

## Технологии и комплексы томографического неразрушающего контроля нового поколения

Бориков В.Н., Рычков М.М., Капранов Б.М., Седнев Д.А., Вавилов В.П.  
Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Институт неразрушающего контроля  
634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30  
E-mail: borikov@tpu.ru

В настоящее время одним из направлений деятельности Института неразрушающего контроля Томского политехнического университета (ИНК ТПУ) является проведение фундаментальных и прикладных исследований в области промышленной томографии. В результате выполнения данных исследований были разработаны прототипы четырех томографов: томограф для крупногабаритных объектов, микротомограф высокого разрешения, ультразвуковой томограф для контроля объектов сложной формы и тепловой томограф.

### 1. Томограф для контроля средних и крупных изделий с техническими характеристиками:

- пространственное разрешение, мкм	100
- источники излучения	рентгеновский аппарат с максимальным анодным напряжением до 450 кВ, бетатрон МИБ-7
- регулируемое анодное напряжение, кВ	15 ÷ 7000
- размер фокусного пятна, мм	0,3
- максимальные габаритные размеры исследуемого объекта, мм	1500x1500x1000
- максимальная масса исследуемого объекта, кг	1500
- максимальная просвечиваемая толщина по стали, мм	220
- типы цифрового детектора	плоская панель и линейный
- получение информации в виде 2D и 3D изображения	
-цифровая обработка изображений: подавление шумов, цифровая фильтрация; контрастирование; арифметические операции с изображениями; «склейка» изображений; выделение контуров, объемов, зон интереса;	

В рамках развиваемого направления ИНК ТПУ может предложить:

- Поставку, отладку, сервисное обслуживание разработанного оборудования;
- Обучение и аттестацию персонала по работе с оборудованием;
- Оказание услуг в области томографического контроля на имеющемся оборудовании;
- Разработку и поставку специализированных томографических комплексов с использованием радиационных, тепловых, электромагнитных, ультразвуковых полей;
- Разработку методик томографического контроля объектов, работающих в особых условиях.

### 2. Микротомограф высокого разрешения

1. Рентгеновский источник – 40 ÷ 150 kV, 100 μA, фокус <10 мкм.
2. Детектор – FlatPanel 4096×4096 (40 x 40 см.) пикселей, 16 bit, с защитным волоконно-оптическим окном из свинцового стекла.
3. Максимальная просвечиваемая толщина:  
сталь – 10 мм;  
алюминий – 400 мм;  
пластики – 100 мм.

4. Максимальный размер объекта:

диаметр – 100 мм;

поперечные размеры – 100×100 мм.

5. Перемещение объекта по двум координатам – 0 ÷ 200 мм: точность позиционирования – 0,1 мкм. Вращение с погрешностью 0,001 градуса

6. Реконструкция:

- модифицированный алгоритм Фелдкампа;

- поле реконструкции – 1024×1024 пикселей;

- разрядность изображения – 16 bit;

- количество проекций – 180 и более;

- толщина реконструированного сечения – 10 мкм;

- шаг сечений – 10 мкм и более;

- время набора 180 проекций – 12 минут;

- время реконструкции – 45 сек.

7. Обработка:

- цифровая обработка изображений: подавление шумов; цифровая фильтрация; контрастирование; арифметические операции с изображениями; «склейка» изображений; выделение контуров, объёмов, зон интереса;

- 2D/3D анализ изображений;

- морфометрия объекта.

8. Радиационная безопасность – доза на поверхности в любой точке не более 1  $\mu\text{Sv}$ .

9. Габариты 800×300×400 мм.

10. Вес – 150 кг

Томограф реализует традиционную схему сканирования с вращающимся объектом исследования и коническим пучком излучения с регистрацией на матричный детектор.

