

ПАНЬ ЯНЯН

**КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА ВЛАГОСОДЕРЖАНИЯ В  
КОМПОЗИЦИОННЫХ СОТОВЫХ ПАНЕЛЯХ  
ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ САМОЛЁТОВ МЕТОДОМ  
ИНФРАКРАСНОЙ ТЕРМОГРАФИИ**

05.11.13 – Приборы и методы контроля природной среды,  
веществ, материалов и изделий

**АВТОРЕФЕРАТ**

**диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук**

Томск – 2018

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ФГАОУ ВО НИ ТПУ)

Научный руководитель: **Вавилов Владимир Платонович**,  
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Лобода Егор Леонидович**,  
доктор физико-математических наук, доцент,  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования Национальный исследовательский Томский государственный университет, заведующий кафедрой «Физическая и вычислительная механика»

**Худяков Павел Юрьевич**,  
кандидат физико-математических наук,  
Негосударственное частное образовательное учреждение высшего образования "Технический университет УГМК", заведующий кафедрой «Механика и автоматизация технологических процессов и производств»

Ведущая организация: Сибирский научно-исследовательский институт авиации им. С. А. Чаплыгина

Защита диссертации состоится «27» ноября 2018 года в 15:00 на заседании диссертационного совета Д 212.269.09 при ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», по адресу: 634028, г. Томск, ул. Савиных, 7, ауд. 215.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» и на сайте: <http://portal.tpu.ru/council/916/worklist>

Автореферат разослан « » 2018 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
кандидат технических наук, доцент

Шевелева Е.А.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность диссертационных исследований** обусловлена: 1) возрастающим применением композиционных материалов и сотовых панелей в современных самолетах; 2) влиянием накапливаемой в сотовых панелях воды на экономичность и безопасность полёта; 3) ограниченностью существующих методов контроля воды и необходимостью разработки новых способов и аппаратуры неразрушающих испытаний, что обеспечило бы высокопроизводительную оценку влагосодержания в сотовых панелях эксплуатируемых самолетов.

### **Степень разработанности темы**

Обзор состояния ТК был сделан в ряде статей отечественных и зарубежных авторов, включая кандидатские диссертации последних лет, выполненные в ТПУ (В.С. Хорев, А.О. Чулков, Д.А. Дерусова). В России сложился ряд школ, разрабатывающих отдельные аспекты активного теплового метода: В.П. Вавилов и др. в ТПУ, О.Н. Будадин и др. в ЦНИИ специального машиностроения, Е.В. Абрамова в МГТУ им. Н.А. Баумана, Н.Ф. Майникова в ТГТУ. Значительное число исследователей работают в смежных областях ИК термографии, в особенности, в пассивной ИК диагностике (В.А. Захаренко в ОмГТУ, О.А. Плехов в ИМСС УрО РАН, Е.Л. Лобода в ТГУ, А.В. Лукьянов в ИрГУПС, В.В. Коннов в НПО «Молния»). За рубежом наиболее активными исследователями в данной области являются Х. Maldague (Канада), D. Burleigh (США), G. Busse (Германия), D. Balageas (Франция), D. Almond (Великобритания) и др. В аспекте ТК воды в авиационных сотовых панелях наиболее близкой к настоящей работе являются исследования Ю.А. Миколайчука (ГосНИИ ГА), Д.А. Нестерука (ТПУ).

**Цель исследования** – Разработка метода, алгоритма обработки результатов контроля и аппаратурной базы для обнаружения и приближенной количественной оценки скрытой воды в сотовых панелях эксплуатируемых самолётов.

### **Задачи исследования:**

- проанализировать процесс нестационарной теплопередачи в сотовых структурах, содержащих скрытую воду, в условиях, когда вода контактирует с контролируемой обшивкой, а также отделена от нее воздушным промежутком; выбрать информативный параметр для принятия решения о наличии/отсутствии воды; теоретически решить задачу приближенной оценки влагосодержания; оптимизировать процедуру контроля;
- выполнить экспериментальные исследования сотовых панелей с целью количественной оценки влагосодержания, на основании чего определить предельные возможности метода;
- разработать компьютерное приложение для сбора и первоначальной обработки тепловизионных данных на платформе Android современных смартфонов; разработать методику теплового контроля для оценки воды в сотовых панелях;
- выполнить практическую съемку самолетов в условиях реальной эксплуатации.

