

УДК 772.96:624

А.З. Варганов, В.В. Набатов

ТЕРМОГРАФИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ ДЛЯ СТРОИТЕЛЬСТВА (обзорная статья)

Приведён обзор проблем, которые позволяет решать термографический контроль в рамках проблем строительства. Описаны отличия методик и характерные помеховые факторы.

Ключевые слова: термография, обзор, сканирующий термограф, матричный термограф, неразрушающий контроль, пассивный и активный контроль, методика, трубопроводы, теплотрассы, здания, сооружения, пустоты, дефекты, протечки, зоны увлажнения, аэрозольки, энергоэффективность, помеховые факторы..

Термография - один из методов контроля состояния зданий, сооружений и подземного пространства города. Сушность термографического контроля сводится к дистанционной регистрации инфракрасного (ИК) излучения от нагретых объектов. Поскольку температура точек поверхности исследуемого объекта обратно пропорциональна длине волны и прямо пропорциональна интенсивности ИК-излучения, то по этим параметрам можно давать оценки нагретости объекта.

В процессе измерений можно оценить как абсолютную температуру точки, так и получить матрицу относительных температур различных точек тела. Эти два параметра стоит различать, поскольку они снимаются термографами с существенно различной точностью.

Отличие термографии от других методов, связанных с регистрацией ИК-излучения объекта, состоит в том, что излучение принимается от достаточно малых точек объекта, т.е. строится ИК-картинка высокого разрешения. Так, например, для термографа «ИРТИС 2200 С» формируемое тер-

моизображение имеет разрешение 640x480 точек. Существует аппаратура, создающая термографическую картинку и более высокого разрешения. На данный момент элементная база инфракрасной техники уже фактически приближается к предельно возможным характеристикам [1].

Существует несколько вариантов формирования ИК-изображения. В частности, матричные термографы представляют собой прямоугольную матрицу чувствительных элементов, каждый из которых принимает и преобразует ИК-излучение из своей точки пространства. Таким образом, формируется матрица чисел оценивающих нагретость тела и составляющих один кадр. Альтернативой матричным термографам является сканирующий термограф. В этом случае используется единственный чувствительный элемент, на который с помощью системы зеркал последовательно направляется ИК-излучение из каждой точки сканируемого пространства.

Недостаток первого варианта связан с изменчивостью характеристик чувствительных элементов. Это приводит к тому, что ИК-излучение оди-

наковой интенсивности, принятое из точки «А» и из точки «Б», после регистрации будет оценено различными значениями. В результате возрастает ошибка определения разности температуры тела в его точках.

Поскольку сканирующие термографы все точки кадра снимают одним и тем же преобразователем, описанная выше погрешность чувствительных элементов не влияет на оценку разности температур. С другой стороны процесс сканирования одного изображения занимает большое время, и максимальная скорость получения кадров у сканирующих термографов может составлять около 1 кадра в секунду. Проблема еще больше обостряется, если оператору необходимо использовать такие методы обработки данных как суммация (осреднение нескольких кадров с целью подавления случайных помех). Матричные термографы обеспечивают гораздо более высокую скорость съёмки термоизображений, позволяют получать изображение более высокого разрешения (несколько мегапикселей).

Не смотря на высокую точность определения разности нагрева, термографы могут давать достаточно большую погрешность при оценке абсолютной температуры. Так, например, для сканирующего термографа «ИРТИС 2200 С» чувствительность к перепаду температур может достигать $0,05\text{ }^{\circ}\text{C}$ (с осреднением по множеству измерений до $0,02\text{ }^{\circ}\text{C}$). При этом ошибка определения абсолютного значения температуры составляет $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$.

В процессе работ по контролю в условиях города в первую очередь необходимо (с максимальной точностью) получать разницу температур поверхностей, а время съёмки одного кадра не играет особой роли. Поэто-

му наибольшее распространение в данном поле задач получили сканирующие термографы. В то же время проблему низкой точности абсолютных значений температуры можно решить с помощью следующего подхода: в «реперных» точках можно получить оценку абсолютной температуры с помощью контактных методов, а далее, с помощью термографии, получить полный «портрет» объекта в приращениях температуры [2]. Этот подход часто используется при контроле энергоэффективности зданий и сооружений.

