления теплопередаче панели равно $1,61 \text{ м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$, а значение произведения $(R_0 a)_{\text{кр}}$ при котором температура поверхности в расчетных условиях эксплуатации ниже точки росы, составляет 5,0, то для точек (x, y) , принадлежащих зоне конденсации, выполняется неравенство:

$$r_a(x, y) < \frac{(R_0 a)_{\text{кр}}}{R_0^{\text{н}} a^{\text{п}}} = 0,46. \quad (7.23)$$

Изолиния $r_a(x, y) = 0,46$, являющаяся границей зоны конденсации, выделена на рис. 7.4. Сопоставления зон конденсации, полученные по стандартной и разработанной методикам, подтверждает теоретический вывод, что по разработанной методике при использовании проектного значения сопротивления теплопередаче зона конденсации получается несколько меньше истинной. Отметим, что подстановка фактического сопротивления теплопередаче вместо проектного значения приводит к той же границе зоны конденсации, что и стандартный метод.

Еще одна проверка возможности использования тепловизоров для рассматриваемых целей была проведена при определении теплозащитных качеств панелей, выпускаемых Клиским ЭССК. Теплотехнические испытания ограждающих конструкций телятника в селе Горбово совхоза "Клинский" Московской области проводились следующим образом.

По результатам предварительного тепловизионного осмотра наружных стеновых панелей для детального исследования была выбрана рядовая панель, наиболее часто встречающаяся на объекте.

Сопротивление теплопередаче участка панели с наилучшими теп-

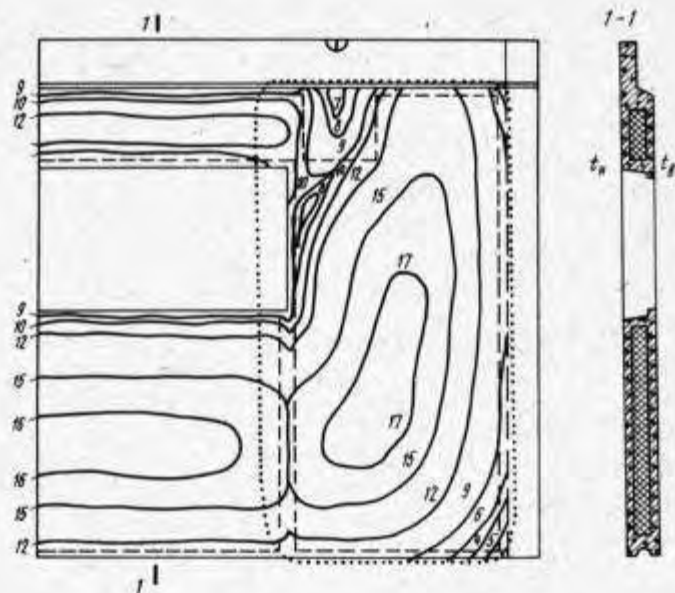


Рис.7.2. Температурное поле ($^{\circ}\text{C}$) внутренней и наружной поверхности панели ($t_{\text{в}} = 18^{\circ}\text{C}$; $t_{\text{н}} = -31^{\circ}\text{C}$, определенное по стандартной методике)

лозащитными свойствами, определенное по отраслевой методике, оказалось равным $1,46 \text{ м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$. При помощи тепловизора получено температурное поле стены $\tau(x, y)$, термопарами определено распределение температур воздуха в пристенном слое $t_{\text{в}}(x, y)$. По результатам натуральных измерений построено распределение безразмерного симплекса:

$$r(x, y) = \frac{t_{\text{в}}(x, y) - t_{\text{н}}}{t_{\text{в}}(x_0, y_0) - t_{\text{н}}} \cdot \frac{t_{\text{в}}(x_0, y_0) - \tau(x_0, y_0)}{t_{\text{в}}(x, y) - \tau(x, y)} \quad (7.24)$$

где x, y – координаты произвольной точки панели; x_0, y_0 – координаты точки с наибольшим значением сопротивления теплопередаче.

Учитывая, что коэффициент теплообмена по поверхности панели незначительно меняется, можно написать:

$$r(x, y) = [R_0(x, y)] / [R_0(x_0, y_0)] \quad (7.25)$$

Изменение показателя $r(x, y)$ по поверхности панели представлено на рис. 7.5. Теплозащитные свойства ограждения на отдельных участках панели превышают требуемое значение более чем в 2 раза. Как видно из рис. 7.5, по мере приближения к участкам, содержащим обрамляющие бетонные ребра или закладные детали, сопротив-

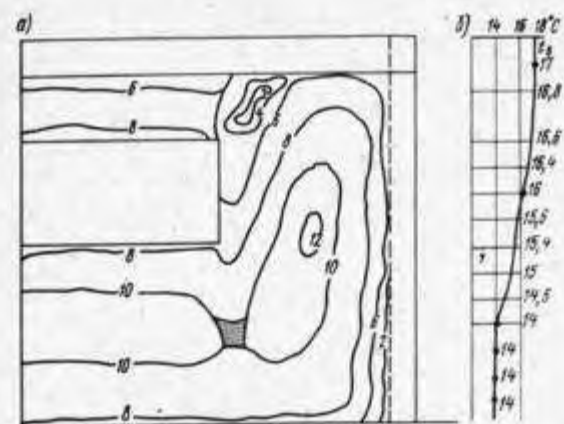


Рис.7.3. Температурное поле ($^{\circ}\text{C}$) внутренней поверхности (а) панели при $t = -5^{\circ}\text{C}$, полученное при помощи тепловизора и распределение температурного внутреннего воздуха (б) по высоте

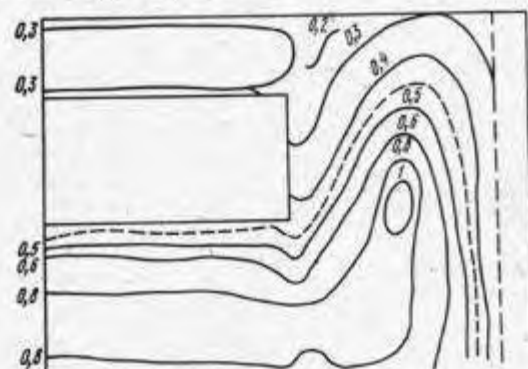


Рис.7.4. Распределение показателя r_{α} (в относительных единицах) на внутренней поверхности панели

ление теплопередаче падает в 5 раз и достигает значения $0,29 \text{ м}^2 \cdot \text{K}/\text{Вт}$.

Нормативные требования СНиП II-3-79 нарушены, если $R(x, y) < 0,68 \text{ м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$, т.е. $r(x, y) < 0,68/1,46 = 0,46$. Участки панелей, не отвечающие нормативным требованиям, на рис. 7.5 отмечены штриховкой.

Определение показателя $r(x, y)$ по площади панели позволило определить коэффициент приведения r . Расчеты показали, что $r = 0,486$. Следовательно, приведенное сопротивление теплопередаче составляет $R_0^{\text{пр}} = r \cdot R_0 = 0,71 \text{ м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$.

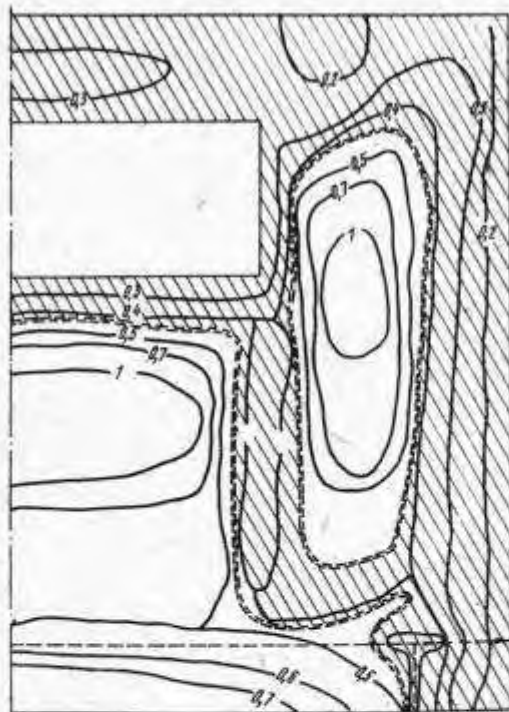


Рис.7.5. Изменение показателя $\gamma(x, y)$ в относительных единицах) на внутренней поверхности ограждения

7.3. ВОЗДУХОПРОНИЦАЕМОСТЬ ЭЛЕМЕНТОВ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Физическими процессами, обуславливающими теплопередачу в стыковых соединениях (СтС), являются теплопроводность, воздухопроницание и влагонепроницание. Перенос тепла в СтС, обусловленный теплопроводностью, достаточно подробно изучен, поэтому рассмотрим возможность тепловизионного исследования теплопередачи через СтС, обусловленной только воздухопроницанием.

Воздухопроницание через стыковые соединения ограждающих конструкций существенно влияет на теплопередачу через ограждения, а также на теплопотери и микроклимат в помещениях. При этом влияние воздухопроницания на теплозащитные качества различно в различных элементах конструкций. В оконных и дверных проемах, в их стыковых соединениях заметно увеличиваются теплопотери, а в стыках панелей понижается температура внутренней поверхности ограждения, что увеличивает вероятность конденсации влаги в зоне этих стыковых соединений.

Воздухопроницаемостью элемента конструкции называется свой-

ство элемента пропускать воздух. В СНиП II-3-79 нормируется величина воздухопроницаемости. Требуемое сопротивление воздухопроницанию определяется по формуле:

$$R^{TP} = \Delta P / G^H, \quad (7.26)$$

где ΔP — разность давлений воздуха на наружной и внутренней поверхностях ограждающих конструкций; G^H — нормативная воздухопроницаемость ограждающих конструкций, $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$. Разность давлений воздуха на наружной и внутренней поверхностях ограждающих конструкций ΔP , Па, следует определять по формуле:

$$\Delta P = 0,55 H (\gamma_H - \gamma_B) + 0,03 \gamma_H V^2, \quad (7.27)$$

где H — высота здания, м; γ_H, γ_B — удельный вес соответственно наружного и внутреннего воздуха, $\text{Н}/\text{м}^3$; V — максимальная из скоростей ветра по румбам за январь, м/с.

Теплопотери под влиянием теплового напора могут достигать 45%, а под влиянием ветрового напора 20% расчетных теплопотерь помещения, поэтому в районах Советского Союза, где преобладает сильный ветер и низкая температура наружного воздуха, теплопотери зданий за счет воздухопроницаемости могут превратиться в основные. Отсюда можно сделать вывод, что при расчете теплозащитных качеств ограждающих конструкций зданий необходимо учитывать воздухопроницаемость конструктивных элементов ограждений и в особенности стыковых соединений.

