

**Н.И. Глуцук, Э.Ю. Гордиенко, Ю.В. Фоменко, Г.В. Шустакова**

Физико-технический институт низких температур им. Б.И.Веркина НАН Украины, Харьков

## **ПРИМЕНЕНИЕ ТЕПЛОВИЗИОННЫХ МЕТОДОВ В НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ**



*Рассмотрены примеры использования тепловизионных методов при решении научно-исследовательских задач. Проанализированы некоторые ключевые моменты и проблемы проведения таких исследований в лабораторных условиях.*

*Ключевые слова: тепловизионный метод, научные исследования.*

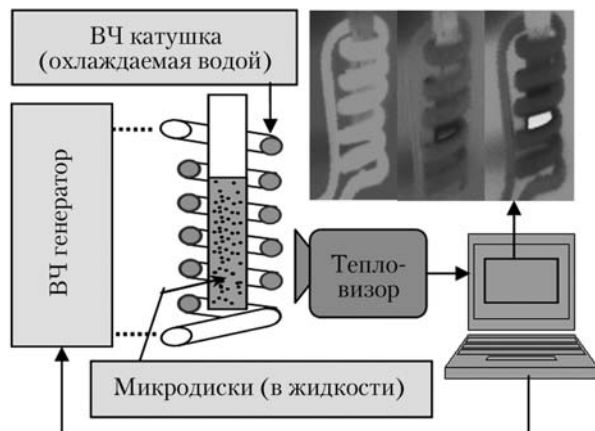
В последнее десятилетие наблюдается значительный рост использования тепловизионных методов в различных областях человеческой деятельности. Он обусловлен совершенствованием технологии производства инфракрасных приемников и развитием компьютерных технологий. Появились тепловизоры новых поколений — легкие, компактные, с высокими параметрами и современным программным обеспечением [1–3]. Они созданы на основе неохлаждаемых приемников — высокоформатных (сотни тысяч чувствительных элементов) микроболометрических матриц [4] — и позволяют получать качественную картину распределения тепловых полей на поверхности исследуемого объекта.

Однако получение такой картины (термограммы) — только первый шаг тепловизионного анализа. Чтобы получить достоверную информацию о внутренних процессах, вызывающих тепловые поля, необходимо учесть побочное влияние окружающей среды, оптические и другие свойства исследуемого объекта, произвести количественный анализ рас-

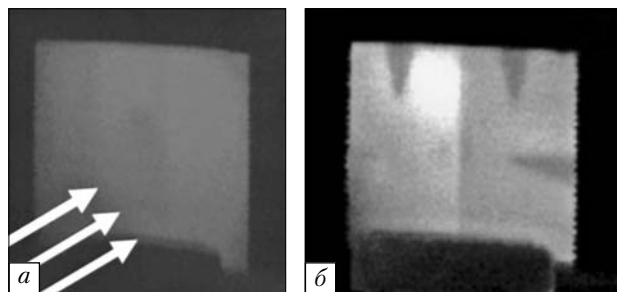
пределения температур и их динамики в правильно выбранных гипер(гипо)термических областях и так далее, т.е. создать индивидуальную для каждой конкретной задачи методику тепловизионного исследования.

В отраслях, где тепловизионные технологии используются относительно широко (энергосбережение и выявление дефектов оборудования), уже существуют разработанные и утвержденные специальными организациями методики регулярного тепловизионного обследования конкретных объектов [5, 6], хотя и они требуют постоянного обновления из-за появления новых строительных и изоляционных материалов, защитных покрытий и т.д.

В большинстве же областей человеческой деятельности тепловизионный анализ, уже доказавший свою необходимость и эффективность, еще не получил широкого распространения и вызывает, в основном, научно-исследовательский интерес. Это — медицина (за исключением уже используемой в клинической практике термографии молочных желез), наука, экология, сельское хозяйство, криминалистика и др. В этих областях разработанных и утвержденных методик практически не существует и их приходится создавать самостоятельно пользо-



**Рис. 1.** Схема эксперимента по тепловизионному исследованию разогрева высокочастотным электромагнитным полем магнитных микродисков



**Рис. 2.** Изучение методами активной термографии нарушений внутренней структуры композитных материалов: а — термограмма образца до теплового воздействия, б — термограмма с дефектами, выявленными в результате теплового воздействия

вателям тепловизионных систем. И если существует надежда на появление в будущем стандартных тепловизионных методик, например выявления зон подземного горения угольных отвалов или диагностики распространенных заболеваний, то при решении нестандартных задач научных исследований вопросы о том, как правильно измерить распределение тепловых полей и извлечь из полученных термограмм достоверную информацию, всегда придется решать самому экспериментатору.

