

стандартная энтальпия образования гексафторида серы. Это указывает на реализацию цепного процесса, инициируемого импульсным электронным пучком. При радиоллизе смеси гексафторида серы с азотом импульсным электронным пучком не зафиксирована убыль азота. Поэтому источником энергии на разложение гексафторида серы была не

экзотермическая реакция синтеза трифторида азота, а другие экзотермические процессы. Вероятно, что наиболее существенный вклад в разложение гексафторида вольфрама вносит ионно-кластерный механизм цепной реакции. Наличие атомов серы и буферного газа (азота, гексафторида серы и др.) способствует формированию кластеров.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Денисов Г.В., Новоселов Ю.Н., Ткаченко Р.М. Удаление оксидов азота из воздуха при воздействии микросекундного пучка электронов // Письма в ЖТФ. — 1998. — Т. 24. — В. 4. — С. 52–56.
2. Денисов Г.В., Кузнецов Д.Л., Новоселов Ю.Н., Ткаченко Р.М. Конверсия оксидов серы и азота в воздухе под действием микросекундных пучков электронов // Журнал технической физики. — 2002. — Т. 72. — В. 5. — С. 102–107.
3. Новоселов Ю.Н., Рыжов В.В., Сулов А.И. Цепной механизм инициирования реакции окисления углеводородов в низкотемпературной плазме // Письма в ЖТФ. — 1998. — Т. 24. — В. 19. — С. 40–43.
4. Власов В.А., Пушкарёв А.И., Ремнёв Г.Е., Сосновский С.А., Ежов В.В., Гузеева Т.И. Экспериментальное исследование и математическое моделирование восстановления фторидных соединений импульсным электронным пучком // Известия Томского политехнического университета. — 2004. — Т. 307. — № 5. — С. 89–93.
5. Kondrat'ev N.A., Pushkarev A.I., Remnev G.E., Pushkarev M.A. Investigation of interaction pulse power electron beams with vapor hexofluoride tungsten // Proc. of 3 Intern. Symp. on pulsed power and plasma applications. — Mianyang, China, 2002. — P. 323–325.
6. Ремнев Г.Е., Фурман Э.Г., Пушкарёв А.И., Карпузов С.Б., Кондратьев Н.А., Гончаров Д.В. Импульсный сильноточный ускоритель с согласующим трансформатором // Приборы и техника эксперимента. — 2004. — № 3. — С. 130–134.
7. Remnev G.E., Furman E.G., Pushkarev A.I., Kondratiev N.A., Goncharov D.V. High-current pulsed accelerator with matched transformer: construction and exploitation characteristics // IEEE Transactions on fundamentals and materials. — 2004. — V. 124. — № 6. — P. 491–495.
8. Пушкарёв А.И., Пушкарёв М.А., Жуков Л.Л., Сулов А.И. Измерение диссипации энергии электронного пучка в плотном газе малоинерционным дифференциальным датчиком давления // Известия вузов. Физика. — 2001. — № 7. — С. 93–97.
9. Пушкарёв А.И., Пушкарёв М.А., Ремнев Г.Е. Исследование звуковых волн, генерируемых при поглощении импульсного электронного пучка в газе // Акустический журнал. — 2002. — Т. 48. — № 2. — С. 260–264.

УДК 620.179.13

### ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕПЛОГО МЕТОДА НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ И ОЦЕНКИ МАССЫ ВОДЫ В СОТОВЫХ ПАНЕЛЯХ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ

Д.А. Нестерук, В.П. Вавилов

НИИ интроскопии при Томском политехническом университете  
E-mail: nesteruk@introscopy.tpu.ru

*Приведены теоретические и экспериментальные результаты применения теплового метода неразрушающего контроля (инфракрасной термографии) для обнаружения воды в сотовых панелях авиационной техники в процессе эксплуатации. Показано, что тепловой контроль находит практическое применение в качестве скринингового метода, а количественная оценка скрытой воды по аномалиям поверхностного температурного поля требует дальнейших исследований.*