Томограф снабжен линейным приводом для позиционирования объекта между детектором и источником излучения. Источник, платформы и детектор расположены на одной оси. В состав томографа входят:

1) Аппарат рентгеновский микрофокусный РАП-150МН (производитель: ТСНК-лаб, г. Москва)

Название характеристики	Значение
Минимальный размер фокусного пятна рентгеновской трубки	50±100% мкм
Диапазон регулирования напряжения	0 – 150 кВ
Ток	100 мкА
Максимальная экспозиция	10000 с

2) Детектор матричный Remote RadEye200 (производитель: Rad-Icon Imaging Corp., США)

Название характеристики	Значение
Размер матрицы	1024 x 1000 пикселей
Размер активной зоны	98,6 x 96,1 мм
Шаг пикселей	96 мкм
Динамический диапазон	4000:1
Время считывания с матрицы в память	540 мс
Время передачи полного изображения на ПК	3-4 с

3) Поворотная платформа M-061.PD с контроллером C-863 (производитель: Physik Instrumente (PI) GmbH & Co., Германия)

Название характеристики	Значение
Диаметр платформы	100 мм
Диапазон угловых перемещений	> 360°
Минимальный шаг углового перемещения	17,5 мкрад (0,001°)
Люфт	200 мкрад
Точность поворотного позиционирования	50 мкрад
Максимальная скорость вращения	90 °/с

4) Прецизионная линейная платформа М.403-82S с контроллером С-663 (производитель: Physik Instrumente (PI) GmbH & Co., Германия)

Название характеристики	Значение
Диапазон перемещения	0–200 мм
Минимальный шаг перемещения	0,2 мкм
Люфт	6 мкм
Точность повторного позиционирования	1 мкм
Максимальная скорость перемещения	3 мм/с

Для управления томографом разработана программа uCT (microCT). С ее помощью производится управление всеми узлами установки: рентгеновской трубкой, детектором и приводами платформ. Программа обеспечивает сканирование в автоматическом режиме и позволяет производить необходимые настройки: калибровку по черному и белому, выбор числа исходных проекций, время экспозиции и т.д.

Программа uCT имеет графический интерфейс и выполнена на основе диалогового окна с закладками (рис.1). Имеется четыре закладки, соответствующие основным задачам: сканирование (закладка «Сбор данных»), управление рентгеновской трубкой («Рентген»), управление приводами перемещения и вращения («Приводы») и управление матрицей детекторов («Детектор»). В правой части осуществляется вывод уменьшенного изображения с матрицы детекторов и регуляторы яркости и контраста.