Мы неоднократно применяли разработанные тепловизионные системы [7–9] в научно-исследовательских целях, в том числе медицинских и биологических. Ниже на конкрет-

ных примерах рассмотрены некоторые ключевые моменты и проблемы, с которыми часто приходится сталкиваться в процессе проведения тепловизионной съемки в лабораторных условиях и при последующем анализе полученных термограмм.

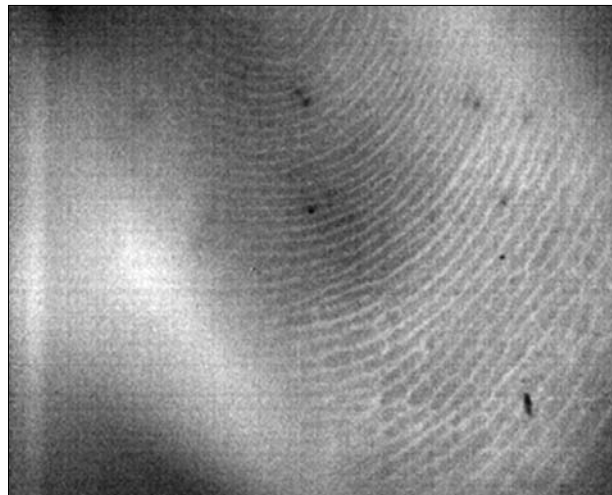
Первым шагом организации тепловизионного исследования является анализ поставленной задачи, в зависимости от которой выбирается вид термографии (пассивный или активный (динамический) [10]). Пассивная термография используется для анализа объектов, находящихся в термодинамическом равновесии с окружающей средой. Для решения таких задач достаточно медленного (и более дешевого) одноэлементного тепловизора с оптико-механическим сканированием. Активная, или динамическая, термография применяется для исследований естественно изменяющихся процессов или при нарушении теплового баланса, вызванного целенаправленным воздействием. Для биологических объектов, кроме тепловых, используется также физиологические, физические или фармакологические воздействия. Для таких задач зачастую необходим матричный прибор с большой частотой кадров. На рис. 1 приведена упрощенная схема эксперимента, в котором использовалась динамическая термография для количественной оценки разогрева высокочастотным электромагнитным полем взвешенных в жидкости микродисков (исследования проводились в Аргоннской национальной лаборатории, США [11]). Следует отметить, что три термограммы, приведенные на рисунке, лишь качественно иллюстрируют нагрев. Количественный анализ скорости и амплитуды нагрева проводился по серии термограмм (термографическому фильму) поверхности жидкости, снятой через открытый конец колбы.

На рис. 2 приведен пример использования направленного импульсного воздушного нагрева для выявления дефектов внутренней структуры различных многослойных образцов, предоставленных научно-исследовательской лабо-

раторией Харьковского государственного авиационного производственного предприятия. При проведении этого исследования мы, имея на тот момент в наличии только «медленный» (1 кадр/с) тепловизор с оптико-механическим сканированием, успешно выявили нарушения внутренней структуры большинства предоставленных композитных материалов, однако не смогли выявить аналогичные дефекты образцов с металлизированными слоями ввиду их высокой теплопроводности.

Поэтому предварительно следует оценить теплофизические и оптические свойства исследуемого объекта, поскольку, например, от его теплопроводности зависит скорость растекания по поверхности температурного рельефа и, соответственно, требуемая частота кадров тепловизора. Важным моментом является оценка коэффициента излучения поверхности исследуемого объекта и учет его при количественном анализе. Чем больше коэффициент излучения, тем меньшая вероятность ошибки из-за ложных тепловых отражений, а использование тепловизионного метода для исследования объектов с коэффициентом излучения поверхности менее 0,7 вообще не является корректным [5]. При необходимости, для увеличения коэффициента излучения, можно покрыть исследуемую поверхность тонким слоем сажи или черной аэрозольной краской с известным высоким коэффициентом излучения.

