

Секция ТЕПЛОВОЙ КОНТРОЛЬ

РАБОТЫ В ОБЛАСТИ ТЕПЛОВОГО НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ В ТОМСКОМ НИИ ИНТРОСКОПИИ

*В.П. Вавилов, В.Г. Торгунаков, А.И. Иванов, Д.А. Нестерук, В.В. Ширяев
г. Томск, Россия*

Описаны направления работ в области теплового контроля в Томском НИИ интроскопии, включая аппаратуру, программное и методическое обеспечение для выполнения технической диагностики и неразрушающих испытаний материалов.

1. Историческая справка

Работы в области теплового контроля (ТК) проводятся в Томском НИИ интроскопии с 1971 г. В период поддержки НИР и ОКР военно-промышленным комплексом бывшего СССР штат лаборатории ТК достигал 30 человек, а направления исследования включали теплофизическое моделирование, статистический анализ, разработку инфракрасной (ИК) аппаратуры и методических аспектов контроля специальных объектов. В 70-е годы прошлого века происходило становление отечественного тепловидения, в заметных количествах выпускались тепловизоры «Радуга» и «ТВ-03», а в наиболее продвинутых организациях начали применяться приборы шведской фирмы AGA, затем AGEMA Infrared Systems (ныне американская фирма FLIR Systems). В силу малодоступности тепловизоров исследования в области ТК носили скорее умозрительный характер. Тем не менее, в институте постепенно сформировалось три подхода к ТК: теплофизический (В.П. Вавилов), выделение сигналов на фоне помех (Б.Н. Епифанцев) и разработка ИК сканеров (В.Г. Торгунаков). В результате перестройки на фоне изменения акцентов в области финансирования научных исследований штат исследователей по ТК резко сократился, тем не менее, вышеуказанные направления были сохранены и получили определенное развитие в промышленной сфере. Докторские диссертации защитили (в хронологическом порядке) В.П. Вавилов, Б.Н. Епифанцев, А.Н. Чепрасов, О.Ю. Троицкий и В.Г. Торгунаков. В настоящее время основные направления исследований включают разработку: 1) специализированного программного обеспечения; 2) методик тепловизионных испытаний в медицине, строительстве и промышленности; 3) строчно-сканирующих ИК систем контроля обжиговых печей.

В научном плане приоритетной областью исследований является активный ТК многослойных, композиционных и сотовых конструкций согласно предложенной авторами концепции испытаний, представленной на рис. 1.

2. Основные направления исследований

2.1. Аппаратура

Из законченных систем контроля, выпускаемых в настоящее время малыми сериями, следует отметить строчно-сканирующую установку «Интрокон-05Ц», предназначенную для автоматизированного ТК вращающихся обжиговых печей, которые используются в производстве цемента (диапазон измеряемых температур от +50 до +600 °С, частота строк 2 Гц, 360 элементов на строке, спектральный диапазон 1,2–5,3 мкм, фотоприемник PbSe). Уникальной особенностью системы является наличие программного обеспечения «Термоинспектор», предназначенного не только для сбора и оформления температурной информации, но и для решения обратной (диагностической) задачи оценки износа теплоизоляции печи.

