

На правах рукописи

Шишкин Андрей Викторович

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИХ
ХАРАКТЕРИСТИК ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ
ПРИ НАРУЖНОМ ОБСЛЕДОВАНИИ МЕТОДОМ
ТЕПЛОВИЗИОННОЙ СЪЕМКИ**

Специальность 05.14.04 – «Промышленная теплоэнергетика»

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Санкт–Петербург — 2001

Работа выполнена в Санкт-Петербургском Государственном Техническом Университете.

Научный руководитель — доктор технических наук, профессор ***В.М. Боровков***

Официальные оппоненты:

— доктор технических наук, профессор ***А.П. Бельский***

— кандидат технических наук ***Л.В. Родичев***

Ведущее предприятие — Государственное унитарное предприятие «Топливо-энергетический комплекс Санкт-Петербурга» (ГУП «ТЭК СПб»)

Защита состоится 25 декабря 2001 г. в 18 часов на заседании диссертационного совета Д_212.229.04 в Санкт-Петербургском Государственном Техническом Университете по адресу:

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, в ауд. 411 ПГК.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке Санкт-Петербургского Государственного Технического Университета.

Автореферат разослан "21" ноября 2001 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

К.А. Григорьев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Важнейшей социально-экономической задачей любого государства является сбережение природных ресурсов, улучшение экономических и экологических показателей в топливно-энергетическом комплексе. Наиболее жесткие требования по эффективному использованию энергии предъявляются к зданиям.

По величине удельного энергопотребления жилые здания в России существенно превосходят аналогичные здания в развитых зарубежных странах. Постановлением министерства строительства Российской Федерации от 11.08.95 приняты изменения строительных норм и правил СНиП II-3-79 «Строительная теплотехника», регламентирующие увеличение теплозащиты проектируемых, вновь строящихся и существующих зданий в соответствии с установленными нормами.

Кроме того, в процессе эксплуатации происходит необратимое уменьшение теплозащитных показателей оболочки зданий, которое является предвестником уменьшения ее прочности и возникновения различных повреждений.

Поэтому необходимо осуществлять обследование ограждающих конструкций эксплуатируемых зданий и сооружений с целью оценки их теплотехнических характеристик и обнаружения дефектов.

Цель работы – разработка теоретических и методических основ оперативной диагностики оболочки зданий и количественной оценки их теплотехнических характеристик в реальных нестационарных условиях на основе дистанционной инфракрасной съемки.

Научная новизна работы.

1. Получено аналитическое решение уравнений нестационарного температурного поля, применительно к плоским элементам ограждающих конструкций, дающее возможность расчета температуры и плотности теплового потока с их наружной поверхности в любой момент времени без задания начального условия и известном произвольном граничном условии.
2. Предложена относительная характеристика теплообмена на поверхности ограждающих конструкций - $f(t)$ и способ оценки теплотехнических параметров оболочки здания в реальных природных условиях по величине $f(t)$.
3. Разработаны основы методики оперативного обследования оболочки зданий, включая оценку величины тепловых потерь, термического сопротивления, величины коэффициента теплоотдачи, на базе однократной дистанционной инфракрасной съемки и опорных «контактных» измерений.
4. Предложен способ учета тепловой засветки от близких объектов.
5. Получены практические данные наружного тепловизионного обследования жилых домов, осуществлены многочисленные натурные измерения и модельные расчеты, проанализированы их результаты.

Степень достоверности. Достоверность теоретических решений проверена по совпадению результатов в частных случаях с решениями традиционными методами при заданных конкретных функциях, описывающих граничные условия, и

стационарном начальном условии. Практические результаты вычисления температуры и плотности теплового потока на наружной поверхности стен зданий подтверждены данными натурных измерений.

Практическая ценность работы.

Результаты теоретических и методических разработок, подтвержденные практическим опытом, дают возможность широкого использования дистанционной тепловой съемки для обследования зданий и сооружений в естественных условиях и количественной оценки теплотехнических свойств их оболочки. Получены аналитические зависимости, связывающие значения регистрируемой яркостной температуры с теплотехническими параметрами ограждающих конструкций. Относительная характеристика теплообмена $f(t)$ в реальных метеорологических условиях является гораздо более стабильной величиной, нежели температура наружной поверхности оболочки здания или плотность теплового потока, а оценка теплотехнических свойств ограждающих конструкций на основе использования $f(t)$ является более детерминированной, точной и базируется на минимуме опорных «контактных» измерений. Предложены способы количественного учета влияния засветки от окружающих объектов. Разработанная и успешно применяемая методика интерпретации данных инфракрасного обследования, позволяет более точно и определенно оценить величину тепловых потерь и значения теплотехнических характеристик ограждающих конструкций в реальных природных (нестационарных) условиях.

Апробация работы и публикации.

