



# МИР материалов и технологий

Динамические  
термографические  
методы неразрушающего  
экспресс-контроля

Д.Ю. Головин, А.И. Тюрин,  
А.А. Самодуров, А.Г. Дивин,  
Ю.И. Головин

Под общей редакцией  
заслуженного деятеля науки РФ,  
профессора Ю.И. Головина

ТЕХНОСФЕРА  
Москва  
2019

УДК 620.179.1

ББК 34.2

Д46

**Д46 Динамические термографические методы неразрушающего экспресс-контроля / Головин Д.Ю., Тюрин А.И., Самодуров А.А., Дивин А.Г., Головин Ю.И.; под общей редакцией Ю.И. Головина. Москва: ТЕХНОСФЕРА, 2019. – 214 с. ISBN 978-5-94836-580-0**

В книге кратко описано современное состояние тепловой технической диагностики и неразрушающего контроля материалов и крупногабаритных изделий по данным как отечественных, так и зарубежных (преимущественно) публикаций. Более подробно рассмотрен ряд новых инфракрасных бесконтактных методов экспресс-контроля качества материалов и изделий, не требующих вырезки и специальной подготовки образцов из материала или изделия.

Описаны наиболее развитые методы динамического лазерного нагрева и инфракрасной термографии (как хорошо известные и внесенные в стандарты РФ и зарубежных стран, так и новейшие, реализуемые с помощью высокоразрешающих тепловизоров и оригинального программного обеспечения).

Особое внимание уделено неразрушающим экспресс-методам определения теплофизических характеристик и диагностики состояния крупногабаритных объектов, позволяющим использовать их в производственных и полевых условиях.

Приведен ряд оригинальных результатов измерения температуропроводности широкого спектра материалов (пластиков, композитов, керамик, монокристаллов, прозрачных элементов силовой оптики, металлов и сплавов), а также теплового неразрушающего контроля объектов с модельными трещинами, расслоениями, дефектами покрытий в условиях одностороннего доступа к объекту контроля.

Книга написана коллективом авторов, представляющих три организации – Московский государственный университет им. Ломоносова, Тамбовский государственный университет им. Г.Р. Державина и Тамбовский государственный технический университет, имеющие опыт и компетенции в физике твердого тела, материаловедении и приборостроении.

Книга будет интересна инженерам-разработчикам, производственникам, студентам, обучающимся по специальностям: 03.04.01. Прикладные математика и физика; 04.04.02. Химия, физика и механика материалов; 12.04.03. Фотоника и оптоинформатика; 13.04.01. Теплоэнергетика и теплотехника; 14.04.01. Ядерная энергетика и теплофизика; 16.04.01. Техническая физика; 22.04.02. Металлургия.

*Экспериментальная часть работы и математическое моделирование динамических тепловых процессов выполнены при поддержке гранта Российского научного фонда, проект № 15-19-00181, с привлечением оборудования Центра коллективного пользования и Наноцентра Тамбовского государственного университета имени Г.Р. Державина.*

УДК 620.179.1

ББК 34.2

© Головин Д.Ю., Тюрин А.И., Самодуров А.А., Дивин А.Г., Головин Ю.И., 2019

© АО «РИЦ «ТЕХНОСФЕРА», оригинал-макет, оформление, 2019

ISBN 978-5-94836-580-0

# Содержание

Предисловие . . . . .	5
Сокращения, принятые в книге . . . . .	8
<b>ГЛАВА 1. ТЕПЛОВЫЕ МЕТОДЫ ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ. КРАТКИЙ ОБЗОР . . . . .</b>	<b>11</b>
1.1. Введение . . . . .	11
1.2. Принципы и классификация методов тепловой технической диагностики . . . . .	15
1.3. Основные задачи и методы теплового контроля и диагностики . . . . .	27
1.3.1. ТКД с помощью точечных датчиков температуры . . . . .	27
1.3.2. Термографические методы ТКД . . . . .	30
1.4. Стационарные методы измерения теплопроводности . . . . .	32
1.4.1. Физические принципы и математические модели . . . . .	32
1.4.2. Практическая реализация стационарных методов . . . . .	40
1.5. Квазистационарные методы измерения теплопроводности . . . . .	45
1.6. Нестационарные методы . . . . .	46
1.6.1. Общие принципы и подходы . . . . .	46
1.6.2. Метод горячей проволоки в нестационарном режиме . . . . .	49
1.6.3. Классический метод лазерной вспышки . . . . .	50
1.6.4. Модифицированные методы лазерной вспышки . . . . .	61
1.6.5. Метод температурных волн . . . . .	69
1.6.6. Метод $3\omega$ . . . . .	70
1.7. Неразрушающий контроль и дефектоскопия методами термографии . . . . .	72
1.7.1. Классификации . . . . .	72
1.7.2. Неразрушающий контроль инженерных материалов . . . . .	75
1.7.3. ИК медицинская диагностика и неразрушающий контроль биоматериалов . . . . .	81
1.8. Заключение . . . . .	83
<b>ГЛАВА 2. ОБОСНОВАНИЕ И ОПИСАНИЕ НОВЫХ МЕТОДОВ . . . . .</b>	<b>85</b>
2.1. Особенности и достоинства ступенчатого «точечного» нагрева . . . . .	85
2.2. Использованное оборудование и его характеристики . . . . .	87
2.3. Калибровка оптики тепловизора . . . . .	89



