

На правах рукописи

Лариошина Ирина Анатольевна

**МЕТОДИКА ТЕПЛОВИЗИОННОГО КОНТРОЛЯ ТЕПЛОЗАЩИТЫ
СТРОИТЕЛЬНЫХ СООРУЖЕНИЙ**

05.11.13 – Приборы и методы контроля природной среды,
веществ, материалов и изделий

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск – 2015

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ФГАОУ ВО НИ ТПУ)

Научный руководитель: Заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук, профессор
Владимир Платонович Вавилов

Официальные оппоненты: **Захаренко Владимир Андреевич**, доктор технических наук, профессор, Омский государственный технический университет, заведующий кафедрой «Технология электронной аппаратуры»

Лобода Егор Леонидович, доктор физико-математических наук, доцент, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», заведующий кафедрой «Физическая и вычислительная механика»

Ведущая организация: Томский государственный архитектурно-строительный университет

Защита состоится « 30 » июня 2015 года в 15:00 на заседании диссертационного совета Д 212.269.09 при ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», по адресу: 634028, г. Томск, ул. Савиных, 7, ауд. 215.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» и на сайте: <http://portal.tpu.ru/council/916/worklist>

Автореферат разослан « 19 » мая 2015 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
к.т.н. доцент



Васендина Е.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность диссертационных исследований.

В последнее десятилетие существенно вырос интерес к применению инфракрасного (ИК) тепловидения в строительстве. В России это обусловлено двумя факторами. Прежде всего, принятие федерального закона № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» от 23 ноября 2009 г. и последующего приказа Минэнерго № 182 «Об утверждении требований к энергетическому паспорту, составленному по результатам обязательного энергетического обследования, и энергетическому паспорту, составленному на основании проектной документации, и правил направления копии энергетического паспорта, составленного по результатам обязательного энергетического обследования» от 19 апреля 2010 г. стимулировали появление практически не существовавшего ранее рынка услуг по энергоаудиту строительных сооружений, что, в свою очередь, привело к взрывному росту спроса на бюджетные тепловизоры. С другой стороны, именно в последнее десятилетие произошла смена поколений инфракрасных (ИК) тепловизоров, обусловленная разработкой относительно недорогих матричных детекторов ИК излучения. Цены на тепловизоры снизились чуть ли не на порядок, измерительные модели стали доступны небольшим организациям и даже физическим лицам. Среди других официальных документов, используемых в тепловизионном энергоаудите, следует отметить ГОСТ 26629-85 (с 2012 г. заменен ГОСТ Р 54852-2011 «Здания и сооружения. Метод тепловизионного контроля качества теплоизоляции ограждающих конструкций»), а также ГОСТ Р 54852-2011 «Здания и сооружения. Метод тепловизионного контроля качества теплоизоляции ограждающих конструкций», который представляет собой реплику международного стандарта ISO 6781-83 «Performance of buildings – Detection of heat, air and moisture irregularities in buildings by infrared methods». Значительное количество стандартов и руководств по практическим обследованиям зданий и сооружений было разработано в Швеции, Канаде и США. Среди зарубежных авторов, внесших существенный вклад в практическую строительную термографию последних десятилетий, следует отметить S. Liungberg, B. Petersson и B. Axen (Швеция), G. Stockton, J. Evans, J. Hart и J. Snell (США), E. Grinzato (Италия), R. Newport и T. Colantonio (Канада), T. Kauppinen (Финляндия). В России аналогичные исследования в течение многих лет проводились организациями, которые более или менее последовательно внедряли тепловидение в строительную диагностику: ВНИИ строительной физики, ГУП «НИИ Мосстрой», Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе, ФГУП «НИЦ «Строительство», институт «ВЕМО», ООО «НПО «Институт термографии», ЗАО «Техника. Тепловидение. Медицина», Национальный исследовательский Томский политехнический университет и др. Научные аспекты отечественного строительного тепловидения в советский период были обобщены В.А. Дроздовым и В.И. Сухаревым, а в течение

последних 10-ти лет разрабатывались О.Н. Будадиным, Е.В. Абрамовой, М.И. Низовцевым, М.И. Щербаковым, А.И. Потаповым, Д.Ю. Лездиным, Д.С. Петровым, В.П. Вавиловым, О.В. Лебедевым, Т.Е. Троицким-Марковым, А.С. Поповым и другими исследователями. Уникальным примером «легального» внедрения тепловидения в масштабах отдельного города служат работы, инициированные К.С. Трофимовым в г. Северске Томской области, где с 1998 г. тепловидение является обязательным инструментом приемки жилья.

Однако, несмотря на очевидные практические достижения строительного тепловидения, теория тепловизионного контроля и методология его применения в значительной степени опираются на исследования, которые датируются 1970–1990 гг. Отдельные результаты решения обратных задач теплового контроля в строительстве (работы О. Н. Будадина, Е.В. Абрамовой, О.В. Лебедева, М.И. Низовцева) не меняют общей, преимущественно качественной, картины применения тепловидения в отечественной строительной практике. В более широком смысле можно констатировать, что существует определенный разрыв между академическими аспектами теплопередачи в строительных конструкциях и практическими обследованиями строительных сооружений, в особенности, с использованием тепловидения.

Актуальность диссертационных исследований обусловлена необходимостью разработки количественных аспектов тепловизионного контроля в строительстве, что связано с созданием методов экспрессного определения сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций и тепловых потерь (далее – теплопотерь).

Цель работы: обобщить основные особенности тепловизионного контроля в строительстве и разработать методику количественной интерпретации результатов тепловизионных обследований наружных ограждающих конструкций (НОК) на основе совместного применения датчиков теплового потока и ИК тепловизоров.

