

промежутки между гребнями позволяют разместить инжектор над средней плоскостью рабочего зазора. При такой установке инжектора существенно снижаются потери частиц от соударения с ним в процессе их вывода за пределы ускорителя. Кроме того, массу ферромагнитного материала магнитопровода можно снизить на 20% за счет его более равномерной загрузки.

Таким образом, для повышения технико-экономических характеристик малогабаритных бетатронов необходимо:

- 1) разработать методы повышения фокусирующих свойств азимутально-периодических полей в условиях ограниченных габаритов установок;
- 2) более подробно исследовать процесс инжекции и "захвата" частиц в режим ускорения, а также процесс смещения частиц на мишень или вывода их за пределы ускорителя;
- 3) разработать конструкции электромагнита, позволяющие формировать периодические поля с повышенными фокусирующими свойствами.

Одним из способов повышения фокусирующих свойств управляющего поля может быть дополнительная модуляция поля по азимуту

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А.с. 360008 СССР МКИ Н 05 Н 11/00. Электромагнит бетатрона / В.Л. Чахлов, А.А. Звонцов, А.А. Филимонов. - Оpubл. в Б.И., 1984, № 6, с.216.
2. Звонцов А.А., Чахлов В.Л., Филимонов А.А. Бетатрон с азимутальной вариацией управляющего поля // Известия ТПИ. - 1974. - Т.279. - С.32.
3. Звонцов А.А., Чахлов В.Л., Филимонов А.А. Электромагнит бетатрона с азимутальной вариацией управляющего поля // ПТЭ. - 1975. - № 2. - С.40-42.
4. Патент России N1568877 МКИ Н 05 Н 11/00. Магнитопровод бетатрона / А.А. Звонцов, В.П. Казьмин, А.А. Филимонов. - Оpubл. в Б.И., 1993, № 47-48, с.191-192.
5. Желепов В.П., Дмитриевский В.П., Замолодчиков Б.И., Кольга В.В. Сильноточные ускорители частиц высоких энергий - "фабрики мезонов" // УФН. - 1965. - Т.85. - Вып.4. - С.651.
6. Басаргин Ю.Г., Белов В.П. Некоторые вопросы динамики движения частиц в циклотроне с пространственной вариацией магнитного поля // Сб.: Электрофизическая аппаратура. - 1965. - № 3. - С.3-23.
7. Коломенский А.А., Лебедев А.Н. Теория циклических ускорителей. - М.: ГИФМЛ, 1962. - 352 с.
8. Дмитриевский В.П., Кольга В.В., Полумордвинова Н.И. Высокоэффективный вывод пучка для кольцевого циклотрона высокой интенсивности. Дубна, 1981 / Препринт ОИЯИ Д 9-81-280.
9. Борисов О.Н., Заплатин Н.П. и др. О возможности использования краевого магнитного поля секторного циклотрона для вывода частиц // Труды XI Всес. сов. по ускор. заряж. частиц. Дубна, 1989. - Т.11. - С.196-199.
10. Модернизированный малогабаритный бетатрон типа МИБ-4 для дефектоскопии / Г.И. Буров, В.П. Зворыгин, В.С. Логинов и др. // Докл. IV Всес. сов. по применению ускор. заряж. частиц в народ. хоз. Ленинград, 28-30 сентября 1982. - Л.: НИИ ЭФА, 1982. - Т.1. - С.23.
11. Чахлов В.Л., Пушин В.С., Буров Г.И. и др. Малогабаритный бетатрон с четырьмя элементами периодичности управляющего магнитного поля // ПТЭ. - 1986. - № 4. - С.23.
12. Звонцов А.А., Зрелов Ю.Д., Касьянов В.А. и др. Малогабаритный импульсный бетатрон на 2,5 МэВ // Ускорители-92: Тез. докл. 7-го совещания по применению ускорителей заряженных частиц в народном хозяйстве. - М.: ЦНИИ атоминформ., 1992. - С.105-106.