Результаты работ докладывались на международных конференциях: «Тепловидение», С-Петербург, ГОИ, 1999; III международной научно-практической конференции «Экономика, экология и общество России в 21-м столетии», С-Петербург, СПбГТУ, 2001; на лекциях в Петербургском Энергетическом Институте повышения квалификации руководящих работников и специалистов (ПЭИПК) и на лекциях для студентов 5 курса СПбГТУ, специальности «Промышленная теплоэнергетика». Разработанная автором методика дистанционной диагностики зданий и сооружений, определения величины тепловых потерь через ограждающие конструкции, применяется ООО АП «ДИССО» («Дистанционные исследования среды обитания») при регулярном массовом обследовании жилых и производственных объектов.

По результатам диссертации имеется 8 публикаций.

Структура и объем диссертации. Работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованной литературы. Содержание работы изложено на 127 страницах текста и рисунков (51 рисунок). Диссертация иллюстрирована фактическими материалами тепловой съемки. Список литературы включает 110 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении описана актуальность работы, рассмотрено состояние проблемы теплофизического обследования зданий и сооружений по опубликованным

материалам, указаны принципиальные недостатки имеющихся методов диагностики и сформулированы основные задачи исследования.

Существующие «контактные» и сканирующие дистанционные методы оценки теплотехнических параметров оболочки зданий рассчитаны на применение в условиях, близких к стационарным и требуют свободного доступа внутрь помещений. При изменяющейся температуре атмосферного воздуха и нестабильных других метеорологических условиях, при значительной тепловой инерции ограждающих конструкций, температура и тепловой поток на поверхности оболочки здания существенно зависят от времени и в какой-то мере являются случайными. Поэтому результаты оценки теплотехнических характеристик оболочки зданий в естественных условиях на основе стационарных представлений будут далеки от истинных.

Основными задачами, решению которых посвящена диссертация, являются: 1) разработка теоретических и методических основ количественной оценки теплотехнических характеристик элементов ограждающих конструкций в реальных нестационарных условиях по данным наружных измерений в произвольный момент времени, 2) разработка и практическое воплощение эффективных и оперативных способов обследования оболочки зданий и сооружений на основе материалов инфракрасной съемки, 3) получение конкретных результатов обследования состояния фасадов и кровель большого количества жилых домов.

В первой главе решается в аналитическом виде задача теплопереноса через плоский элемент ограждающей конструкции (именуемый слоем) при нестационарном теплообмене на внешней поверхности и с произвольным неизвестным начальным условием.

Существенная проблема физико-математического описания температурного поля в оболочке зданий, при воздействии метеорологических факторов, заключается в том, что нельзя определить начальное условие и затруднительно описать граничные условия в дифференциальных уравнениях. Граничные условия можно упростить и свести воздействие внешней среды на ограждающую конструкцию только к изменению температуры атмосферного воздуха при незначительных колебаниях величины коэффициента теплообмена, если проводить обследование в стабильных погодных условиях при сплошной облачности. Но задать начальное условие для оболочки здания, находящейся под воздействием внешней среды, в некоторый момент времени, принимаемый за начальный, по сути ничем не лучше такого же задания температурного поля в интересующий нас момент времени.

Поэтому решение дифференциального уравнения нестационарной теплопроводности осуществляется в общем виде при неизвестном начальном и граничном условиях, а далее рассматривается уравнение теплового баланса на поверхности теплообмена с атмосферой:

При этом подходе можно получить решение только для наружной поверхности ограждающей конструкции, что вполне достаточно для практического использования при неразрушающих методах диагностики.

Решение осуществляется для плоского слоя (элемента ограждающей конструкции) толщины H с эффективными (интегральными) значениями теплопроводности - λ , плотности - ρ и теплоемкости - C . На внешней поверхности слоя температура есть некоторая функция от времени t - $T(0,t)$. Температура внутренней поверхности слоя - T_s считается постоянной. $T_b(t)$ - температура атмосферного воздуха. На внешней поверхности слоя происходит теплообмен только с атмосферным воздухом (конвекция, излучение и молекулярная теплоотдача).

Уравнение теплового баланса на наружной поверхности слоя в этом случае - следующее:

$$\lambda \cdot \partial T(x,t) / \partial x \Big|_{x=0} = K \cdot (T(0,t) - T_b(t)) \quad (1)$$

Здесь K - коэффициент теплообмена с атмосферным воздухом, являющийся суммой коэффициента теплоотдачи (конвекция и турбулентная диффузия), и коэффициентов линейной аппроксимации теплообмена излучением и молекулярной теплоотдачи.