Основные защищаемые положения

- Нестационарный характер теплообмена НОК с окружающей средой является основным источником низкой производительности энергоаудита, поэтому для снижения погрешностей определения приведенного сопротивления теплопередаче и теплопотерь рекомендуется учитывать температурную предысторию НОК путем численного моделирования изменения температуры НОК за период, предшествующий обследованию, причем длительность этого периода определяется теплофизическими характеристиками НОК. В диссертации получили развитие идеи, высказанные в работах О.Н. Будадина, Е.В. Абрамовой, О.В. Лебедева.

- При скачкообразном изменении теплового потока нагрева температура НОК стабилизируется быстрее теплового потока, и для снижения погрешности оценок сопротивления теплопередаче и теплопотерь рекомендуется измерять

температуру и плотность мощности теплового потока одновременно на обеих поверхностях НОК.

- Тепловизионный метод является простым инструментальным средством оценки эффективности теплосберегающих покрытий оконных пакетов, для чего рекомендуется сравнивать температуры наружных поверхностей стандартных и теплосберегающих стеклопакетов путем установки покрытий с высоким (известным) коэффициентом излучения и введения корректирующих параметров тепловизионных измерений: коэффициента излучения объекта исследований и отраженной температуры фона.

- Экспрессный характер тепловизионных измерений температуры находится в противоречии с «медленными» измерениями плотности мощности теплового потока через НОК зданий согласно ГОСТ 26254-84 «Здания и сооружения. Методы определения сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций». Учитывая линейный характер теплообмена НОК с окружающей средой, что связано с небольшими температурными градиентами на поверхности НОК, предлагается комбинировать результаты измерения плотности мощности теплового потока в реперных точках с измерением приведенной температуры НОК тепловизионным методом, после чего производить расчет приведенного сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций и теплопотерь, усредненных по отопительному периоду.

Научная новизна диссертационных исследований.

- Предложен алгоритм определения приведенного сопротивления теплопередаче наружных ограждающих конструкций (НОК) в нестационарных условиях, основанный на свертке температурной функции нагрева НОК и ее отклика на импульсное тепловое воздействие и обеспечивающий погрешность измерений до 15%.

- Установлено, что в процессе нестационарного теплообмена НОК с окружающей средой погрешность определения тепловых потерь и сопротивления теплопередаче, в первую очередь, определяется погрешностью измерения плотности мощности теплового потока и, во вторую очередь, погрешностью измерения температуры, причем для снижения погрешности измерений предложено комбинировать результаты измерений на обеих поверхностях НОК.

- В предположении линейного характера теплообмена на поверхностях НОК разработана методика тепловизионного контроля строительных сооружений, основанная на комбинировании результатов локальных измерений плотности мощности теплового потока и тепловизионных измерений температуры НОК, обеспечивающая погрешность оценки сопротивления теплопередаче и теплопотерь в течение отопительного периода не более 20 %.

- Установлено, что снижение погрешности определения тепловых потерь и приведенного сопротивления теплопередаче обеспечивается одновременным измерением коэффициента излучения материала ограждающей конструкции,

температуры окружающей среды и отраженной температуры фона в отдельных зонах контроля.

Практическая ценность и реализация результатов диссертационных исследований

- Разработана экспрессная методика энергетического аудита строительных зданий и сооружений с использованием метода инфракрасной (ИК) термографии, сертифицированная в системе добровольной сертификации ZOND_{es} (Приложение А).

- Выполнена экспериментальная оценка сопротивления теплопередаче оконных стеклопакетов с теплосберегающими покрытиями разработки Томского политехнического университета. С использованием метода ИК термографии установлено, что наличие покрытий приводит к увеличению сопротивления теплопередаче двухкамерных стеклопакетов от 0.33 до 0.65 Вт⁻¹·м²°С, что находится в хорошем согласии с результатами, полученными независимо классическим методом (0.36 и 0.60–0.72 Вт⁻¹·м²°С соответственно).

- Выполнены тепловизионные обследования строительных объектов в Сибирском регионе с использованием вышеупомянутой методики, который завершились разработкой энергопаспортов, зарегистрированных в Минэнерго РФ согласно требованиям федерального закона № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» (акт использования результатов диссертационных исследований в Приложении Б).

Достоверность полученных теоретических и экспериментальных результатов обеспечивается использованием аппаратуры, которая позволяет измерять абсолютные температуры с основной погрешностью не более ±2%, или ±2°С и дифференциальные температуры с чувствительностью до 0.03°С (в лабораторных условиях). Теоретические исследования подтверждены результатами практического энергоаудита строительных сооружений в сибирском регионе. Анализ результатов натуральных и вычислительных экспериментов выполнен с помощью численных методов расчета и статистических методов обработки экспериментальных данных. Полученные теоретические и экспериментальные результаты не противоречат общефизическим принципам и данным, полученным другими авторами.

Апробация работы. Основное содержание диссертационной работы докладывалось на Международной конференции «Современные исследования в области энергосбережения и повышения энергетической эффективности» (г. Курск, 2012 г.), Всероссийской конференции «Неразрушающий контроль: электронное приборостроение, технологии, безопасность» (г. Томск, 2012 г.), научно-практическом семинаре «Энергосбережение и энергосберегающие технологии», результатом которого стало издание сборника «Инженерно-

экологические проблемы энергосбережения в строительстве и ЖКХ» (г. Томск, 2013 г.), а также 11^й Европейской конференции по неразрушающему контролю (г. Прага, 2014 г.).