УДК 620.179.13

*В. П. ВАВИЛОВ, А. И. ИВАНОВ, В. В. ШИРЯЕВ, В. А. ПУШНЫХ,
Д. Г. КУРТЕНКОВ, К. Д. ТРОФИМОВ, И. А. АНОШКИН, О. Г. СЛЕСАРЕНКО*

ОБЗОР ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ ТЕПЛООВОГО НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ В ТОМСКОМ НИИ ИНТРОСКОПИИ

В статье выполнен обзор исследований Томского НИИ интроскопии в области разработки алгоритмического и программного обеспечения теплового неразрушающего контроля, создания тепловых дефектоскопов и практических инфракрасных съемок в целях технической диагностики.

Введение

В начале 70-х гг. в бывшем СССР Н.А. Бекешко, Ю.А. Попов, А.Е. Карпельсон, А.Б. Упадышев из Московского НИИ интроскопии начали работы в области активного теплового неразрушающего контроля (НРК). Одновременно, усилиями М.М. Мирошникова (ГОИ им. С.И. Вавилова, Ленинград) и А.Г. Жукова (НПО "Исток", Фрязино) были созданы образцы отечественных тепловизоров, которые

впоследствии стали широко использоваться в целях НРК. В качестве политико-лингвистического курьеза, отражавшего дух того времени, можно упомянуть тот факт, что термин "инфракрасный" (ИК) был фактически запрещен в открытых публикациях, поскольку ассоциировался у рецензентов с ИК-разведкой и системами теплового самонаведения ракет. Для того чтобы обойти эту проблему, Н.А.Бекешко предложил термин "тепловой контроль". В зарубежных публикациях применяли оба термина, причем "инфракрасный контроль" относили к бесконтактной технике НРК путем регистрации собственного теплового излучения объектов.

В 1972 г. В.П.Вавилов защитил дипломную работу по теоретическому обоснованию активного теплового НРК, что послужило определенным толчком для развития этого метода в Томском НИИ интроскопии. В 1975 г. он защитил кандидатскую диссертацию и организовал лабораторию теплового контроля. Примечательно, что из-за проблем с соответствующими комплектующими, в особенности с приемниками ИК-излучения, работы тех лет имели ярко выраженный теоретический уклон. Это привело к тому, что уровень теоретического анализа теплового контроля в Томске значительно опередил не только отечественные, но и зарубежные разработки, хотя соответствующие результаты долгое время не внедрялись в экспериментальную практику. Глава по решению задач активного теплового контроля, написанная В.П.Вавиловым в соавторстве с Р.Тейлором и включенная в монографию британского Центра ядерных исследований в г. Харуэлле, в течение длительного времени оставалась одной из немногих мировых публикаций по данной тематике, на которую зарубежные исследователи ссылаются вплоть до настоящего времени [1]. В этой работе были приведены результаты трехмерного анализа, полученные с помощью самого мощного в то время компьютера СДС-7600 вычислительного центра в Манчестере (заметим, что к изумлению британских специалистов время решения отдельных задач достигало нескольких часов).

Параллельные исследования по близкой тематике проводились также в Томском НИИ интроскопии группой Б.Н.Епифанцева, которая сконцентрировала свои усилия на специальных задачах ИК-мониторинга и расшифровке ИК-изображений на фоне естественных помех. В середине 80-х гг. в Томске сформировался центр теплового контроля, в котором работало до 30 сотрудников, что, по видимому, составляло самую большую группу в мире в данном узком сегменте исследований. В результате в Томске было опубликовано несколько монографий [2–5], кандидатские диссертации были защищены А.И.Ивановым, В.В.Ширяевым, Г.Х.Гефле, С.В.Финкельштейном, А.Н.Фурсовым. В.П.Вавилов и Б.Н.Епифанцев защитили докторские диссертации. Томская группа участвовала в ряде крупных научно-технических программ. Например, в рамках работ по контролю теплозащиты космического корабля-челнока "Буран" был разработан метод количественной влагометрии, не имевший аналога в соответствующих исследованиях в США.

В начале 90-х гг., в силу известных причин, произошел определенный отток научных сил из НИИ интроскопии, в том числе и по "тепловой" тематике. В то же время именно в эти годы были установлены тесные международные связи и налажен обмен специалистами с Канадой, Италией, Германией, Финляндией, Францией, Колумбией. Выяснилось, что ряд теоретических идей 80-х гг., например в области динамической тепловой томографии, может быть поставлен на экспериментальную основу путем комбинирования отечественной методологии и западной ИК-аппаратуры [6–9]. В настоящее время отдел теплового контроля Томского НИИ интроскопии активно участвует в международном разделении исследований по данной тематике, поддерживая рабочие связи с ИК-комитетом американского общества НРК, Международной Академией ИК-термографии, европейской группой "Евротерм" по количественной ИК-термографии и другими организациями.