Важным моментом являются внешние условия проведения тепловизионной съемки. При медицинских исследованиях требования к внешним условиям достаточно четко определены (отсутствие внешних источников тепла, постоянная определенная температура воздуха в помещении и т.д.) [12] и могут быть реализованы. При проведении научного эксперимента в реальных лабораторных условиях аналогичные требования нелегко соблюдать. Тем не менее побочное влияние окружающей среды в процессе измерений всегда необходимо минимизировать. Работавшую аппаратуру и другие источники тепла следует отгораживать тепло-



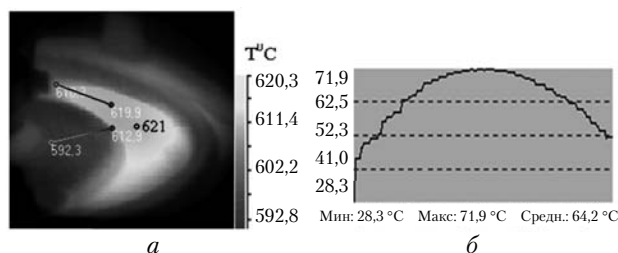
**Рис. 3.** Тепловое изображение фрагмента кожи ногтевой фаланги пальца человека, полученное обычным тепловизором с использованием дополнительного объектива. Разрешение позволяет видеть папиллярный узор и раскрытые потовые поры (черные точки)

выми экранами (например, листами пенопласта), а для уменьшения ложных отражений корпусы приборов и другие отражающие элементы можно отделить ширмами из черного сукна. Удобным приемом исключения из анализа ложных тепловых областей на поверхности объекта является предварительная съемка «фоновой» термограммы (с работающей аппаратурой, но при отключенном исследуемом объекте) и последующее вычитание ее из всех «рабочих» термограмм с помощью стандартных программ обработки изображений. Например, в описанном выше эксперименте по измерению параметров разогрева микродисков (см. рис. 1) фоновыми термограммами являлись термограммы поверхности жидкости без взвешенных в ней микродисков при соблюдении всех остальных условий эксперимента.

В зависимости от размера объекта, расстояния до него и особенностей его расположения выбирается инфракрасный объектив с нужными параметрами, при необходимости устанавливаются инфракрасные зеркала, которые возможно изготовить в лабораторных условиях (например, рамка с натянутым майларом). Для



**Рис. 4.** Использование относительной температурной шкалы для количественного анализа изменений тепловых полей на коже пациента в процессе лечения. Закрашенные на термограммах области имеют температуру, равную или превышающую опорную температуру



**Рис. 5.** *a* — термограмма системы расплав/кристалл CsI, полученная через смотровое окно; *б* — температурное сечение собственного теплового поля наружной поверхности смотрового окна

получения более качественной термограммы (а тем более термографического фильма) тепловизор следует закрепить на штативе. Если размеры объекта достаточно малы (задача для узкоспецифического инфракрасного микроскопа), для получения качественной информации о тепловых полях можно получить термограмму с помощью обычного тепловизора, используя дополнительный инфракрасный объектив. На рис. 3 для иллюстрации приведена полученная таким способом термограмма фрагмента ногтевой фаланги пальца с тепловым рисунком потовых пор, капилляров и мелких сосудов.

В результате предварительного анализа свойств объекта и с учетом ожидаемых на нем температур, тепловых контрастов, скорости тепловых процессов выбирается модель тепловизора с нужными параметрами (пространственным разрешением, температурной чувствительностью, частотой кадров, диапазоном измеряемых температур, спектральным диапазоном). Также следует уделять внимание возможнос-

тям прилагаемого программного обеспечения, цене и конструкции прибора. Например, для работы в лабораторных условиях можно использовать тепловизор, управляемый посредством внешнего персонального компьютера с большим монитором вместо прибора со встроенным экраном, удобным для работы в полевых условиях. Оптимальным вариантом для использования в разнообразных научных экспериментах являются тепловизионные системы с «открытой архитектурой», в которых в зависимости от задачи можно изменять параметры прибора и функции программного обеспечения, совмещать их с другой аппаратурой, создавая общий интерфейс и т.д. [8, 11].