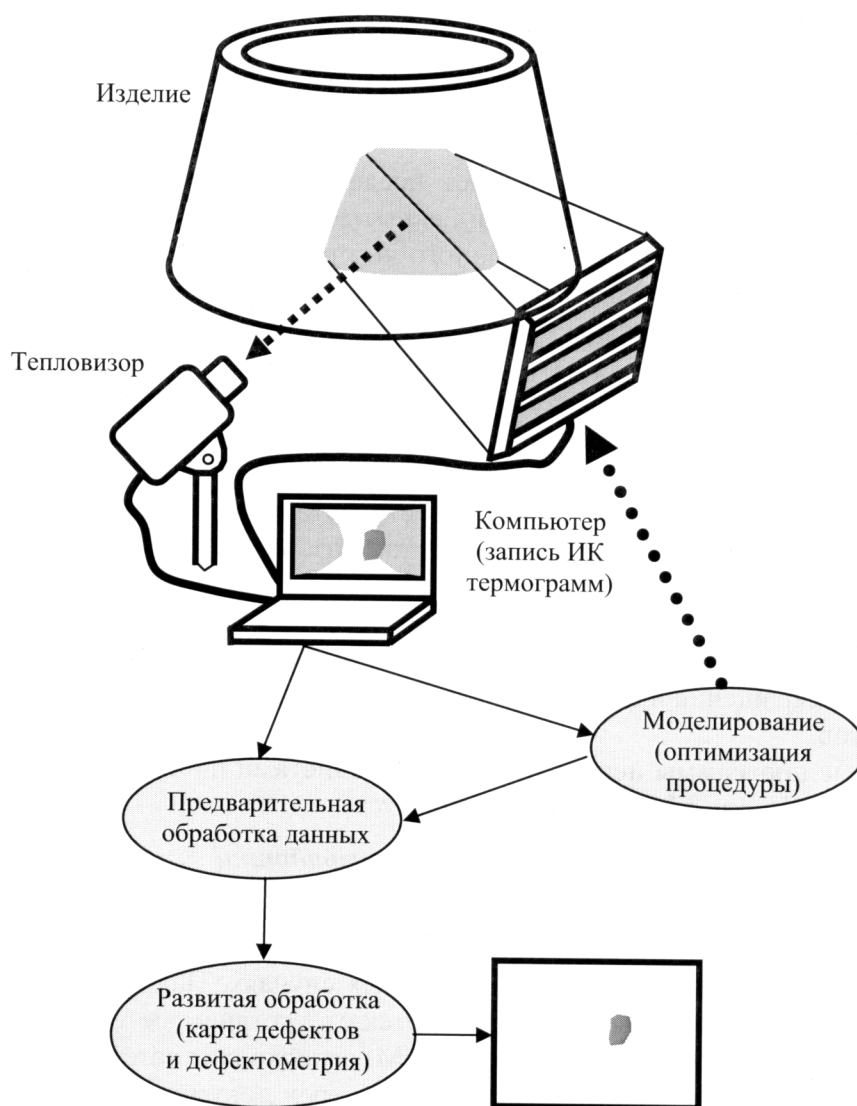


Рис. 1. Концепция активного ТК

Для целей тепловой дефектоскопии разработано несколько реализаций систем активного ТК, в которых базовым элементом являются ИК тепловизоры различного типа (Thermovision-570, ThermoCam P-65, ThermoCam A20 и др.), а для нагрева объектов контроля используются несколько видов нагревателей, включая твердотельные лазеры (15 Дж, длительность импульса 1 мс), кварцевые галогенные лампы (30 кВт) и ксеноновые импульсные лампы (3,2 кДж, длительность импульса 5 мс). Такие системы контроля используют для обнаружения дефектов в многослойных и композиционных материалах, используемых, прежде всего, в авиакосмической технике, а также для контроля коррозии и скрытой воды в сотовых и металлических изделиях.

Из более ранних разработок можно отметить портативные измерители температуропроводности «Тау», использующие метод Паркера, а также лазерную систему для определения износостойкости режущего инструмента. В данных установках объект контроля подвергают импульсному нагреву на одной из поверхностей, после чего анализируют температурный отклик на противоположной поверхности.

2.2. Программный продукт

Ставя цель соответствовать мировому уровню ТК, была принята концепция разработки передового программного продукта, предназначенного как для моделирования

задач ТК, так и для обработки динамических последовательностей экспериментальных ИК изображений. В течение последнего десятилетия было разработано около десятка компьютерных программ, в результате чего в настоящее время сформирован пакет, включающий две базовые программы.

Программа ThermoCalc-6L позволяет исследовать трехмерные нестационарные задачи ТК многослойных тел, содержащих скрытые дефекты. Последняя версия позволяет моделировать до 30 слоев анизотропного композита, причем каждый из слоев может быть повернут относительно предыдущего на определенный угол, тем самым моделируя цилиндрические углепластиковые изделия, выполненные методом намотки. С помощью данной программы можно формировать последовательности ИК изображений, которые затем подлежат анализу как экспериментальные данные.

Программа ThermoFit Pro предназначена для обработки последовательностей ИК термограмм с использованием набора алгоритмов, разработанных в мировом ТК, в том числе: 1) определение теплофизических свойств материалов (температуропроводности и тепловой инерции, включая три компонента тензора анизотропии); 2) одномерный Фурье-анализ; 3) анализ главных компонент; 4) статистический анализ; 5) тепловая томография; 6) тепловая дефектometрия и др.