Теоретические результаты, методики испытаний и компьютерные программы

Задачи теплового НРК, как и любые задачи технической диагностики, в академическом плане представляют собой некорректные (обратные) задачи математической физики. В данном случае базовым уравнением является параболическое уравнение теплопроводности, хотя параллельно проводятся работы по визуализации фоновых потоков в кристаллах при низких температурах в рамках гиперболического уравнения теплопроводности. Длительное время НРК развивался в русле чистой "дефектоскопии", что предусматривало визуализацию дефектов и их анализ человеком-оператором. В тепловом контроле этому этапу соответствовало решение прямых задач теплопроводности. Большинство зарубежных исследователей при этом опиралось на классические одномерные решения, которые были обобщены в "библии" теории теплопередачи, написанной Х.Карслоу и Т.Егером [10] (российским аналогом служит монография А.В.Лыкова [11]). В работах В.П.Вавилова с соавторами акцент был сделан на решение двумерных и трехмерных задач, как наиболее отвечающих тем, что встречались на практике. При этом широко использовались численные методы и компьютерное моделирование.

Было показано, что большинство специфических черт теплового НРК могут быть получены в рамках цилиндрической модели дефекта ("диск в диске"), для анализа которой был разработан ряд компьютерных программ. Учет диссипации тепла вокруг дефекта произвольной формы может быть сделан при использовании трехмерной декартовой модели ("параллелепипед в параллелепипеде"), реализованной в коммерческом пакете "Термо.Хит-3Д".

Анализ прямых задач теплового контроля позволил сформулировать основные характеристики активного метода, предусматривающего внешнюю тепловую стимуляцию объекта контроля с помощью импульсных, непрерывных или модулированных источников тепла:

– В силу диссипации тепла в твердом теле для обнаружения дефектов малого размера необходимо создавать нестационарные режимы теплообмена, которые дополнительно к известным в теплофизике критериям и безразмерным числам (Фурье, Био и т.п.) могут описываться некоторыми безразмерными коэффициентами, связанными с параметрами внутренних дефектов. Теория подобия применительно к скрытым дефектам, до сих пор не завершена, однако установлено, что одномерное приближение справедливо для дефектов в неметаллах с поперечными размерами в 6–8 раз больше их глубины залегания, а тепловые процессы при импульсном возбуждении протекают в диапазоне времен до $F_0 \sim 1$.

– Основными параметрами обнаружения являются максимальный температурный сигнал (непосредственно в градусах или в контрастном выражении), а также момент его появления на контролируемой поверхности. Величина сигнала существенно зависит от размеров дефекта, в особенности, в направлении, перпендикулярном тепловому потоку. Момент его оптимальной регистрации увеличивается для более глубоких дефектов в процедуре одностороннего НРК и слабо зависит от глубины дефекта при двустороннем контроле.

– Односторонняя процедура целесообразна, если дефекты имеют тенденцию группироваться вблизи одной из поверхностей; при их равномерном распределении по толщине объекта контроля наиболее чувствительным является двусторонний метод.

– Неметаллы являются наиболее предпочтительными объектами теплового НРК, поскольку: 1) сигналы над дефектами существуют в течение более длительного времени и подвержены меньшей диссипации по сравнению с металлами; 2) поверхность неметаллов создает меньше тепловых шумов; 3) так называемые "новые материалы" (композиты, соты и т.п.) с трудом контролируются традиционными методами НРК.

Переход в 90-х гг. от дефектоскопии к дефектометрии обусловил интерес "академических ученых" к технической диагностике, которая является естественной областью приложения решений некорректных задач. Применительно к тепловому НРК термин "некорректная задача" означает, что одному набору экспериментальных параметров (сигналу над дефектом и моменту его регистрации) могут соответствовать различные наборы параметров самого дефекта. Иными словами, большой, но глубокий дефект может создать на поверхности такие же сигналы, как неглубокий, но малый дефект. По сути дела, разработка алгоритмов решения обратных задач есть процесс поиска методов отбора наиболее вероятных наборов дефектных параметров, которые будут соответствовать экспериментальным данным "наилучшим" образом. Авторы разрабатывают методы решения обратных задач, основанные на аппроксимации численных данных полиномиальными функциями с использованием метода наименьших квадратов.