#### Введение

В отечественных самолетах нового поколения широко используют сотовые конструкции (металлические и композиционные), которые обладают высокими прочностными характеристиками при малой массе [1]. Однако первые годы эксплуатации самолетов с сотовыми панелями (ИЛ-86, ИЛ-96, ТУ-204, ЯК-42) выявили возможность появления существенного эксплуатационного дефекта, а именно накопления воды в ячейках сот за счет конденсации и прямого проникновения атмосферной влаги. В первую очередь, сказанное относится к самолетам ТУ-204, которые идут на смену устаревшим отечественным лайнерам ТУ-154. Наличие

значительной массы воды в сотовых панелях приводит не только к увеличению взлетной массы, но, главным образом, к ухудшению свойств клеевых соединений и возможному разрушению конструкций. В процессе полета и посадки вода претерпевает фазовые превращения, поскольку температура за бортом самолета изменяется от  $-50$  до  $+50$  °С. Увеличение объема воды при замерзании может вызвать разрушение ячеек сотовых конструкций, кроме того могут ухудшаться сцепные свойства клея, при помощи которого ячейки крепятся к несущим панелям. Наличие воды приводит также и к утяжелению сотовой конструкции, что увеличивает взлетный вес и сказывается на прочности панелей. Следует заметить, что сотовые конструкции использу-

ют в ответственных узлах самолетов: элеронах, закрылках, рулях высоты и направления. Только в течение последнего года произошло два инцидента с российскими самолетами ТУ-204, сопровождавшихся разрушением в воздухе руля высоты, причем, по мнению экспертов, именно наличие воды в сотах явилось одним из факторов разрушающего воздействия. Возможность накопления воды в сотах и степень серьезности этого вида дефектов фактически не была предусмотрена конструкторами, поэтому до сих пор отсутствует приемлемая технология его диагностики и "лечения".

Сотовые панели представляют собой две обшивки, между которыми находится ячеистая сотовая структура, состоящая из соединенных профилированных листов, образующих замкнутые ячейки квадратной или шестигранной формы. В конструкциях с несущими слоями из алюминиевого сплава материалом заполнителя обычно служит алюминиевая фольга (или бумага типа Nomex), соединяемая с несущими слоями при помощи клея. Толщина обшивки из дюралюминиевых листов составляет 0,5...1,5 мм, типичная толщина самих сот из алюминиевой фольги сот – 0,1 мм. Такие конструкции использованы в российских самолетах последнего поколения ИЛ-76, ИЛ-86 и др., а также в европейских авиобусах А-310 производства фирмы Airbus Industry. Сотовые конструкции, выполненные из полимерных композиционных материалов (ПКМ), применяют на российских самолетах АН-72, ИЛ-96, ТУ-204, вертолетах Ка-50. Основными элементами, где может скапливаться вода, являются элероны, закрылки, рули высоты и направления, воздухозаборники, а также ряд фюзеляжных панелей.

#### Методы неразрушающего контроля воды в сотовых конструкциях

На данный момент можно выделить три способа неразрушающего контроля воды в сотовых конструкциях: радиационный, ультразвуковой и тепловой. Применение радиационного метода ограничивается лабораторными условиями, что связано со специфическими требованиями безопасности. В российских аэропортах достаточно широко применяется ультразвуковой метод, но он характеризуется малой производительностью и неспособностью контролировать вертикально-ориентированные панели самолетов, например, рули направления и фюзеляжные зализы. В данной работе рассмотрены особенности применения теплового метода неразрушающего контроля для обнаружения воды в сотовых панелях самолетов. Тепловой контроль использует динамические различия в температурах дефектной и бездефектной зон объекта испытаний при воздействии на него тепловой энергией различного вида. Появление на рынке современных измерительных тепловизоров, характеризующихся малой массой, отсутствием охлаждаемых приемников излучения и высокой чувствительностью, делает применение теплового метода привлекательным с точки зрения практики.

#### Компьютерное моделирование теплопередачи в сотовых структурах

Для моделирования процесса нагрева воды или льда в сотовой конструкции разработана компьютерная программа "MultiLayer1D", позволяющая определять температуру на поверхности и по глубине многослойной структуры, которая подвергается воздействию внешних источников тепла. Программный продукт позволяет моделировать одномерные структуры, состоящие из неограниченного числа слоев с произвольными теплофизическими характеристиками. В отличие от большинства известных программ, в том числе и коммерческих пакетов Matlab, LabView и т.п., в программе "MultiLayer1D" учитывается возможность фазовых переходов, которые имеют место при плавлении льда и замерзании воды. В основе разработанного алгоритма лежит одномерная математическая модель нагрева многослойной структуры [2]. Применительно к обнаружению воды в сотовых конструкциях вид исследуемых структур представлен на рис. 1.