Стандартные испытания воздухопроницаемости элементов ограждающих конструкций заключаются в следующем. С одной стороны изучаемого фрагмента устанавливается герметичная обойма, стык обоймы с фрагментом герметизируется. С помощью вентилятора или пылесоса и герметичной обоймы создается перепад давления воздуха на фрагменте ограждения (перепад давлений измеряется манометром типа ММН-1).

Расход воздуха в обойме контролируется газовым счетчиком. Испытания проводятся при разностях давлений. По средним значениям расхода воздуха G при каждой разности давлений ΔP строится плавный график зависимости между этими величинами. По графику определяется коэффициент воздухопроницаемости стыка G^1 , т.е. расход воздуха в $\text{кг}/\text{с}$ через 1 м^2 фрагмента ограждения или 1 пог.м стыка при $\Delta P = 133,322$ Па. Размер обоймы при исследовании стыков $1 \times 0,2$ м, а при исследовании пересечений стыков — $0,5 \times 0,5$ м.

Проверка стыков этим методом позволяет получать нормированную характеристику воздухопроницаемости с достаточно высокой точностью. Однако описанный метод контроля воздухопроницаемости СтС вследствие большого времени проведения опыта и трудоемкости подготовительных работ непригоден при массовых обследованиях теплотехнических качеств ограждающих конструкций. Применять этот метод можно выборочно при сдаче дома в эксплуатацию и проверке воздухопроницаемости стыковых соединений при ухудшении микроклимата помещений.

В районе элементов ограждающих конструкций, обладающих повышенной воздухопроницаемостью, возникают аномалии температурного поля поверхности конструкции. Эти аномалии обусловлены теплообменом фильтрующегося воздуха с массивом конструкции и возникают лишь при наличии перепада температур между внутренним и наружным воздухом.

Причиной провеса фильтрации воздуха является перепад давлений, практически всегда существующий между внутренней средой здания и атмосферным воздухом. Знак и величина аномалии температурного поля поверхности являются функциями, зависящими от величины и знака перепадов давлений и температур воздуха, а также от теплофизических и геометрических характеристик конструкции.

Теоретические и экспериментальные исследования показали, что аномалии температурного поля поверхности конструкции больше с той стороны конструкции, где идет фильтрация воздуха; величина аномалии температурного поля возрастает при условии, что потоки тепла и воздуха направлены в противоположные стороны. Это справедливо для стационарного и квазистационарного режимов теплопередачи, поэтому в зимнее время рациональнее проводить тепловизионные исследования воздухопроницаемости изнутри помещения, создавая разрежение в помещении.

Исследования температурного поля в стационарном режиме теплопередачи позволяют не только выявлять участки с ухудшенной герметизацией, но и количественно оценивать расход воздуха через эти участки. Наряду с этим достоинством исследование в стационарном режиме теплопередачи обладает существенным недостатком — при натурных исследованиях трудно осуществить стационарный режим вследствие колебаний температуры воздуха и перепада давлений.

Оперативный метод контроля воздухопроницаемости — это метод тепловизионного исследования, использующий предварительный подогрев исследуемой поверхности с последующим созданием перепада давлений. Этот метод позволяет оперативно получать сравнительные значения воздухопроницаемости для различных участков однотипных стыков без количественной оценки величины расхода фильтрующегося воздуха.

Кроме исследований поперечной фильтрации воздуха в ограждающих конструкциях, тепловизионный метод получил применение для исследования температурного решения ограждений с воздушными прослойками. С помощью тепловизора обнаруживаются участки ограждений, через которые в воздушную прослойку поступает холодный воздух. При исследовании теплотехнических качеств СтС с помощью тепловизора необходимо иметь расчетные зависимости, позволяющие оценивать воздухопроницаемость стыковых соединений исходя из температурного поля на поверхности ограждения в зоне СтС.

В литературе получено решение задачи о температурном поле пластины при наличии щелевой фильтрации, позволяющее оценивать воздухопроницаемость при наличии тепловизионной информации о температурном поле на поверхности.

Рис.7.6. Модель процесса щелевой фильтрации

t_1, t_2, t_0 — температура воздуха по обе стороны панели и в щели; α_1, α_2 — коэффициенты теплоотдачи поверхности панели; τ_1, τ_2 — температуры поверхности панели; λ — теплопроводность материала панели; V_0 — скорость фильтрации воздуха; C_0, λ_0 — теплоемкость и теплопроводность фильтрующегося воздуха; δ — толщина панели

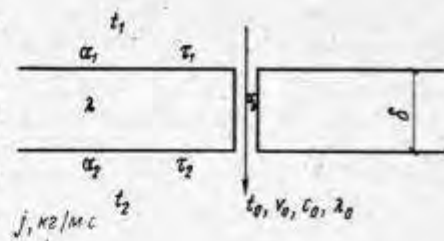
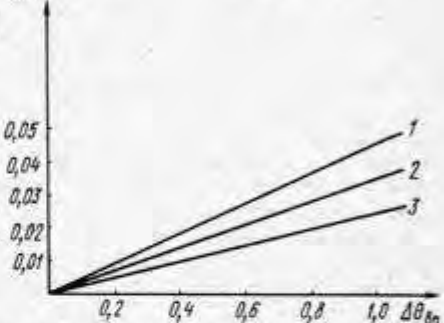


Рис.7.7. Зависимость избыточной безразмерной температуры $\Delta\theta_{вп}$ от расхода воздуха j через щель для пластины с разным сопротивлением теплопередаче



Для постановки математической задачи для расчета температурного поля конструкции, как правило, используется модель щелевой фильтрации, приведенная на рис. 7.6. Задача заключается в нахождении плоского стационарного температурного поля пластины, разделяющей две среды: внутреннюю с температурой t_B и наружную с температурой t_H . Коэффициенты теплообмена на соответствующих поверхностях пластины равны α_B и α_H . Пластина имеет сквозную плоскую щель шириной h , по которой со скоростью V движется инфильтрат с известной плоскостью ρ_0 , теплоемкостью C_0 , вязкостью ν_0 и теплопроводностью λ_0 . Заданными являются также толщина пластины δ , ее теплопроводность λ и коэффициент теплообмена инфильтрата в щели α_0 . При решении задачи граничные условия 3-го рода на поверхностях пластины аппроксимируются граничными условиями 1-го рода путем замены пластины на эквивалентную ей пластину толщиной

$$\delta_1 = \lambda/\alpha_H + \delta + \lambda/\alpha_B \quad (7.28)$$

с заданными температурами t_H и t_B наружной и внутренней поверхностей эквивалентной пластины.

Полученное решение задач для внутренней поверхности пластины при наличии инфильтрации при малых расходах инфильтрата преобразовано в следующее выражение:

$$j = \Delta\theta_{вп} \pi \lambda (\alpha_B R_0 - 1) / C_0 [1 - \ln(\pi/2 \alpha_B R_0)], \quad (7.29)$$

где j — расход воздуха через щель, кг/(м·с); R_0 — сопротивление теплопередаче пластины, м²·°С/Вт; $\Delta\theta_{вп} = [t_{вп}(\infty) - t_{вп}(0)] / [t_{вп}(\infty) - t_H]$ — без-

размерная температура, характеризующая относительное изменение температуры внутренней поверхности в зоне щели; $T_{вп}(\infty)$ – температура внутренней поверхности вдали от щели; $T_{вп}(0)$ – температура внутренней поверхности на границе со щелью; t_n – температура наружного воздуха.

На рис. 7.7 построены графики зависимости $j = \varphi(\Delta\theta_{вп})$ при некоторых R_0 . Полученная зависимость позволяет оценивать воздухопроницаемость СтС стеновых панелей при проведении тепловизионной съемки.

7.4. ОБЩАЯ ОЦЕНКА ТЕПЛОПOTЕРЬ ЗДАНИЯ

Одним из основных путей экономии энергии в зданиях является уменьшение теплопотерь и теплопоступлений через ограждающие конструкции, достигающие по данным проведенных исследований для жилых зданий до 30% общих потерь. Тепловизионные методы измерения температур являются эффективным средством в решении этой задачи.

Изменения в утечке тепла через наружные ограждения вызывают изменения температуры на их поверхности. Учитывая это, можно получить качественную картину распределения теплового потока в конструкции.

Тепловизионные методы могут служить как для локализации мест с повышенными теплопотерями, так и для сравнительной оценки теплопотерь различных зданий и конструкций. Основными преимуществами тепловизионного метода являются высокая оперативность, определение теплопотерь удаленных и труднодоступных участков конструкций, определение теплопотерь на больших поверхностях в реальном масштабе времени; проведение одновременной оценки теплопотерь различных зданий.

Тепловизионные обследования, как правило, проводятся с подвижного носителя (автомашины, самолета), что значительно увеличивает объем получаемой информации и позволяет проводить массовые обследования зданий и сооружений. При съемке с машины определяются теплопотери через стены, при аэросъемке – через крыши зданий.

Качественная оценка теплопотерь выполняется по шкале серых тонов тепловизора, исходя из того факта, что более яркие изображения объектов на термограмме имеют более высокую температуру, а более высокая температура соответствует большим теплопотерям. Однако следует учитывать, что изменение яркости изображения может быть вызвано не только изменением теплового потока через ограждающую конструкцию, но и различной излучательной способностью поверхности и рядом других факторов, что может быть установлено при визуальном наблюдении.

Интерпретацию термограмм упрощает введение дискретных уровней серой шкалы тепловизора, соответствующих определенным интервалам температур. По различным оттенкам серого тона теплопотери можно классифицировать следующим образом:

нет теплопотерь (холодный дом). Очертания дома хорошо разли-

чимы, ограждающая конструкция имеет равномерный черный цвет; незначительные теплопотери. Ограждающая конструкция светлее, чем в предыдущем случае, некоторые утечки тепла из отдушин, вокруг дымоходов и т.д.;

средние теплопотери. На термограмме появляются серые области в местах утечки тепла;

высокие потери. Сильная утечка тепла через ограждение и блики с боков;

усиленные теплопотери. Утечка тепла из всех частей здания, изображенных на термограмме белым цветом.

Количественная оценка теплопотерь выполняется с помощью изотермической функции и соответствующей градуировки тепловизора.

При съемке с воздуха теплопотери рассчитываются по формуле:

$$q = \alpha_k (T_n - T_n) + \epsilon \delta (T_n^4 - T_{неба}^4) + \epsilon \delta (T_n^4 - T_{ф}^4), \quad (7.30)$$

где q – тепловой поток через крышу; α_k – коэффициент конвективного теплообмена (берется из справочных данных); T_n – температура поверхности крыши; $T_{неба}$ – температура неба; ϵ – коэффициент излучения поверхности крыши; $T_{ф}$ – температура фона; T_n – температура наружного воздуха.