Методики термографического контроля различных объектов можно разделить на два класса [3].

Пассивный метод заключается в измерении теплового потока от поверхности объекта исследования без использования дополнительного термического воздействия на него. Реализуется в задачах технического обслуживания энергетических установок, составления энергетического паспорта зданий, поиска нарушений в работе систем водоснабжения и отопления (засоры, брак монтажа и т.п.).

Активный метод применяется в случае наличия теплового равновесия между объектом исследования и окружающей средой. Данный подход основан на применении внешней тепловой стимуляции объекта контроля, последующей регистрации и сравнения значений температур в каждой из точек исследуемого тела. Так как различные вещества имеют различную теплопроводность и соответственно за определенное время теплового воздействия нагреваются на разную температуру, это позволяет с помощью термографа вычленивать неоднородности в тепловом поле и сопоставить их с неоднородностями материала. Эти неоднородности могут быть интерпретированы как пустоты, об-

ласти увлажнения, дефекты конструкции (трещины, материал ненадлежащего качества) и т.д. Метод применяют при обнаружении скрытых дефектов в строительных конструкциях, при обнаружении причин обрушения зданий.

Спектр задач, которые решают с использованием термографии, достаточно широк. В контексте контроля подземного пространства это в первую очередь картирование с поверхности отдельных видов подземных коммуникаций – теплотрасс, трубопроводов, в случае если документация на эти объекты была утеряна. Для контроля технического состояния магистральных газо- и нефтепроводов термография начала использоваться еще в 70-х годах XX века [4, 5, 6]. Тепловой след газопровода различим при температурной аномалии превышающей в 3 раза флуктуации фонового температурного контраста. Основное внимание уделялось поиску утечек. В [4] приведён интересный пример контроля глубины залегания трубопровода. При глубине залегания 1-2 м. указывается хорошее совпадение с прямыми замерами. При больших глубинах начинаются существенные расхождения, причинами которых можно назвать влияние метеорологических условий, рельефа, недостаток сведений о грунтах. Интересна так же представляет статья [7] в которой описаны методические особенности тепловой термографической аэросъёмки. В статье даны артефакты позволяющие выявлять несанкционированные врезки и места разливов нефти.

Аналогичны методики при выявлении сырых мест, протечек и прорывов теплотрасс при работах в мегаполисе. Так в [8] описаны работы по обнаружению с помощью термографии места протечки в подземный гараж грунтовых вод (дефект гидроизоляции). С

результатами работ по обнаружению прорывов подземных теплотрасс можно познакомиться в [9, 10, 11].

Съемка наиболее эффективна, если производится ночью и с использованием авиатранспорта (вертолёт) [9]. Положительным аспектом в рамках задачи поиска прорывов является то, что вода из городских сетей обычно имеет высокую температуру. Недостатком метода является ограниченность типов коммуникаций, к обследованию которых он применим. Часто конструктивные особенности коллекторов создают проблемы при выявлении источника протечек [12]. Важна и глубина заложения контролируемого объекта.

Также термографический контроль позволяет выявлять нарушения насыпей для железных дорог и шоссе. Конструктивные особенности насыпей приводят к накоплению воды вблизи магистралей, что приводит к разрушению подушки (за счёт сезонных изменений температурных режимов). За счёт более высокой теплоёмкости воды и её испарения, увлажнённые зоны прогреваются медленнее, чем сухие грунты. Термоаэросъёмка позволяет выявлять подобные опасные зоны. Опыт по данным работам описан в [10], даны методические рекомендации, в частности по высоте облёта и др.

Помимо описанных проблем термография позволяет локализовать подземные торфяные пожары, вести контроль рекультивации полей аэрации, выявлять утечки из хранилищ отходов, выявлять незаконный или неконтролируемый сток промышленных вод в городские водоёмы [10].