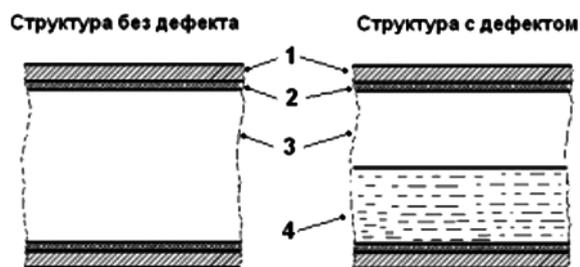


Рис. 1. Модель обнаружения воды в самолетной сотовой панели: 1) обшивка, из дюралюминия или ПКМ; 2–4) слой клея, воздуха, воды или льда

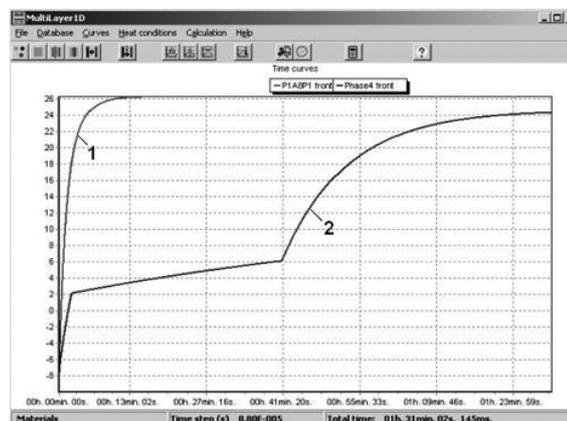


Рис. 2. Изменение поверхностной температуры в бездефектной (кривая 1) и дефектной (кривая 2) области при перемещении сотовой панели из среды с температурой  $-10^{\circ}\text{C}$  в среду с температурой  $+53^{\circ}\text{C}$

Учет фазовых переходов при моделировании различных начальных и граничных условий позволил определить оптимальное время наблюдения температурных сигналов, обусловленных наличием воды или льда. Например, установлено, что при нагреве сотовой панели (толщина обшивки из ПКМ – 1 мм, толщина слоя воздуха – 8 мм для бездефектной

панели и 4 мм для структуры с дефектом, толщина слоя воды/льда – 4 мм) при нагреве в среде с температурой +53 °С, начальной температуре –10 °С и коэффициентах теплообмена на внешних поверхностях, равных 23 Вт/(м<sup>2</sup>·К), температурный сигнал сохраняется 2 ч. На рис. 2 показано развитие температуры в бездефектной (кривая 1) и дефектной (кривая 2) областях. В отличие от общепринятой в тепловом контроле модели чистой теплопроводности, расчет в дефектной области выполнен с учетом плавления льда. Период времени, когда в массе льда происходит фазовое превращение, соответствует отчетливо наблюдаемой "полочке" в развитии температуры. Рост поверхностной температуры замедлен, поскольку поступающая из окружающей среды тепловая энергия расходуется на таяние льда.

### Экспериментальные результаты

Обследования самолетов ТУ-204, проведенные в 2003–2004 гг. в аэропортах "Толмачево" (г. Новосибирск) и "Домодедово" (г. Москва), а также лабораторные исследования, проведенные в НИИ интроскопии при ТПУ, показали пригодность предложенной одномерной модели нагрева сотовой конструкции для оптимизации условий неразрушающих испытаний. На рис. 3 в качестве иллюстрации приведены термограммы правого и левого крыльев самолета ТУ-204 [3]. Съемку проводили через 40...60 мин после посадки при температуре окружающего воздуха +10 °С. Отчетливо видно различие в температурах поверхности элеронов, в частности, в правом элероне обнаружено значительное скопление воды, характеризующееся зонами пониженной температуры (участки черного цвета на рис. 3). Температурные сигналы, обусловленные скоплением воды, сохранялись в течение 4 ч после посадки самолета.