– Показано, что поперечные размеры внутренних дефектов хорошо описываются проекцией первой производной от поверхностной температуры. Этот вывод, сделанный В. П. Вавиловым и В. В. Ширяевым в 1979 г. [12], долгое время не получал практического применения из-за возрастания шумов в процессе дифференцирования. В последние годы интерес к этому алгоритму возобновился в США и Великобритании благодаря появлению мощных коммерческих пакетов для обработки ИК-изображений.

– Зависимость сигнала над дефектом от глубины его залегания в общем случае имеет сложный вид. Авторами получен вид этой зависимости для односторонней процедуры, что позволило разработать алгоритм решения соответствующей обратной задачи, реализованный в коммерческом пакете "Термидж Про" [13], который получил определенную известность в мире. Типичная погрешность определения глубины залегания расслоений в композиционных материалах составляет 10–30%.

– Толщина дефекта относится к числу параметров, относительно слабо влияющих на информативные характеристики. Тем не менее, имеющиеся в программе "Термидж Про" опции позволяют оценивать толщину дефектов с погрешностью около 30–60% [13].

– Отдельное место в исследованиях авторов занимает динамическая тепловая томография, которая предложена В. П. Вавиловым и В. В. Ширяевым в 1985 г. как способ послойного представления структуры твердого тела, характеризующийся существенно меньшим уровнем шумов. В 1985 г.

В. П. Вавилов сообщил об алгоритме тепловой томографии на конференции "Термосенс" в США и в том же году получил первую тепловую томограмму углепластика совместно с исследователями из Университета Уэйна (США) [6]. В последующие годы этот алгоритм продолжал развиваться в кооперации с учеными из нескольких стран [7,15]. Пример тепловой томографии показан на рис.1.

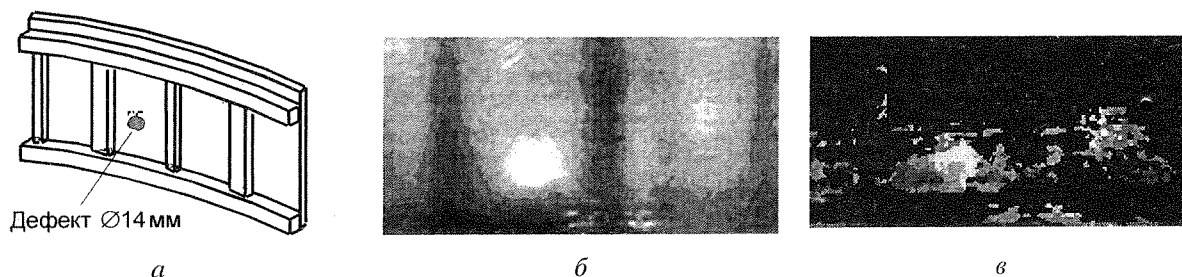


Рис.1. Тепловая томография самолетной углепластиковой панели: *а* – изделие со стрингерами и искусственным дефектом (вид сзади); *б* – исходная ИК-термограмма (видны стрингеры и искусственный дефект); *в* – тепловая томограмма при одностороннем контроле (виден искусственный дефект и два естественных расслоения)

– Предложена концепция теплового контроля, согласно которой внутренние дефекты рассматриваются как локальные изменения теплофизических характеристик (ТФХ) основного изделия, в результате чего задача дефектоскопии сводится к задаче измерения ТФХ. В рамках такого подхода авторами предложен ряд способов импульсного теплового контроля и в мировую практику введены понятия "характерного времени теплопередачи", "таймограммы", "максиграммы".