2.4. Общие алгоритмы обработки термограмм . . . . .	94
2.5. Необходимые условия для корректного определения КТП . . . . .	96
2.6. Проверка отсутствия явной зависимости результатов измерений от мощности источника нагрева . . . . .	98
2.7. Методы обнаружения и характеристики дефектов . . . . .	99
2.8. Заключение . . . . .	102
<b>ГЛАВА 3. ИЗМЕРЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕМПЕРАТУРОПРОВОДНОСТИ . . . . .</b>	<b>104</b>
3.1. Теоретические основы 3D метода измерения КТП . . . . .	104
3.2. 3D эксперимент . . . . .	106
3.3. Определение КТП прозрачных материалов . . . . .	125
3.4. Теоретические основы 2D метода измерения КТП . . . . .	135
3.5. 2D эксперимент с цилиндрическим тепловым фронтом . . . . .	137
3.6. Измерение КТП анизотропного материала на примере древесины . . . . .	147
3.7. Источники погрешностей . . . . .	149
3.8. Обсуждение результатов . . . . .	153
3.8.1. Особенности 2D и 3D способов определения КТП . . . . .	153
3.8.2. Влияние температурной зависимости ТФХ на результаты измерений КТП . . . . .	154
3.9. Заключение . . . . .	155
<b>ГЛАВА 4. ВЫЯВЛЕНИЕ И ХАРАКТЕРИЗАЦИЯ ДЕФЕКТОВ . . . . .</b>	<b>158</b>
4.1. Модели нормальных дефектов при точечном нагреве . . . . .	158
4.2. Методы обработки ИК изображений . . . . .	159
4.3. Экспериментальное обнаружение нормальных трещин . . . . .	161
4.4. Методы увеличения чувствительности для обнаружения мелких дефектов . . . . .	164
4.5. Обнаружение нормальных трещин электротокowym нагревом . . . . .	167
4.6. Термографический контроль изделий посредством обдува объекта горячим воздухом . . . . .	173
4.6.1. Контроль состояния наружной поверхности оболочки . . . . .	178
4.6.2. Контроль состояния внутренней поверхности оболочки . . . . .	181
4.7. Заключение . . . . .	188
Эпилог . . . . .	189
Список литературы . . . . .	193

## Предисловие

Уважаемый читатель, перед вами небольшая книга по тепловой технической диагностике. Идея написать ее родилась спонтанно, как это зачастую бывает, при обсуждении задач первичной инфракрасной медицинской диагностики недорогими экспресс-методами. Специалисты различного профиля предложили ряд свежих подходов, но при их тестировании оказалось, что они хорошо подходят и для технической диагностики (ТД) и неразрушающего контроля (НК) инженерных материалов и изделий. По отношению к этим объектам легче разработать математические модели и программное обеспечение, можно получить большой объем количественной информации, т.е. сделать их более информативными и мультимодальными.

В частности, в рамках одной парадигмы и технической платформы можно определять теплофизические характеристики объекта, его структурную эволюцию на разных этапах производства и деградацию в процессе эксплуатации, осуществлять обнаружение и характеризацию дефектов различного типа и геометрии — нормальных к поверхности (типа трещин, непроваров) и латеральных (типа расслоений, нежелательных депозитов, частичной утраты или нарушения адгезии покрытий к субстрату). Ряд найденных технических и алгоритмических решений запатентован и позволил создать принципиальную основу для группы новых методов неразрушающего контроля качества. На их базе сконструированы опытные образцы приборов, позволяющих проводить инспекцию, техническую диагностику и неразрушающий контроль в процессе производства или эксплуатации различных инженерных материалов и изделий. Очень важным для практических приложений этих разработок является исключение необходимости вырезания образцов определенной геометрии из массива и малое время, необходимое для проведения контроля (от десятых долей секунды до нескольких десятков секунд в зависимости от тепловых свойств и геометрии объекта). В принципе это позволяет встраивать их и в производственную ли-

нию и использовать в производственных, полевых и других не лабораторных условиях.

В этой связи акцент в изложении сделан на описании разработанных нами новых способов, алгоритмов и устройств. Однако для сравнительного анализа в обзорной главе и обсуждениях по тексту оригинальных глав приводятся также сведения о традиционных методах (особенно лазерных термографических), их развитии и современном состоянии, а также полученные с их помощью результаты, которые сопоставляются с данными, полученными новыми способами.