Результаты теоретических и экспериментальных исследований положены в основу разработанной совместно с ГосНИИ ГА методики обследования самолетов в пассивном (после посадки) и активном (при дополнительном нагреве) режиме.

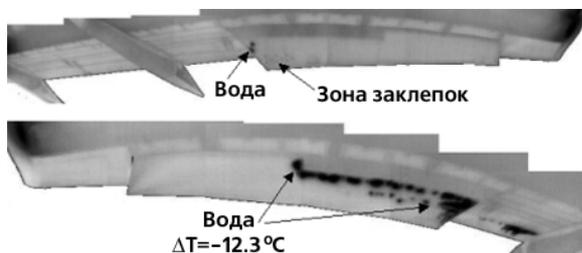


Рис. 3. Инфракрасные термограммы крыльев самолета ТУ-204

### Повышение достоверности обнаружения зон с водой

Одной из важных задач при локализации зон с водой является выделение "полезных" температурных сигналов на фоне специфических помех. Под обшивкой самолета могут находиться различные

конструктивные элементы (стрингеры, внутренние перегородки и т.п.), сигналы от которых при тепловизионном осмотре могут быть интерпретированы как соответствующие скоплениям воды. Для лабораторного моделирования такой ситуации был изготовлен эталонный образец, имитирующий сотовую конструкцию и содержащий включения воды, металла и резины. Процесс нагрева образца регистрировали с помощью тепловизора Thermovision 570 (спектральный диапазон 7...13 мкм, температурное разрешение 0,1 °С, частота кадров 30 Гц, формат кадра 320×240 элементов). На рис. 4 приведены термограммы образца в начале и через 12 мин после нагрева, зона 1 соответствует области с водой (льдом), зона 2 – области с резиновым включением, зона 3 – области с металлическим включением.

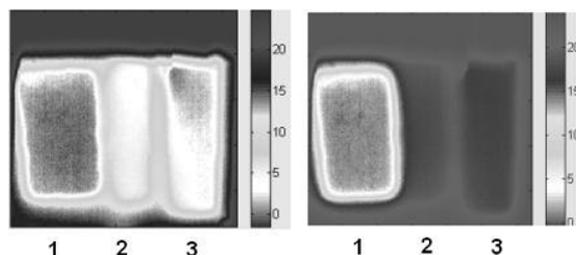


Рис. 4. Термограммы образца в начале и через 12 мин после нагрева

Экспериментальные данные обрабатывали с помощью алгоритма, реализованного с помощью пакета "Matlab 6.5" и использующего различные теплоемкости примененных материалов, а также наличие отмеченной выше "полочки", обусловленной фазовым переходом. Результатом обработки является термоизображение, на котором отчетливо видна зона с водой и отсутствуют дефектные отметки, обусловленные металлом и резиной (рис. 5).

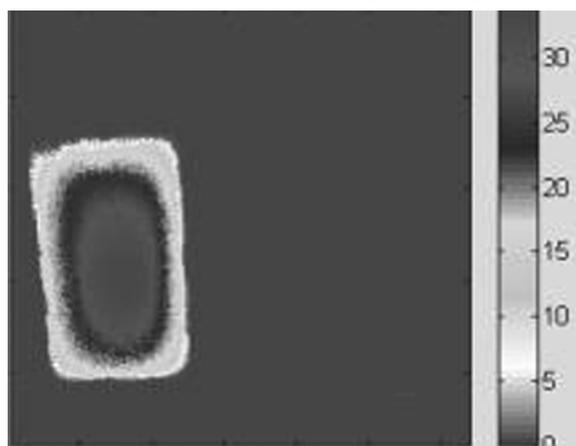


Рис. 5. Результат компьютерной обработки термограмм

### Оценка количества воды

Наряду с локализацией зон с водой, важной задачей является оценка массы накопленной воды, которая необходима для применения норматива отбраковки и последующего удаления воды из зон, признанных дефектными. В настоящее время дан-

ный норматив, как и способы "лечения" сотовых панелей, находится в стадии разработки, в частности соответствующие исследования проводятся в ГосНИИ ГА. Для определения массы воды диагностические службы российских аэропортов используют ультразвуковой метод, который позволяет измерить водяной столбик высотой более 2 мм в отдельной соте. Тепловой метод контроля до сих пор является качественным и рекомендуется в качестве скринингового или дополнительного к ультразвуковому. Представляет интерес разработать способ приближенной оценки массы скрытой воды по аномалиям температуры, что в сочетании с высокой оперативностью тепловизионных осмотров позволит повысить привлекательность теплового метода.