Связь диссертационных исследований с научно-техническими программами и грантами. Результаты диссертационных исследований связаны с выполнением проекта «Классификация строительных сооружений по энергоэффективности тепловизионным методом» в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» (2011 – 2013 г.).

Публикации. Соискателем опубликовано 13 работ, по теме диссертации – 9 работ, в том числе 4 статьи в рецензируемых изданиях из списка ВАК. Разработаны «Методические рекомендации по энергетическому аудиту строительных зданий и сооружений с использованием метода инфракрасной термографии», получившие сертификат соответствия в системе ZOND_{es}.

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы, включающего 104 источника, и четырех приложений, содержит 155 страниц текста, 28 рисунка и 18 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цели и задачи исследований, изложены основные положения, выносимые на защиту и их научная новизна.

Первая глава посвящена рассмотрению тенденций, обусловивших рост интереса к тепловизионной строительной диагностике и энергоаудиту зданий.

Основными документами, стимулирующими расширяющееся применение строительного тепловидения, являются федеральный закон №261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» от 23 ноября 2009 г., приказ Минэнерго №182 «Об утверждении требований к энергетическому паспорту, составленному по результатам обязательного энергетического обследования, и энергетическому паспорту, составленному на основании проектной документации, и правил направления копии энергетического паспорта, составленного по результатам обязательного энергетического обследования» от 19 апреля 2010 г., а также основополагающий международный стандарт ISO 6781-83 «Performance of buildings – Detection of heat, air and moisture irregularities in buildings by infrared methods».

На основе выполненного обзора отечественных и зарубежных публикаций в области строительного ИК тепловидения показано, что, несмотря на очевидные практические достижения строительного тепловидения, теория тепловизионной диагностики и методология ее применения опираются на

исследования, которые датируются 1970–1980 гг. Имеющиеся результаты решения обратных задач теплового контроля в строительстве не меняют преимущественно качественной картины применения тепловидения в строительстве. Повсеместное внедрение тепловизионных обследований столкнулось с очевидной проблемой, а именно, трудностью сочетания медленных точечных измерений плотности мощности теплового потока, что необходимо для количественной интерпретации результатов обследований, с экспрессным характером собственно тепловизионной съемки. В более широком смысле можно констатировать, что существует определенный разрыв между академическими аспектами теплопередачи в строительных конструкциях и практической диагностикой зданий, в особенности, с использованием ИК тепловидения. Решению проблем современного строительного тепловидения может способствовать разработка методических указаний по тепловизионному энергоаудиту строительных сооружений, что и явилось предметом настоящих диссертационных исследований.

Вторая глава содержит численный анализ задач нагрева строительных объектов со сложными условиями теплообмена, которые имеют место на практике: произвольная во времени и пространстве функция нагрева лучистым потоком и температура окружающей среды, а также изменение конвективной теплоотдачи во времени. Использована разработанная в Томском политехническом университете компьютерная программа ThermoCalc-2D (автор В.В. Ширяев), которая модифицирована под задачи строительной ИК термографии путем введения произвольной функции нагрева, моделирующей практический случай нагрева НОК солнцем и окружающей средой: программа ThermoCalc-2D Build. Вследствие азимутальной симметрии в данной модели отсутствует зависимость температуры от угла φ , а возможный дефект НОК моделируется диском радиуса r_d , расположенным в центральном слое толщиной $d = l_2$. Глубина залегания дефекта равна толщине первого слоя $l = l_1$. Неадиабатические граничные условия имеют место как на передней (F), так и на задней поверхности (r_s); боковая поверхность теплоизолирована. Коэффициент теплопроводности задается различными значениями по координатам r и z (анизотропная пластина). В данной модели пространственная функция теплового потока нагрева описывается азимутально-симметричной функцией, в то время как временная функция нагрева может быть произвольной, что является оригинальным моментом данного исследования.

Математическая постановка задачи нагрева трехслойной пластины описывается следующими соотношениями (Рисунок 1):

$$\frac{1}{a_i} \frac{\partial T_i}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 T_i}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_i}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_i}{\partial z^2}; \quad i=1 \div 3; \quad 0 \leq r \leq r_s; \quad 0 \leq z \leq L; \quad \tau > 0; \quad (1)$$

$$T_i(r, z, \tau) = 0; \quad (2)$$

$$\frac{\partial T_i(z=0, \tau)}{\partial z} = -\frac{Q(\tau)}{\lambda_1} + \frac{\alpha_F}{\lambda_1} \cdot T_i(z=0, \tau); \quad (3)$$

$$\frac{\partial T_i(z=L, \tau)}{\partial z} = -\frac{\alpha_R}{\lambda_3} \cdot T_i(z=L, \tau); \quad (4)$$

$$\frac{\partial T_i(z=r_s, \tau)}{\partial z} = 0; \quad (5)$$

$$\lambda_i \frac{\partial T_i(z, \tau)}{\partial \vec{v}} = \lambda_j \frac{\partial T_j(z, \tau)}{\partial \vec{v}}; \quad (на\ границах\ между\ слоями\ и\ слоями\ и\ дефектами) \quad (6)$$

$$T_i(z, \tau) = T_j(z, \tau).$$

Здесь: T_i – температура i -й области НОК, r, z – цилиндрические координаты, Q – плотность мощности теплового потока нагрева, λ – коэффициент теплопроводности, a – коэффициент температуропроводности, α – коэффициент теплоотдачи на наружных поверхностях НОК, \vec{v} – вектор нормали к поверхности НОК.