Книга имеет целью дать обзор достижений в области термографии с акцентом на динамические методы, потенциально пригодные для создания на их основе портативных устройств, отвечающих требованиям эксплуатации, как в лабораторных, так и в производственных условиях. В соответствии с этим в главе 1 дан краткий критический обзор современных методов теплового неразрушающего контроля с фокусом на динамические термографические подходы (преимущественно по данным зарубежной периодики последних лет). В главе 2 описаны оригинальные подходы, модели и алгоритмы, разработанные и реализованные авторами. Глава 3 посвящена описанию способов термографического определения теплофизических характеристик различных материалов с помощью экспресс-методов и алгоритмов, не требующих вырезания из массива образцов определенной геометрии и пригодных для использования в производственных условиях. В главе 4 рассмотрены некоторые методы тепловой дефектоскопии, разработанные авторами, также пригодные для реализации вне лабораторных условий. В эпилоге обобщены описанные подходы и результаты, дан сравнительный анализ достоинств и недостатков различных экспресс-методов теплового НК и намечены возможные перспективы их развития и применения.

Книга может быть полезной инженерам-разработчикам, производственникам, студентам, обучающимся по специальностям: 03.04.01. Прикладная математика и физика; 04.04.02. Химия, физика и механика материалов; 12.04.03. Фотоника и оптоинформатика; 13.04.01. Теплоэнергетика и теплотехника; 14.04.01. Ядерная энергетика и теплофизика; 16.04.01. Техническая физика; 22.04.02. Металлургия.

Экспериментальная часть работы и математическое моделирование динамических тепловых процессов выполнены при поддержке гранта Российского научного фонда, проект № 15-19-00181, с привлечением оборудования и ресурсов Научно-исследовательского института «Нанотехнологии и наноматериалы» и Центра коллективного пользования Тамбовского государственного университета имени Г.Р. Державина.

Авторы выражают сердечную признательность к.б.н. Инне Анатольевне Васюковой за квалифицированную и самоотверженную работу по оформлению рукописи.

## Сокращения, принятые в книге

ИК	— инфракрасный
КТП	— коэффициент температуропроводности
МЛВ	— метод лазерной вспышки
НК	— неразрушающий контроль
СКО	— среднееквадратическое отклонение
ТД	— техническая диагностика
ТК	— тепловой контроль
ТКД	— тепловой контроль и диагностика
ТФХ	— теплофизические характеристики
УНТ	— углеродные нанотрубки
CFRP	— Carbon Fibre Reinforced Polymers (углепластиковые композиты)
GFRP	— Glass Fibre Reinforced Polymers (композиты, армированные стекловолокном)
GHP	— Guarded Hot Plate (метод горячей охранной зоны)
HFM	— Heat Flow Meter (измеритель теплового потока)
LFA	— Laser Flash Analysis (метод лазерной вспышки)
TBC	— Thermal Barrier Coating (термобарьерные покрытия)

### Обозначения переменных:

$a$	— коэффициент температуропроводности
$a_8, a_{10}$	— средние значения $a$ по 8 и 10 тестам соответственно
$a^*$	— значения, вычисленные по данным измерений $\lambda$ стационарным методом GHP
$a^{**}$	— значения, вычисленные по данным о величине $\lambda$ , $\rho$ и $C_p$ , приведенным в литературе
$\delta a$	— стандартные отклонения выборки
$Bi$	— число Био
$C_p$	— удельная теплоемкость при постоянном давлении
$D_w$	— диаметр проволоки



$F_0$	— число Фурье
$G$	— функция Грина
$h$	— глубина прорези или трещины
$I$	— ток
$j$	— локальная плотность тока
$j_\infty$	— плотность тока на бесконечности
$K(m)$	— автокорреляционная функция
$l$	— длина линейного электронагревателя, проволоки
$L$	— длина прорези или трещины
$L_d$	— характерная длина дефекта
$n$	— частота съемки тепловизором
$q$	— плотность теплового потока
$q_l$	— тепловая мощность нагревателя-проволоки на единицу ее длины
$q_s$	— плотность поверхностных источников тепла в области $S$
$q_v$	— объемная плотность источников тепловыделения
$Q$	— тепловой поток
$Q^*$	— мощность импульса лазерного излучения
$r$	— радиус, характерный размер
$r_0$	— радиус пятна нагрева
$R$	— радиус отверстия
$R_d$	— радиус дефекта
$R_w$	— радиус проволоки
$S$	— площадь сечения
$t$	— текущее время
$t_p$	— длительность теплового импульса
$T$	— температура нагрева
$\alpha$	— коэффициент теплоотдачи
$\beta$	— отношение энергии, покинувшей образец вследствие теплообмена на поверхности, к запасенной энергии
$\gamma$	— постоянная Эйлера
$\delta$	— толщина пластины, образца
$\lambda$	— коэффициент теплопроводности
$\lambda_{st}$	— стандартное значение коэффициента теплопроводности