Сравнение оценок теплопотерь двух участков ограждения выполняется по формуле:

$$q_1/q_2 = (\tau_1 - t_n) / (\tau_2 - t_n), \quad (7.31)$$

где τ_1, τ_2 – поверхностные температуры двух участков; t_n – температура воздуха; q_1, q_2 – плотность тепловых потоков этих участков.

Следует отметить, что причины повышенных теплопотерь при таком подходе оказываются скрытыми. Повышенная температура наружной поверхности может быть вызвана как локальным понижением теплозащитных свойств ограждения, так и повышенной температурой воздуха внутри соответствующего помещения. Однако предложенный подход позволяет выявить источники избыточных потерь тепла и оценить их интенсивность.

Для определения причины повышенных теплопотерь необходима дополнительная информация о конструкции и тепловом режиме здания.

Глава 8. ВЫЯВЛЕНИЕ ДЕФЕКТОВ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИИ ЛИНЕЙНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Особенностью эксплуатации протяженных линейных технологических объектов является то, что локальные нарушения их состояния могут в большинстве случаев иметь незначительные проявления только в начальных или конечных узлах этих линий, в то время как не своевременное выявление этих нарушений приведет к остановке

всей цепи технологического процесса. Например, локальное разрушение слоя теплоизоляции трубопровода не вызовет какого-либо заметного снижения эффективности всей системы теплоснабжения. Однако дальнейшая ее эксплуатация может привести к коррозии ограждения трубопровода, его разрушению, что вызовет необходимость отключения теплосети для проведения ремонтных работ.

В связи с этим необходимо проведение регулярной проверки состояния всей линии трубопровода. А так как применение существующих контактных методов в этом случае невозможно, то, естественно, следует стремиться к поиску бесконтактных оперативных методов, позволяющих выполнить обследование объектов большой протяженности за короткое время. Использование термографии как раз и является тем методом, который способен решить поставленные задачи. Наряду с достоинствами этого метода — оперативностью получения информации, наглядностью представления результатов обследований, возможностью обследования протяженных объектов с большого расстояния, отсутствием необходимости контакта с обследуемым объектом и т.п. имеются и ограничения его применения. К одному из них следует отнести влияние окружающей среды на точность измерения теплового потока от объекта.

Например, такие внешние факторы, как солнце, дождь, снег, ветер, состояние атмосферы, запыленность и загазованность окружающей среды, оказывают существенное влияние на величину регистрируемого теплового потока от обследуемого объекта. Другим ограничением являются форма и относительные размеры измеряемых объектов. Как правило, они имеют круглую (цилиндрическую) форму и их длина во много раз превышает диаметр. Все это следует учитывать при выборе методики измерений и параметров диагностики и интерпретации термограмм.

Использование термографии предусматривает выбор для диагностики таких линейных технологических объектов, которые связаны с тепловыми процессами и имеют дефекты, проявляющиеся в виде нарушений нормального процесса теплообмена объекта с окружающей средой. Только в этих случаях использование термографии, как метода диагностики, будет целесообразным.

В.1. КОНТРОЛЬ СОСТОЯНИЯ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИИ ТРУБОПРОВОДОВ

При исследовании состояния теплоизоляции трубопроводов следует прежде всего выделить два обстоятельства, которые определяют особенности проведения контроля:

наземное или подземное расположение трубопровода;
существующий перепад температур между теплоносителем и окружающей средой.

Что касается наружных трубопроводов, то контроль качества их состояния заключается в проверке качества тепловой изоляции при монтаже и приемке ее после монтажа и ремонта, в проверке путем натуральных испытаний соответствия достигнутых теплотехнических

показателей запроектированных или нормативных в начальный период или после продолжительной эксплуатации. Основными качественными показателями тепловой изоляции являются величина тепловых потерь через изоляцию и температура наружной поверхности изоляции. Эти показатели не должны превышать утвержденные или предусмотренные в проектах нормы.

Натурные испытания тепловой изоляции проводят по этапам: внешний осмотр и обмер; тепловые испытания; контрольные вскрытия тепловой изоляции с отбором проб для лабораторных испытаний; паспортизация тепловой изоляции.

При внешнем осмотре фиксируется:

тип изоляционной конструкции, вид и состояние основных материалов теплоизоляционной конструкции, постоянство толщины изоляционных слоев и конструкции изоляции в целом, надежность крепления;

внешние дефекты (раковины трещины, нештукатуренные места). Особое внимание должно быть обращено на наличие трещин в изоляционном слое;

плотность прилегания покровного слоя к основному изоляционному слою (определяется легким простукиванием), плотность прилегания оклеечной ткани, дефекты ее внешнего вида и в заделке швов;

оценка внешнего вида конструкции теплоизоляции в целом с точки зрения промышленной эстетики.

Натурные испытания тепловой изоляции производятся с помощью теплоизмерительных приборов (тепломеров, термомпар, термощупов, ртутных термометров, вторичных измерительных приборов). Тепловые потери в виде удельного теплового потока измеряют тепломерами, т.е. измерителями тепловых потоков различных конструкций. Под тепловыми испытаниями понимается проведение комплекса измерений для выявления теплозащитных свойств изоляционных конструкций. Тепловые испытания являются наиболее ответственным и трудоемким этапом натуральных испытаний. В задачу тепловых испытаний входит определение следующих теплотехнических показателей: тепловые потери через изоляцию; температура горячей поверхности изоляции; температура холодной поверхности изоляции; температура окружающего воздуха; коэффициент теплопроводности изоляционной конструкции.

Протяженность контрольных участков и их количество зависят от объема исследуемой изоляции и определяются на месте.

В случае покрытия тепловой изоляции алюминиевыми кожухами или алюминиевой фольгой следует иметь в виду, что температура на поверхности кожуха выше, чем на поверхности изоляции с другими покрытиями, и что эта температура не может приравниваться к нормируемой температуре поверхностей.

В каждом испытываемом месте конструкции целесообразно устанавливать по два или три тепломера, так как изоляционная конструкция обычно имеет швы, крепежные рейки и пустоты, при пользовании одним тепломером не исключена возможность установки его

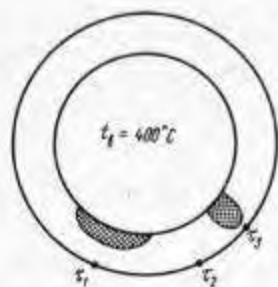


Рис.8.1. Изменение температуры поверхности трубопровода в месте расположения дефекта теплоизоляции при $t_H = 10^\circ\text{C}$ ($\Delta\tau_1 = \tau_1 - \tau_2 = 2^\circ\text{C}$; $\Delta\tau_2 = \tau_3 - \tau_2 = 4^\circ\text{C}$)

в место, не характерное для всей конструкции в целом. Величина теплового потока для данного места определяется как средняя из показаний нескольких термомеров, установленных в непосредственной близости друг от друга.

Перечисленные методы контроля состояния теплоизоляции трубопроводов трудоемки и не дают представления о действительном распределении теплоизоляции вдоль всего трубопровода. Для более быстрого получения данных о состоянии теплоизоляции рекомендуется термографирование с помощью тепловизора. Однако использование термографии для контроля теплоизоляции наземных трубопроводов затрудняется тем, что они часто сверху покрываются оболочкой из алюминиевых листов.

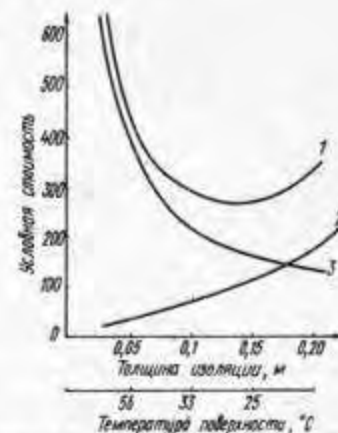
Как известно, коэффициент излучения алюминиевого листа изменяется от 0,05 (новый лист) до 0,4 (сильно окисленный после длительной эксплуатации).

Такое колебание коэффициента приводит к усложнению расчетов температуры поверхности, поэтому новая изоляция, как правило, не проверяется до тех пор, пока коэффициент излучения не достигает приблизительно 0,2.

Как правило, при термографических обследованиях наземных трубопроводов определяют только местонахождение участков с наружным слоем теплоизоляции по увеличению поверхности температуры в этом месте (рис. 8.1). Конечно, с увеличением поверхностной температуры следует предполагать и большие размеры дефекта теплоизоляции. Однако из-за алюминиевой оболочки определить точно дефект не представляется возможным.

Для точной идентификации дефекта используются вспомогательные методы, например ультразвуковой толщиномер. В подземных трубопроводах вследствие внутренней коррозии и износа отдельных частей сети может возникать течь, которая определяется по повышению потерь жидкого носителя. Путем разбивки на секции течь может быть локализована с точностью до 300–500 м. Затем внешний осмотр выявленного участка позволяет уточнить место утечки по таким признакам, как парение под землей, увлажнение участков грунта, подтаивание снега и т.д. В этих участках трубопровод разрывается и ищется место повреждения. Однако такое видимое проявление участка поврежденного трубопровода крайне редко. В большин-

Рис.8.2. Относительная зависимость стоимости теплоизоляции и энергопотерь через ограждение при температуре теплоносителя 600°C
1 – сумма расходов; 2 – стоимость изоляции; 3 – стоимость энергопотерь



стве случаев точная идентификация места дефектов крайне затруднительна.

В этих случаях эффективно использование тепловизоров. Их камера устанавливается на автомобиле и преимущественно в ночное время, когда отсутствует влияние солнечной радиации, проводится осмотр линии трубопровода.

Вначале определяется участок повреждения, а затем с помощью изотермических функций, анализируя форму и температурный контраст аномалии температурного пояса, отмечается место повреждения с точностью до 1–2 м.

Во всех случаях обнаружения нарушений теплоизоляции трубопроводов или ее недостаточности следует оценить стоимость ремонта или дополнительной теплоизоляции и стоимость вызываемых ими теплопотерь. Увеличение слоя изоляции, а следовательно, и его стоимость приводит к уменьшению теплопотерь. Как видно из рис. 8.2, на котором нанесены относительные стоимости слоя теплоизоляции и стоимости теряемого тепла, результирующие расходы имеют довольно выраженный оптимум, положение которого может быть использовано в качестве критерия оценки необходимости произведения ремонта теплоизоляции трубопровода.

8.2. ОБСЛЕДОВАНИЕ ДЫМОВЫХ ТРУБ

Дымовые трубы, обслуживающие различные по типу котлоагрегаты, являются сложными и дорогостоящими высотными сооружениями, поэтому для увеличения срока их службы и надежности необходима правильная их эксплуатация и тщательное, систематическое наблюдение и уход за ними.

Принятие своевременных мер для предохранения дымовых труб от поврежденной удлинит межремонтный период, удешевляет эксплуатацию, а также позволяет предотвратить аварии.