Если зависимость температуры атмосферного воздуха от времени аппроксимировать выражением:

$$T_b(t) = T_{b0} + \sum_{m=1}^M \{ \alpha_m \sin(m\omega t) + \beta_m \cos(m\omega t) \}, \quad (2)$$

где $\omega = 2\pi / (N \cdot 24 \cdot 3600)$, а N - число суток (не менее 1), то для достаточно большого t температуру наружной поверхности слоя можно вычислить по формуле:

$$T(0,t) = T_b(t) + [T_s - T_b(t)] / (Kr + 1) + \sum_{m=1}^M ([A_m - Kr \alpha_m / (Kr + 1)] \sin[m\omega t] + [B_m - Kr \beta_m / (Kr + 1)] \cos[m\omega t]), \quad (3)$$

$$A_m = \frac{(Kr)[(Kr + 1 + 2(\omega/D)^2 p_m) \alpha_m + 2(\omega/D) s_m \beta_m]}{(Kr + 1 + 2(\omega/D)^2 p_m)^2 + 4(s_m \omega/D)^2},$$

$$B_m = \frac{(Kr)[(Kr + 1 + 2(\omega/D)^2 p_m) \beta_m - 2(\omega/D) s_m \alpha_m]}{(Kr + 1 + 2(\omega/D)^2 p_m)^2 + 4(s_m \omega/D)^2},$$

$$p_m = m^2 \sum_{n=1}^{\infty} (1 / [n^4 + m^2(\omega/D)^2]) \quad \text{и} \quad s_m = m \sum_{n=1}^{\infty} (n^2 / [n^4 + m^2(\omega/D)^2]),$$

где $r = H/\lambda$ - термическое сопротивление слоя, $D = a(\pi/H)^2$, $a = \lambda/\rho C$.

Плотность теплового потока определяется как: $q(0,t) = K[T(0,t) - T_b(t)]$.

Полученное решение позволяет вычислить температуру и плотность теплового потока с наружной поверхности слоя в произвольный момент времени по измеренной (известной) функции температуры атмосферного воздуха, средней величины коэффициента теплообмена с атмосферным воздухом и заданных теплотехнических характеристиках слоя.

Расчетные (теоретические) значения температуры наружной поверхности стен и плотности теплового потока $q(0,t)$ подтверждаются данными прямых измерений $T(0,t)$ и $q(0,t)$, полученными в процессе обследования зданий.

Представленные теоретические результаты и фактические данные показывают, что температура и плотность теплового потока с наружной поверхности оболочки здания существенно зависят от времени. При этом $T(0,t)$ и $q(0,t)$ для слоев с различными теплотехническими характеристиками зависят от времени по-разному. Если в одно время разные слои сильно отличаются по температуре или тепловому потоку с наружной поверхности, то в другое время они оказываются практически неразличимы. В некоторые временные интервалы возможна даже инверсная тепловая картина, когда, при прочих равных условиях, слой с меньшим термическим сопротивлением r имеет, наоборот, меньшую температуру $T(0,t)$, чем слой с большим r .

Поэтому и тепловые изображения одного и того же здания, оболочка которого неоднородна по теплотехническим свойствам, будут значительно отличаться в разное время. Более яркие - «теплые» и менее яркие «холодные» зоны, (в соответствии с $T(0,t)$), в течение времени могут (загадочным образом) появляться и исчезать, менять свои размеры, положение и даже меняться местами.

Аналитические расчеты и данные натурных измерений показывают, что даже обычный суточный перепад температуры воздуха вызывает изменение $q(0,t)$ в течение суток на 50 Вт/м^2 и более при среднем стационарном значении плотности теплового потока, равном 20 Вт/м^2 . Поэтому для характеристики величины потребления тепла нет смысла использовать значение $q(0,t)$ в какой-то момент времени. Тем более такое значительное изменение теплового потока вовсе не связано с источником тепла с внутренней стороны оболочки здания.

В качестве характеристики расхода тепла, тепловых потерь через ограждающую конструкцию, следует принять величину средней плотности теплового потока за период, кратный суткам.

Вторая глава посвящена решению задачи определения теплотехнических характеристик ограждающей конструкции по регистрируемым значениям температуры на ее наружной поверхности.

Решение (1 – 3) в принципе позволяет отдельно определить теплотехнические параметры: термическое сопротивление - r , объемную теплоемкость - ρC , величину коэффициента теплообмена - K (при прочих равных условиях характеризующего поверхность ограждающей конструкции) и обобщающую потребительскую величину – средние тепловые потери за период в одни или более суток. Но для этого

нужно осуществить тепловизионные и опорные контактные измерения не менее четырех раз в разное время или непрерывно в течение двух суток.

Для оперативного обследования поверхности ограждающей конструкции и оценки ее теплотехнических параметров предложено применять относительную характеристику теплообмена - $f(t)$:

$$f(t) = [T(0,t) - T_{в}(t)] / [T^{\circ}(0,t) - T_{в}(t)], \quad (4)$$

где $T^{\circ}(0,t)$ - температура поверхности в некоторой базовой точке, а $T(0,t)$ - в произвольной точке, $T_{в}(t)$ - температура воздуха.

Для однородной поверхности оболочки здания величина $f(t)$ инвариантна как для термодинамической, так и для яркостной температуры, а при линейном аппаратурном преобразовании измеряемой температуры в яркость теплового изображения - $f(t)$ также инвариантна и по отношению к величине яркости на тепловом изображении. Поэтому, на однородной поверхности, величину $f(t)$ можно определить непосредственно дистанционными инфракрасными методами без дополнительных измерений (или без учета) коэффициента излучения (чтобы вычислить термодинамическую температуру) и коэффициента теплообмена K (чтобы вычислить плотность теплового потока).