Из других программ отметим программу Multilayer-3D, позволяющую моделировать фазовые превращения в объектах контроля, в частности, таяние льда в сотовых панелях самолетов.

Указанные программы используются специалистами по ТК в США, Италии, Англии, Финляндии, Индии, Малайзии и др. странах.

2.3. Методические разработки

Внедрение тепловизионного контроля в промышленность напрямую связано с наличием нормативно-методической базы, включая документы, предписывающие обязательное применение этого метода в тех или иных случаях. Например, массовые испытания самолетов на скрытую воду сдерживаются отсутствием методики, утвержденной такими организациями как ГосНИИ ГА, ВИАМ, а также соответствующими конструкторскими бюро. НИИ ИН являлся разработчиком трех документов федерального уровня, утвержденных Госстандартом РФ (ныне Ростехрегулирование):

- РД-13-04-2006. Методические рекомендации о порядке проведения теплового контроля технических устройств и сооружений, применяемых и эксплуатируемых на опасных производственных объектах.-Ростехнадзор, 2006.
- Диагностика и определение теплотехнических характеристик наружных ограждающих конструкций строительных сооружений тепловизионным методом.-Свид. об аттестации МВИ № 1305/442 от 10.01.2001, Госстандарт РФ.
- Методика тепловизионной диагностики дымовых труб и газоходов. – Свид. об аттестации МВИ № 11/442 от 6.03.2002, Госстандарт РФ.

В настоящее время на утверждении в ГосНИИ ГА находится РТМ «Неразрушающий контроль влаги в сотовых панелях летательных аппаратов в условиях эксплуатации и ремонта авиационной техники тепловым методом».

2.4. Международные контакты

Лаборатория ТК поддерживает рабочие контакты с ведущими мировыми исследовательскими группами. Сотрудники лаборатории прошли научные стажировки в Канаде, Франции, США, Германии, Финляндии, Великобритании и Италии. Выполнены контракты для организаций США, Германии и Индии. Совместные научные исследования проводились в Китае, Японии, Польше. Основным предметом сотрудничества является разработка методологии активного ТК композиционных материалов, используемых в авиакосмической технике.

2.5. Обучение

Обучение специалистов в области ТК производится по трем направлениям: 1) обучение и сертификация специалистов I, II-го уровней по системе Ростехнадзора (на базе Независимого органа по аттестации); 2) тренинг и проведение экзаменов в странах, имеющих собственную систему сертификации (Колумбия, Камерун); 3) обучение и сертификация в рамках Международного Центра Обучения (ИТС – International Training Centre).

Кроме того, в рамках отдельных контрактов производится обучения специалистов из развивающихся стран, в частности, Малайзии и Китая.

2.6. Публикации

По рассматриваемой тематике специалистами института опубликовано более 250 работ по ТК, включая около 90 зарубежных публикаций, 25 патентов на изобретения и 10 монографий. Опыт исследований обобщен в двух справочниках, изданных в России и США:

- Тепловой контроль. Спр. «Неразрушающий контроль», том 5, 2006. – М.: Машиностроение.
- Nondestructive Testing Handbook: Infrared and Thermal Testing, vol. 3. ed. by X. Maldague, ASNT, USA, 2001.

Специально для курсов по ТК различного уровня разработаны учебные пособия на русском и английском языке.