Существующая методика обследования дымовых труб позволяет достаточно точно определять имеющиеся повреждения и дефекты, но сопряжена со значительными трудностями в части проведения работ на высоте, а также материальными затратами при проведении внутренних осмотров, связанных с остановками котлоагрегатов на время проведения осмотра и монтажа оборудования до 2–3 сут.

По существующей методике обследование железобетонных стволов дымовых труб проводится в два этапа: наружное обследование, внутреннее обследование.

Наружное обследование железобетонного ствола дымовой трубы производится по всей высоте с ходовых лестниц и световых площадок, имеющих на трубах. При необходимости в местах, недоступных обзору, подвешивается люлька специальной конструкции на роликах.

При проведении наружного обследования фиксируются следующие дефекты: отслоение защитного слоя бетона; оголение вертикальной и горизонтальной арматуры; оголение прогнутой арматуры; прочность бетона в секциях ствола (выборочно); состояние рабочих швов бетонирования секций; наличие разрушающихся швов бетонирования; наличие в стволе труб горизонтальных и вертикальных трещин; наличие сквозных разрушений ствола дымовых труб; наличие высолов и намоканий (выход конденсата на наружную поверхность); определение состояния металлоконструкций и молниеотводы и т.д.

С земли проводится наблюдение за вертикальностью труб с помощью теодолита.

Внутренний осмотр осуществляется из люльки, подвешенной к блочному устройству, монтируемому на оголовке дымовой трубы.

Подъем проводится на высоту, равную $H_{\text{трубы}} = 10$ м (высота верхнего барабана футеровки).

При внутреннем осмотре фиксируются следующие дефекты: состояние кирпичной кладки футеровки на серно-кислотную коррозию; швы кладки (при выполнении футеровки из кислотоупорного кирпича на кислотоупорном растворе), последний имеет большую подвижность (пластичность), вертикальные швы имеют пустоты; состояние горизонтальных и вертикальных компенсаторов; наличие трещин в футеровке, их направление, ширина раскрытия и длина; наличие обрушений в барабанах и целостности футеровки. Вскрываются участки футеровки для определения состояния внутренней поверхности железобетонного ствола и насыщения сульфатами раствора и кирпича.

К недостаткам внутренних осмотров относится то, что детальное обследование проводится в одной плоскости в зоне продвижения люльки сверху-вниз. При необходимости обследования других противоположных зон необходима перестановка блочного приспособления, что увеличивает продолжительность остановки котлоагрегатов еще на 1 сут.

Обследование с помощью кольцевой площадки увеличивает сроки обследования до 5 сут. Проведение таких обследований приводит

к значительным экономическим и трудовым затратам, связанным с необходимостью остановки котлоагрегатов, изготовлением специальной оснастки, подготовкой подъемного оборудования и т.д. Кроме этого, проведение таких обследований не безопасно для исполнителей.

В связи с этим использование тепловизоров значительно облегчает процесс обследований. Возможность же и эффективность его использования объясняется следующими обстоятельствами.

Ограждение трубы находится в постоянном температурном перепаде между внутренней и наружной средами. Температура наружного воздуха, естественно, зависит от климатических условий и колеблется от -30 до $+30^{\circ}\text{C}$, а температура отводимых газов внутри трубы равна $+40$ – 60°C .

Поэтому с точки зрения применимости тепловизионного метода дефекты ограждений дымовых труб можно условно разделить на две группы:

1) дефекты, связанные с нарушением целостности ограждающих конструкций (трещины, разрушения бетона, коррозии футеровки и т.п.);

2) дефекты, связанные с изменением теплопроводности и сопротивления газопроонианию материалов (пористость бетона, образование пустот, трещины и т.п.).

Обе эти группы дефектов в конечном счете проявляются в виде температурных аномалий на наружной поверхности ствола. Размеры и величина температурных аномалий зависят от размеров и вида дефекта конструкции ограждения и использованных материалов, а также от целого ряда климатических параметров. Конечно, не все дефекты могут быть выявлены таким образом, но возможность проведения обследований без остановки оборудования, на любой стадии его эксплуатации, выявления дефектов на ранней стадии их возникновения, при значительном снижении трудозатрат позволяет для этих целей рекомендовать тепловизионный метод.

Обследования могут проводиться круглогодично, но при условии отсутствия солнечного излучения, дождя, снегопада и тумана. Кроме того, следует учитывать влияние скорости и направления ветра на результаты термографирования.

Одним из важных параметров, который следует принимать во внимание при обследовании, является перепад давлений между наружной и внутренней средой, т.е. необходимо выяснить работает ли вся труба под разрежением или некоторые участки находятся под избыточным давлением.

При проведении тепловизионных обследований выбираются точки, с которых будет проводиться обследование трубы. Выбор производится таким образом, чтобы поверхности трубы, находящиеся в поле зрения тепловизора при обследовании с двух последних точек, перекрывались и вся поверхность трубы была доступна для обследования. Точки при обследовании, по возможности, должны располагаться ближе к поверхности трубы. Если труба с какой-либо стороны недоступна для обзора с поверхности земли, возможен

выбор точек на крышах главных корпусов, других технологических сооружений ТЭС. Расстояние от точки обследования до поверхности трубы не должно превышать 200 м.

Одновременно с тепловизионным обследованием производится визуальный осмотр поверхности трубы с помощью бинокля. Видимые дефекты (разрушение ствола трубы, трещины, обнажение арматуры) фиксируются на плане трубы.

Кроме того, для последующего анализа результатов тепловизионного обследования на плане фиксируется защитная окраска трубы, пятна грязи, сажи и др. Видимые дефекты трубы фиксируются при помощи фотоаппарата.

В процессе обследования в выбранных на поверхности трубы реперных точках измеряется температура поверхности и соответствующий уровень изотерм по шкале тепловизора. Одновременно измеряется температура наружного воздуха. Обследование трубы производится последовательно с каждой из выбранных точек. При анализе размеров, величины и знака температурных аномалий для определения вероятного характера дефектов, их вызывающих, следует оценить возможное влияние на них внешних факторов.

Понижение или повышение температуры в месте расположения газопроницаемого дефекта, по сравнению с бездефектной зоной зависит от знака перепада давления отводимых газов и наружного воздуха.

Оценка условий избыточности давления отводимых газов или разрежение может быть определено путем расчета величины критерия Рихтера.

Критерий Рихтера R рассчитывается по следующей формуле:

$$R = (\lambda + 8i) h_D / \Delta\gamma D_0, \quad (8.1)$$

где λ — коэффициент аэродинамических потерь на трение о футеровку, равный для кирпичной футеровки 0,05; i — уклон образующей внутренней поверхности футеровки верхнего участка трубы (в большинстве железобетонных

труб составляет 0,015); $h_D = \gamma_{\Gamma} \frac{w_0^2}{2g}$ — динамический напор газового потока на выходе из трубы, кг/м²; D_0 — диаметр устья трубы, м; $\Delta\gamma = \gamma_{\Gamma} - \gamma_{\Gamma}$ — разность плотностей окружающего воздуха и дымовых газов, кг/м³; g — ускорение свободного падения; $w_0 = \frac{V_0}{0,785D_0^2} \sqrt{\frac{273 + t_{\Gamma}}{273}}$ — скорость дымовых газов в устье трубы, м/с; V_0 — объем дымовых газов с учетом присосов; t_{Γ} — температура дымовых газов, °С.

В случае, если $R \leq 1$, вся труба работает под разрежением. Если $R > 1$, имеет место избыточное давление.

Описание дефектов дымовых труб и соответствующий им характер температурных аномалий при различных видах перепадов давлений приведены в табл. 8.1.

При определении типа дефекта следует уточнить, не вызвана ли аномалия на термограмме за счет различия в коэффициентах излучения участков поверхности.

Таблица 8.1. Виды дефектов и соответствующий им характер температурных аномалий на наружной поверхности ограждений трубы

Тип дефекта	Тепловое поле		Примечание
	труба под разрежением	труба под избыточным давлением	
Дефектный шов бетонирования	Горизонтальная холодная линия	Горизонтальная теплая линия	—
Трещина несущего ствола	Холодная линия	Холодная линия	Подтверждается при визуальном осмотре
Сквозная трещина несущего ствола	То же	Теплая линия	То же
Понижение сопротивления газопроницанию материала несущего ствола	Холодный участок	Теплый участок	"
Разрушение несущего ствола	В зависимости от глубины разрушения — холодный либо теплый участок		Устанавливается при визуальном осмотре
Коррозия футеровки до 60%	Теплый участок	Теплый участок	Устанавливается при визуальном осмотре
Обрушение футеровки	То же	То же	То же
Понижение сопротивления газопроницанию футеровки	"	"	"
Отсутствие теплоизоляции в прослойке между стволом и футеровкой	"	"	"
Золотые отложения	Холодный участок	Холодный участок	Возможность возникновения уточняется по проекту трубы

Тепловизионные обследования дымовых труб, газопроводов и ограждающих конструкций корпусов проводились в Конаковской ГРЭС и ТЭЦ-21 Мосэнерго. Цель обследований — выявление дефектов ограждающих конструкций.

При проведении обследований использовалась следующая аппаратура: тепловизор АГА-750 с объективом 7°, контактный термощуп "Комарк" для измерения температуры в реперных точках; психрометр Ассмана для измерения температуры и влажности воздуха; бинокль БНП 7x50 для визуального обследования выявленных дефектов на поверхности стволов труб; мерная лента для определения линейных размеров в ходе обследований.

Обследование трех дымовых труб, а также ограждающих конструкций котлоагрегатного цеха Конаковской ГРЭС были проведены с 7 по 12 июня 1982 г.

Метеусловия в период проведения обследований были следующими: температура воздуха — 6–10°С; относительная влажность воздуха — 80%; сплошная облачность; скорость ветра — 3–5 м/с.

Рассмотрим технические характеристики обследованных труб.



Рис.8.3. Термограмма наружной поверхности дымовой трубы № 1

Железобетонные дымовые трубы № 1 и 2 возведены по проекту, разработанному ВНИТИ Теплопроект в 1961 г. Высота труб 180 м, диаметр устья 7 м. Футеровка выполнена высотой 175 м от отметки 5 до отметки +180 м из локального кирпича марки 150. Между стволами и футеровкой оставлена прослойка, заполненная минераловатными матами.

Дымовая труба № 3 возведена по проекту № 32091 ВНИТИ Теплопроект. Высота трубы 250 м, диаметр устья 8 м. Ограждающая конструкция трубы состоит из железобетонного ствола, гидроизоляции, прижимной стенки из глиняного обыкновенного кирпича, теплоизоляционной прослойки, заполненной минераловатными матами, футеровки из кислотоупорного кирпича. Футеровка выполнена от отметки +5 м до верха трубы. На оголовках всех труб предусмотрены чугунные колпаки для защиты бетона, прослойки и футеровки от агрессивных дымовых газов и атмосферных осадков. Труба № 1 возводилась с 1963 по 1964 г., труба № 2 – с 1965 по 1966 г., труба № 3 – с 1966 по 1968 г.