В рамках проблем строительства и контроля состояния зданий и сооружений метод позволяет обследовать стены и кровли зданий с локализацией аварийных и развивающиеся де-

фектов, проверить строящиеся объекты на соответствие проекту качества строительства и применяемых материалов, выявлять нарушение теплоизоляции, выявлять скрытые аварийные дефекты в электрооборудовании и электропроводке. По этим проблемам можно найти достаточно обширный список публикаций, в частности [8, 13, 14, 15, 16]. Публикация [3] интересна использованием термографии для выявления причин аварийного разрушения здания.

С помощью термографии проводят такие процедуры как энергоаудит и разработка энергопаспорта здания, который представляет собой индивидуальный учет его энергопотребления. Отопление занимает до 76% процентов потребляемой жилыми комплексами энергии [17]. Экономический и экологический эффекты от экономии энергии, затрачиваемой на отопление зданий может быть очень существенным - пример интересных расчетов можно найти в [18]. Поэтому с 2003 года в Российской Федерации законодательно требуется от любого проекта здания заполнение раздела «Энергоэффективность», энергопаспорт является составной частью этого раздела [19]. Основными теплотехническими характеристиками качества строительства являются величина приведенного сопротивления теплопередаче ограждающей конструкции здания, положение точки росы, глубина промерзания, промежуток времени, в течение которого возможно функционирование здания при аварийном отключении теплоснабжения и др. С содержанием этих характеристик можно познакомиться в [15]. За несколько лет с момента введения термографического обследования зданий процент административных и жилых зданий не соответствующих нормам энерго-

сбережения упал в несколько раз [15, 20].

В рамках контроля энергоэффективности существует достаточно большое количество публикаций [2, 16, 19, 21, 22, 24], содержащих примеры термограмм, методики проведения съемок и расчетов. С точки зрения методик полевых измерений наиболее интересна статья [23]. В [19] приведена аргументация длительных (в несколько суток) измерений сопротивления теплопередаче.

По результатам термографического контроля основными источниками потерь монолитных зданий являются перекрытия и обрамления окон (15% энергии дополнительно к прямому теплотокоту через стену). Для панельного здания – вертикальные и горизонтальные межпанельные соединения (до 20-25% дополнительных теплотерь) [24].

Обособленную проблему представляют так называемые «мостики холода». Это участки конструкции, теплопроводность которых существенно выше, чем у остальной конструкции. Эти участки будут нагреваться и охлаждаться быстрее, чем вся конструкция. Проблемой здесь является не столько теплотеря, сколько то, что на этих участках будет скапливаться конденсат [17]. Увлажнение будет распространяться на прилегающие области конструкции. Часто такие области являются местами скопления плесени, которая отрицательно влияет на здоровье человека. Мостики холода наиболее эффективно выявляются именно тепловизионным контролем.

Интересна также возможность изучения распределения нагрузок в материале при испытаниях образцов строительных материалов. В ряде случаев визуализация термического поля оказывается более эффектив-

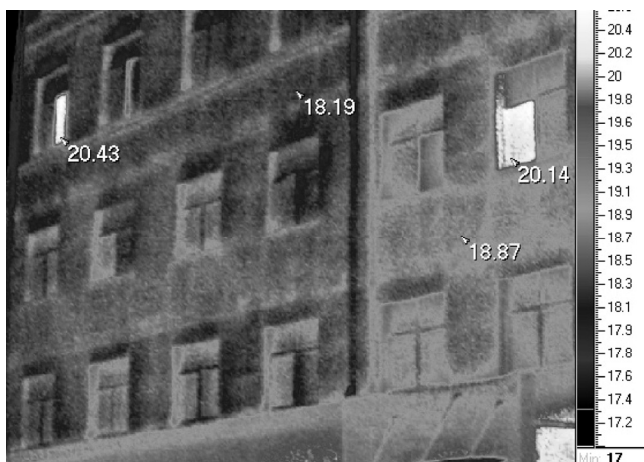


Рис. 1. Термограмма фасада здания (в точках и на шкале цифрами даны значения температуры в °С)