Как упоминалось выше, в последние годы акцент сделан на комбинирование оригинального программного продукта с зарубежной тепловизионной техникой. Усилиями авторов созданы и поставляются за рубеж пакеты компьютерных программ, не имеющих мировых аналогов. Разработаны программы для решения прямых задач теплопроводности твердых тел классическими ("Мультилэйер") и численными методами ("Термо.Хит-2Д", "Термо.Хит-3Д" и "Термо.Калк"). Для решения обратных задач теплового НК, то есть для осуществления тепловой дефектометрии и томографии путем обработки последовательностей тепловых изображений, создана программа "Термидж Про". Специально для использования в ИК-съемке строительных сооружений создана программа "Бильдидж", где предложен способ построения так называемых карт дефектов на основе статистического анализа результатов (см. пример 3Д-карты дефектов в углепластике на рис.2). В настоящее время разрабатывается математическое обеспечение для проведения тепловизионного медицинского скрининга больших контингентов населения (условное название "Медидж").

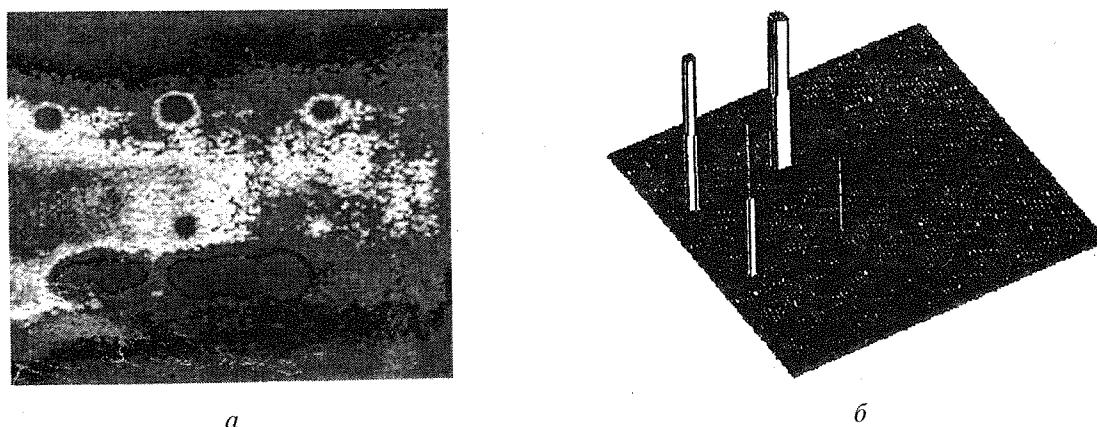


Рис.2. Статистическая обработка результатов в тепловом контроле: *а* – исходная термограмма девяти дефектов в стандартном образце из углепластика; *б* – карта четырех дефектов (вероятность обнаружения 80%, вероятность ложной тревоги 5%)

Аппаратура для теплового неразрушающего контроля

В области чисто тепловизионных систем отечественные приборы не выдерживают конкуренции с фирмами "Агема", "Инфраметрикс", "Эф-Си-Ай" и т.п. Поэтому усилия авторов в области создания

аппаратуры были направлены на разработку установок, которые могут называться тепловыми дефектоскопами. В качестве таких установок могут служить компьютерные тепловизионные системы, ядром которых являются быстродействующие отечественные или зарубежные тепловизоры. В то же время существенным элементом таких систем являются нагреватели, выбор типа которых зависит от объекта контроля. Одним из первых отечественных приборов такого типа являлся фоторегистрирующий ИК-дефектоскоп ФИД-1, предназначенный для документированного контроля качества пайки в металлических теплообменниках (соответствующая публикация [16] вошла в список лучших публикаций 1978 г. по линии Международного общества металлургов). Для испытаний цилиндрических резинометаллических втулок была создана полуавтоматизированная тепловизионная система, использующая индукционный нагреватель. В приборах серии "Тау", предназначенных как для измерения теплофизических характеристик, так и для отбраковки массовых многослойных изделий, например мощных тиристоров, использовалась лампа-вспышка энергией до 2 кДж. Контроль износостойкости режущего инструмента осуществлялся на лазерной установке с энергией нагрева в импульсе до 15 Дж (лазерная часть системы разработана В.П.Ципилевым). С помощью такой установки испытана партия резцов фирмы "Роберт Бош" (Германия), в результате чего показано, что предложенный метод является единственным, позволяющим предсказывать срок службы режущего инструмента с надежностью более 80%, тогда как традиционные методы испытаний ограничивали эту величину 30%.