**Объектом исследования** является активный тепловой неразрушающий материалов и изделий с использованием внешней тепловой стимуляции.

**Предметом исследования** являются теоретический анализ теплопередачи в сотовых структурах с водой и усовершенствование экспериментального метода активного ТК авиационных сотовых панелей.

### **Научная новизна**

- Предложен алгоритм дискриминации скрытой воды и клея в сотовых структурах путем исследования тепловой инерции контролируемой панели в режиме нестационарного нагрева, основанный на различной теплоемкости воды и клея. Получено выражение, позволяющее оптимизировать период регистрации тепловой инерции контролируемой панели в зависимости от толщины и теплопроводности обшивки.

- Впервые детально исследованы особенности теплопередачи в сотовых панелях со скрытой водой, в результате чего предложен алгоритм приближенной количественной оценки влагосодержания и определены предельные возможности теплового контроля. Теплопередача в многослойных дефектных структурах со скрытой водой определяется высокой теплоемкостью воды, что приводит к специфическому поведению температурных сигналов в зонах с и может быть использовано для приближенной количественной оценки влагосодержания, однако погрешность таких оценок достаточно высока. Величины температурных контрастов над скрытой водой, в основном, определяются соотношением теплофизических характеристик (ТФХ) воды и воздуха и в меньшей степени зависят от ТФХ и толщины композиционной обшивки.

- Если вода находится в контакте с обшивкой, температурные сигналы сравнительно слабо зависят от толщины воды, в то время как наиболее значимым параметром является время наблюдения, которое значительно уменьшается с уменьшением массы воды в диапазоне влагосодержания  $W$  от 0 до 50%. Присутствие воздушного промежутка между водой и обшивкой делает температурный контраст и время его наблюдения зависимыми от  $W$ . В частности, температурный контраст может быть использован в качестве информативного параметра во всем диапазоне  $W$  (0-100%), тогда как время наблюдения температурных сигналов можно использовать для оценки влагосодержания в диапазоне  $W \sim 40-100\%$ .

**Практическая значимость** работы заключается в следующем.

- Разработана методика и программное обеспечение на платформе Android для обнаружения и приближенной оценки массы воды в сотовых панелях самолетов, использованные при практической инфракрасной (ИК) съемке самолетов в условиях эксплуатации.

**Основные положения, выносимые на защиту**

- Дискриминацию воды и клея в ячейках сотовых конструкций следует осуществлять по параметру тепловой инерции при импульсном тепловом

возбуждении обшивки, причем существует оптимальное время контроля, при котором различия в тепловой инерции максимальны вследствие различия в теплоемкости указанных веществ.

- Теплопередача в многослойных дефектных структурах со скрытой водой определяется высокой теплоемкостью воды, что приводит к специфическому поведению температурных сигналов в зонах с водой и может быть использовано для приближенной количественной оценки влагосодержания, однако погрешность таких оценок достаточно высока.

- Выбор параметров ТК, используемых для приближенной оценки массы воды, зависит от того, контактирует ли вода в ячейках с обшивкой сот или отделена от обшивки воздушным промежутком. В первом случае информативным параметром является характерное время контроля, во втором – как время контроля, так и температурный сигнал или контраст температуры.

### **Реализация результатов работы**

Результаты диссертационных исследований использованы при пробной инспекции самолета Boeing-737 в аэропорту г. Томска.