*Сокращения, принятые в книге*

- $\lambda_0$  — длина волны света
- $\rho$  — плотность материала
- $\sigma$  — удельная электрическая проводимость материала
- $\tau$  — полная длительность нагрева
- $\tau_F$  — характерное время Фурье для радиуса  $r_0$  лазерного пучка
- $\tau_{F2}$  — латеральное характерное время Фурье
- $\varphi$  и  $\theta$  — полярные углы

# ГЛАВА I

## ТЕПЛОВЫЕ МЕТОДЫ ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ. КРАТКИЙ ОБЗОР

### I.1. Введение

Среди большого числа подходов и методов ТД и НК (оптических, ультразвуковых, электрических, магнитных, вихретоковых, радиоволновых, капиллярных, радиационных рентгеновских, гамма-просвечивающих и др.<sup>1)</sup> тепловые способы снискали репутацию как одни из самых универсальных, безопасных, наглядных и несложных в реализации [1—4]. Они могут быть активными и пассивными (т.е. требовать или не требовать внешнего источника возбуждения теплового поля), статическими и динамическими, бесконтактными, высокопроизводительными, многофункциональными и весьма информативными (при наличии адекватных тепловых моделей объекта и температурного поля в нем) [5—16]. Их можно применять по отношению к любым материалам — электропроводящим и диэлектрическим, ферромагнитным и магнитонеупорядоченным, инженерным и биологическим, находящимся в твердой и жидкой фазе, прозрачным и непрозрачным. До последней трети прошлого века применение тепловых методов диагностики сдерживалось отсутствием удобных технических средств для реализации и недостаточной развитостью модельных представлений.

---

<sup>1</sup> Российский ГОСТ 18353—79 предусматривает девять видов НК, различающихся физическими принципами, положенными в их основу: магнитный, электрический, вихретоковый, радиоволновый, тепловой, оптический, радиационный, акустический, проникающими веществами. В англоязычной литературе часто упоминают «большую пятерку» методов НК: радиационные, ультразвуковые, вихретоковые, магнитопорошковые, метод проникающей жидкости.

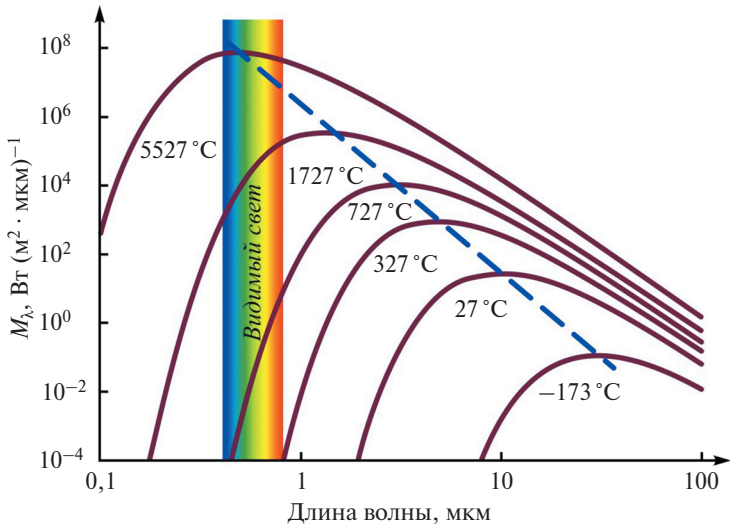
Широкие технические возможности для инспекции больших поверхностей и крупногабаритных объектов (зданий, промышленных установок, линий электропередачи), медицинской диагностики, дефектоскопии и многих других приложений появились лишь в 60-е годы XX века после выхода на рынок инновационной продукции шведской фирмы AGA — линейки коммерческих тепловизоров. В настоящее время преемником AGA является крупная американская компания FLIR, занимающая около  $\frac{3}{4}$  мирового рынка тепловизоров.

Современные тепловизоры — это компактные цифровые видеокамеры с болометрическими матрицами, работающие в инфракрасном (ИК) диапазоне излучения электромагнитных волн (преимущественно в области длин волн  $\lambda_0 = 3\text{--}15$  мкм) и снабженные некоторым программным обеспечением, позволяющим производить первичную обработку цифрового изображения.