В настоящее время авторы эксплуатируют компьютерную систему на базе тепловизора "Термовижн-470" и нагревателя из семи ксеноновых ламп общей мощностью 35 кВт. Система может быть использована для контроля композиционных материалов и металлов большой толщины.

Практические работы по ИК-съемке промышленных и строительных объектов

Выше речь шла об активном тепловом НРК материалов и изделий, что соответствует английскому термину "thermal/infrared nondestructive testing". С появлением в отделе портативного тепловизора "Термовижн-470" стало возможным проводить полевую съемку объектов с целью анализа их теплового состояния и обнаружения дефектов (английские термины "predictive maintenance" и "condition monitoring"). По инициативе Администрации г. Северска Томской области с 1996 г. тепловизионная диагностика успешно используется жилищно-коммунальными службами при приемке жилья и расследовании жалоб жильцов на тепловой дискомфорт в квартирах. Работы по энергосбережению и контролю дефектов в строительстве выполнялись в г.Сургуте, Томске, Новосибирске. Методика тепловизионной диагностики в строительстве утверждена Томским центром стандартизации, метрологии и сертификации в 1997г. В течение ряда лет сотрудники Томского НИИ интроскопии принимают участие в программе сохранения памятников старины в Италии (метод тепловой томографии применен для обнаружения отслоений между фресками и кирпичной стеной в церквях Падуи, а также при ремонте дворца Палаццо делла Раджионе в Милане).

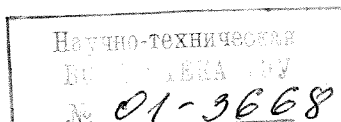
Тепловизионный метод внедрен на Томской дистанции электроснабжения при 100%-й диагностике контактов открытых и закрытых распределительных устройств, что позволило отказаться от услуг ремонтников и установить межремонтный период равным 1 году. Аналогичные работы выполнены для Воткинской ГЭС, предприятия "Омскэнерго" и "Пермьтрансгаз". Авторами выполнена ИК-съемка дымовых труб нефтебазы "Грушовая" (Новороссийск) и тепловой станции ТС-1 СО РАН (Новосибирск), на основе чего в настоящее время разрабатывается соответствующая методика. На Томском электроламповом заводе составлен атлас термограмм стекловаренной печи, что позволяет производить периодическую оценку ее технического состояния в рабочем режиме.

В последние годы авторы работают над внедрением метода вертолетной аэросъемки трасс газо- и нефтепроводов. Пробный облет газопровода в системе "Пермьтрансгаз" показал, что ИК-диагностика не имеет себе равных по оперативности и документированности; при этом легко обнаруживаются дефекты типа "всплывания" нитки трубопровода на поверхность, а также выявляются, после выработки у оператора навыков расшифровки термограмм, утечки газа малой интенсивности.

В 1997 г., по заданию Администрации г. Северска, выполнен медицинский скрининг населения деревни Наумовка, находящейся в зоне влияния Северской атомной станции, на основании чего составлена диаграмма распределения патологий у жителей деревни.

Перспективные направления исследований

В области тепловой томографии совместно с исследователями из Института холодильной техники (Италия) разрабатывается способ фазовой фурье-томографии, который основан на попиксельном одномерном преобразовании Фурье, примененном к функции развития температуры в процессе нагре-



ва-охлаждения. При этом, аналогично обработке термограмм во временной области, удается значительно снизить шумы.

В ближайшие годы предполагается рост интереса к ИК-термографии при обнаружении коррозии трубопроводов, цистерн, сосудов и т.п. объектов. В сотрудничестве с итальянскими исследователями заложены основы простого количественного способа оценки коррозии, который в настоящее время реализован в специализированной компьютерной программе (см. пример обработки термограмм на рис.3).