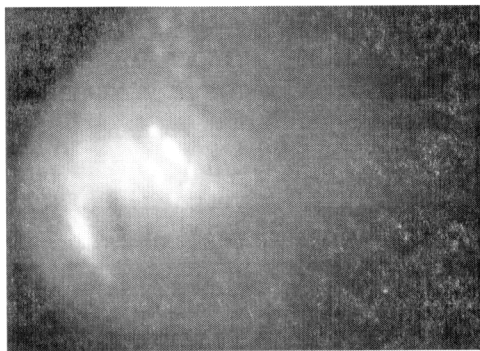
3. Применения и иллюстрации

Активный ТК композитов проиллюстрирован на рис. 2 на примере испытаний изделия, изготовленного из углепластикового композита. Следуя разработанной концепции ТК (рис. 1), процесс ТК включает: 1) регистрацию последовательности ИК термограмм (в силу неплоской геометрии и технологии изготовления композита при нагреве изделия исходные термограммы характеризуются неоднородным тепловым полем, на фоне которого надежное выявление дефектов затруднительно, см. рис. 2, а); 2) применение одного из алгоритмов обработки, не зависящих от физики процесса, например, преобразование Фурье (рис. 2, б); 3) оконтуривание дефектов, например, с помощью фильтра Собеля (рис. 2, в); 4) наложение контуров дефектов на исходное изображение и выполнение дефектометрии, в частности, оценку глубины залегания и толщины дефектов (рис. 2, г). Указанные параметры дефектов непосредственно оцениваются программой ThermoFit Pro по изображениям типа рис. 2, г с погрешностью до 30 % по глубине и до 60 % по толщине дефектов.

В 2007 г. был обследован корпус одного из пансионатов в г. Томске, где должен был остановиться президент России. Осмотр фасадов и внутренних помещений показал удовлетворительную теплозащиту здания, однако тепловизионная съемка чердака обнаружила обширные зоны слабой теплоизоляции, что привело к обильному сосулькообразованию (рис. 3, а) в зимний период.

Инспекцию дымовых труб проводят без останова котлов с целью выявить скрытые дефекты ствола, которые не обнаруживаются при наружном и внутреннем осмотре. Железобетонные трубы высотой 120–200 м характеризуются специфической кольцеобразной структурой теплового поля, связанной с секциями бетонирования. Тепловизионный контроль выявляет повышенную пористость бетона и отсутствие минералватного утеплителя между железобетонным стволом и футеровкой (рис. 3, б).

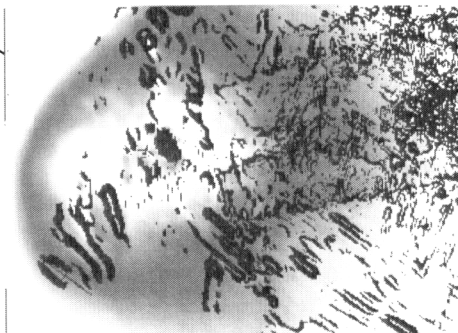
В 2008 г. в Томске выполнено обследование 10 жилых домов различного типа, в результате чего оценены тепловые потери и величины сопротивления теплопередаче стен и окон, которые регламентированы территориальными строительными нормами. Аналогичная работа была выполнена по тепловым коммуникациям г. Томска (рис. 4).



Многочисленные дефекты намотки (полости, заполненные воздухом и эпоксидной смолой)

а

б



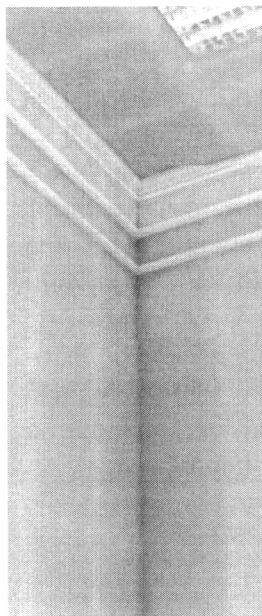
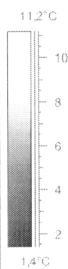
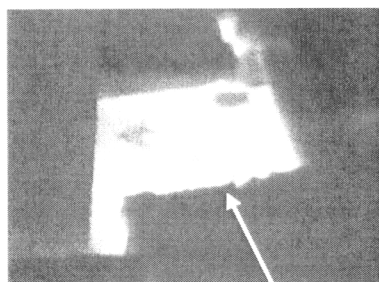
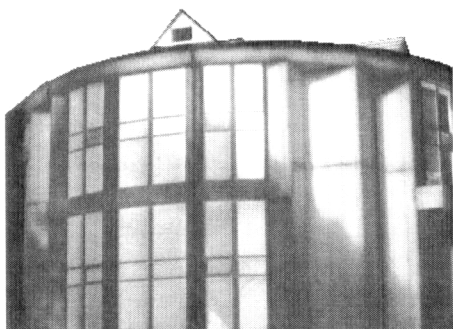
в