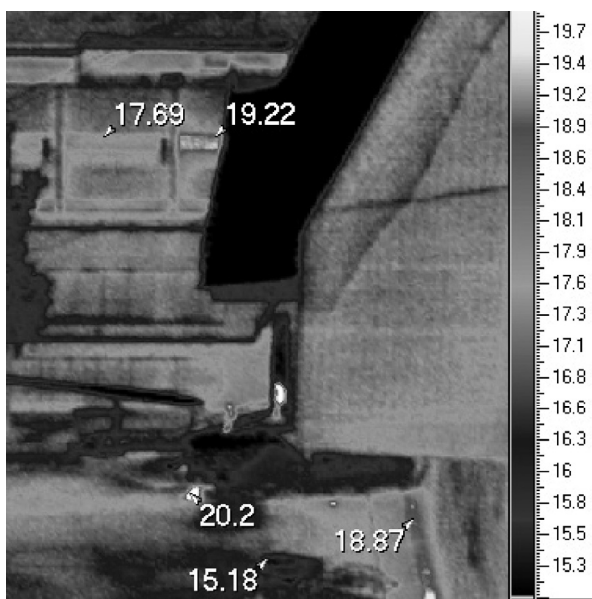


Рис. 2. Термограмма (в точках и на шкале цифрами даны значения температуры в °С)

ным методом контроля напряжённого состояния образца [25].

Для термографической съёмки важным аспектом проведения работ являются помеховые факторы. Так, например, в деле контроля зданий и

сооружений распространённой проблемой является то, что ИК-излучение формируется не только за счёт нагретости самого объекта, но и за счёт отражённого фонового ИК-излучения (ИК-излучение солнца, неба и пр.).

Это удобно проиллюстрировать термограммой, представленной на рис. 1. Здесь цифрами даны оценки нагретости конкретных точек фасада здания в °С. Точки на оконных проёмах со значениями 20.43°С и 20.14 °С на самом деле такую нагретость не имеют, а просто отражают падающий на них солнечный свет.

По описанной выше причине существуют рекомендации проводить термографическую съёмку в отсутствие облучения внешними источниками (вечер, ночь). Ряд методик еще более жёстко задают условия: обследуемая поверхность не должна находиться в зоне прямого солнечного облучения в течении 12 часов до съёмки, разница температуры снаружи и внутри (так называемый температурный напор) не должна быть меньше 15 °С и т.п.

Термограмма, представленная на рис. 2 снята в вечернее время (несколько часов после захода солнца) и гораздо более информативна. Здесь наибольший интерес представляет сопоставление двух точек - 17.69 °С и 19.22 °С. Точки представляют собой два



Рис. 3. Термограмма фасада здания (в точках и на шкале цифрами даны значения температуры в °С)

однотипных перекрытия, нагретых на температуры с разницей в 1.5 °С. Возможно, речь идёт о существенном различии свойств строительного материала. Также на термограмме можно увидеть ряд ложных аномалий. Так например точка 20.2 °С это нагретая часть автомобиля (выхлопная труба). Точка 18.37°С представляет собой трубопровод, проложенный по поверхности.

На рис. 3 можно увидеть еще одну термограмму, снятую в вечернее время. Интерес для контроля здесь представляют разницы температур в точках междублочных швов (точки 16.54 °С и 17.03 °С) и неравномерность распределения температурного поля по поверхности. Аномалии 18.56 °С и 18.6°С на самом деле представляют собой открытые окна через которые тёплый воздух выходит наружу. Такова же аномалия точки 19.9 °С.

Помеховые факторы отражённым излучением солнца не ограничиваются. Даже при отсутствии прямого солнечного излучения, обследуемая поверхность будет отражать излучение неба, особенно это заметно при съёмке верхних этажей зданий с земли [23]. Также любой нагретый объект,

находящийся вблизи от обследуемого (другое здание), будет излучать в ИК-диапазоне, этот поток будет падать на обследуемую конструкции, отражаться и искажать результаты [23]. Выходом здесь может быть съёмка обследуемой поверхности с различных углов. При этом необходимо помнить, что регистрация излучения под углом существенно отличным от перпендикулярного к обследуемой поверхности, так же может исказить результат.