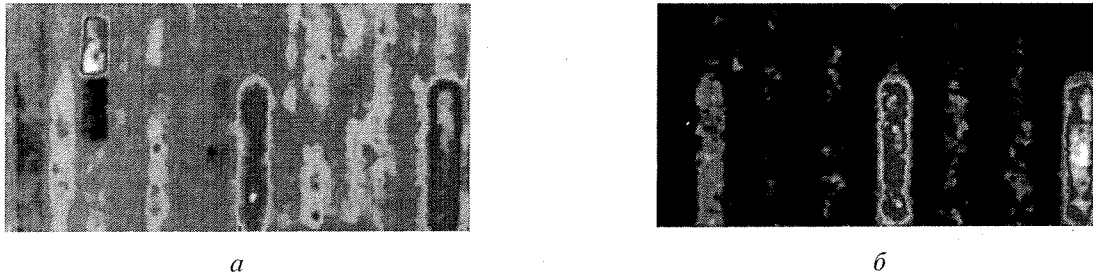


Рис.3. Алгоритмическая обработка экспериментальных результатов при обнаружении коррозии в 4-мм стальной стенке бойлера (размер дефекта: 40x8мм; унос материала слева направо: 30, 36 и 52%): *a* – исходная ИК-термограмма; *б* – результат обработки

В области строительной термографии ведется усовершенствование алгоритма измерения сопротивления теплопередаче, регламентируемого СНиП. На основании результатов анализа причин разрушения казармы ТВВКУС (Томск, 17 июля, 12 человеческих жертв), высказана догадка о возможности применения ИК-термографии для обнаружения аномальных механических напряжений в строительных конструкциях (мостах, лестничных маршах, нежилых домах и т.д.).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Vavilov V., Taylor R. Theoretical and Practical Aspects of the Thermal NDT of Bonded Structures // Res. Techn. in NDT. V.5 / Ed. by R. Sharpe. – London, U.K.: Academic Press, 1982. – P.239–280.
2. Вавилов В. П. Тепловые методы контроля композиционных структур и изделий радиоэлектроники. – М.: Радио и связь, 1984. – 162 с.
3. Стороженко В. А., Вавилов В. П., Волчек А. Д. Неразрушающий контроль качества промышленной продукции активным тепловым методом. – Киев: Техника, 1988. – 128 с.
4. Вавилов В. П. Аппаратура и методики теплового неразрушающего контроля изделий в процессе производства и эксплуатации. – М.: ЗИПК, 1990. – 62 с.
5. Вавилов В. П. Тепловые методы неразрушающего контроля. – М.: Машиностроение, 1991. – 250 с.
6. Vavilov V. Infrared Techniques for Materials Analysis and Nondestructive Testing // Infrared Methodology and Technology. Monograph Series "Intern Advances in NDT" / Ed. by X.Maldague. – U.S.A.: Gordon&Breach Science Publisher, 1994. – P.230–309.
7. Вавилов В. П., Джин Х., Томас Р., Фавро Л. Экспериментальная тепловая томография твердых тел при импульсном одностороннем нагреве // Дефектоскопия. – 1990. – № 12.
8. Vavilov V., Maldague X., Picard J. et al. Dynamic Thermal Tomography: New NDE Technique to Reconstruct Inner Solids Structure Using Multiple IR Image Processing // Rev.of Progress in Quant. NDE. – U.S.A.: Bowdoin College, 1991. – P.452-432.
9. Вавилов В. П., Гринцато Э., Бизон П. и др. Новые аспекты динамической тепловой томографии // Дефектоскопия. – 1992. – № 7. – С.69–76.
10. Vavilov V., Grinzato E., Bison P.G., Marinetti S., Bales M. Inversion for Hidden Corrosion Characterization: Theory and Applications.-Intern. J.Heat & Mass Transfer, 1996. – V.39. – P.355–371.
11. Лыков А. В. Теория теплопроводности.-М.: Высшая школа, 1967. – 460 с.
12. Вавилов В. П., Ширяев В. В. Способ определения размеров дефектов при тепловом контроле // Дефектоскопия. – 1979. – № 11. – С.23–28.
13. Вавилов В. П., Ширяев В. В. Тепловой томограф.-А.С. СССР №1266308 (приоритет от 31 января 1985 г.).
14. Vavilov V.P., Grinzato E., Bison P.G. Thermal Characterization and Tomography of Carbon Fibre Reinforced Plastics Using Individual Identification Technique // Mater. Evaluation, May 1996. – V.54. – №.6. – P.604–611.
15. Вавилов В. П., Ширяев В. В., Танасейчук С. Ю. Комплексный подход к проектированию системы теплового контроля паяных соединений // Дефектоскопия. – 1978. – № 10. – С.45–52.