Температура отводимых газов 180°C. Агрессивные составляющие по объему составляют, %: CO₂ – 10,55; SO₂ – 0,35; H₂O – 13,5; N₂ – 75,5.

Для всех труб был рассчитан критерий Рихтера. Для труб № 1 и 2 он определялся по формуле:

$$R = \frac{(\lambda - 8i) h_D}{\Delta \tau D_0} = \frac{(0,05 + 8 \cdot 0,015) 36,2}{0,436 \cdot 7} = 2,02 > 1. \quad (8.2)$$

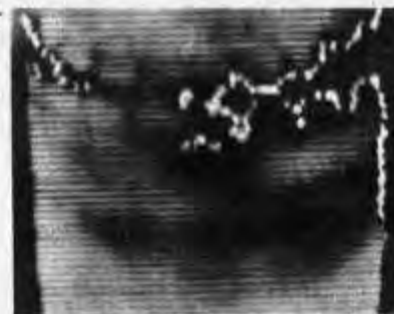
Для трубы № 3

$$R = \frac{(0,05 + 8 \cdot 0,015) 51,5}{0,38 \cdot 8} = 2,88 > 1. \quad (8.3)$$

Следовательно, все дымовые трубы на некотором верхнем участке работают под избыточным давлением по отношению к наружному воздуху.

В процессе тепловизионного обследования было проведено пробное термографирование поверхности каждой дымовой трубы с фоторегистрацией термограмм участков с температурными аномалиями.

Рис.8.4. Термограмма наружной поверхности дымовой трубы № 2



Съемка велась с поверхности земли, а также с крыши главного корпуса ГРЭС.

Ряд температурных аномалий был обнаружен на поверхности каждой трубы. Примеры таких аномалий приведены на рис. 8.3.

Температурные аномалии, обнаруженные на поверхности дымовых труб, интерпретировались как дефекты следующих типов:

холодные горизонтальные линии с $\Delta \tau = 4-6^\circ\text{C}$, как дефектные швы бетонирования;

теплые участки с $\Delta \tau = 4^\circ\text{C}$ – коррозия футеровки.

На рис. 8.4 видна горизонтальная холодная линия ($\Delta \tau = 2-4^\circ\text{C}$) на поверхности трубы, возникшая в результате инфильтрации внешнего холодного воздуха через некачественный шов бетонирования. Ниже шва бетонирования наблюдается холодное (темное) пятно. При дополнительном визуальном осмотре было установлено, что оно связано с разрушением защитного слоя бетона.

8.3. ВЫЯВЛЕНИЕ ДЕФЕКТОВ В ЭЛЕМЕНТАХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ

Использовать термографию в энергетической промышленности можно по всей цепи производства и распределения энергии: от электростанций и линий электропередачи до подстанций, районных и местных электрических сетей и, наконец, по потребителей электроэнергии – заводов, производственного оборудования и т.д.

Метод термографии оказался успешным и смог развиваться в качестве средства контроля электрооборудования и сетей благодаря тому, что он обеспечивает обнаружение неисправностей в ходе эксплуатации энергосистемы и на ранней стадии их возникновения, большую оперативность (обследование можно проводить с автомобиля, вертолета).

Электросопротивление и наличие тепла – два взаимосвязанных фактора. Электрический ток, протекающий через некий проводник или диэлектрик, создает определенное количество энергии или тепла, которое выражается в ваттах. Если электросопротивление уменьшить, то количество тепла будет возрастать пропорционально увели-

чению силы тока. Таким образом, в случае изолятора, у которого нет предела сопротивления, изменение его физического состояния уменьшит его сопротивление, увеличит силу тока, а это означает, что возрастает выход тепла. Это можно определить с помощью ИК тепловизионной системы.

Другим таким же ярким примером является искрение или другими словами образование дуги. В принципе это подобно изменению электрического сопротивления, но при искрении изоляционной средой являются воздух и влага, которые образуются в результате уменьшения сопротивления и увеличения силы тока. Таким образом, образование дуги, хотя и не заметно невооруженным глазом, почти всегда приводит к увеличению выхода тепла.

Действительный объем тепла, излучаемого поврежденным участком, будет функцией как нагрузки (силы тока), так и окружающих условий. Более высокие токи оказывают повышенную нагрузку на участки и создают лучшие условия для испытаний. Очевидно, что некоторые повреждения на начальной стадии могут быть определены только в том случае, если они подвержены сильным нагрузкам. Сильные повреждения почти всегда проявляются при любых нагрузках. Окружающие условия могут влиять на термодинамику поверхности (скрывать или подчеркивать желаемый эффект). Сильная влажность или холодные ветры уменьшают температуру поверхности, тем самым скрывают истинный выход тепла на поверхность. Теплые безветренные ночи увеличат эффект. Исходя из этих факторов необходимо, чтобы ток или нагрузка стали основным условием определения оптимального времени проведения испытаний.

Во многих странах линии электропередачи подвергают регулярной проверке с целью обнаружения возникающих неисправностей. Проверка осуществляется обычно с помощью инфракрасного оборудования, смонтированного на вертолете, летящем вдоль линии электропередачи. Применяя вертолет, можно проверить за день 300 км линии электропередачи. Оптимальное расстояние летящего вертолета от линии при скорости примерно 70 км/ч составляет 90–120 м. Если температура соединителя превышает температуру прилегающего провода всего лишь на 3°C, то это можно без труда обнаружить. Для обеспечения непрерывной и экономичной работы вертолета желателен установка контрольных критериев для 50%-ной нагрузки. В этом случае можно обнаружить большинство неисправных соединений и почти наверняка очень плохие соединения, находящиеся на грани отказа. В некоторых случаях подобную проверку можно проводить с помощью наземной системы, например аппаратуры, смонтированной на вездеходе. Обнаружение дефектных соединителей на подстанциях, начиная от высоковольтных, магистральных энергетических сетей (например, 400 кВ) и до распределительных подстанций (например, 11 кВ), не менее важно, чем обнаружение неисправных участков на воздушных линиях электропередачи. Однако задача облегчается в значительной степени тем, что проверку можно производить с уровня земли, а соединители находятся на подстанции.

Поскольку вся линия электропередачи находится во время обследований под нагрузкой, то ее температура, как правило, выше, чем температура воздуха. Однако, поскольку наблюдение линии ведется на тепловом фоне, которым может быть земля, при обследовании с вертолета, либо небо, при обследовании с автомашины, то следует это обстоятельство принимать во внимание. Особо это следует учитывать при съемке с вертолета, так как поверхность земли, нагретая солнцем, может иметь высокую и неравномерную фоновую температуру.

Дефекты соединителей определяются, как правило, по повышению их температуры за счет увеличения электрического сопротивления дефектных участков. По величине избыточной температуры и оценивают степень дефектности элемента. Выявленные элементы линий электропередач с избыточной температурой подлежат более детальному инструментальному контролю.

При определении температуры по результатам тепловизионных съемок следует принимать во внимание все внешние дефекты, которые оказывают влияние на ее величину, а также учитывать соотношение расстояния, с которого ведутся обследование и линейные размеры объекта, как это описано в гл. 3.

Следует отметить, что, как правило, коэффициент излучения окисленной или загрязненной медной или алюминиевой поверхности элементов электропередач равен 0,6–0,8.

Особо следует учитывать влияние ветра, который охлаждает обследуемые объекты. Учесть его влияние можно путем введения соответствующей поправки к измеряемой величине температуры.

Из энергии, поступающей к компоненту в виде электротока, часть излучается (ИК излучение), часть теряется за счет конвекции. При скорости ветра, превышающей 0,2 м/с, наблюдается принудительная конвекция. В диапазоне 0,2–7 м/с при расчетах можно использовать следующую формулу:

$$T_2/T_1 = (V_1/V_2)^{0,448} \quad (8.4)$$

В этой формуле T определяется, как избыточная температура, равная разнице температур между горячим пятном и соседним компонентом. На практике это означает, что избыточная температура, измеренная при скорости ветра 5 м/с, примерно в 2 раза больше, чем при уменьшении скорости ветра до 1 м/с.

Избыточная температура зависит также от нагрузки. Она прямо пропорциональна квадрату силы тока, проходящего через компонент:

$$T_1/T_2 = (I_1/I_2)^2 \quad (8.5)$$

Действительная нагрузка I_2 выражается в процентах от максимальной нагрузки I_1 . Для увязки температуры, скорости ветра и нагрузки была построена номограмма изменения температуры с учетом скорости ветра и нагрузки (рис. 8.5). Этот расчет можно произвести также с помощью микрокалькулятора.

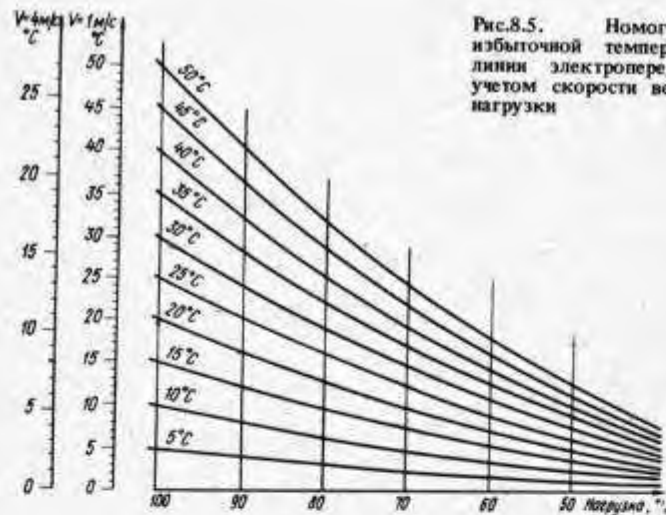


Рис.8.5. Номограмма избыточной температуры линии электропередач с учетом скорости ветра и нагрузки

Сильные магнитные поля зачастую искажают термическое изображение. В результате на экране оно смещается по вертикали или горизонтали. Во избежание этого иногда достаточно передвинуть аппаратуру на несколько метров или использовать удлинительный кабель с тем, чтобы вывести дисплей из магнитного поля (где имеются сильные нагрузки). Магнитное поле не влияет на само измерение, а лишь на регулировку изображения.

При оценке степени дефекта элемента, имеющего избыточную температуру, следует принять во внимание при какой нагрузке работает линия (равномерной или переменной) и, какие нагрузки на этот элемент ожидаются в последующее время, какое положение занимает выявленный элемент в линии.