При работе на открытом воздухе помеховым эффектом будет охлаждающее воздействие ветра. Так, например, контраст температур, измеренный при скорости ветра 5 м/с, будет примерно в 2 раза меньше, чем тот же контраст, но измеренный при скорости ветра 1 м/с [9]. Подобное же воздействие имеют дождь, туман, мокрый снег. Дополнительно капли влаги в воздухе могут существенно рассеивать ИК-излучение.

Еще одним аспектом работ, может быть так называемый температурный дрейф – аппаратная помеха, связанная с работой электронных компонентов прибора. Эта особенность присуща всем термографам [23]. Подобное воздействие можно компенсировать множественными снимками объекта в одних и тех же ракурсах.

В отечественной практике существует большое количество работ по обследованию дефектов конструкций (зданий, дымовых труб, дорожного покрытия и пр.). Не сложно обнаружить и широкий спектр публикаций. Однако до сих пор остро стоит вопрос устаревания норм термографического контроля. Сразу несколько статей ссылаются на эту проблему: [2,

14, 24]. Так же в [2] есть ссылка на кадровую проблему (недостаток сертифицированных специалистов). В контексте методик работы в [26, 27] к проблемам развития термографи-

ческого контроля авторы относят недостаточную разработанность вопросов моделирования тепловых процессов и методов выявления артефактов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Громов Ю.Ю., Лобанов Б.С., Ищук И.Н., Иванова О.Г., Ширшов С.С. Интеллектуальная информационная система синтеза решения задач теплового обнаружения скрытых подповерхностных объектов // Инженерная физика. 2009, №11. С. 36-42.
2. Абрамова Е.В. Тепловой неразрушающий контроль зданий и сооружений // Промышленное и гражданское строительство. 2009, №2. С. 53-55.
3. Вавилов В.П. Инфракрасная термография механических напряжений в строительных конструкциях // Контроль. Диагностика. 1998, №1. С. 21-25.
4. Моисеев В.Н., Розов В.Н., Арефьев А.Г., Дедешко В.Н., Салюков В.В. Определение глубины залегания газопровода методом воздушной тепловизионно-телевизионной съемки // Газовая промышленность. 2006, №2. С. 51-53.
5. Алеев Р.М., Овсянников В.А., Чепурский В.Н. Воздушная тепловизионная съемка для контроля нефтепродуктов / - М.: Недра, 1984.
6. Моисеев В.Н., Пихтелев Р.Н. Вертолетный комплекс для контроля линейной части магистральных газопроводов и экологического мониторинга объектов нефтегазовой промышленности // Известия Академии Наук. Энергетика. 1997, №1. С. 3-27.
7. Каримов К.М., Онегов В.Л., Кокутин С.Н., Соколов В.Н., Каримова Л.К., Васев В.Ф. Авиационное тепловизионное зондирование геологической среды // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. 2009, №5. С. 24-31.
8. Петров Д.С., Василевская Э.С. Тепловидение предупреждает // В мире неразрушающего контроля. 2004, №1. С. 19-20.
9. Вавилов В.П., Александров А.Н. Инфракрасная термографическая диагностика в строительстве и энергетике / Библиотечка электротехника, приложение к журналу "Энергетик", Вып. 9(57). М.: НТФ "Энергопрогресс" 2003. - 76 с.
10. Пируева Т.Г., Скловский С.А. Дистанционный тепловой мониторинг городских территорий и природных объектов // Разведка и охрана недр. 2006, №5. С. 46-53.
11. Сайт компании ИРТИС: (<http://www.irtis.ru/usage1.html>). Проверено 09.04.2010.
12. Неразрушающий контроль: Справочник: В 8 т. / Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 5: В 2 кн. Кн. 1: В.П. Вавилов. Тепловой контроль. Кн. 2: К.В. Подмастерьев, Ф.Р. Соснин, С.Ф. Корндорф, Т.И. Ногачева, Е.В. Пахолкин, Л.А. Бондарева, В.Ф. Мужичкий. Электрический контроль. - 2-е изд., испр. - М.: Машиностроение, 2006. - 679 с.
13. Некрасов В.П. Тепловизионное обследование объектов в целях повышения энергоресурсосбережения и безопасности их эксплуатации // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2002, №2.
14. Шишкин А. Термография как способ технической диагностики ограждающих конструкций // Строительная инженерия. 2005, №5.
15. Будадин О.Н., Абрамова Е.В., Троицкий-Марков Т.Е. Комплексный тепловой контроль зданий и строительных сооружений. // В мире неразрушающего контроля. 2004, №1. С. 21-24.
16. Завидей В.И., Милованов С.В. Особенности применения тепловизоров в тепловом контроле зданий и сооружений // Промышленное и гражданское строительство. 2008, №10. С. 49-50.
17. Вернеке Д. Энергоэффективное строительство – это мировая тенденция // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2008, №10.
18. Савин В. К. Энергетическая модель расхода первичных источников энергии и эффективность их использования при