Но самое важное свойство $f(t)$ состоит в том, что эта относительная характеристика теплообмена является существенно более стабильной, чем $T(0,t)$, $q(0,t)$ или отклонения их величин относительно базовых значений: $dT(0,t) = T(0,t) - T^{\circ}(0,t)$, $dq(0,t) = q(0,t) - q^{\circ}(0,t)$.

Кроме того, величина $f(t)$ близка к ее стационарному значению $f(ст)$.

Эти свойства относительной характеристики $f(t)$ иллюстрируются на **Рис.1**, по сравнению с изменением величины другой характеристики $dq(0,t)$ - различия в плотности теплового потока.

Для конкретного времени наблюдения можно рассчитать зависимости величины параметра $f(t)$ от какой-либо теплотехнической характеристики участка ограждающей конструкции.

Пример такой зависимости $f(t)$ от отношения значений термического сопротивления к базовому (r/r°) для разного времени представлен на **Рис. 2**.

Зависимость $f(t)$ от температуры внутренней поверхности ограждающей конструкции T_s является линейной:

$$T_s - T_s^{\circ} = [f(t) - 1] S(t),$$

где коэффициент «чувствительности» $S(t)$ существенно изменяется со временем и, как правило, лежит в пределах 20 – 50 °К.

Тепловые потери через оболочку здания - средняя плотность теплового потока с поверхности за суточный или кратный суткам период времени $q_{ср}$ - связаны с величиной $f(t)$ простым соотношением:

$$f(t) \approx [q_{ср} / q^{\circ}_{ср}] (K^{\circ} / K). \quad (5)$$

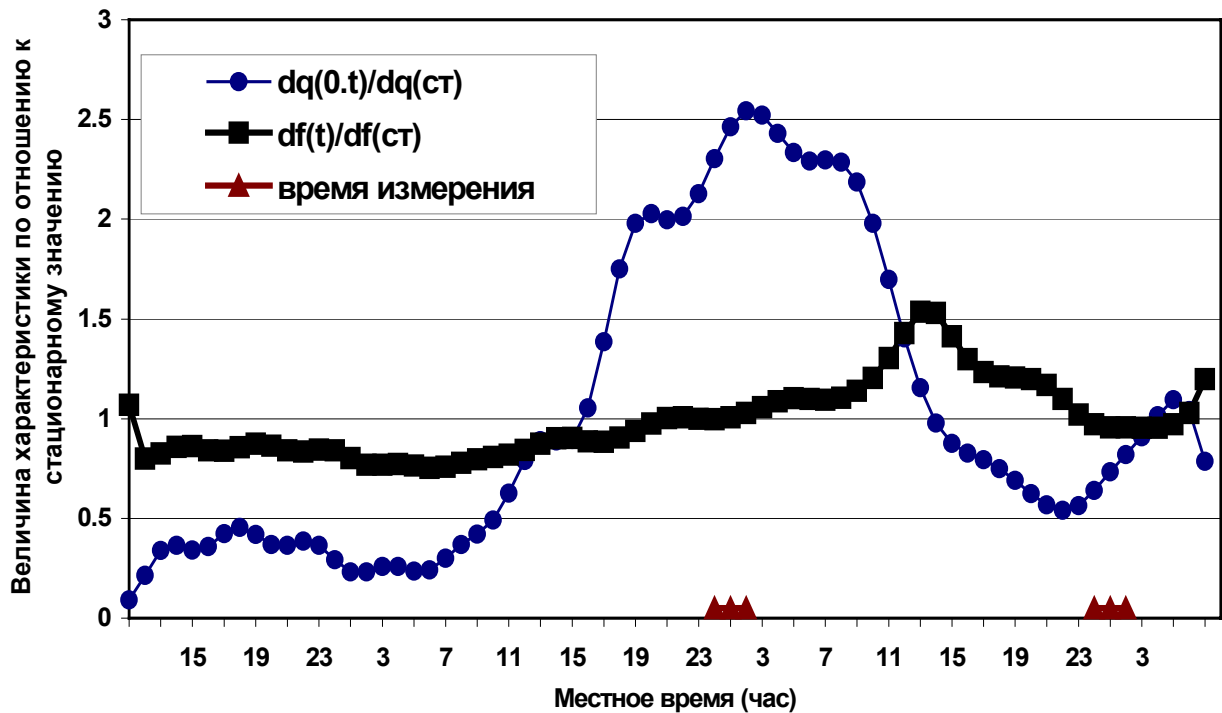


Рис. 1. Зависимости от времени величины $f(t)$ и разности плотности теплового потока $dq(0,t)$ по отношению к их стационарным значениям для панельной стены с термическим сопротивлением $\gamma = 0.5$ и $1.0 \text{ м}^2\text{К/Вт}$. Вологда, 09 – 12.02.01.