Как показывает опыт, избыточная температура, измеренная непосредственно в месте неисправности в зависимости от опасности неисправности может быть разделена на три степени (по отношению к нагрузке, составляющей 40–50% максимальной):

1) *избыточная температура* $< 5^{\circ}\text{C}$. Обнаруженное появляющееся горячее пятно следует держать под контролем и принять меры во время проведения запланированного по графику технического обслуживания;

2) *избыточная температура* $5\text{--}30^{\circ}\text{C}$. Развившееся горячее пятно. Принять меры как можно быстрее, учитывая условия работы установки;

3) *избыточная температура* $> 30^{\circ}\text{C}$. Аварийное горячее пятно. Принять немедленные меры с учетом условий работы установки.

8.4. ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ДВИЖУЩЕЙСЯ СТЕКЛОПЛАСТИКОВОЙ ЛЕНТЫ В ПРОЦЕССЕ ЕЕ ПРОИЗВОДСТВА

Изготовление стеклопластиков является сложным технологическим процессом, при котором выходные параметры изделия, характеризующие его качество, определяются большим числом факторов. Одним из ответственных этапов их изготовления является процесс термообработки. Температура стеклопластиковой ленты является параметром, который существенно влияет на основные свойства готового изделия.

Несмотря на широкое развитие различных методов измерения температуры до настоящего времени отсутствуют методы, отвечающие специфике данного технологического процесса. И как следствие этого затруднено решение вопроса по выявлению связи между температурой ленты и другими технологическими параметрами, влияющими на нее и определяющими режимы термообработки.

Основные требования к методу измерения температуры стеклопластиковой ленты в процессе ее производства следующие:

должна быть обеспечена бесконтактность измерения; для обеспечения динамической погрешности в 5% при скорости ленты 0,5 м/с постоянная времени устройства не должна превышать $2 \cdot 10^{-3}$ с;

условия прогрева ленты, ее малая толщина (не более 0,2 мм) позволяют считать, что температура ленты на ее поверхности равна интегральной температуре.

В результате рассмотрения этих требований могут быть предложены два метода ее измерения – теплорадиационный и диэлектрический.

Для решения вопроса об использовании тепловизионного (тепловизионного) метода следует прежде всего оценить излучательную способность поверхности стеклопластиковой ленты, ее спектров пропускания и отражения при различных ее температурах.

Как известно, с увеличением температуры ленты до 160°C коэффициент пропускания излучения в спектральном диапазоне 2–3 мкм увеличивается по сравнению с его значением при температуре 23°C на 12% и составляет 0,12. Коэффициент зеркального отражения во всем спектральном диапазоне ИК излучения не превышает 0,01.

Коэффициент излучения, рассчитанный на основании закона Кирхгофа для полупрозрачных тел при температуре 160°C в спектральном диапазоне $2\text{--}3 \cdot 10^{-6}$ м, составляет 0,86 и может привести к погрешности измерения температуры на 3–5%, при условии своевременной градуировки прибора. При температуре же 23°C этот коэффициент имеет величину 0,68, что приводит к существенному увеличению погрешности измерений.

Допустимая абсолютная погрешность измерения температуры стеклопластиковой сети при различных режимах термообработки в диапазоне температур $60\text{--}200^{\circ}\text{C}$ составляет $\pm 4^{\circ}\text{C}$ при условии относительной погрешности измерения скорости движения ленты не более $\pm 2\%$.

С увеличением температуры ленты при постоянной скорости ее движения допустимая погрешность измерения температуры увеличивается.

Поэтому теплорадиационный метод следует рекомендовать для измерения температуры стеклопластиковой ленты в диапазоне температур свыше 70°C. При этом будет обеспечена допустимая погрешность измерений.

Глава 9. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КАЧЕСТВА ТЕПЛОИЗОЛЯЦИИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПЕЧЕЙ

Процессы, связанные с высокотемпературной обработкой материалов, имеют место в цветной и черной металлургии; химической и нефтехимической; стекольной, целлюлозно-бумажной, металлообрабатывающей и др.

Сами процессы весьма различны, но методы контроля за ними имеют много общих черт и особенностей. Это прежде всего в контроле и регулировании температуры самого обрабатываемого материала, поскольку почти во всех случаях обеспечение равномерности прогрева приводит в дальнейшем к понижению качества конечной продукции. Кроме того, необходимо осуществлять контроль не только за состоянием обрабатываемого материала, но и за состоянием производственного оборудования (печей, котлов, нагревательных элементов и др.).

Контроль за состоянием производственного оборудования важен не только с точки зрения обеспечения необходимых параметров производственного процесса, но и с экономической точки зрения, т.е. продление срока службы оборудования, уменьшение потерь энергии из-за недостаточной теплоизоляции, повышение эффективности работы теплоагрегатов и т.д.

Контроль за состоянием печей и котлов проводится различными способами, которые в основном сводятся к контактным измерениям и визуальному определению температуры в отдельных участках системы, работающих в наиболее напряженных условиях. Визуальный контроль осуществляется периодически во время остановки оборудования. Однако срок остановки на профилактику бывает настолько мал, что работы приходится проводить не в остывших печах, что связано с дополнительными сложностями по обеспечению безопасности обслуживающего персонала.

Печи, как правило, состоят из внешней стальной конструкции и внутренней футеровки, выполненной из огнеупорного керамического кирпича. Футеровка постепенно изнашивается из-за больших термических и механических нагрузок, которым она подвергается. Поэтому во избежание дорогостоящих и опасных прорывов печь должна регулярно останавливаться для ремонта футеровки.

Обычно перекладка футеровки осуществляется через определенное время, определяемое опытным путем. Для этого периодически производится измерение внешней температуры поверхности ограж-

дения печи контактным термометром по точкам. В обоих случаях существует риск пропуска критических мест.

Использование дистанционного измерительного оборудования является во многих случаях единственным способом решения указанных проблем. В связи с этим использование приборов измерения температуры поверхности на основе регистрации инфракрасного излучения является очень перспективным. Причем это относится как к радиометрическому измерению температуры одной точки или одного выбранного участка поверхности, так и к системам получения термоизображения.

Термография позволяет проводить как внешний осмотр распределения температур на наружной поверхности ограждений печей, так и внутренний осмотр сводов. Следует отметить, что только в последние годы в результате усовершенствования методов и самой регистрирующей аппаратуры, разработки специальных оптических материалов, стало возможным регистрировать тепловое излучение объектов сквозь газы и пламя, что являлось основной трудностью при внутреннем осмотре. Таким образом, при осмотре поверхности ограждения печей ИК камерой может регистрироваться изменение и распределение внешней температуры печи. Это дает воспроизводимый метод проверки состояния футеровки, который вместе со статистическим методом приведет к оптимальному использованию печи.

Современные тепловизионные системы позволяют проводить как качественный контроль за состоянием футеровки, т.е. ограничиваться выявлением участков с повышенной температурой на наружной поверхности, что свидетельствует о неблагоприятном состоянии теплоизоляции ограждения в этом месте, так и осуществлять количественную оценку степени дефектности выявленного участка, проводить наблюдения за характером изменения толщины футеровки и оценки определения времени остановки ее на ремонт.

Конечно, ограждения печей настолько разнообразны, что нельзя дать единой методики оценки их состояния. В каждом конкретном случае, в зависимости от требований технологии, конструктивных особенностей, степени нагрузки и т.д., следует выработать соответствующие критерии оценки, основанные на опыте эксплуатации конкретного обследуемого объекта в целом или отдельных его участков.

При таком методе контроля представляется возможным составлять рабочие графики в зависимости от действительного состояния огнеупорного и изоляционного материалов. Во многих случаях ИК контроль обеспечивает экономию материальных средств и времени, дает более точную информацию.

ИК контроль используется также для контроля сосудов с внутренней металлической футеровкой, огнеупорной изоляцией и внешним корпусом. Когда повреждена огнеупорная изоляция, можно провести ремонт, введя с помощью насоса новые огнеупорные материалы. Но для этого необходимо знать, где произошло

повреждение и каковы его размеры. ИК контроль поможет получить нужную информацию о месте ремонтных работ и для проверки результатов.

9.1. КАЧЕСТВЕННЫЙ КОНТРОЛЬ ДЕФЕКТОВ ОГРАЖДЕНИЙ ПЕЧЕЙ

Использование ИК тепловизионной системы для контроля огнеупорных материалов и изоляции ограждения печей является одной из наиболее важных областей применения тепловизионной аппаратуры. Как известно, печь представляет собой сосуд, внутри которого поддерживается равномерная температура. На внешней поверхности печи распределение температуры является прямой функцией активной теплопроводности через теплоизоляцию и внешнюю конструкцию ограждения.

У идеального сосуда температура на его внешней поверхности распределяется также равномерно. При появлении трещины или другого дефекта в изоляционной среде температура наружной поверхности сосуда в месте нарушения изоляции увеличивается прямо пропорционально появившемуся дефекту. Таким образом, определение области нарушения изоляции (дефекта) основывается на неравномерной проводимости тепла от внутренней и внешней поверхности изучаемого объекта.

В практике встречаются и другие нарушения оболочки печи, которые вызывают неравномерное распределение тепла. Они включают решетки, нарушение огнеупорности, наличие отверстий и т.д. Однако даже при таких нарушениях контроль огнеупорных материалов с помощью тепловизионной аппаратуры не представляется сложным и не требует много времени.

В принципе этот метод может применяться повсюду, где на основании температуры поверхности можно сделать вывод о рабочем состоянии агрегата или его повреждении. Термография может применяться, когда температура поверхности объекта позволяет определить нарушение или на основании распределения температуры сделать вывод о состоянии объекта.

В данном случае тепловизор можно применять не только для выявления дефектов, но и оптимизации режима работы печей, обеспечивающего экономию энергии и улучшение управления производственным процессом.

Трудности контроля могут возникнуть из-за наличия различных сторонних агрегатов, трубопроводов и других предметов, находящихся в поле зрения тепловизора, мешающих свободному обзору и не позволяющих произвести съемку всей поверхности объекта, поэтому качество съемки в значительной степени зависит от выбора точки обзора объекта. Рассмотрим отдельные случаи, в которых может быть использован тепловизионный метод контроля:

Коксовый завод Контроль батарей коксовых печей и сборника коксового газа

Доменная печь	Кожух шахты доменной печи, формы, трубопровод для горячего литья, пылесборник, газоочистительная установка, охлаждающие контуры, футеровка
Чугуновозы	Прочность футеровки
Агломерационная установка	Температурные условия в ленточной агломерационной машине, зажигательный горн
Миксер для чугуна	Футеровка
Конвектор	Футеровка, несущая конструкция
Разливочный ковш	Нагрев, футеровка
Разливка в изложницы	Условия охлаждения
Непрерывная разливка	Брызгало, распределение температуры на слябе, контроль частот установки
Машина для огневой зачистки	Рабочее состояние
Методическая печь	Условия нагрева, футеровка
Прокатный стан	Рабочее состояние валков и брызгал
Отжигательный цех	Футеровка колпаков отжигательной печи
Цинкование	Футеровка печи
Газопровод	Контроль осаждения пыли, мест утечки
Нефтяные цистерны	Контроль заполнения, дефекты изоляции
Электрооборудования	Дефекты выводов, контроль установок на сопротивление

В качестве примера рассмотрим способ контроля ковша в процессе его работы.