г

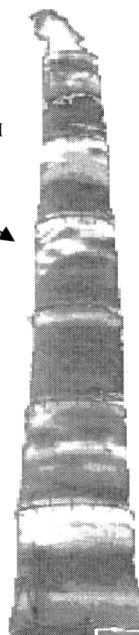
Рис. 2. Тепловой контроль изделия из углепластика:

а – исходная термограмма; б – фазограмма;

в – градиентная маска; г – наложение маски на исходную термограмму



Ухудшение
теплозащиты
ствола



Отсутствие теплоизоляции на чердаке

Рис. 3. Тепловизионный контроль строительных сооружений:

а – термограммы фасада, внутреннего помещения и чердака фасада;

б – термограмма железобетонной трубы тепловой станции



Рис. 4. Оценка тепловых потерь в тепловых коммуникациях г. Томска (слева – фотография шурфа, справа – ИК термограмма)

Несколько лет назад НИИ ИН выступил инициатором обследования тяговых подстанций на Томской дистанции Западно-Сибирской железной дороге. В настоящее время тепловизионный контроль является рутинной операцией на железной дороге, позволяющей своевременно выявлять предкатастрофические ситуации (см. рис. 5).

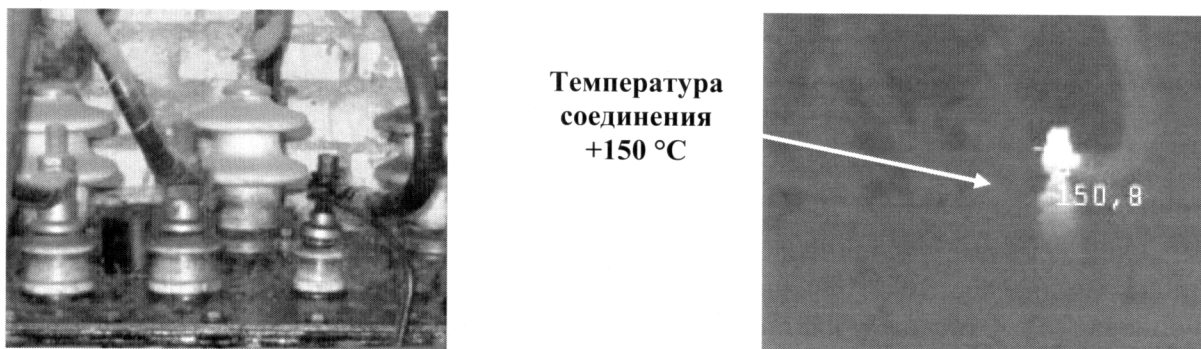


Рис. 5. Перегретый электрический контакт на железнодорожной тяговой подстанции

На рис. 6 показаны результаты ТК стандартного образца иконы на дереве, который содержал 4 искусственных дефекта, внесенных при изготовлении образца по средневековой технологии. Все дефекты были уверенно обнаружены в результате использования метода динамической тепловой томографии (см. изображение справа).

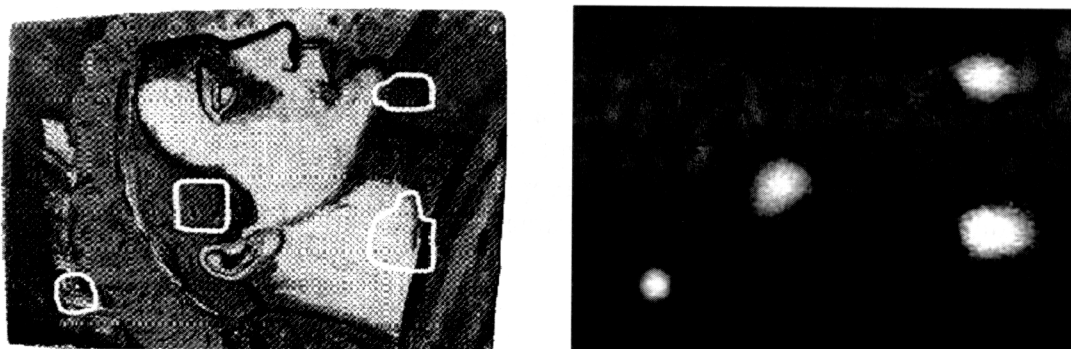


Рис. 6. Тепловая дефектоскопия стандартного образца иконы на дереве, содержащего 4 дефекта

В течение последних лет было обследовано несколько самолетов Ту-204, эксплуатируемых российскими авиакомпаниями, в результате чего разработана методика испытаний после посадки самолета, упомянутая выше (см. рис. 7). Оперативность и на-

дежность ТК делают этот метод весьма перспективным при испытаниях самолетов типа Бе-2000, Ан-726 Ан-74 «Руслан», а также вертолетов Ка-50.