**Достоверность полученных теоретических и экспериментальных результатов** обеспечивается использованием современной тепловизионной аппаратуры, позволяющей измерять абсолютные температуры с основной погрешностью не более  $\pm 1\%$  или  $\pm 1^\circ\text{C}$  и дифференциальные температуры с чувствительностью до  $0,03^\circ\text{C}$ . Валидация программы трехмерного численного моделирования ThermoCalc-3D осуществлена с использованием классических аналитических решений теории теплопроводности. Для обработки экспериментальных ИК термограмм использованы известные методы компьютерного анализа изображений и статистической обработки результатов измерений. Полученные теоретические и экспериментальные результаты не противоречат общефизическим принципам и результатам, полученным другими авторами на сходных объектах исследований.

### **Апробация работы**

Результаты диссертационных исследований докладывались на Международной конференции по количественной ИК термографии QIRT, Польша, 2016 г., конференции Международного общества оптической техники и фотоники SPIE “Thermosense”, США, 2016 г., а также ряде конференций регионального уровня.

### **Личный вклад автора** заключается в:

- выполнении теоретических расчетов с использованием программы ThermoCalc-3D;
- изготовлении стандартных образцов и проведении экспериментальных исследований, включая обработку данных с помощью программы ThermoFit Pro;
- разработке программного обеспечения на платформе Android;
- проведении экспериментальных обследований самолетов в условиях аэропорта.

### **Связь диссертационных исследований с научно-техническими программами и грантами**

Диссертационные исследования связаны с выполнением гранта РФФИ № №17-19-01047 «Разработка метода и аппаратуры динамической тепловой томографии композиционных материалов», а также контракта №5-285/14 от 18.11.2014 г. «Неразрушающий контроль авиационных и космических материалов методом активной количественной инфракрасной термографии (AQIRT)».

### **Публикации**

Соискателем опубликовано 8 работ, все по теме диссертации, в том числе, 1 статья в журнале, входящем в список ВАК, 5 статей в изданиях, индексируемых в базах данных SCOPUS и Web of Science (4 статьи в журналах с импакт-фактором более 1).

### **Структура и объем диссертационных исследований**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников, включающего 125 работ, протокола тепловизионной диагностики самолета, содержит 118 страниц текста, 83 рисунка, 110 формул и 18 таблиц.

### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** описаны актуальность, научная новизна и практическая значимость диссертационных исследований. Сформулирована цель диссертационной работы, поставлены основные задачи исследований, представлены основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** на основе выполненного обзора научно-технической литературы констатировано, что, в силу специфических свойств композитов, разработка новых и усовершенствование имеющихся композиционных материалов продолжится. Композиты из матрицы и армирующих волокон останутся наиболее важным материалов в высокотехнологичных отраслях промышленности. По сравнению с традиционными материалами, авиационные композиты повышают экономичность полетов, снижают количество деталей и упрощают процесс эксплуатации самолетов. По мере разработки новых технологий проектирования и производства, а также улучшения возможностей технической диагностики и снижения стоимости, композиционные материалы будут всё более заменять традиционные материалы в авиастроении.

Сотовые панели являются важным конструкционным элементом конструкции планера самолетов, поскольку они широко применяются для изготовления рулей высоты и направления, фюзеляжа, обтекателя антенны, закрылков и т.д. Скрытая вода является типичным дефектом сотовых панелей, следовательно, контроль и диагностика этого вида дефекта необходимы для обеспечения экономичности и безопасности полета.

Разработано несколько методов для обнаружения воды в самолетных панелях, в частности, рентгеновский, ультразвуковой и тепловой. Исходя из таких требований как портативность, безопасность, производительность и

возможность количественной оценки влагосодержания, ТК можно рассматривать в качестве приоритетного метода контроля.

Способы ТК воды можно разделить на активный и пассивный, причем в авиации они должны быть реализованы только в односторонней процедуре испытаний. В последнее десятилетие были сделаны попытки использовать активный ТК для обнаружения и количественной оценки воды в сотовых панелях с использованием импульсного нагрева, однако диапазон возможных количественных оценок оказался весьма ограниченным ввиду малой толщины «столбика» обнаруживаемой воды. Пассивный способ позволяет эффективно обнаруживать воду, но возможность количественных оценок не исследовалась.