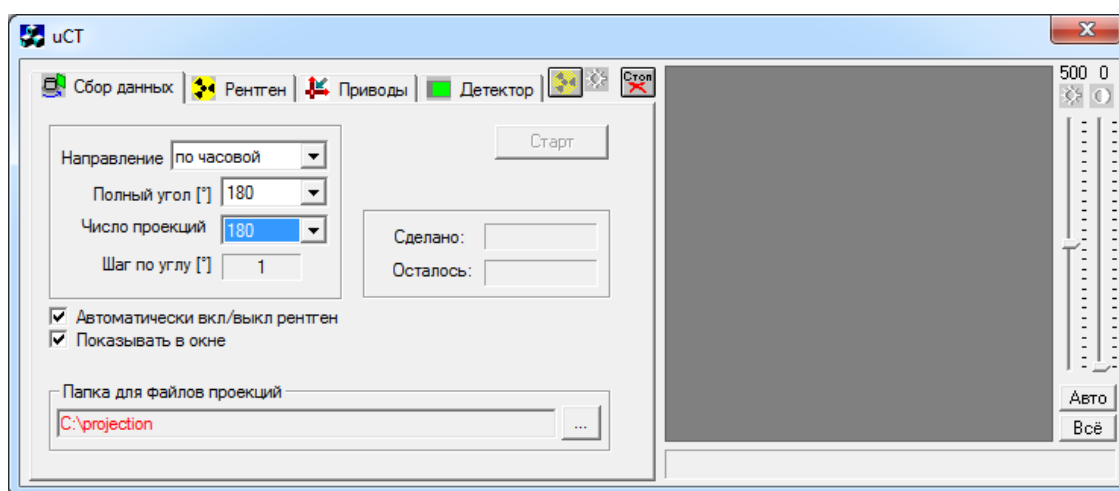


Рисунок 1 - Окно программы uCT

Скорость сканирования при экспозиции порядка 1 с составляет 1,5 с на проекцию. Файлы проекции представляют собой 16-битные TIFF-файлы с именами A\_XXXX.tif, где XXXX – номер файла, начиная с номера 0000 для первой проекции.

### 3. Ультразвуковой томограф

Система представляет собой многоканальную измерительную установку ультразвукового контроля с иммерсионным контактом и со сканирующим устройством, позволяющим производить контроль объектов с поверхностями сложной формы. Модель макета представлена на рисунке 2.



Рисунок 2 - Внешний вид макета ультразвукового томографа

Макет комплекса включает в себя следующие функциональные модули (рис. 3):

- 1) Блок электроники и автоматики УЗК;
- 2) Ультразвуковые преобразователи;
- 3) Сканирующее устройство – механический манипулятор;
- 4) Иммерсионная ванна с моторизированным подъёмным столом, системой крепления объектов контроля и системой циркуляции контактной жидкости.

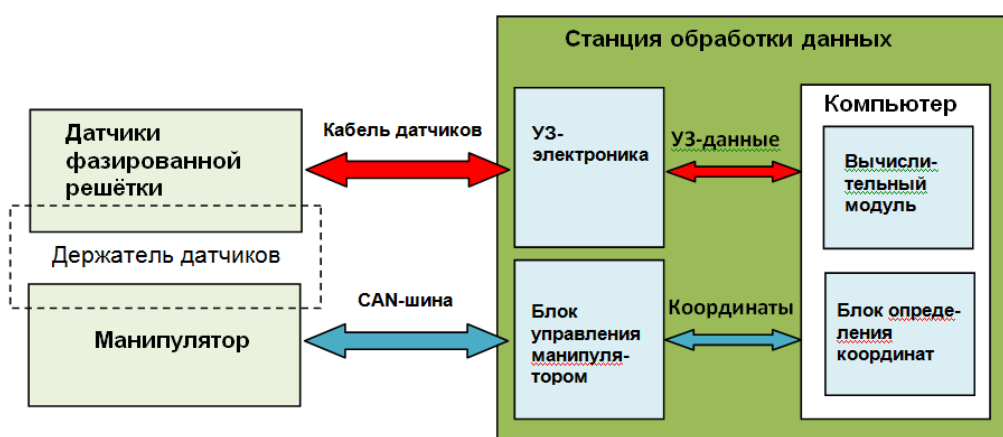


Рисунок 3 - Структурная схема макета

Разработанная роботизированная установка является многофункциональной многоканальной системой ультразвукового контроля, позволяющей реализовывать

традиционный контроль одноэлементными ультразвуковыми преобразователями, и с возможностью применения функций контроля фазированными антенными решётками (ФАР) за счёт расширения программного обеспечения.

Манипулятор контроля представляет собой шестиосную сканирующую систему в комплекте с иммерсионной ванной и крепёжным столом, включающим систему креплений для объектов контроля. Контроль производится с иммерсионным контактом при полном погружении объекта контроля в контактную жидкость.

Программное обеспечение для ультразвуковой лабораторной установки содержит модули управления отдельными элементами системы в ручном и автоматическом режиме. Они принимают на себя контроль как над всем процессом проведения измерений, так и над параметрами системных компонентов и над управлением данными. Приём данных по методу антенных решёток с цифровой фокусировкой происходит таким образом, что необработанная информация со всех каналов обрабатывается в реальном масштабе времени.

В анизотропном негомогенном материале, например композите, где акустические волны распространяются не прямолинейно, вид волнового фронта, также как и скорость распространения волны, зависит от структуры материала.