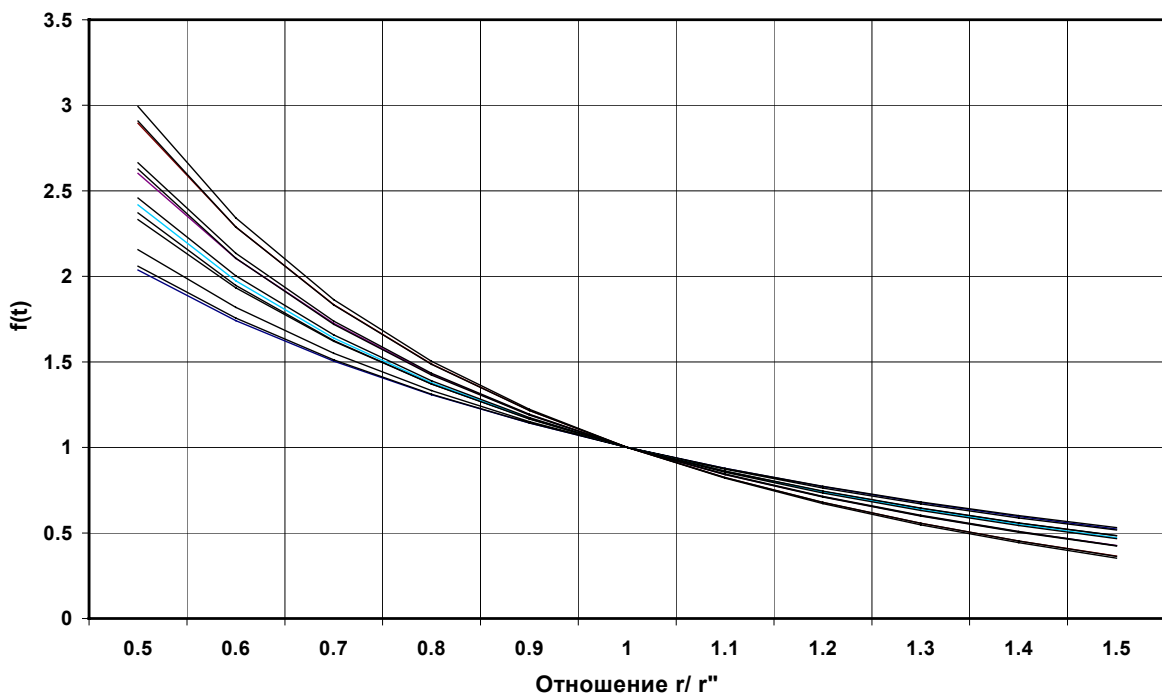


Рис. 2. Зависимости $f(t)$ от отношения r/r'' для кирпичной стены (толщиной 0.7 м). Вологда, 21.03.98 с 0 до 12 часов с шагом в 1 час. $K = 20 \text{ Вт/м}^2\text{К}$, $\rho C = 10^6 \text{ Дж/м}^3\text{К}$.

Систематическую погрешность в (5) нетрудно рассчитать для любого времени по отличию $f(t)$ от $f(st)$ (см. Рис.1). В предпочтительное время проведения инфракрасной съемки относительная погрешность в (5), как правило, не превышает 10%, даже если термическое сопротивление и коэффициент теплообмена изменяются в два раза (как увеличение, так и уменьшение), а произведение плотности на теплоемкость материала ограждающей конструкции может изменяться на 20 процентов.

В третьей главе описывается решение задачи определения собственного теплового излучения обследуемого объекта и способы количественного учета засветки (облученности) от других объектов.

Реальные ограждающие конструкции являются телами с коэффициентом излучения (поглощения) инфракрасных волн - ϵ меньшим единицы ($\epsilon = 1$ для абсолютно черного тела) и ненулевым коэффициентом отражения. Тепловое излучение любого элемента ограждающей конструкции складывается из собственного излучения, определяемого природой вещества и его температурой, и отраженного излучения (засветки) других объектов. Большинство используемых строительных материалов и покрытий близки по своим характеристикам к диффузным (Ламбертовским) телам, спектральная энергетическая яркость (B_e) которых не зависит от направления излучения. Отличие от идеальной серой поверхности для диэлектриков наблюдается при угле излучения φ больше $55 - 60^\circ$ по отношению к нормали. При $\varphi = 90^\circ B_e = 0$.

Прямыми вычислениями в работе показано, что засветка элементарной площадки ограждающей конструкции от безграничных объектов: небесной полусферы и плоскости поверхности земли – практически равномерна, не зависит от координат площадки.

Освещённость от конечного объекта, находящегося на сравнительно близком расстоянии, частично закрывающего «фоновую» освещенность от атмосферы и поверхности земли порождает неравномерную засветку. При этом возникают существенные аномалии яркостной температуры на поверхности оболочки здания (как правило, даже большие, чем те, которые могут быть вызваны изменением ее теплотехнических свойств). Прямой расчет засветки от конечных объектов может представлять серьезные математические и практические трудности, связанные с определением ϵ , геометрических коэффициентов облучения и энергетической светимости в каждой точке источника засветки.