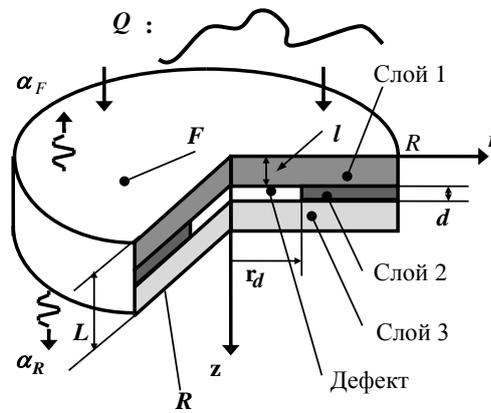


Рисунок 1 Двухмерная цилиндрическая модель ТК

Уравнение (1) есть классическое двухмерное уравнение теплопроводности параболического типа, записанное в цилиндрических координатах; уравнение (2) обозначает начальное условие; уравнение (3) описывает граничное условие на передней поверхности (нагрев и охлаждение); уравнение (4) описывает граничное условие на задней поверхности (охлаждение по закону Ньютона); уравнение (5) соответствует теплоизоляции боковой поверхности изделия; уравнения (6) суть условия неразрывности тепловых потоков и температур на границах внутренних областей (слоев и дефектов).

Временная зависимость $Q(\tau)$ включает четыре типа нагрева: 1) прямоугольным импульсом; 2) синусоидальным импульсом (моделирует солнечный нагрев); 3) тепловыми волнами; 4) тепловым потоком, произвольно изменяющимся во времени (задается пользователем в табличной форме).

Разработан алгоритм определения сопротивления теплопередаче многослойных стенок R при квазистационарных граничных условиях, проанализированы точностные показатели алгоритма и предложен способ оценки дефектности НОК путем измерения не абсолютных значений температуры, а температурных градиентов на внешних поверхностях.

В качестве примера на Рисунке 2 показано изменение отношение расчетного термического сопротивления стенки к истинному для кирпичных стен различной толщины, причем экспериментальная оценка термического сопротивления стенки R_t сделана по стандартной формуле: $R_t = (T_{\text{внутр}}^{\text{ст}} - T_{\text{внеш}}^{\text{ст}}) / Q$

(ГОСТ 26254-84), где $T_{\text{внутр}}^{\text{ст}}$, $T_{\text{внеш}}^{\text{ст}}$ – температуры внутренней и внешней поверхностей НОК, Q – тепловой поток через НОК. Видно, что для стенки толщиной 0.76 м через 5 суток после начала нагрева оценка термического сопротивления достигает 92% от истинного, в то время как для стенки толщиной 2.6 м даже через 5 суток измеренное значение R_i составляет всего 34% от истинного. Важно отметить, что основная погрешность возникает не из-за значений температуры поверхностей, а из-за того, что длительное время не устанавливается значение теплового потока.

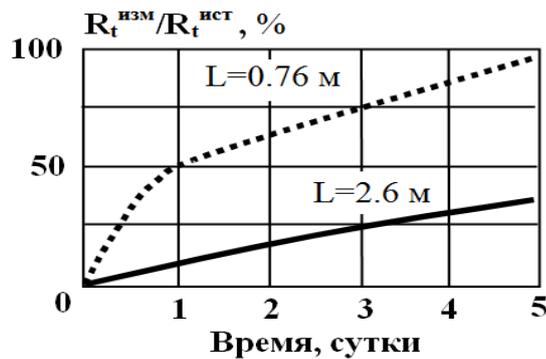


Рисунок 2 Определение термического сопротивления стенки из красного кирпича в нестационарном режиме

Наиболее простым приемом ускорения момента времени, когда можно применять выше приведенную формулу является одновременное измерение теплового потока как на внутренней ($T_{\text{внут}}^{\text{ст}}$), так и на наружной поверхности стены ($T_{\text{внеш}}^{\text{ст}}$). Предлагается следующая новая формула для расчета R_i :

$$R_i = \frac{T_{\text{внут}}^{\text{ст}} - T_{\text{внеш}}^{\text{ст}}}{(Q_{\text{внут}} - Q_{\text{внеш}})/2} \quad (7)$$

где $Q_{\text{внут}}$, $Q_{\text{внеш}}$ – плотности мощности теплового потока на внутренней и внешней поверхностях.

Используя формулу (7), величину R_i для кирпичной стенки толщиной 2.6 м можно определить «уже» через 5 дней после начала нагрева с погрешностью не более 6 %.

Если тепловой поток измеряют только на одной поверхности стены (как правило, внутренней) предложен другой подход к учету нестационарности температуры при расчете сопротивления теплопередаче. Алгоритм предполагает, что в течение длительного времени конструкция пришла в состояние теплового равновесия, в котором R_i может быть измерено с помощью стандартной формулы. Пусть в некоторый момент времени начинается существенное изменение температуры наружного воздуха (для простоты примем, что солнечная инсоляция отсутствует, т.е. температура среды начинает изменяться вечером, а измерения R_i производят утром в отсутствие солнечного излучения). Пусть $T(\tau)$ есть функция изменения температуры среды, которая может быть задана с высокой точностью в табличной формуле (доступна из метеоданных).

Температурный отклик конструкции в момент времени τ^* на воздействие функции $T(\tau)$ определяют с помощью свертки (интеграла Дюамеля):

$$T_{\text{внеш}}^{cm}(\tau^*) = \int_0^{\tau^*} T(\tau) T_{\text{внеш}}^{cmD}(\tau^* - \tau) d\tau, \quad (8)$$

где $T_{\text{внеш}}^{cmD}$ – отклик конструкции на изменение температуры среды в виде импульса Дирака. По аналогичной формуле рассчитывают тепловой поток на наружной поверхности в момент времени τ^* , после чего рассчитанные значения потока и температуры вычитают из экспериментально измеренных значений в момент τ^* для того, чтобы определить значения, которые существовали в конструкции до начала изменения температуры среды. Далее применяют стандартную формулу для расчета R_i .