Взаимодействие модулей программного обеспечения между собой изображено на рисунке 3.



Рисунок 4 – Взаимодействие модулей программного обеспечения

На рисунке 4 представлен пример решения задач контроля сварки трением с перемешиванием.

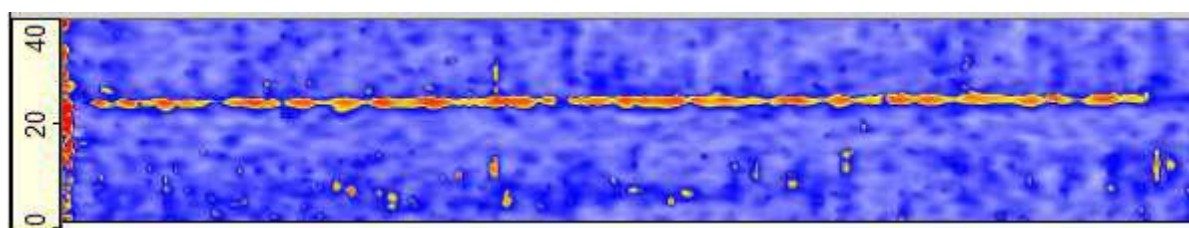
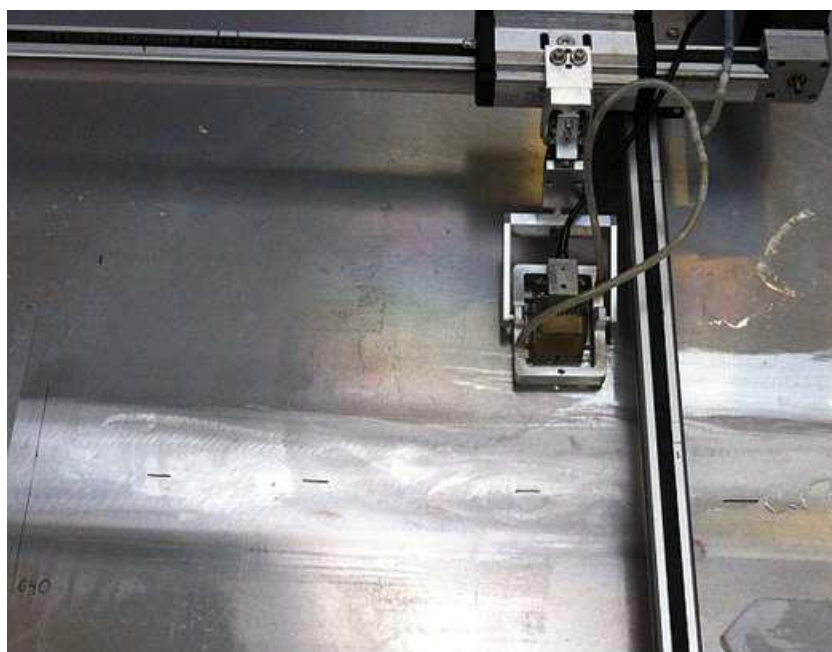


Рисунок 5 – Пример УЗК томограммы

#### 4. Тепловой томограф

Революционизирующее воздействие томографических принципов продолжает в значительной степени обеспечивать прогресс в неразрушающем контроле (НК). В тепловом контроле значимость томографии не столь велика вследствие диффузионного характера распространения тепловой энергии в твердых средах, в результате чего температурные сигналы, обусловленные дефектами, испытывают затухание по амплитуде и запаздывают во времени. Во многих случаях использование принципа динамической тепловой томографии позволяет визуализировать скрытые дефекты по глубине объекта контроля, хотя число выделяемых слоев не превышает 3–5.