Активный тепловой контроль, характеризующийся сравнительно высокой производительностью и слабо зависящий от внешних условий (температуры, ветра, постороннего теплового излучения), обладает значительным практическим потенциалом и выбран в качестве области настоящих диссертационных исследований. Анализю подлежит процесс теплопередачи в сотовых панелях со скрытой водой, причем в качестве основного информативного параметра следует выбрать безразмерный контраст температуры.

Неравномерность клеевого слоя и наличие клея в ячейках сот является дефектом, подлежащим выявлению. Кроме того, необходимо различать ячейки с водой и клеем, создающие сходные температурные сигналы при внешней тепловой стимуляции.

Различие в ТФХ воды, обшивки и эпоксидного клея дает возможность обнаружить и количественно оценить влагосодержание. Выбранный для принятия решения информативный параметр должен быть основан на комбинации ТФХ контролируемой панели, в особенности, учитывать аномально высокую теплоемкость воды.

В заключение сделан вывод, что активный ТК воды в сотах целесообразно производить с использованием оптических нагревателей и ИК тепловизоров.

**Вторая глава** посвящена теплофизическому анализу обнаружения воды и клея в сотах. Практическим основанием этого исследования является необходимость дискриминации между этими двумя субстанциями, поскольку вода является серьезным эксплуатационным дефектом, подлежащим устранению, например, в условиях ангара на снятых с самолета панелях. В то же время наличие клея в отдельных сотах, как правило, не приводит к снижению эксплуатационных характеристик панелей. Проблема состоит в том, что при использовании существующих методик контроля, например, «тепловых одеял» в корпорации Airbus, тепловые отпечатки воды и клея неразличимы.

Выполнен анализ 1D и 3D моделей обнаружения воды в авиационных сотовых панелях, причем анализ сделан на оценку массы воды и дискриминацию воды и эпоксидного клея. Исследуемая геометрия контроля показана на Рис. 1.

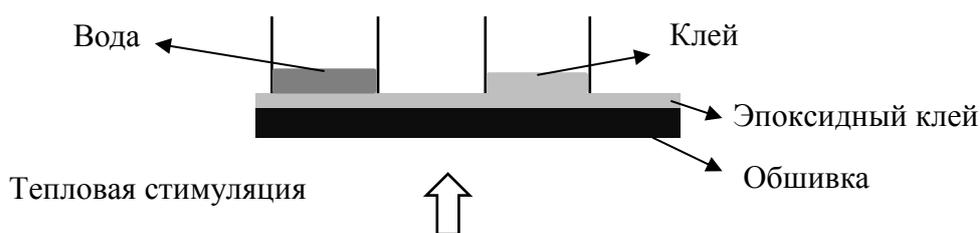


Рисунок 1 – Дискриминация воды и клея в сотовой панели.

Одномерный (1D) анализ основан на использовании сравнительно малоизвестного выражения для температуры на поверхности покрытия на полуограниченном теле после воздействия прямоугольного импульса (применено нами для расчета многослойных структур):

$$T_c(\tau) = \frac{W}{e_c \sqrt{\pi \tau}} [1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-G)^n e^{-n^2 / Fo_c}]. \quad (1)$$

Здесь:  $e$ - тепловая инерция рассматриваемого материала;  $W$ - плотность поглощенной энергии (Дж/м<sup>2</sup>);  $Fo = a\tau/L^2$ - число Фурье;  $L$ - толщина пластины;  $a$ - коэффициент температуропроводности;  $e_c$ - тепловая инерция материала покрытия;  $G = \frac{e_s - e_c}{e_s + e_c}$  - коэффициент отражения тепловой волны;  $Fo_c$ - число Фурье по отношению к покрытию; индексы «с» и «с» относятся соответственно к покрытию и подложке.

Трехмерный (3D) анализ основан на использовании базовой модели ТК, разрабатываемой в ТПУ на протяжении многих лет (описание модели не приводится, поскольку она была рассмотрена в ряде ранних публикаций и диссертаций). Для целей данных исследований нами была предложена модификация известной программы ThermoCalc-3D, предусматривающая введение до 40 дефектов в тело, включающее до 36 слоев. Такая геометрия позволяет моделировать отдельные соты при полном или частичном их заполнении водой и клеем.