Как известно, после удаления серы из чугуна производят его разливку, которая осуществляется после подачи ковша чугуновозом на разгрузочную шахту, где ковш вместе с чугуновозом поворачивается вокруг оси от 0° до 90°. При повороте ковша чугун переливается в ковш, стоящий внизу. Розлив чугуна производится в течение длительного времени с изменением положения чугуновоза с ковшем несколько раз.

Такой промежуток времени и переменное положение чугуновоза является вполне достаточным для проведения тепловизионного контроля разливочного ковша. Измерение температуры оболочки ковша производится с четырех точек. Контролю подвергаются как кожух, так и дно ковша.

Термографирование кожуха ковша производится 2 раза, когда ковш находится в нормальном (транспортном) положении и при разливе чугуна. При разливе чугуна ковш находится у опорной плиты напротив места установки измерительного прибора. В таком положении места корпуса ковша и футеровки, которые подвергаются самому большому износу, хорошо видны.

Термографирование дна ковша производится также 2 раза, термографическая камера устанавливается вначале на одной, а потом на другой стороне чугуновоза и делаются соответствующие снимки. При этом расстояние между камерой и объектом достигает обычно 4 м, а при термографировании корпуса 13 м.

Как уже отмечалось, коэффициент излучения исследуемой поверхности имеет решающее значение для точности термографических измерений, поэтому при каждом измерении следует определять коэффициент излучения. Для этого на измеряемые места устанавливается термозлемент, с помощью которого получают данные инфракрасного излучения и фактической температуры поверхности тела.

По ним производится расчет коэффициента излучения. Вычисленные значения температуры ковша чугуновоза заносятся в протокол.

На основании сравнения протокола измерений с предыдущими можно сделать вывод о состоянии футеровки ковша чугуновоза.

В первую очередь анализируются сведения о равномерном или неравномерном износе огнеупорной футеровки. Неравномерный износ распознается по отклонению от нормального распределения цветов теплового поля. Например, пятно с более темным цветом указывает на более сильный износ футеровки. Если наблюдается пятно с особенно низкой температурой, то можно сделать вывод, что в этом месте имеется отложение шлака или образование настыли. Равномерное распределение по всему полю термограммы среднего уровня температуры позволяет судить об общем износе футеровки. Как показали исследования, чем выше уровень температуры, тем меньше прочность футеровки.

На температуру поверхности и оценку состояния футеровки существенное влияние оказывают сила ветра и температура атмосферы во время движения чугуновоза от доменной печи к сталеплавильному заводу, степень наполненности ковша, количество возок в день, простои и т.д.

С помощью тепловизора осуществляется также контроль каупера. Поскольку внешний кожух каупера не снабжен особой изоляцией и стальная обшивка не закрыта, может хорошо наблюдаться распределение тепла на поверхности каупера. Это позволяет судить о равномерности прогрева насадки в каупере, т.е. о наличии повреждений в изолирующей кладке или состоянии насадки.

Как известно, миксер для чугуна служит буфером между доменной печью и сталеплавильным цехом, он является смесителем поступающих из доменной печи различных сортов чугуна.

Из-за частых заполнений и опорожнений миксера в течение эксплуатационного периода в зоне сливочного отверстия футеровка изнашивается значительно быстрее, чем в остальной части, поэтому контроль миксера для чугуна является также важной областью применения инфракрасной техники измерения.

Наружный осмотр работающих промышленных печей может также сочетаться с термографическими измерениями. На термоизображениях поверхности печи ясно видны местные участки перегрева, трещины и слишком тонкая футеровка печей. Температурные измерения наружной обшивки, проведенные с помощью изотермической функции, помогают определить степень износа футеровки и время остановки печи на ремонт.

Большая опасность для людей, работающих около огромных печей, и высокая стоимость замены футеровки требуют особо внимательного и надежного контроля состояния ограждений печей. Термография в этих случаях может оказать значительную помощь.

Большие преимущества имеет термографический контроль по сравнению с другими методами в случае, если замена футеровки отдельных печей является очень дорогостоящей операцией из-за их

больших размеров и значительного времени, необходимого для замены футеровки.

Термографические обследования могут быть полезны и при остановках печей. Предварительно сделанные, в ходе работы печей, термограммы приносят большую пользу, чем при визуальных осмотрах, так как часто бывает очень трудно обнаружить визуально опасные трещины в холодной футеровке. С другой стороны, неопасные трещины, увеличивающиеся при охлаждении футеровки, имеют тенденцию к усадке, когда в печи снова устанавливается рабочая температура. Термография может быть использована в этом случае для предупреждения ненужной замены футеровки, показывая, что эти трещины не являются опасными, и позволяя, таким образом, избежать дополнительных расходов.

В таких случаях термографический контроль позволяет отложить замену футеровки до тех пор, пока это становится абсолютно необходимым, что позволяет максимально продлить срок службы печи.

9.2. КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА РАЗМЕРОВ ДЕФЕКТОВ

Для количественной оценки размеров дефектов прежде всего следует получить как можно более точные данные о температуре поверхности.

Точность температурных измерений в печи может быть достигнута при учете всех параметров излучения: коэффициентов излучения объекта и пропускания газов; температуры стен печи и газа в печи.

При измерениях в условиях высоких температур имели дело с большими перепадами температур и поэтому контактные измерители являются сами по себе теплопроводами. В связи с этим термомпара или какой другой контактный прибор понижает температуру измеряемой точки, если окружающая температура ниже, и наоборот.

Часто в печах термомпара должна выдерживать гораздо более высокие температуры, чем температура измеряемой точки. Циклическое нагревание и охлаждение печи ведет к увеличению погрешности измерения. При всех преимуществах приборы, основанные на инфракрасном методе регистрации излучения, имеют ограниченное применение.

При всех измерениях прибор должен всегда оставаться холодным. Для этого необходимо пробивать визирные отверстия для измерений внутри печи. Если эти отверстия являются открытыми, то они влияют на газо- и теплоток в печи, поэтому необходимо закладывать в конструкцию печи окно, а измерения проводить на относительно большом расстоянии.

Поскольку такие параметры объекта, как коэффициент излучения и отражения, зависят от температуры, длины волны и материала, для их определения требуется специальное оборудование. В зонах высокой радиации могут быть использованы только термомпары.

Однако они также подвержены диффузии элементов при длительной работе в высокотемпературных диапазонах. При этом понижается электрический сигнал, и необходима повторная калибровка.

Следовательно, для количественной оценки размеров дефектов при тепловизионных обследованиях решающую роль играет точность измерения температуры поверхности исследуемых объектов. При этом необходимо учитывать целый ряд факторов, определяющих погрешность измерений в условиях интенсивного лучистого теплообмена исследуемых поверхностей с окружающими их телами. Однако точное знание распределения температуры на поверхности объекта не гарантирует надежную идентификацию состояния теплоизоляции и формы, размеров и характера существующих в ней дефектов. Для решения этой задачи следует рассмотреть процесс теплопередачи через ограждение печей в условиях их эксплуатации.

В качестве наиболее распространенного дефекта примем случай частичного прогара или разрушения слоя футеровки.

Задача заключается в нахождении плоского стационарного температурного поля бесконечной пластины, разделяющей две среды: внутреннюю с температурой t_B и наружную с температурой t_H . Заданными являются также толщина пластины H и ее теплопроводность λ . Коэффициенты теплообмена на соответствующих поверхностях пластины равны a_B и a_H . Для упрощения решения задачи аппроксимируем граничные условия 3-го рода на поверхностях пластины с граничными условиями 1-го рода, заменив пластину эквивалентной пластиной толщиной $H_1 = \frac{\lambda}{a_H} + H + \frac{\lambda}{a_B}$. Теплообмен пластины с внутренней средой весьма интенсивен, т.е. $a_B \gg a_H$, поэтому можем записать:

$$H_1 = \lambda/a_H + H. \quad (9.1)$$

Предположим, что дефект на внутренней поверхности имеет форму бесконечной цилиндрической выемки с поперечным сечением в виде кругового сегмента с площадью S . Совместим ось абсцисс η с внутренней поверхностью пластины, а ось ординат ξ — с радиусом цилиндрической выемки. Начало координат находится на оси цилиндрической выемки. Уравнение стационарного температурного поля рассматриваемой эквивалентной пластины

$$\frac{\partial^2 t(\xi, \eta)}{\partial \xi^2} + \frac{\partial^2 t(\xi, \eta)}{\partial \eta^2} = 0 \quad (9.2)$$

имеет следующие граничные условия:

$$\begin{aligned} \eta = 0; \quad t(\xi, \eta) &= t_B; \\ \eta = H + \lambda/a_H; \quad t(\xi, \eta) &= t_H. \end{aligned} \quad (9.3)$$

Перейдем к безразмерному описанию задачи. В качестве масштаба безразмерных координат выберем толщину эквивалентной

пластины $H_1 = H + \lambda/a_H$, а безразмерной температуры — перепад температур между наружной и внутренней средой $t_H - t_B$. Введем безразмерные переменные $x = \xi/H_1$; $\varphi = \eta/H_1$; $T(x, y) = [t(\xi, \eta) - t_B]/x$; $x/(t_H - t_B)$ и безразмерные комплексы $\delta = S/[(H + \lambda/a_H)^2]$ — площадь дефекта в поперечном сечении, $\beta = 1/[Ha_H/\lambda + 1]$ — толщина дополнительного слоя.

Уравнение температурного поля в безразмерных переменных

$$\frac{\partial^2 T(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(x, y)}{\partial y^2} = 0 \quad (9.4)$$

имеет следующие безразмерные граничные условия:

$$\begin{aligned} \varphi = 0; \quad T(x, y) &= 0; \\ \varphi = 1; \quad T(x, y) &= 1. \end{aligned} \quad (9.5)$$

Задача сводится к определению безразмерной площади кругового сегмента σ по температурному полю $T_H(x)$; измеренному в сечении пластины с координатой $y = 1 - \beta$ (что соответствует наружной поверхности реальной пластины). Связь между этими величинами может быть получена в результате решения уравнения (9.4). Для упрощения решения задачи произведем преобразование координат в рассматриваемой области. Для этого воспользуемся конформным отображением полосы с удаленным круговым сегментом на полосу. Такое отображение реализует (при малых σ) функция

$$W = \frac{\sigma}{2} \operatorname{cth} \frac{\pi z}{2} + z_1 \quad (W = U + iV; \quad z = x + iy).$$

Так как решение уравнения (9.4) в полосе имеет вид $T = V$, то возвращаясь к переменным (x, y) , находим

$$T(x, y) = I_m W = y + \frac{\sigma}{2} \frac{\sin \pi y}{\operatorname{ch} \pi x - \cos \pi y}. \quad (9.6)$$

Полагая, что $y = 1 - \beta$, получаем

$$T_H(x) = 1 - \beta + \frac{\sigma}{2} \frac{\sin \pi \beta}{\operatorname{ch} \pi x + \cos \pi \beta}, \quad (9.7)$$

где $T_H(x)$ — безразмерное температурное поле, наблюдаемое на поверхности $y = 1 - \beta$ (что соответствует наружной поверхности пластины).