Существует несколько реализаций тепловой и/или инфракрасной (ИК) томографии. В Томском политехническом университете (ТПУ) разрабатывается динамическая тепловая томография (ДТТ), идея которой была предложена еще в 1984 г. Исследования в области разработки методологии тепловой томографии проводились, в основном, учеными ТПУ, в том числе, в сотрудничестве с исследовательскими группами в Канаде и Италии. В частности, был выполнен ряд экспериментальных исследований, преимущественно в области НК композиционных материалов. При сравнении результатов УЗК и теплового контроля ударного повреждения в углепластике; отмечено, что УЗ томография обеспечивает значительно лучшее разрешение по слоям, однако тепловой метод предпочтителен с точки зрения производительности испытаний, бесконтактности и отсутствия контакта композита с водой.

ДТТ не требует создания прецизионных сканирующих устройств, поскольку разноракурсная съемка, необходимая, например, для рентгеновской томографии, заменяется записью последовательностей ИК термограмм, отражающих изменение температуры во времени (напомним, что в основе ДТТ лежит простой принцип соответствия глубины

залегания дефектов и времени задержки температурных сигналов на нагреваемой поверхности при односторонних испытаниях). Поэтому в качестве теплового томографа может служить любое устройство ИК термографического НК («тепловой дефектоскоп»), осуществляющее цифровую запись ИК термограмм и включающее специализированный софтвер, который обеспечивает томографический анализ данных и построение тепловых томограмм.

Разработанный в ТПУ томограф для теплового контроля обладает достаточно гибкой архитектурой и позволяет использовать как источники нагрева, так и ИК тепловизоры различного типа. Управление процессом испытаний осуществляет специализированная программа, для обработки результатов контроля применяют программы ThermoFit Pro и ThermoLab (рисунок 6). Технические характеристики основных блоков устройства приведены в таблице 1.