Для сокращения длительности процедуры измерения R_i при небольшом температурном напоре, то есть в период с мая по сентябрь, был предложен модифицированный способ «теплового ящика», который предусматривает нагрев одной из поверхностей НОК в зоне конечных размеров, а температуру и тепловые потоки измеряют на обеих поверхностях. Нестационарность процесса учитывается введением поправочных коэффициентов, выражения для которых приведены в диссертации. Патент на данный способ принадлежит Томскому политехническому университету. В рамках настоящих диссертационных исследований, в сотрудничестве со специалистами Центра энергосбережения г. Барнаула (совместно с В.Г. Григорьевым), осуществлена практическая проверка вышеупомянутого способа.

Во второй главе также описаны результаты экспериментальной оценки сопротивления теплопередаче оконных стеклопакетов с теплосберегающими покрытиями разработки Национального исследовательского Томского политехнического университета. С использованием метода ИК термографии установлено, что наличие покрытий приводит к увеличению сопротивления теплопередаче от 0.33 до 0.65 м²·К/Вт, что находится в хорошем согласии с результатами, полученными независимо «классическим» методом М.И. Низовцевым и др. в Институте теплофизики СО РАН (0.36 и 0.60–0.72 м²·К/Вт).

Пример ИК термограммы приведен на Рисунке 3, из которого следует, что правый (стандартный) стеклопакет теплее теплосберегающего стеклопакета на 1.5–2 °С, что означает от 30 до 60 % экономии теплопотерь через стекло (без учета переплета).

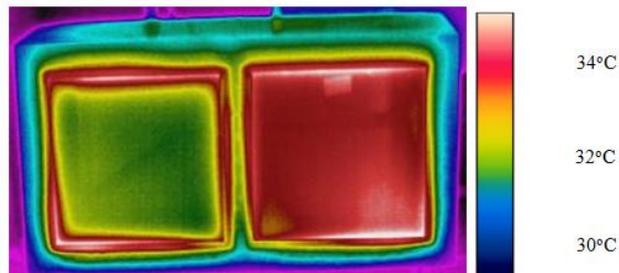


Рисунок 3 Характерная термограмма стеклопакетов (слева пакет с теплосберегающим покрытием)

Третья глава посвящена разработке количественных аспектов тепловизионной съемки строительных сооружений.

Рассмотрены основные положения методики тепловизионного энергоаудита, разработанной в ходе выполнения диссертационных исследований и включающей количественные аспекты интерпретации результатов тепловизионной съемки.

Комплексный тепловой контроль теплотехнических характеристик (параметров теплозащиты) и энергоэффективности наружных ограждающих конструкций зданий, строений и сооружений основан на применении:

- ИК термографического (тепловизионного) метода для бесконтактной регистрации теплового (температурного) поля поверхности и последующего анализа его характеристик;

- термоэлектрического метода для измерения температур воздуха, поверхности ограждающей конструкции и тепловых потоков, проходящих через нее;

- термометрического метода для определения теплопроводности слоя материала ограждающей конструкции (этот метод разработан Е.В. Абрамовой и не являлся предметом настоящих исследований).

Предложенная в рамках диссертационных исследований схема тепловизионного контроля и энергоаудита строительных зданий и сооружений показана на Рисунке 4.

В ходе тепловизионного обследования и измерения плотности мощности теплового потока и температур в характерных (реперных) зонах НОК определяют сопротивление теплопередаче (приведенное по всему фасаду и в отдельных зонах). Методика оценки трансмиссионных теплопотерь через все НОК зданий основана на комбинировании отдельных ИК термограмм с результатами измерения плотности мощности тепловых потоков в отдельных точках. При этом основное допущение состоит в том, что с помощью тепломера возможно определить суммарные конвективные и радиационные теплопотери в эталонной точке, которые выражаются законом Ньютона $Q_{эм} = h(T_{внеш}^{ст} - T_{внеш}^в)$, где h – коэффициент теплообмена НОК с окружающей средой, учитывающий как конвекцию, так и линеаризованное излучение, индекс «в» обозначает наружный воздух, индекс «ст» обозначает стену. Также принимается, что величина h является постоянной на обследуемом фасаде, даже если такое предположение не является абсолютно верным.

Тогда средняя плотность теплового потока через фасад \tilde{Q} определяется по формуле:

$$\tilde{Q} = Q_{эм} \frac{\bar{T}_{внеш}^{ст} - T_{внеш}^в}{T_{внеш}^{ст эм} - T_{внеш}^в}, \quad (9)$$

где $Q_{эм}$ – плотность мощности теплового потока в эталонной точке, среднюю температуру по фасаду $\bar{T}_{внеш}^{ст}$ определяют путем усреднения температурных значений всех ИК термограмм, полученных на фасаде, $T_{внеш}^{ст эм}$ – температура стены в эталонной точке.

Как известно, снижение погрешности тепловизионных измерений температуры связано с введением корректирующих параметров, из которых основными являются коэффициент излучения и отраженная температура фона. Опыт многочисленных обследований показал, что целесообразно оценивать корректирующие параметры не в каждой сессии измерений, как это обычно рекомендуется, а на каждом месте съемки, то есть фактически на каждом фасаде контролируемого здания.

Предложена тепловизионная система для обследований строительных сооружений, которая позволяет снизить погрешности измерения температуры при наружной тепловизионной съемке, в частности, объектов строительства и энергетики, путем одновременного измерения температурных параметров окружающей среды.