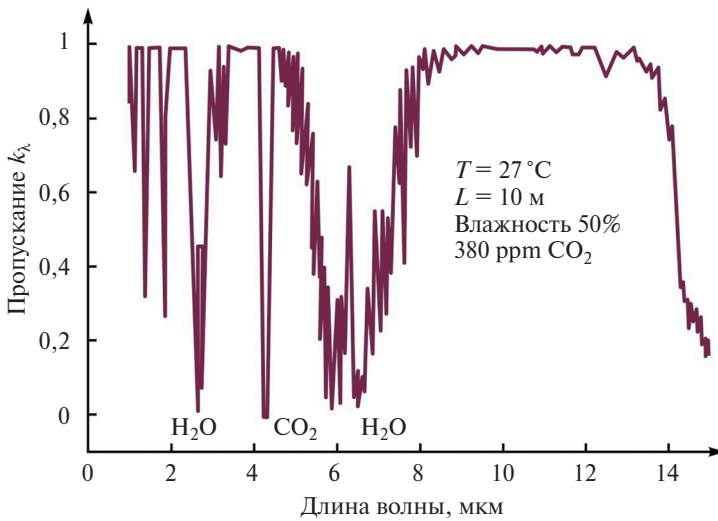
Согласно закону Планка о распределении спектральной плотности мощности излучения и закону смещения Вина именно в этом диапазоне длин волн лежат максимумы интенсивности излучения при температурах поверхности тела от  $-260$  до примерно  $700\text{--}800$  °С (рисунок 1.1).

В этом же диапазоне длин волн находятся и спектральные окна прозрачности в воздухе: несколько относительно узких в области  $\lambda_0$  от 0,8 до 5 мкм и одна широкая в области  $\lambda_0 = 8\text{--}14$  мкм (рисунок 1.2). В совокупности это делает легким использование для большинства практически интересных случаев термографических ИК методов в обычных атмосферных условиях.

В процессе внедрения тепловизоров в различные сферы деятельности возникла научно-техническая дисциплина «термография» (т.е. буквально — регистрация и анализ тепловых изображений) как инновационный подход к задачам получения большого объема информации о тепловом состоянии объекта в относительно короткое время. Дополнительным драйвером развития и внедрения термографии стало широкое применение лазеров для термического возбуждения контролируемого объекта в активных методах инспекции качества.



**Рис. 1.1.** Зависимость интенсивности излучения от длины волны для абсолютно черного тела при различной температуре в соответствии с законом Планка. Штриховая линия отвечает смещению максимума интенсивности при изменении температуры в соответствии с законом Вина [7]



**Рис. 1.2.** Зависимость пропускающей способности 10-метрового слоя воздуха от длины волны ИК излучения [7]

По степени универсальности и применимости к различным видам технической инспекции термографические методы уступают только компьютерной томографии и ультразвуковым методам. Согласно [4] из 18 типов дефектов первые могут обнаруживать и охарактеризовывать 11, в то время как последние два — по 13.

Несмотря на более чем полувековую историю развития современной термографии, происходившего благодаря непрерывному совершенствованию и снижению стоимости ИК сенсорной, полупроводниковой и лазерной техники, методов решения задач теплопроводности и компьютерной обработки больших массивов информации, ее потенциал далеко не исчерпан. Практически каждый год характеристики тепловизоров (чувствительность, быстродействие, пространственное разрешение) улучшаются без существенного роста стоимости, и появляются публикации о новых способах и устройствах для определения теплофизических характеристик (ТФХ) материалов и НК изделий, оценки их состояния и остаточного ресурса, медицинской диагностики, оценки качества сельскохозяйственной продукции, продуктов питания и др.

Знание теплофизических характеристик керамических, полимерных и композитных материалов, а также готовых изделий из них необходимо для эффективного функционирования и диагностики их состояния в процессе эксплуатации во многих областях техники: металлургии, нефтехимии, гражданском и промышленном строительстве, ракетной и аэрокосмической отрасли, трубопроводном транспорте и др. Тепловые и смежные методы ТД и НК переживают всплеск интереса в последнее десятилетие и продолжают успешно развиваться. Большой вклад в их развитие внесли отечественные ученые (И.В. Баранов, Н.А. Бекешко, С.Е. Буравой, В.П. Вавилов, А.Д. Ивлиев, В.В. Ключев, С.В. Мищенко, Е.С. Платунов, С.В. Пономарев, Л.А. Скворцов, Д.Л. Тимрот, Л.П. Филиппов, Г.П. Чеботарева и др.) и зарубежные специалисты (A.J. Anström, F. Cernuschi, G. Gaussorgues, C. Ibarra-Castanedo, X. Maldague, W. Parker, M. Vollmer и др.). В создание отечественной тепловизионной техники большой вклад внесли Н.Д. Куртев, М.М. Мирошников, Г.А. Падалко, Л.З. Криксунов, А.Г. Жуков.