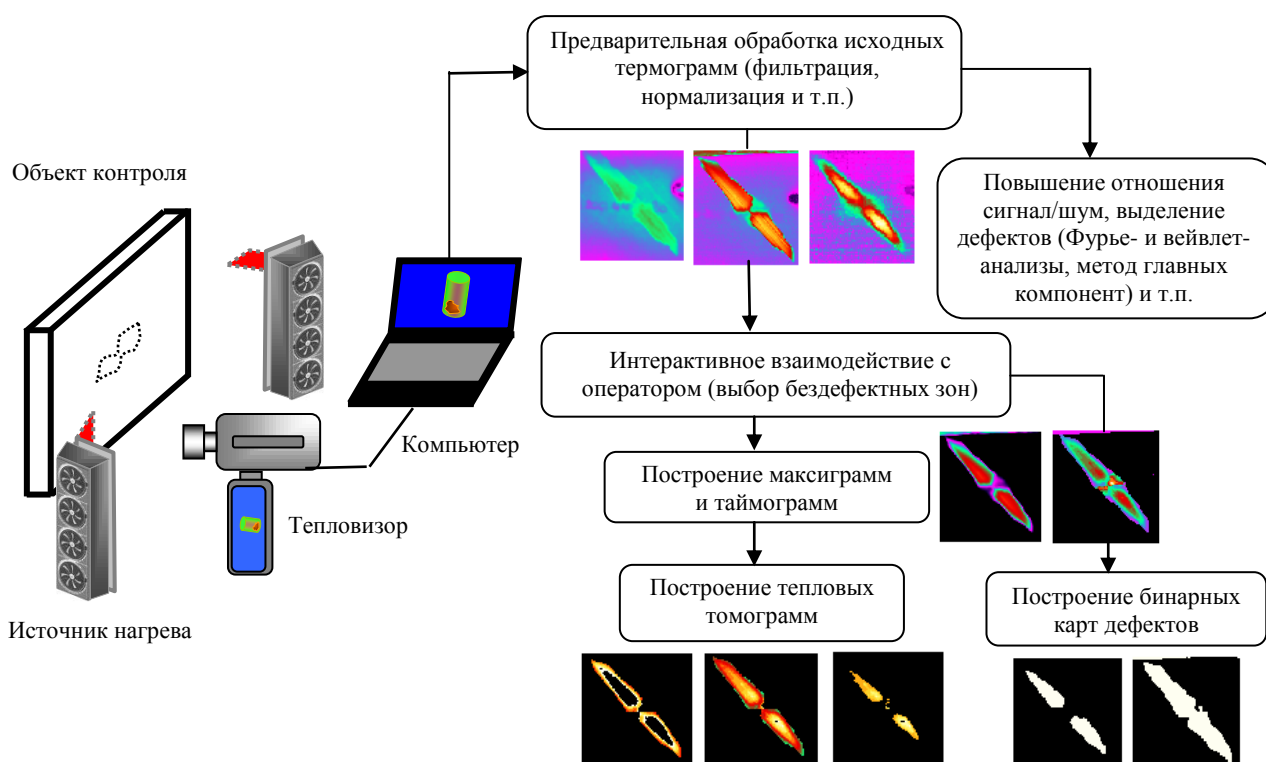


Рисунок 6 - Схема лабораторного макета теплового томографа.

Таблица 1 - Технические характеристики лабораторного макета теплового томографа

Объекты контроля	
Конструкции	Панели различного радиуса кривизны, цилиндрические и конические изделия
Материалы	Стекло-, угле-, органо- и боропластик, углерод-углеродные и сотовые структуры с металлическими и бумажными ячейками
Толщина материала	0–10 мм*
Площадь зоны одновременного контроля	0,05–0,15 м <sup>2</sup>
Производительность испытаний	до 4,5 м <sup>2</sup> /ч
Минимальные обнаруживаемые дефекты (расслоения)*: по поперечным размерам по толщине	Более 5x5 мм Более 50 мкм

по глубине залегания	До 3–6 мм (односторонняя процедура) и до 10 мм (двухсторонняя процедура)
Типы и мощность источников нагрева	Ксеноновые импульсные лампы (3,2 кДж) Галогеновые лампы (1–30 кВт) Светодиоды (до 800 Вт) Конвектор (до 3 кВт) Ультразвуковой стимулятор (до 2,5 кВт)
Длительность нагрева	5 мс (ксеноновые лампы) до 20 с (галогеновые лампы, светодиоды, конвекторы и у.з. стимулятор)
Типы ИК тепловизоров**	NEC Avio TH-9100 ThermaCAM P65 FLIR SC 7700M
Спектральный диапазон	7–13 и 8–10 мкм***
Температурная чувствительность	0,02–0,06 °С ***
Формат термограмм	320×240 и 640×512 ***
Частота цифровой записи	0,1–113 Гц (полноформатная термограмма)***
Число термограмм в последовательности	3–2000
Число разрешаемых томографических слоев*	3–5
Алгоритмы обработки ИК изображений	Фильтрация Усреднение Нормализация Полиномиальная аппроксимация Определение уноса материала 1D-дефектометрия 3D-дефектометрия Статистический анализ и бинарная карта дефектов Корреляционный анализ Анализ производных по времени (включая анализ в логарифмических координатах) Фурье-анализ Вейвлет-анализ Анализ главных компонент Тепловая томография
Масса	5–10 кг (в зависимости от типа источника нагрева и тепловизора)
Питание	Сеть 220 В

\* Усредненные значения (данные параметры подлежат определению в конкретных задачах контроля).

\*\* См. паспортные характеристики ИК тепловизоров.

\*\*\* В зависимости от типа тепловизора.