Существенно упрощает ситуацию то обстоятельство, что любая точка поверхности (элементарной площадки) освещается из области, почти равной полусфере. Поэтому засветка от конечного объекта для конкретной точки поверхности определяется площадью сечения этого объекта, видимого из этой точки, и его средней светимостью. Если объект целиком попадает в область видимости со стороны любой точки поверхности и практически изометричен, то засветка поверхности от объекта будет равномерна.

Тот же эффект равномерной засветки будет и в случае, если источник засветки закрывает практически всю область видимости из любой точки поверхности и имеет одинаковую среднюю светимость.

Таким образом, от условно называемых больших и малых объектов – засветка равномерна.

Неравномерную освещенность поверхности создают только объекты, зона видимости которых зависит от координаты точки на поверхности.

Получены простые геометрические формулы вычисления яркости засветки от бокового объекта (выступа, угла) для двумерной и трехмерной модели. Яркость источника засветки, средняя по зоне видимости, принимается постоянной.

Так, для вертикальной стены (в плоскости $(x,0,z)$), величина превышения яркости засветки от боковой стены (в плоскости $(y,0,z)$) над фоновой, обусловленной небом и поверхностью земли, составляет:

$$\Delta J(x,z) = J(x,z) - J_{\text{ф}} = (1 - \epsilon) (1/2\pi) [\Omega_{\text{сн}} (J_{\text{ст}} - J_{\text{в}}) + \Omega_{\text{сз}} (J_{\text{ст}} - J_{\text{з}})] ,$$

где x и z – горизонтальная и вертикальная координаты; $\Omega_{\text{сн}}$ – телесный угол видимости из точки (x,z) части источника засветки на фоне неба, $\Omega_{\text{сз}}$ – на фоне поверхности земли; $J_{\text{ст}}$, $J_{\text{в}}$, $J_{\text{з}}$ – средняя яркость поверхности источника засветки, неба и поверхности земли, $J_{\text{ф}} = J(\infty,z) = (1 - \epsilon) [0.5 \cdot J_{\text{в}} + 0.5 \cdot J_{\text{з}}]$.

$\Omega_{\text{сн}}$ и $\Omega_{\text{сз}}$ зависят от координат и их несложно вычислить геометрически. Величины: $(1 - \epsilon)$, $(J_{\text{ст}} - J_{\text{в}})$ и $(J_{\text{ст}} - J_{\text{з}})$ можно измерить, а можно и вычислить непосредственно по тепловому изображению оболочки здания.

Засветка любой зоны ограждающей конструкции сложной формы может быть представлена одним из двух рассмотренных в работе простых случаев – двумерной или трехмерной моделью. Засветка от нескольких объектов равна простой сумме засветок от каждого объекта.

Четвертая глава содержит разработку методики оценки теплотехнических параметров оболочки здания по данным однократной тепловой съемки и минимума опорных измерений. Речь идет о практической методике массового и оперативного обследования ограждающих конструкций.

Соответствующий выбор времени и погодных условий позволяет осуществлять тепловизионное обследование при максимальном различии по температуре $T(0,t)$ участков оболочки здания с различными теплотехническими параметрами (то есть во время наибольшей чувствительности и детальности метода), а также при стабильной величине $f(t)$, практически равной стационарному значению. При этом, воздействие окружающей среды на оболочку здания должно сводиться только к теплообмену с атмосферным воздухом.

Параллельно с инфракрасной съемкой в нескольких базовых точках осуществляются измерения температуры поверхности ограждающей конструкции и атмосферного воздуха, плотность теплового потока. Периодически фиксируется радиационная температура эталонного объекта (миры), дающая значения яркостного аналога температуры атмосферного воздуха. За двое – трое суток до

тепловизионного обследования и 4 – 6 часов после него записываются метеоданные о температуре атмосферного воздуха.

Полученное тепловое изображение поверхности ограждающей конструкции корректируют на геометрические искажения и на засветку от ближайших объектов, которые участвуют в теплообмене излучением и, в той или иной мере, закрывают небо и поверхность земли.

По тепловому изображению рассчитывают «изображение» $f(t)$ (массив значений $f(t)$) отдельно для всех участков поверхности ограждающей конструкции с резко отличающимися значениями коэффициента теплообмена и коэффициента излучения.

Рассчитывают по (2), (3) зависимости от времени $T(0,t)$ и $q(0,t)$ для оболочки здания с нормативными теплотехническими характеристиками и не нормативными. Для конкретного времени наблюдения рассчитывают зависимости $f(t)$ от T_s (коэффициент чувствительности $S(t)$), от термического сопротивления r и коэффициента теплообмена K .

Относительные средние тепловые потери связаны с параметром $f(t)$ по формуле (5). Величины плотности и теплоемкости элементов ограждающей конструкции принимаются равными проектным.