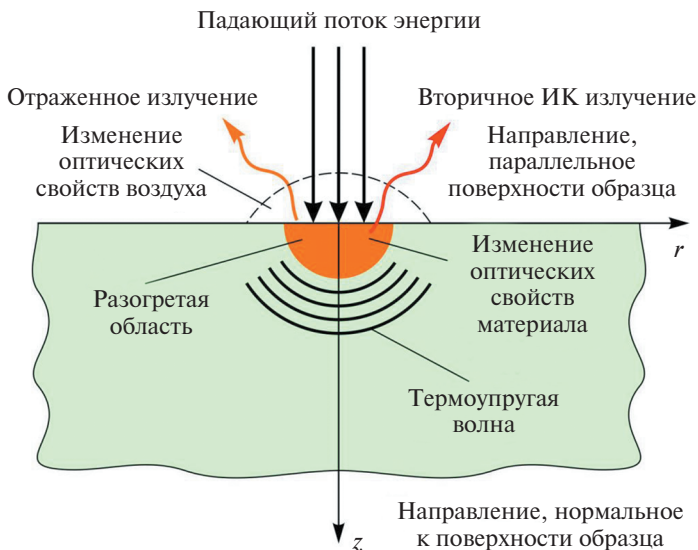
В соответствии с целями и задачами книги ниже дан краткий обзор достижений и результатов в этой области (преимущественно по данным зарубежной периодики последних лет), потенциально пригодных для создания на их основе портативных устройств, отвечающих требованиям эксплуатации, как в лабораторных, так и в производственных условиях. Особое внимание уделено динамическим термографическим подходам.

## 1.2. Принципы и классификация методов тепловой технической диагностики

Развитию тепловых методов ТД и НК, особенно термографических, в последние два десятилетия посвящено множество монографий и обзоров [7, 9—14, 16—26]. Будучи весьма универсальными, способными быть бесконтактными, наглядными и недорогими, они обладают рядом других неоспоримых достоинств и продолжают успешно развиваться ввиду потенциально более высокой производительности и информативности, безопасности и удобства применения. Большой прогресс в термографические методы ТД привнесло использование ИК видеокамер — тепловизоров и лазеров, создавшее техническую базу развития современной термографии. Свою роль сыграло также совершенствование математических моделей тепловых процессов, компьютерных методов технического зрения и алгоритмов обработки тепловых изображений. К настоящему времени применяются как пассивные методы, не требующие внешнего воздействия на объект, так и активные, использующие различные способы подведения энергии и индуцирования зондирующего теплового поля извне. Сферы применения ИК термографии чрезвычайно широки. Их используют для контроля микроэлектроники [14, 17], крупногабаритных изделий [18—22], произведений искусства [23, 24], инженерных сооружений [25, 26], дефектоскопии и неразрушающего контроля материалов и изделий [4, 7, 27—34], измерения ТФХ [35—38], обнаружения и количественной характеристики коррозии [39], инспекции природных объектов [40] и геоматериалов [41], древе-

сины [42—47], плодов [48, 49], в биомедицине и диагностике [50, 51], спортивной медицине [52] и др. Знания о природе и количественных мерах ТФХ, в частности о наиболее важных из них — коэффициентах тепло- и температуропроводности, становятся все более востребованными в любых процессах, где значимую роль играют явления теплопереноса. Во многих случаях они определяют энергоэффективность, экономичность техпроцесса, а иногда и реализуемость самой технологии.

В активной тепловой диагностике могут быть использованы различные физические эффекты, индуцируемые нагревом поверхности объекта контроля (рисунок 1.3). Это позволяет получать разнообразную информацию об объекте. Термография эксплуатирует ИК излучение нагретого объекта. Фототермические способы основаны на изменении оптических свойств контролируемого материала или окружающего воздуха в результате локального нагрева. В фотоакустических методах регистрируют термоупругую волну, генерируемую импульсно нагреваемым объектом.



**Рис. 1.3.** Физические эффекты, используемые в активной тепловой диагностике



мой зоной объекта. В активных тепловых стратегиях ТД принято различать методы, исследующие отклики на тепловое возмущение в плоскости свободной поверхности образца (in-plane — вдоль координаты  $r$  на рисунке 1.3) или по нормали  $z$  к ней (in-depth).

Наряду с достоинствами, нельзя не отметить и существенные недостатки термографических методов — зависимость сигнала в каждом пикселе цифрового ИК тепловизионного изображения от локальных оптических свойств материала (отражающей, испускающей и поглощающей способности), а также геометрии и состояния поверхности (степени черноты, шероховатости, локальных наклонов, окисления, загрязнения и т.п.). К этому могут добавляться аберрации в оптике тепловизора, недостаточное быстродействие, узкий динамический диапазон и автоматическая подстройка по максимуму интенсивности излучения, шумы в чувствительной матрице камеры, обслуживающей электронику и др. Все это, вместе взятое, затрудняет точное определение истинного распределения абсолютных значений температуры от точки к точке в регистрируемой динамической тепловой картине, особенно при больших скоростях ее изменения и высоких градиентах температуры, которые характерны для адиабатических условий нагрева, позволяющих создавать простые физические модели и алгоритмы расчетов. Однако важно отметить, что во многих случаях знания абсолютных температур в распределении и не требуется. При соответствующей компьютерной обработке ИК изображения зачастую бывает достаточно располагать информацией об относительных температурах при условии, что они связаны с абсолютными температурами неизменным коэффициентом (или хотя бы известным законом) от точки к точке. Физические модели, позволяющие оперировать отнормированной, безразмерной температурой, намного менее чувствительны к оптическим свойствам объекта, что позволяет исключить из алгоритма абсолютную калибровку тепловизора на каждом новом типе поверхности материала.