строительстве и эксплуатации зданий // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2008, №10.

19. *Шишкин А.В.* Натурные измерения сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций зданий // В мире неразрушающего контроля. 2005, №2. С. 58-59.

20. *Вытчиков Ю.С., Беляков И.Г., Белякова Е.А., Славов С.Д.* // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2008, №1.

21. *Будадин О.Н., Сучков В.И.* Автоматизированная тепловизионная система оперативного бесконтактного определения теплотехнических характеристик наружных ограждающих конструкций зданий и других сооружений // Энергонадзор-энергосбережение сегодня. 2000, № 4. С. 39-43.

22. *Будадин О.Н., Потапов А.И., Колганов В.И и др.* Тепловой неразрушающий контроль изделий. М.: Наука. 2002. 476 с.

23. *Рейно В.В., Шерстобитов М.В.* Применение термографии для энергетиче

ского обследования зданий и сооружений // Вестник ТГАСУ. 2009, №4. С. 120-131.

24. *Абрамова Е.В., Будадин О.Н.* Комплексный тепловизионный контроль фактических теплотехнических показателей зданий // Строительные материалы. 2004, №7. С. 10-13.

25. *Мирсаяпов И.Т.* Выявление зон концентрации напряжений в железобетонных конструкциях при циклическом нагружении // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2007, №6.

26. *Ишук И.Н., Громов Ю.Ю., Самхарадзе Т.Г., Фесенко А.И.* Обработка изображений в инфракрасном диапазоне волн на основе идентификации тепловых свойств скрытых подповерхностных объектов // Инженерная физика. 2009, № 2. С. 3-11.

27. *Будадин О.Н. и др.* Тепловой неразрушающий контроль. М.: Наука, 2002.

ТИАБ

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Вартанов Александр Зараирович – профессор, кандидат технических наук,
Набатов В.В. – кандидат технических наук, доцент, Московский государственный горный университет, Moscow State Mining University, Russia, ud@msmu.ru



ДИССЕРТАЦИИ ТЕКУЩАЯ ИНФОРМАЦИЯ О ЗАЩИТАХ ДИССЕРТАЦИЙ ПО ГОРНОМУ ДЕЛУ И СМЕЖНЫМ ВОПРОСАМ

Автор	Название работы	Специальность	Ученая степень
ЮЖНО-РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ (НОВОЧЕРКАССКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ)			
ФИЛОНЕНКО Александр Александрович	Обоснование и выбор параметров бункер-перегрузателей в составе комплектов горно-проходческого оборудования	05.05.06	к.т.н
ВОЛКОВ Дмитрий Владимирович	Асинхронный частотно-регулируемый привод шахтного электровоза с автоматическим выравниванием нагрузок тяговых двигателей	05.09.03	к.т.н