Для оценки конструктивных теплотехнических параметров ограждающих конструкций используется огрубленная шкала их изменения, связанная с величиной $f(t)$, с учетом предполагаемых изменений других тепловых характеристик, (Табл. 3).

Табл. 3. Шкала значений $f(t)$ и соответствующих величин термического сопротивления r (m^2K/Wt) и относительных тепловых потерь q_{cp}/q_{cp}^6 .

| | | | | | | | |
|-------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| $f(t)$ | 0.3 | 0.5 | 0.7 | 1.0 | 1.4 | 1.7 | 2.0 |
| r | 0.5 | 0.6 | 0.8 | 0.8 | 0.6 | 0.5 | 0.4 |
| q_{cp}/q_{cp}^6 | 1.5 | 1.3 | 1.1 | 1.0 | 1.4 | 1.7 | 2.0 |

Величина $f(t)$ в различных зонах оболочки здания может быть как больше, так и меньше единицы. Область значений $f(t)$, больших единицы, при учете возможного уменьшения K , увеличения T_s , отвечает уменьшению термического сопротивления слоя. Значения $f(t)$, меньшие единицы, при учете возможного уменьшения T_s (и, может быть, увеличения r), как правило связаны с существенным возрастанием K и уменьшением $T(0,t)$ из-за трещиноватости, пористости, влажности, проницаемости ограждающей конструкции и связанным с ними уменьшением термического сопротивления и увеличением относительных тепловых потерь.

В работе рассмотрены типичные элементы или зоны оболочки зданий, для которых неприменима прямая интерпретация величины $f(t)$ в значения теплотехнических характеристик: 1) различные зоны с неподдающимся учету резким изменением T_s (область прогрева от батарей, неотапливаемые лоджии), а также углы, выступы и «архитектурные излишества» фасада, которые нельзя рассматривать как плоский слой; 2) трещины, щели, а также трещиноватые,

шероховатые зоны; 3) окна. Для этих элементов дана качественная интерпретация тепловых изображений.

Дефекты ограждающих конструкций выделяются как участки аномально повышенных или пониженных значений параметра $f(t)$ на псевдоцветовом тепловом изображении (массиве значений $f(t)$) оболочки здания.

В пятой главе приведены результаты тепловизионного обследования жилых зданий, выполненного в городе Вологда в 1999 и 2000 годах с применением тепловизоров: матричного AGEMA - THV500, с регистрируемым диапазоном длины волн инфракрасного излучения 3 – 5 мкм, и сканирующего AGEMA - THV1000, с диапазоном 8 – 12 мкм.

Исходные тепловые изображения фасадов домов, откорректированные на геометрические искажения и засветку от близких объектов, были преобразованы в изображения, в которых величина яркости в каждой точке равна $100f(t)$.

Достоверность построения теплового изображения в значениях относительной характеристики теплообмена $f(t)$, расчета нормативного теплового потока - $q^H(0,t)$, а также величина термического сопротивления стен зданий в базовых точках контактных измерений определялись по соответствию измеренных значений плотности теплового потока $q^{изм}(0,t)$ и расчетного $q(0,t) = f(t) q^H(0,t)$. Относительная погрешность δq сопоставления измеренных и расчетных значений плотности теплового потока с наружной поверхности стен в точках контактных измерений не превышала 10% и в среднем составила 5 %.

Расчитанные зависимости от температуры внутренней поверхности стен показали, что во время тепловизионного сканирования величина $f(t)$ оказалась практически нечувствительна к изменениям T_s до 3° С.

Представлены данные наружного обследования 14 панельных и кирпичных домов и приведены наиболее интересные тепловые изображения фасадов домов в псевдоцветовой окраске, соответствующей величине $f(t)$. Значениям $f(t)$ сопоставлены величины термического сопротивления и относительного превышения тепловых потерь (средней плотности теплового потока за 2 – 3 суток).

По результатам обследования домов, величина сопротивления теплопередаче R в основном соответствовала проектной ($= 1.0 \text{ м}^2\text{К/Вт}$), в отдельных (дефектных) участках уменьшаясь до 0.8 – 0.7 $\text{м}^2\text{К/Вт}$. В целом, по фасадным стенам панельных зданий сопротивление теплопередаче составило 93 – 96% от проектной величины, а для кирпичных – 95 – 97%.

Контактные измерения с целью определения сопротивления теплопередаче стен домов в соответствии с требованиями ГОСТ 26254-84, проведенные в различное время, дали существенно заниженные, в 1.2 – 2 раза, или, наоборот, завышенные значения R . Это обусловлено нестационарностью температурного поля (а также практической невозможностью установления «режима теплопередачи, близкого к стационарному») и наличием значительного теплового потока, связанного с нагревом или охлаждением материала стен.

Обследованные здания характеризуются несколько повышенной величиной тепловых потерь, превышающей нормативные на 8 – 18% (в среднем – 10 %) через стены и 5 – 12 % - через кровли.