Испытания теплового томографа проведены на углепластиковых стандартных образцах корпорации Airbus, содержавших ударные повреждения различной энергии. Цель исследований – установление связи между количественными показателями теплового контроля и характеристиками дефектов. Ниже приведен пример томографического анализа ударного повреждения (энергия 62 Дж, скорость удара 6,8 м/с) в стандартном образце из углепластика толщиной 5 мм (рис. 7а). Ударное повреждение было осуществлено на



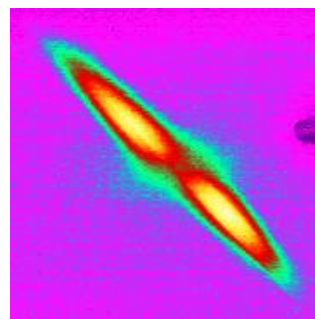
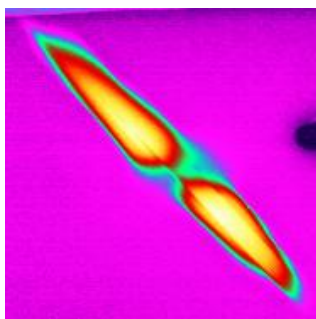
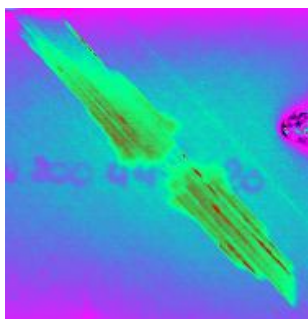
передней поверхности панели белого цвета, при этом в месте удара визуально отмечено незначительное углубление круглой формы при отсутствии растрескивания композита.

Визуально наблюдаемое расслоение углепластика произошло вблизи задней поверхности образца, поэтому в качестве источника нагрева при одностороннем контроле задней поверхности выбраны две ксеноновые лампы, обеспечивающие длительность импульса нагрева около 5 мс. Записали последовательность из 600 ИК термограмм с частотой 60 Гц. Дефектная зона имела классическую форму бабочки (см. динамику температурного поля на рис. 7б). Обработка данных по методу тепловой томографии показала, что основное тело дефекта (крылья «бабочки») находится в слое 0,26–0,34 мм, но в то же время незначительная часть дефекта распространяется до глубины 0,55 мм (см. рис. 7в).

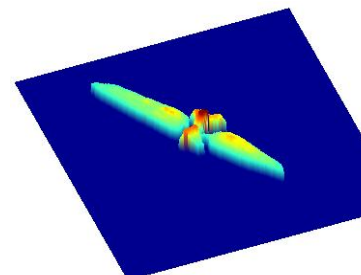
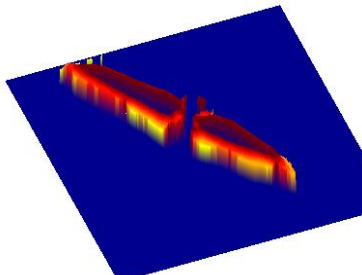
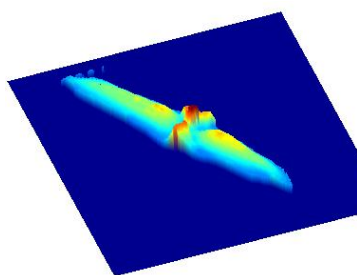
Преимуществом тепловой томографии, помимо возможности идентифицировать дефекты по нескольким выделенным слоям, является также низкая «зашумленность» томограмм, поскольку обработку данных производят во временной области.



а)



б)



в)