В дальнейшем изложение будет сфокусировано главным образом на двух основных классах задач, которые решаются методами активной термографии и последующего анализа ИК изображений: определение

ТФХ разнообразных материалов, а также тепловые методы нестационарной дефектоскопии и НК.

Знание ТФХ материалов и изделий необходимо при создании и эксплуатации зданий и сооружений различного назначения, почти всех видов современной техники: наземных и аэрокосмических транспортных средств, печей и кристаллизаторов различного назначения, высокотемпературных реакторов, металлургического оборудования, тиглей, оборудования энергетического и нефтехимического комплекса, лазерной техники, электроники и др. От теплофизических характеристик зависит функциональность, энергоэффективность, а зачастую и сама осуществимость запланированных функций. ТФХ любых материалов могут существенно зависеть от атомарной структуры и микроструктуры, наличия пор, их концентрации, формы и размеров, степени их заполнения жидкостями или газами, размеров и связанности кристаллитов или фаз в композите и других факторов, на которые могут влиять технологии их получения и обработки, условия эксплуатации (температура, механические нагрузки, влияние агрессивной окружающей среды). Поэтому необходимо иметь надежные, простые и высокопроизводительные методы их определения, желательно без вырезки образцов из изделия или массива материала.

Важнейшими транспортными тепловыми характеристиками материалов являются коэффициент теплопроводности  $\lambda$  и коэффициент температуропроводности (КТП)  $a$ . Большое значение имеют их температурные зависимости, а также удельная теплоемкость при постоянном давлении  $C_p$ , коэффициенты термического расширения, характеристики огнеупорности и теплостойкости.

Величина  $\lambda$  определяет плотность теплового потока в стационарных условиях теплопередачи и имеет размерность [Вт/(м·°С)]. Обычно  $\lambda$  измеряют методами, использующими стационарный тепловой поток в образце. Величина  $a$  характеризует скорость выравнивания температуры в неоднородно нагретом объекте в нестационарных условиях. В системе СИ величина  $a$  измеряется в [м<sup>2</sup>/с] или более удобных для теплоизолирующих и плохо проводящих материалов единицах, выраженных через десятичную дольную приставку, — [мм<sup>2</sup>/с]. Величину  $a$

можно измерить только нестационарными методами, когда поле температур претерпевает контролируруемую эволюцию во времени. Обычно определение КТП занимает намного меньше времени, чем измерение  $\lambda$  в стационарном режиме, поскольку не требуется длительного прогрева всей установки с образцом для достижения стационарности теплового состояния всей системы. По этой причине зачастую величину  $\lambda$  определяют по формуле  $\lambda = arC_p$ , предварительно измерив  $a$ , где плотность  $\rho$  и величина  $C_p$  полагают известными или определяют независимыми измерениями.