Из (9.7) находим, что площадь дефектного участка может быть найдена, например по температуре в точке $x = 0$;

$$\sigma = 2 (T_H(x) - 1 + \beta) \operatorname{ctg} \frac{\pi \beta}{2}. \quad (9.8)$$

Учитывая, что $T_H(x)$ определяется экспериментальным путем, т.е. с некоторой погрешностью, можем предположить, что (9.8) не даст надежных результатов. Достоверность определения σ может быть повышена измерением поверхностной температуры в нескольких

точках, например, в $\pm x_i$ ($i = 0, 1; \dots; N$), и последующей обработкой по методу наименьших квадратов. Расчетная формула при этом имеет вид:

$$\sigma = 2 \sum_{i=1}^N R(x_i) [T_H(x_i) - 1 + \beta] / \left[\sum_{i=1}^N R^2(x_i) \right], \quad (9.9)$$

где $R(x_i) = \sin \pi \beta / (\operatorname{ch} \pi x_i + \cos \pi \beta)$.

В частности, при $N = 1$ (т.е. при измерении температуры в центре тепловой аномалии и двух отстоящих на x_1 от центра точек), получаем

$$\sigma = 2 < [T_H(0) - 1 + \beta] \operatorname{tg} \frac{\pi \beta}{2} + [2\beta - 2 + T_H(x_1) + T_H(-x_1)] R(x_1) > / \left[\operatorname{tg}^2 \frac{\pi \beta}{2} + 2R^2(x_1) \right], \quad (9.10)$$

где $R(x_1) = \sin \pi \beta^2 / (\operatorname{ch} \pi x_1 + \cos \pi \beta)$.

Уравнение (9.7) дает возможность оценить перепад температур, необходимый для выявления дефекта, сечение которого составляет площадь S . Максимальная разница температур ΔT на поверхности составит:

$$\Delta T = [T_H(0) - 1 + \beta] (t_B - t_H).$$

Используя (9.7), находим

$$\Delta T = (t_H - t_B) \frac{S}{2(H + \lambda/a_H)^2} \operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{2} \frac{1}{1 + Ha_H/\lambda} \right).$$

Искомый дефект будет выявлен, если максимальная разница температур на поверхности превысит разрешающую способность тепловизора θ , т.е. при выполнении неравенства

$$(t_B - t_H) \geq 2\theta \frac{(H + \lambda/a_H)^2}{S} \operatorname{ctg} \left(\frac{\pi}{2} \frac{1}{Ha_H/\lambda} \right). \quad (9.11)$$

Пользуясь неравенством (9.11), можно решить задачу по определению перепада температуры между внутренней и наружной средами, необходимого для выявления дефекта определенных размеров при заданной чувствительности тепловизора.

Рассмотрим следующий пример. Имеется конструкция с термическим сопротивлением $R_k = 1,0 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$. Коэффициент теплоотдачи на наружной поверхности составляет $a_H = 10,0 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Используется тепловизор с чувствительностью $\theta = 0,2^\circ\text{C}$. Требуется выявить дефект, площадь которого в поперечном сечении составляет 10% величины $H + \lambda/a_H$. При подстановке приведенных данных в формулу (9.11) получим, что для выявления дефекта необходим перепад температуры не менее 28°C . Формула (9.11) позволяет также решить задачу о минимальном размере дефекта, выявляемого тепло-

визором, при заданном перепаде температуры между внутренней и наружной средой.

Таким образом, предлагаемый вариант решения задачи тепловизионной дефектоскопии при принятых допущениях позволяет определить размеры дефекта на внутренней поверхности конструкции и условия, при которых тепловизионная съемка оказывается эффективной.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- А.с. 1038857. Способ тепловой дефектоскопии изделий/В.А.Лобанов, Г.С.Иванов, В.И.Сухарев//Бюлл. изобретений. - 1983. - № 32.
- Бекешко Н.А. Об интерпретации результатов теплового контроля при изменениях излучательной способности поверхности объектов контроля//Дефектоскопия. - 1982. - № 9. - С. 35-37.
- Богословский В.Н. Тепловой режим зданий. - М.: Стройиздат, 1979. - 320 с.
- Вавуло Н.М., Сухарев В.И., Щербаков А.В. Теплозащита наружных ограждений существующих зданий//Жилищное строительство. - 1982. - № 7. с. 23-28.
- Дроздов В.А., Савин В.К. Теплообмен в светопрозрачных ограждающих конструкциях. - М.: Стройиздат, 1979. - 307 с.
- Дроздов В.А., Сухарев В.И., Зотов А.В. Определение искажения температурного поля поверхности при изменении направления оси визирующей оптической системы//Тепловидение. МИРЭА. - 1980. - Вып. 2. - С. 57-65.
- Дорохов В.Б., Лобанов В.А., Сухарев В.И. Исследование теплозащитных качеств ограждающих конструкций с воздушной прослойкой на основе инфракрасной техники//Актуальные проблемы строительной физики. - Деп. во ВНИИС 12.09.84, № 5271. - С. 189-197.
- Жуков А.Г. Расчет параметров сканирующих тепловизионных систем//Тепловидение. МИРЭА. - 1980. - Вып. 3. С. 34-44.
- Зуев В.Е. Распределение лазерного излучения в атмосфере: Радиосвязь. - 1981. - 286 с.
- Линевич Ф. Измерение температур в технике. Справочник. - М.: Металлургия, 1980. - 544 с.
- Лобанов В.А., Сухарев В.И. О тепловизионном контроле плоских элементов ограждающих конструкций зданий в производственных условиях//Тепловидение. МИРЭА. - 1984. - Вып. 5. - С. 147-159.
- Ллойд Дж. Системы тепловидения. - М.: Мир, 1978. - 312 с.
- Лобанов В.А., Сухарев В.И. Измерение температурных полей непрозрачных ограждающих конструкций при помощи тепловизионных систем//Актуальные проблемы строительной физики. - Деп. во ВНИИС 12.09.84, № 5271. - С. 289-296.
- Лобанов В.А. Метод интерпретации результатов тепловизионного контроля ограждающих конструкций при переменной излучательной способности поверхности//Строительство и архитектура. - 1983. - Вып. 10. - С. 10-17.
- Лобанов В.А., Сухарев В.И. Измерение температурных полей непрозрачных ограждающих конструкций зданий при помощи тепловизионных систем//Актуальные вопросы строительной физики. - Деп. во ВНИИС 12.09.84, № 5271. - С. 212-220.

Мирошников М.М. Теоретические основы оптико-электронных приборов. — Л.: Машиностроение. — 1983. — 250 с.

Сухарев В.И., Зотов А.В., Дорохов В.Б. Определение излучательной способности поверхности ограждающих конструкций на основе тепловизионных измерений. Теплозащитные свойства ограждающих конструкций зданий//Сб. трудов. НИИСФ. — 1980.

Поскачей А.А., Чубаров Е.П. Оптико-электронные системы измерения температур. — М.: Энергоатомиздат. — 1979. — 208 с.

Сухарев В.И., Зотов А.В., Дорохов В.Б. Определение излучательной способности поверхности ограждающих конструкций на основе тепловизионных измерений. Теплозащитные свойства ограждающих конструкций зданий. — М.: Стройиздат, 1980. — 81 с.

Хлевчук В.Р. Теплотехнические и звукоизоляционные качества ограждений домов повышенной этажности. — М.: Стройиздат, 1979. — 248 с.

Хахин В.И., Мельчаков В.Н. Тепловизор АТП-41//Тепловидение. Межвуз. сб. науч. трудов/Под ред. Н.Д.Куртеева. — М. — МИРЭА, 1982. — С. 30—35.

Ушков Ф.В., Сухарев В.И., Новгородов В.Г. Применение тепловидения в строительстве//Тепловидение. МИРЭА. — 1978. — Вып. 2. — С. 155—158.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
Глава 1. Особенности применения методов термографии в строительстве	4
1.1. Сущность и возможности термографических методов	5
1.2. Область применения термографии в строительстве	8
Глава 2. Основы оптико-электронной термографии	12
2.1. Физические законы теплового излучения	13
2.2. Источники теплового излучения	16
2.3. Взаимодействие теплового излучения с твердыми телами	20
2.4. Прохождение теплового излучения через газы	26
2.5. Оптико-электронные системы измерения температуры	31
2.6. Основные элементы приборов и требования к ним	47
Глава 3. Измерение температуры оптико-электронными системами	59
3.1. Искажение перспективы в оптических системах измерения температуры	68
3.2. Нестационарные температурные поля	73
3.3. Измерение температуры поверхности с подвижного носителя аппаратуры	74
3.4. Измерение температуры в двух участках спектра теплового излучения	78
3.5. Погрешности измерения температуры	81
Глава 4. Методы обработки тепловизионной информации	88
4.1. Градуировка оптико-электронных систем	90
4.2. Направление автоматизации обработки термограмм	92
4.3. Аналоговая обработка тепловизионной информации	102
4.4. Использование ЭВМ в термографии	106
4.5. Возможности использования отечественных систем для цифровой обработки информации	112
4.6. Расчет температурных полей с использованием программируемых калькуляторов	115
Глава 5. Термографирование наружных ограждений зданий	128
5.1. Радиационные характеристики поверхностей строительных конструкций	131
5.2. Анализ внешних факторов, оказывающих влияние на результаты термографирования строительных конструкций	140
5.3. Обследование состояния крыш зданий	144
5.4. Облученность внутренних поверхностей ограждений	147
Глава 6. Дефектоскопия строительных конструкций	149
6.1. Метод термографической аналогии	153
6.2. Случайные теплопроводные включения наружных ограждений	157
6.3. Скрытые дефекты отделочных слоев ограждений	166
6.4. Дефекты стыковых соединений панельных зданий	169
6.5. Использование термографии при реставрации и реконструкции зданий и памятников архитектуры	176
6.6. Тепловизионный контроль плоских элементов ограждающих конструкций зданий в заводских условиях	179
Глава 7. Определение количественных показателей теплозащитных качеств ограждающих конструкций зданий	187
7.1. Оперативный метод сравнительной оценки теплозащитных качеств ограждений зданий в реальных условиях	189
7.2. Количественная оценка теплозащитных качеств ограждающих конструкций	193
7.3. Воздухопроницаемость элементов строительных конструкций	208
7.4. Общая оценка теплопотерь здания	212