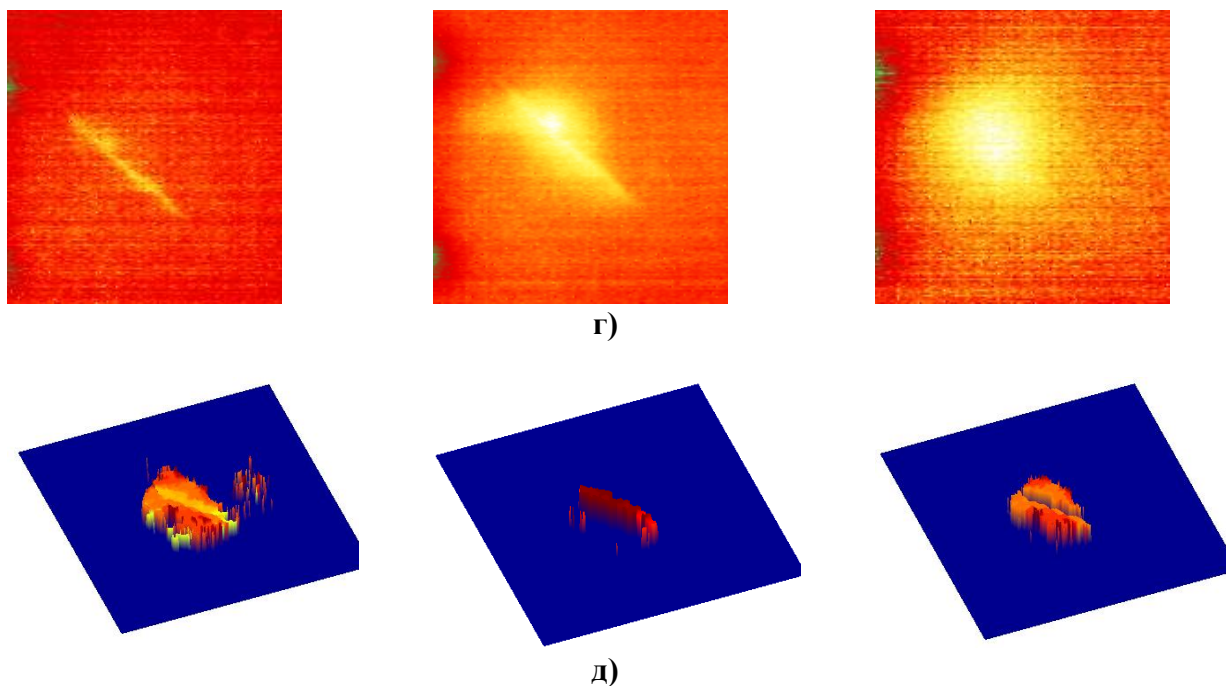


Рисунок 7 - Тепловая томография ударного повреждения в углепластиковой панели при одностороннем тепловом контроле задней (б, в) и передней поверхности (г, д):  
 а – образец толщиной 5 мм (передняя и задняя поверхности), ударное повреждение с энергией 62 Дж при скорости 6.8 м/с;  
 б – исходные термограммы задней поверхности при импульсном нагреве (слева направо времена задержек: 0,09; 0,9; 3,4 с);  
 в – томограммы при контроле задней поверхности (координаты слоев слева направо: 0,26–0,55; 0,26–0,34; 0,35–0,55 мм);  
 г – исходные термограммы передней поверхности при импульсном нагреве (слева направо времена задержек: 1,5; 10 с);  
 д – томограммы при контроле передней поверхности (координаты слоев слева направо: 1,0–1,63; 1,0–1,24; 1,26–1,63 мм).

### **Особенности выполнения компоновки силовых модулей энергопреобразующей аппаратуры с учетом влияния комплекса воздействующих факторов**

Быков В. В., Бугай Т. В.

Научный руководитель: Дмитриев В.С., д.т.н., профессор  
 Акционерное общество «Научно-производственный центр «Полюс»  
 634050, Россия, г. Томск, пр. Кирова, 56 "в"  
 E-mail: vasilii\_bykov@mail.ru

Одной из важнейших систем космических аппаратов (КА) является система энергоснабжения. Во многом именно она определяет конструкцию КА, их массу и срок активного существования. По мере освоения новых задач непрерывно растет мощность энергетической установки КА, что требует постоянной модернизации каждого из ее компонентов. Так, первый искусственный спутник Земли (1957 г.) обладал энергоустановкой мощностью около 40 Вт, аппараты серии «Глонасс» второго поколения (2001 г.) – 1,4 кВт, а современные телекоммуникационные аппараты тяжелого класса (например, «Экспресс-АМ5») снабжаются энергоустановками мощностью свыше 10 кВт. Кроме того, при создании