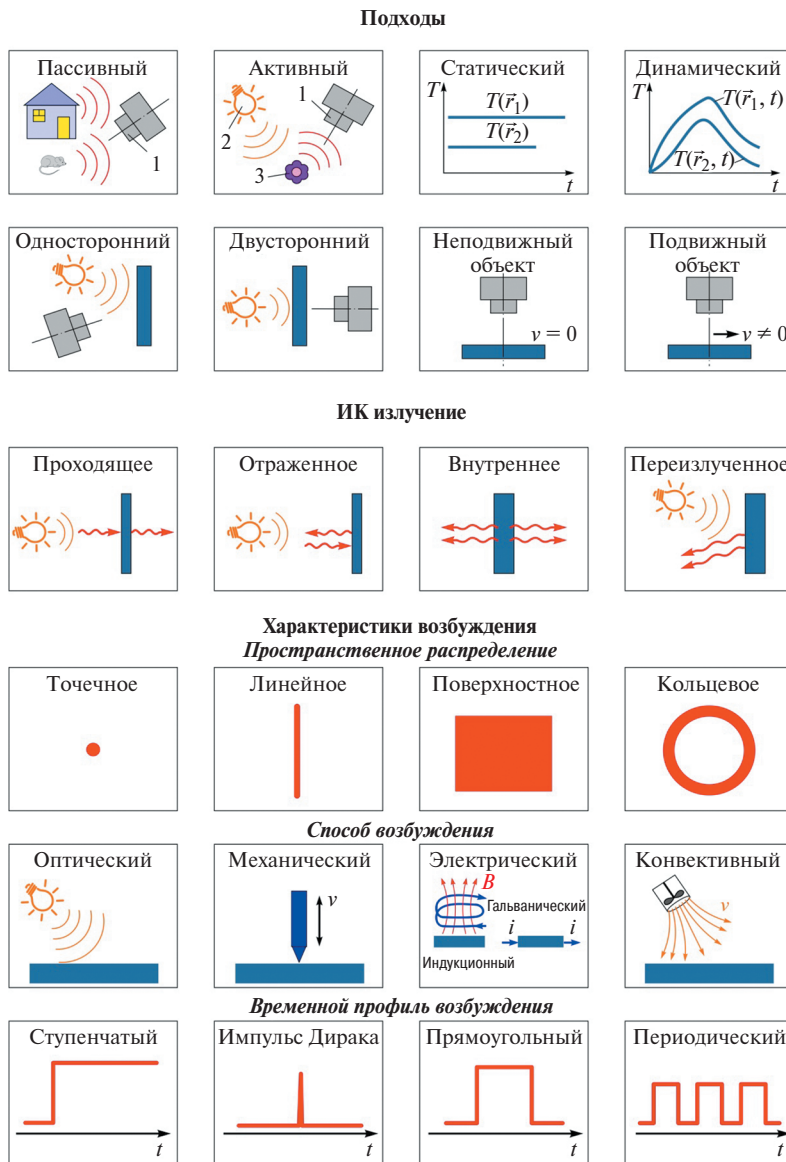
Наряду с количественной характеристикой различных теплофизических свойств материала и готовых изделий, актуальны также и задачи создания материалов с пониженными или повышенными тепловыми транспортными характеристиками (как в твердом, так и в жидком состоянии). Первые находят применение в качестве более эффективных огнеупоров, теплозащитных слоев, термостойких и термобарьерных покрытий, а вторые — в системах охлаждения энергетически высоконапряженных изделий, теплообменных аппаратах, радиаторах мощных электронных компонентов, термопастах, снижающих тепловое контактное сопротивление, и др. В настоящее время как понижения, так и повышения  $\lambda$  и  $a$  чаще всего добиваются применением оптимально сконструированных композитов, в последние годы — все шире — наноструктурированных композитов. Наличие нанофазы с отличающимися от матрицы ТФХ может привести к существенному изменению транспортных макрохарактеристик не только аддитивно, за счет изменения усредненных по объему значений  $\lambda$  и  $a$ , но и вследствие появления межфазных границ и контактных явлений на них, размерных эффектов, изменения фоновых спектров, перехода теплопереноса в баллистический режим, перколяции и т.п. Физическая сторона подобных явлений в наномасштабе до конца не изучена и требует отдельного рассмотрения.

Перечень задач и объектов НК весьма разнообразен: это различные нарушения сплошности (трещины, поры, расслоения в объеме материала, отслоения покрытий, непровары, непроклеи и др.), дефекты и неоднородности структуры без нарушения сплошности (области деградации микроструктуры, коррозионных повреждений, ослабления

адгезии различных фаз в композитах и многослойных материалах и конструкциях и др.). Протяженные дефекты в первом приближении можно разделить на два класса — перпендикулярные и параллельные инспектируемой поверхности. Существуют и близкие к равноосным дефекты (поры, дисперсные частицы второй фазы, включения), которые нельзя отнести ни к одному из этих двух классов и образующие свой класс. Для выявления и характеристики дефектов каждого из этих трех классов используют средства НК, отличающиеся геометрией источников тепла, временными режимами их работы, математическими моделями, алгоритмами обработки термограмм и программным обеспечением. Используя основные классификационные признаки, существенные при описании и реализации тепловых методов ТД и НК (рисунки 1.4), дадим их краткий обзор. В мировой литературе имеется более десяти тысяч публикаций по этой проблематике. Совершенно очевидно, что можно дать их анализ и даже ссылки только выборочно, руководствуясь теми или иными принципами отбора. В настоящем обзоре акцент сделан на работах последних лет, посвященных термографическим методам. Однако для сравнения их с другими тепловыми методами ТД и НК будут приведены сведения и о некоторых наиболее распространенных подходах, не использующих технику термографии.

Как уже упоминалось, важнейшими для реализации, последующей обработки и извлечения искомым данным являются признаки, по которым все тепловые методы инспекции целесообразно в первую очередь разделить на пассивные и активные (по факту отсутствия или наличия внешнего источника энергии, возбуждающего тепловое поле). До некоторой степени это разделение условное. Так, например, некоторые исследователи считают методы изучения тепловых процессов при деформации и разрушении пассивными, поскольку объекту не сообщается тепловой энергии извне, а другие — активными, так как в объект тем или иным способом закачивается упругая энергия (растяжением/сжатием, локальным ударом, вибрацией).

По характеру температурного поля — зависящему или независящему от времени — все методы ТД можно подразделить на динамические и статические. Методы тепловой инспекции могут быть контактными



**Рис. 1.4.** Классификация наиболее распространенных тепловых способов ТД и НК. 1 — тепловизор, 2 — источник внешнего возмущения (энергии), 3 — объект контроля