Дефекты стен домов выделяются на цветном изображении фасадов как области $f(t) > 1.2$ или $f(t) < 0.8$. Первые являются зонами пониженного термического сопротивления, меньшей плотности, большей проницаемости и повышенных тепловых потерь. Вторые интерпретируются как трещиноватые, кавернозные участки, как правило, имеющие повышенную влажность (а значит – теплоемкость) и проницаемость для атмосферного воздуха. Они также характеризуются повышенными тепловыми потерями и пониженным сопротивлением теплопередаче (из-за инфильтрации воздуха, молекулярного теплопереноса).

Заключение.

На основе дистанционной инфракрасной съемки ограждающих конструкций зданий и сооружений возможно осуществить оперативное и эффективное обследование их состояния, оценить их теплотехнические параметры и величину тепловых потерь, обнаружить и охарактеризовать различные дефекты. В диссертационной работе описано теоретическое и методическое обоснование интерпретации данных тепловой съемки и приведены результаты практического применения при обследовании жилых зданий в реальных условиях.

1) Получено аналитическое решение уравнений нестационарного теплопереноса через плоский элемент ограждающей конструкции, позволяющее учесть воздействие внешней среды при неизвестном начальном условии. В качестве граничных условий приняты: заданная функция температуры атмосферного воздуха от времени, устойчивость других метеорологических параметров в течение суток, отсутствие прямого солнечного нагрева, постоянство температуры внутренней поверхности ограждающей конструкции.

2) Выведены формулы для вычисления температуры и плотности теплового потока для наружной поверхности ограждающей конструкции в любой момент времени и способы определения теплотехнических характеристик оболочки зданий по значениям температуры их наружной поверхности. Выполнены модельные расчеты. Прямыми измерениями на фасадах домов подтверждены расчетные значения плотности теплового потока.

3) Разработан эффективный способ учета засветки от окружающих объектов и определения собственного теплового излучения ограждающей конструкции, приведены примеры для фасадов жилых зданий.

4) Предложена методика оперативного массового обследования оболочки зданий и сооружений в естественных погодных условиях путем однократной тепловизионной съемки при минимуме опорных контактных измерений.

5) Для количественной оценки теплотехнических свойств, выявления дефектов и для сравнения состояния ограждающих конструкций в разное время рекомендовано использовать относительную характеристику теплообмена – значительно более стабильную величину, нежели температура или тепловой поток.

6) На модельных примерах и фактических материалах дана качественная интерпретация материалов инфракрасной съемки при обследовании окон, областей прогрева от батарей отопления, трещиноватых, кавернозных зон фасадов.

7) Разработанная методика регулярно применяется на практике при ежегодном обследовании жилых и производственных объектов. Приведены результаты работ, полученные в 1999 и 2000 году по 14 жилым зданиям в городе Вологда.

Список опубликованных работ А.В. Шишкина по теме диссертации.

1. Определение фактического теплового режима системы теплоснабжения – путь к экономии энергоресурсов // Теплоэффективные технологии. Информационный бюллетень №4. СПб, 1997. - с. 59 – 63. /Соавторы: В.В. Исаев, Н.Н. Шаповалов, В.С. Слепченко.
2. Определение фактического теплового режима системы теплоснабжения – путь к экономии энергоресурсов // Проблемы экономии топливно-энергетических ресурсов на промпредприятиях и ТЭС: Межвуз. Сб. научн. тр. С-Пб. 1999. - с. 12 – 20. /Соавторы: В.В. Исаев, Н.Н. Шаповалов, В.С. Слепченко.
3. Применение тепловой аэросъемки для диагностики подземных тепловых сетей // «Геодезия и картография», № 10, М. 1993. - с. 31 – 33. Соавторы: В.Ф. Мельников, И.А. Молодчинин.
4. Способ определения энергетических потерь линейного участка теплопровода. Авторское свидетельство № 1710928 от 11.03.90. /Соавторы А.Н. Рондель, И.А. Молодчинин.
5. Оценка теплофизических характеристик зданий и сооружений при наружном обследовании методом тепловизионной съемки // Межотраслевой сб. научн. трудов. Тепловидение, № 13, М., МИРЭА, 2000. - с. 78 – 83.
6. Применение тепловизионной съемки для обследования дымовых труб // Труды 3 международной научно-практической конференции «Экономика, экология и общество России в 21-м столетии», С-Петербург, СПбГТУ, 2001. - с. 1000 – 1004. /Соавторы: В.М. Боровков, А.Н. Рондель, В.В. Исаев, Н.Н. Шаповалов.
7. Оценка теплофизических характеристик зданий и сооружений методом тепловизионной съемки // Труды 3 международной научно-практической конференции «Экономика, экология и общество России в 21-м столетии», С-Петербург, СПбГТУ, 2001. - с. 1081 – 1088.
8. Дистанционное инфракрасное обследование дымовых труб // «Энергоназор-информ», № 2, 2001. - с. 43 – 45. /Соавторы: В.В. Исаев, Н.Н. Шаповалов, В.С. Слепченко, А.Н. Рондель.