Предложенная тепловизионная система (Рисунок 5) содержит ИК тепловизор и дополнительное устройство для измерения температурных параметров окружающей среды, которое состоит из двух тонких пластин. Одна пластина выполнена из материала, коэффициент отражения которого близок к единице, например, полированного алюминия или меди, а вторая пластина, выполнена из материала, коэффициент поглощения которого близок к единице, например, металла, на который нанесено покрытие, близкое по своим свойствам к абсолютно черному телу (матовая акриловая краска любого цвета, преимущественно, черного, эмульсия графита в воде и т.п.).

Обе пластины установлены на корпусе оптической камеры тепловизора таким образом, что они попадают в поле зрения тепловизора, причем пластина, коэффициент отражения которой близок к единице, закреплена на удерживающем устройстве с помощью шарового шарнира и может поворачиваться оператором-термографистом произвольным образом. Это позволяет вводить соответствующие корректирующие параметры окружающей среды в виде установок тепловизора и тем самым повысить точность измерения температуры при наружной тепловизионной съемке.

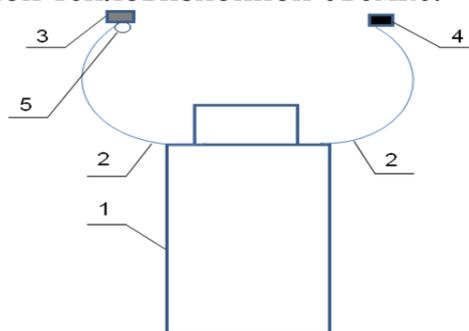


Рисунок 5 Тепловизионное устройство для определения корректирующих параметров тепловизионной съемки: 1 – ИК тепловизор; 2 – устройство удерживающие пластины; 3, 4 – пластины; 5 – шарнир

Описанная выше тепловизионная система заявлена в качестве полезной модели (приоритет от 10.11.2014 г.).

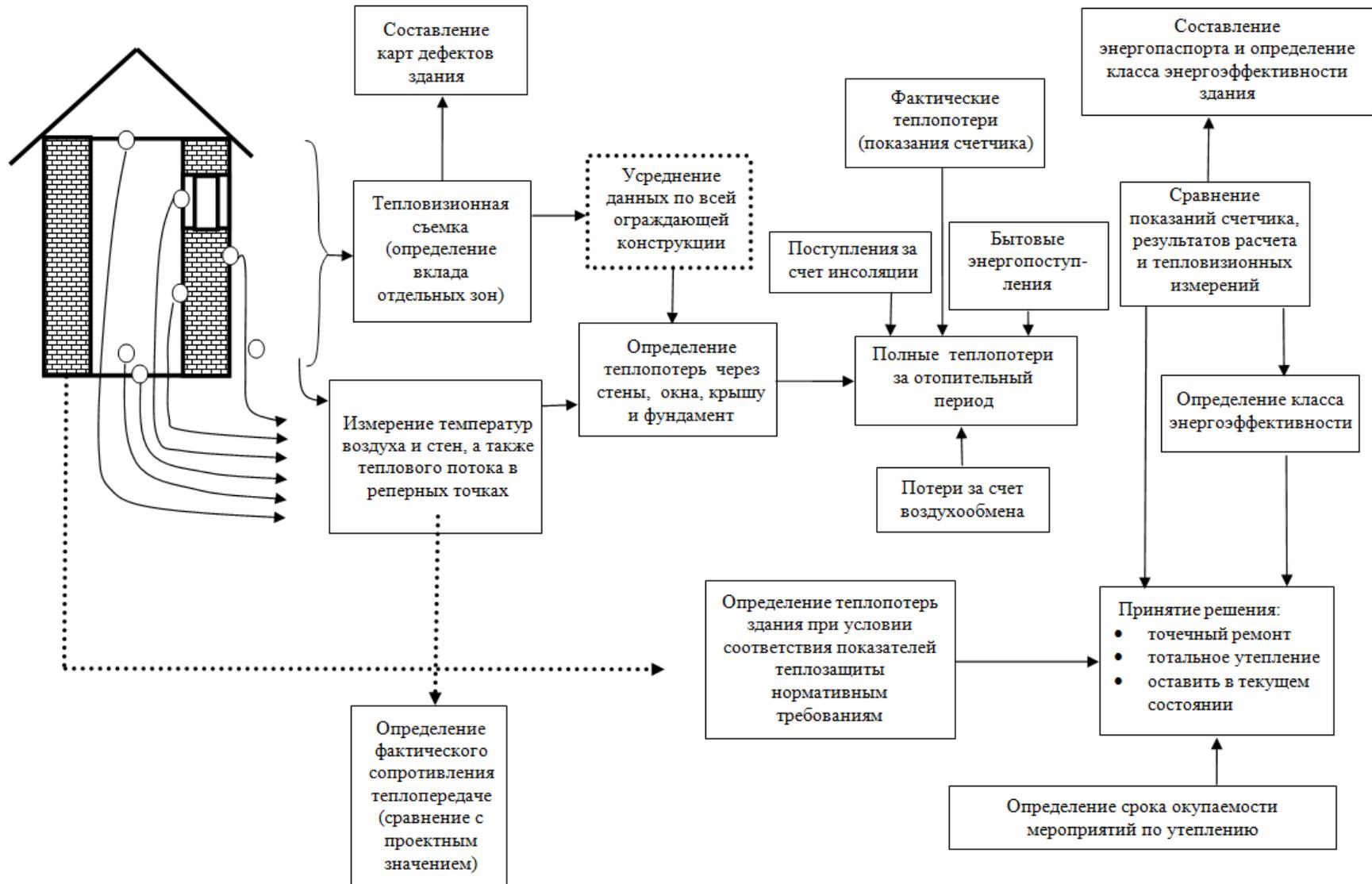


Рисунок 4 Схема тепловизионной контроле и энергоаудита строительных зданий и сооружений

Четвертая глава посвящена практическому внедрению методики энергетического аудита строительных зданий и сооружений с использованием метода ИК термографии на примере энергоаудита здания Администрации Томской области.