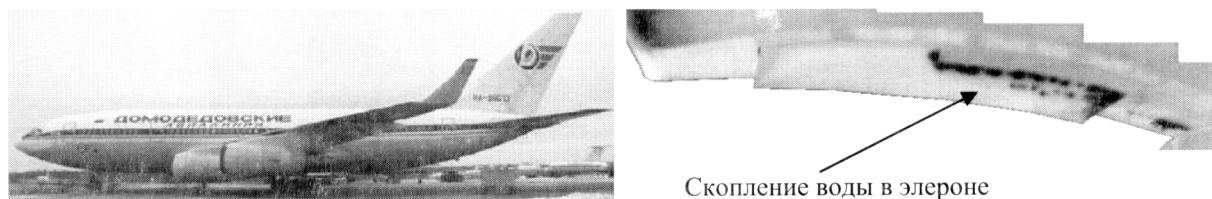


Рис. 7. Обнаружение скрытой воды в сотовых панелях самолетов

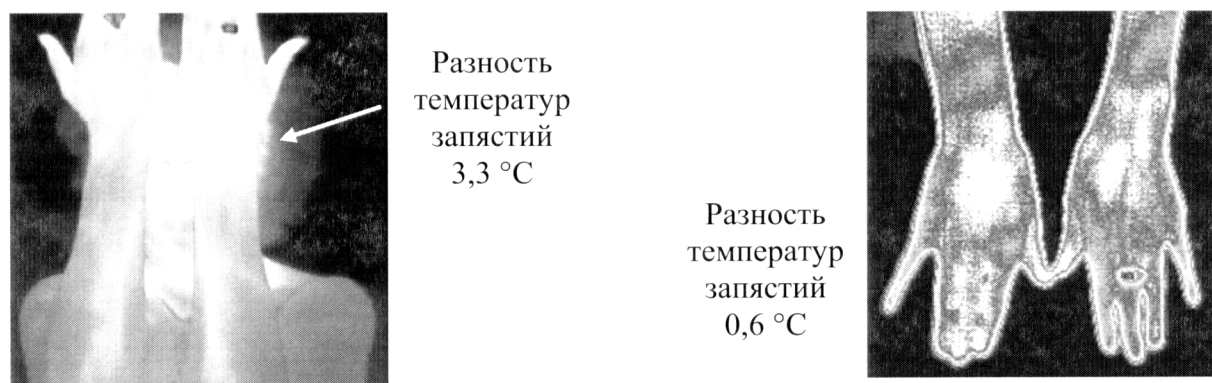


Рис. 8. Тепловизионный контроль за состоянием перелома левого запястья через 1 месяц (слева) и 1 год (справа) после перелома

Определенные усилия были предприняты по внедрению ИК тепловидения в медицинскую диагностику. Проводились исследовательские и практические работы в сотрудничестве с Томским НИИ онкологии. На рис. 8 показаны термограммы зоны перелома запястья левой руки пациентки В., полученные после снятия гипса, а также через год после перелома. Видно, что процесс вылечивания сопровождается снижением дифференциального температурного сигнала двух запястий от 3,3 до 0,6 °С.

4. Заключение

ИК термография является привлекательной областью прикладных научно-технических исследований. Применение этого метода в неразрушающем контроле характеризуется универсальным характером, что выделяет его среди других методов испытаний. Тем не менее, платой за универсальность теплового контроля является необходимость выделять температурные сигналы на фоне специфических «тепловых» помех. Учитывая разрыв в техническом уровне между отечественными и зарубежными тепловизорами, авторы видят возможность соответствовать мировому уровню в области теплового контроля путем разработки теории, методологических основ, алгоритмов обработки информации и коммерческих компьютерных программ.