Даже самые совершенные современные тепловизионные системы измеряют абсолютную температуру с точностью, не превышающей  $\pm 2\%$  от измеряемой температуры. Поэтому при анализе тепловых полей предпочтительно использовать относительную температурную шкалу. Точность измерений в этом случае определяется температурной чувствительностью применяемой тепловизионной системы и для современных приборов достигает сотых долей градуса. Особенно важно использовать относительную шкалу при биологических или медицинских исследованиях, так как тепловое поле человека претерпевает постоянные временные изменения, зависящие от множества факторов. На рис. 4 приведены термограммы полупрофиля лица пациента после первого, второго и третьего циклов лечения методами химио-радиотерапии. Оценка количественных изменений тепловых полей производилась с использованием относительной температурной шкалы. Темным цветом на рисунке закрашены области с температурой, равной или превышающей опорную температуру, в качестве которой в данных исследованиях [12] выбрана температура века в области переносицы.

В условиях лабораторного эксперимента относительные измерения неизбежны, если излучение от объекта попадает на приемник тепловизора после отражений от инфракрасных

зеркал, прохождения сквозь препятствия (например, окна технологических камер) и т.д. При этом необходимо учитывать не только коэффициенты отражения (пропускания) материала препятствия в спектральном диапазоне чувствительности приемника, но и его собственные тепловые поля. В таких случаях рекомендуется расположить в поле зрения тепловизора эталонный источник теплового излучения с заданными температурой и высоким коэффициентом излучения (модель абсолютно черного тела). Такой эталонный источник нужного размера также можно изготовить в лабораторных условиях. Тогда тепловые изображения исследуемого объекта и эталона будут расположены на одной термограмме, что даст возможность по заданным температуре и коэффициенту излучения эталона оценить количественно абсолютные температуры любой точки поверхности изучаемого объекта. На рис. 5, а приведена термограмма, иллюстрирующая распределение тепловых полей в один из моментов процесса роста кристаллов CsI, проводимого в Институте сцинтилляционных материалов НАН Украины (г. Харьков). Серия термограмм получена через смотровое кварцевое окно камеры. За опорную температуру была принята температура расплава CsI – 621 °С. При последующем количественном анализе термограмм были учтены спектральная характеристика коэффициента пропускания кварца и собственное тепловое поле смотрового окна (рис. 5, б). При измерении теплового поля окна его наружная поверхность была специально покрыта тонким слоем сажи для увеличения коэффициента излучения, а тепловизор располагался под углом, чтобы исключить попадание в его поле зрения разогретых объектов внутри камеры.

Опыт использования тепловизионного метода при решении различных научно-исследовательских задач доказывает его информативность и перспективность [11–13]. Ведь любой физический, химический, механический или биологический процесс сопровождается выделением или поглощением тепла, а спектральное

и пространственное распределение интенсивности такого теплового излучения содержит много информации об этом процессе. Это дает уверенность утверждать, что многие научные исследования, дополненные этим уникальным методом, смогут дать качественно новый уровень понимания изучаемых процессов.