Здание Администрации Томской области было впервые обследовано сотрудниками Томского политехнического университета методом тепловидения в 1996 г. с помощью тепловизора АГЕМА-470, в результате чего были констатированы весьма низкое значение приведенного сопротивления теплопередаче из-за большой площади остекления, а также неэффективность системы разводки отопления, что приводило к «перетоку» верхних этажей и неравномерному температурному полю фасада (Рисунок 6,а). Повторное тепловизионное обследование было выполнено в 2011 г. в рамках энергетического обследования (Рисунок 6,б) после модификации системы отопления и замены «деревянных» окон на двухкамерные стеклопакеты, закрытые дополнительной рамой.

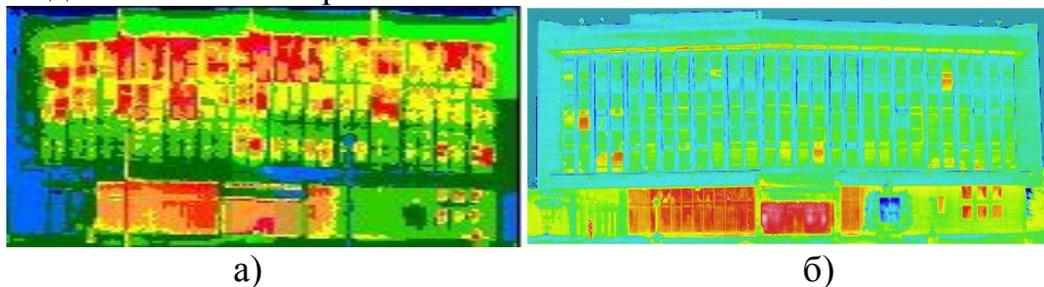


Рисунок 6 Температурные поля одного из фасадов здания Администрации Томской области в 1996 г. (а) и после реновации системы отопления и замены окон в 2011 г. (б)

Обследование включало 100 %-ю тепловизионную съемку наружных фасадов домов и выборочное тепловизионное обследование внутренних помещений, анализ эффективности системы электроснабжения, а также отопления и вентиляции в здании. В результате проведенных инструментальных измерений определено сопротивление теплопередаче отдельных элементов ограждающей конструкции здания, установлены фактические теплотери здания через ограждающие конструкции. По результатам обследования заполнен энергетический паспорт здания и разработан перечень рекомендуемых мероприятий по повышению энергоэффективности здания в части повышения теплозащиты ограждающих конструкций, оптимизации освещения, вентиляции и отопления.

Трансмиссионные теплотери здания Администрации Томской области определены в размере ~ 2840 Гкал за отопительный период. Инфильтрационные теплотери определены на уровне 757 Гкал. С учетом теплопоступлений бытовых (163 Гкал) и за счет солнечной радиации (795 Гкал) годовая потребность здания в тепловой энергии на отопление определена согласно СНиП 23-02-2003 на уровне 3200 Гкал, что на 10 % меньше фактического (по данным теплосчетчика) расхода 3550 Гкал в соответствующем году.

Удельный расход тепловой энергии в здании определен на уровне 34.5 кДж/(м³·°С·сут), что выше норматива для административных зданий: 27 кДж/(м³·°С·сут). Таким образом, здание Администрации Томской области по энергетической эффективности относится к классу С (нормальный).

Определено, что при полной реновации всех ограждающих конструкций экономия энергоресурсов составит 39.2% от потребленной энергии. При утеплении стен боковых фасадов экономия энергоресурсов составит 20.1 %, а при полной замене окон на теплосберегающие стеклопакеты с сопротивлением теплопередаче 0.75 Вт⁻¹·м²·°С экономия составит 6.1 %. Соответственно ремонт кровли крыши обеспечит экономию на уровне 6.7 %, а при утеплении фундамента – 6.3 %.

Рассмотрены технико-экономические аспекты использования тепловидения в строительной диагностике. С помощью одного комплекта аппаратуры возможно обследование до 50 сооружений в отопительный сезон, причем экономический эффект от данного направления услуг может достичь 500 тыс. руб. в год для этого количества зданий. Применительно к ремонту межпанельных швов в панельных зданиях тепловидение способно сократить расходы на ремонт приблизительно на 20 %; при этом годовая экономия составит около 400 т.р. в год для города с населением около 500 тысяч человек. В свою очередь, прибыль от поставки одного комплекта аппаратуры для тепловизионной диагностики стоимостью 1 млн. рублей может составить 200 тысяч рублей. Вышеуказанные оценки приведены в ценах 2012 г.

Основные научные результаты и выводы

- На основе выполненного обзора отечественных и зарубежных публикаций в области строительного ИК тепловидения сделан вывод, что, несмотря на очевидные практические достижения строительного тепловидения, теория тепловизионного контроля и методология ее применения опираются на исследования, которые датируются 1970–1990 гг. Имеющиеся результаты решения обратных задач строительной диагностики не меняют преимущественно качественной картины применения тепловидения в строительстве. Решению проблем современного строительного тепловидения может способствовать разработка методических указаний по тепловизионному энергоаудиту строительных сооружений, что и явилось предметом настоящих диссертационных исследований.
- Показано, что предписанная ГОСТ 26254-84 методика определения сопротивления теплопередаче НОК непригодна для экспрессных оценок в условиях изменяющейся температуры среды и солнечного потока нагрева. Установлено, что простым способом учета нестационарности является одновременное измерение плотности мощности теплового потока на обеих поверхностях НОК (следует заметить, что на практике это затруднительно для наружной стены, где измерения подвержены мешающим факторам внешней среды).