Можно показать, что для этого целесообразно анализировать температуру на поверхности сотовой панели в период времени, когда в массе льда/воды

происходят фазовые превращения. Например, пусть необходимо различить  $m_1=0,9$  кг и  $m_2=1$  кг воды с использованием источника энергии мощностью  $P=1$  кВт. При отсутствии фазовых переходов, для нагрева этих количеств воды на  $\Delta T=10$  °С необходимо время  $t=(cm\Delta T)/P$ , где  $c$  – теплоемкость воды – 4200 Дж/(кг·К). Тогда  $t_1=37,8$  с,  $t_2=42$  с, а разность времен  $t_2-t_1$  составит около 4 с. Если учитывать фазовые переходы, то для плавления воды массой  $m$  необходимо время  $t=(\lambda m)/P$ , где  $\lambda$  – теплота плавления льда (340 кДж/кг), тогда  $t_1=306$  с, и  $t_2=340$  с; соответственно длительность интервала наблюдения составит 34 с. Таким образом, можно предположить, что анализ температурных полей в момент фазового перехода может облегчить оценку массы накопленной воды по сравнению с моделью чистой теплопроводности. Соответствующий алгоритм находится в стадии разработки.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гиммельфарб А.Л. Основы конструирования в самолетостроении. — М.: Машиностроение, 1971. — 312 с.
2. Никитенко Н.И. Исследование процессов тепло- и массообмена методом сеток. — Киев: Наукова думка, 1978. — 213 с.
3. Вавилов В.П., Климов А.Г., Антошкин С.А., Нестерук Д.А. Тепловизионная диагностика воды в авиационных сотовых панелях // В мире неразрушающего контроля. — 2003. — № 2. — С. 11–12.

УДК 621.378:681.3:535

## АНАЛИЗ И ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕЛЕВИЗИОННОГО ПРИНЦИПА СКАНИРОВАНИЯ ФАЗОВОГО ПРОСТРАНСТВА ОПТИЧЕСКИМ ФАЗОМЕТРОМ: 1. ПОИСКОВЫЕ ТРАЕКТОРИИ

С.М. Слободян

Инновационный центр "ТЕСТ". г. Томск

E-mail: IC\_Test@inbox.ru

*Проведен анализ различных траекторий сканирования пространства оптическим следящим фазометром. Найдено, что оптимальным по вероятности обнаружения объекта при срыве слежения является алгоритм расходящегося с точки потери построения сканирования пространства наблюдения.*

Понятие локации и назначение локационных систем любого класса всегда [1–6] отождествляется с решением задачи обнаружения и определения местонахождения искомого объекта в некотором  $N$ -мерном пространстве или поле наблюдения. В качестве основных параметров, отражающих местоположение объекта, обычно принимают линейные или угловые координаты, их изменение и удаление объекта от системы в наблюдаемом пространстве. Задача обнаружения и оценки координат положения объекта в пространстве решается системами в темпе реального или квазиреального масштаба времени. Квазиреальность объясняется наличием задержки принятия решения. Подвижность объекта контроля, широкий формат пространства, весьма малые, по сравнению с форматом пространства, размеры элемента покрытия пространства, локация узконаправленными лазерными пучками

и т.д. обуславливает применение сканирования или поочередного просмотра отдельных областей – ячеек пространства. Это необходимо для получения информации об изменении в структуре наблюдаемого поля и последующего ее анализа, формирования оценок и принятия решения о наличии или отсутствии каких-либо изменений в пространстве наблюдения. Сканирование производится с целью обнаружения объектов в заданном пространстве, определения координат их местонахождения, последующей оценки их траекторных изменений при сопровождении и наведении по требуемой траектории их перемещения в координатной системе наблюдаемого пространства.

Гетеродинные интерферометрические системы обладают высокой чувствительностью среди измерительных, телевизионных, локационных и навигационных средств [1–6]. Спецификой этих систем