*Работа выполнена при финансовой поддержке НАН Украины в рамках научно-технического проекта «Разработка анализатора тепловых полей для научных исследований» (программа научного приборостроения НАН Украины).*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. NEC Infrared Technologies. — <http://www.nec-avio.co.jp/en/>.
2. Fluke Corporation — <http://www.fluke.com/>.
3. FLIR Systems — <http://www.flir.com/>.
4. Tissot J.L. High Performance Uncooled Amorphous Silicon VGA IR FPA with 17  $\mu\text{m}$  pixel-pitch // Proc. SPIE. — 2010. — V. 7660. — 7660 OT.
5. Метод тепловизионного контроля качества теплоизоляции ограждающих конструкций, ГОСТ 26629-85.
6. Технічна діагностика електрообладнання та контактних з'єднань електроустановок та повітряних ліній електропередачі засобами інфрачервоної техніки, СОУ-Н ЕЕ 20.577:2007.
7. Тепловизионный программно-аппаратурный комплекс (ТК-1). — [http://www.ilt.kharkov.ua/bvi/technology/tk1/tk1\\_r-1.html](http://www.ilt.kharkov.ua/bvi/technology/tk1/tk1_r-1.html).
8. Гордиенко Э.Ю., Ефременко В.Г., Керемет Л.С. и др. Анализатор тепловых полей для лабораторных исследований // Радиоэлектроника и информатика. — 2010. — № 3. — С. 57–62.
9. Гордиенко Э.Ю., Глушук Н.И., Пушкарь Ю.Я. и др. Многоэлементный тепловизор на основе неохлаждаемой болометрической матрицы // ПТЭ. — 2012. — № 4. — С. 85–88.
10. Maldague X.P. Theory and Practice of Infrared Technology for Nondestructive Testing, Wiley, 2001. — 562 p.
11. Yefremenko V., Gordiyenko E., Shustakova G. et al. A Broadband imaging system for research applications // Rev. of Scientific Instruments. — 2009. — V. 80. — 056104 (3 pp).
12. Шустак Г.В., Ефременко В.Г., Новосад В.А. и др. Тепловизионная методика прогнозирования острого мукозита у онкологических больных // Кибернетика и вычислительная техника. — 2011. — Вып. 164. — С. 71–77.
13. Vainer Boris G. Focal plane array based infrared thermography in fine physical experiment // J. Phys. D: Appl. Phys. — 2008. — V. 41. — 065102 (12 pp).

*М.І. Глушук, Е.Ю. Гордієнко,  
Ю.В. Фоменко, Г.В. Шустакова*

### ВИКОРИСТАННЯ ТЕПЛОВІЗІЙНИХ МЕТОДІВ У НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕННЯХ

Розглянуто приклади використання тепловізійних методів у наукових дослідженнях. Проаналізовано деякі ключові моменти і проблеми проведення таких досліджень у лабораторних умовах.

*Ключові слова:* тепловізійний метод, наукові дослідження.

*N.I. Glushchuk, E.Yu. Gordiyenko,  
Yu.V. Fomenko, G.V. Shustakova*

### THERMAL IMAGING FOR SCIENTIFIC RESEARCH APPLICATION

Examples of the application of thermal imaging methods in scientific research have been considered. The key problems of such investigation under laboratory condition have been analyzed.

*Key words:* thermal imaging, scientific research.

Стаття надійшла до редакції 24.12.12

---

## VIII МЕЖДУНАРОДНЫЙ КОНКУРС МОЛОДЕЖНЫХ ИННОВАЦИЙ И РАЗРАБОТОК «НОВОЕ ВРЕМЯ»

**26—28 сентября 2013 г. Севастополь, Украина**

#### ОРГАНИЗАТОРЫ КОНКУРСА

Министерство образования и науки, молодежи и спорта Украины  
Государственная служба интеллектуальной собственности Украины  
ГП «Украинский институт промышленной собственности» (г. Киев)  
Севастопольская городская государственная администрация  
Севастопольский городской Совет и др.

Конкурс проходит с 01 октября 2012 г. по 07 сентября 2013 г.

Он включает три направления для молодежи до 25 лет:

1. Конкурс «Молодой изобретатель»
2. Конкурс новых технологий.
3. Конкурс социальных инновационных проектов

Сроки подачи конкурсных материалов до 07 сентября 2013 г.

В рамках проекта планируется дополнительная информационная подготовка участников по вопросам ТРИЗ-педагогике, педагогике творчества, основам охраны и использования интеллектуальной собственности, авторскому праву и изобретательской деятельности. Победители конкурса будут отмечены медалями и дипломами и другими наградами международных организаций, получают рекомендацию для участия в работе обществ изобретателей, а также для участия в специальных тренингах и конкурсах.

#### Адрес конкурсной программы:

Юрию Мечиславовичу Скоморовскому,  
а/я 36, Севастополь, Украина 99006.

Тел.: 380-692-555628, 380-500094660

e-mail: aumel@sevsky.net

Владимир Алексеевич Куликов,

Тел. +380-692-932038, +38050-812-61-91

e-mail: aed-sevastopol@yandex.ru

Регистрация на сайте: [www.newtime-ayumel.com](http://www.newtime-ayumel.com)