- Впервые в отечественной практике применен метод «черного ящика», предписанный международным стандартом ISO 9869–1998, что обеспечило погрешность измерений в реальных условиях до 15 %.
- В рамках предложенной модели нестационарного нагрева элементов НОК тепловым потоком, произвольно изменяющимся во времени, модифицирована ранее разработанная в Томском политехническом университете компьютерная программа ThermoCalc-2D Build, что позволило предложить алгоритм определения сопротивления теплопередаче НОК в нестационарных условиях с погрешностью до 15 %.
- В рамках диссертационных исследований проведена экспериментальная проверка способа «теплового ящика», ранее предложенного в Томском политехническом университете. Показана, что данный способ может дать приемлемые результаты на эксплуатируемых зданиях вне отопительного периода, когда температурный напор ниже требуемого ГОСТ 26254-84, однако необходимость введения поправочных коэффициентов для отдельных материалов (классов материалов) требует дополнительных исследований.
- Выполнена экспериментальная оценка сопротивления теплопередаче оконных стеклопакетов с теплосберегающими покрытиями производства Национального исследовательского Томского политехнического университета. С использованием метода ИК термографии установлено, что наличие покрытий приводит к увеличению сопротивления теплопередаче от 0.33 до 0.65 Вт⁻¹·м²·°С, что находится в хорошем согласии с результатами, полученными независимо «классическим» методом (0.36 и 0.60–0.72 Вт⁻¹·м²·°С).
- Разработаны «Методические рекомендации по энергетическому аудиту строительных сооружений с использованием метода ИК термографии», получившие сертификат соответствия в системе ZOND_{es} (Приложение А). Погрешность оценки сопротивления теплопередаче и теплопотерь с помощью данной методики составляет не более 20 %. В методику тепловизионного энергоаудита введены количественные показатели принятия решения о качестве теплозащиты НОК.
- Вышеуказанная методика была использована при 68-ми обследованиях строительных сооружений, включая энергоаудит 29-ти сооружений. С участием диссертанта выполнено обследование 6-ти объектов (Приложение В). Рассмотрены технико-экономические аспекты использования тепловидения при обследованиях строительных сооружений (Приложение Г). Акт использования результатов диссертационных исследований получен по результатам энергоаудита здания Администрации Томской области (Приложение Б).
- Результаты диссертационных исследований были связаны с выполнением проекта «Классификация строительных сооружений по энергоэффективности тепловизионным методом» в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» (2011 – 2013 г.). Соискателем опубликовано 13 работ, по теме диссертации - 9 работ, в том числе 4 статьи в рецензируемых изданиях из списка ВАК.

Основные результаты диссертации изложены в публикациях:

1. **Лариошина И.А.** Тепловидение как инструмент энергоаудита/ Вавилов В.П., Лариошина И.А. // Энергетик. – 2012 – №. 8 – С. 38–39
2. **Лариошина И.А.** Методические аспекты тепловизионного энергоаудита/ Вавилов В.П., Лариошина И.А. // Контроль. Диагностика. – 2012 – №. 9(171) – С. 75–79
3. **Лариошина И.А.** Опыт тепловизионного энергетического аудита зданий/ Вавилов В.П., Лариошина И. А., Чулков А.О. // Контроль. Диагностика. – 2013 – №. 6. – С. 69–71
4. **Лариошина И.А.** О роли тепловидения при составлении энергопаспортов зданий: определение трансмиссионных теплопотерь и технико-экономическое обоснование усиления теплозащиты/ Вавилов В.П., Лариошина И.А., Чулков А.О.// Контроль. Диагностика. – 2013 – №. 13. – С. 67–69
5. **Лариошина И.А.** Тепловизионная диагностика как элемент энергоаудита строительных сооружений/ Лариошина И.А., Вавилов В.П. // Электрика. – 2012 – №. 8 – С. 33–34
6. **Лариошина И.А.** Роль тепловидения при проведении энергоаудита и составлении энергопаспортов строительных сооружений [Электронный ресурс]/ Вавилов В.П., Лариошина И.А // Вестник науки Сибири. – 2012 – №. 2 (3). – С. 33–40. – Режим доступа: <http://sjs.tpu.ru/journal/article/viewPDFInterstitial/315/291>
7. **Лариошина И.А.** Тепловизионная диагностика как элемент энергоаудита строительных сооружений/ Лариошина И.А., Вавилов В.П.// Современные исследования в области энергосбережения и повышения энергетической эффективности: сборник научных статей по материалам 1-й Международной научно-практической конференции, Курск, 16 Апреля 2012. – Курск: Издательство Юго-западного государственного университета, 2012 – С. 117–122
8. **Лариошина И.А.** Методические рекомендации по энергетическому аудиту строительных зданий и сооружений с использованием метода инфракрасной термографии/ Абрамова Е.В., Вавилов В.П., Чулков А.О., Лариошина И.А.. – Томск.: ТПУ, 2012–49 с.
9. **Лариошина И.А.** О некоторых аспектах обеспечения энергоэффективности зданий и сооружений // Неразрушающий контроль: сборник научных трудов II Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Неразрушающий контроль: электронное приборостроение, технологии, безопасность», Томск, 28 Мая-1 Июня 2012. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012 – Т. 1 – С. 32–35