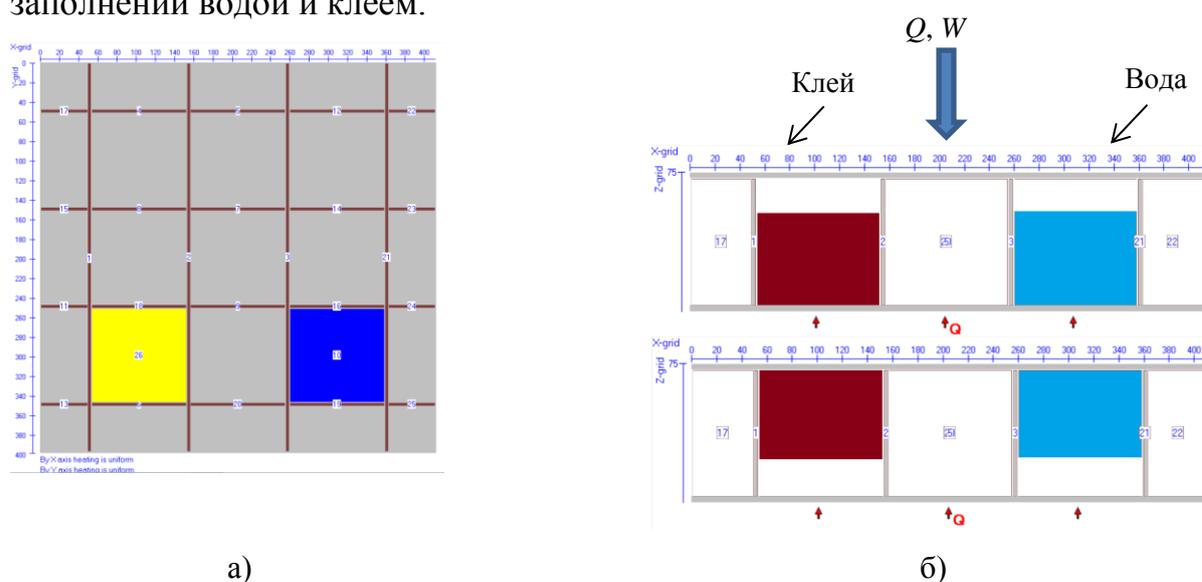


Рисунок 2 – Геометрия обнаружения воды и клея в ячейках сотовой панели: а – вид сверху; б – вид сбоку (показан контроль «сверху» и «снизу» панели).

Поверхностные температурные сигналы максимальны, если вода контактирует с обшивкой сот со стороны поверхности контроля. В этом случае можно отличить тонкие слои воды от значительной массы воды. Таким образом, оценка массы воды по величине температурных сигналов весьма затруднительна. Если вода отделена от контролируемой обшивки воздушным зазором, то температурные сигналы снижаются приблизительно на порядок, а оптимальные времена контроля существенно затягиваются. Величины температурных контрастов над скрытой водой, в основном, определяются соотношением ТФХ воды и воздуха и в меньшей степени зависят от ТФХ и толщины композиционной обшивки.

В классической процедуре активного ТК вода и эпоксидный клей практически неразличимы, если дискриминацию этих веществ проводить только

по температуре поверхности. В качестве критерия принятия решения предложена тепловая инерция, являющаяся справочной характеристикой материала ( $e = \sqrt{\lambda C \rho}$ , где  $\lambda$ -коэффициент теплопроводности,  $C$ -удельная теплоемкость,  $\rho$ -плотность материала). Для воды  $e=1573 \text{ Втс}^{1/2}/(\text{м}^2\cdot^\circ\text{C})$ . для эпоксидного клея  $e=487,4 \text{ Втс}^{1/2}/(\text{м}^2\cdot^\circ\text{C})$ . Соответственно, коэффициенты отражения импульсной тепловой волны  $G$ , входящие в формулу (1), на границе углепластик-воздух:  $G= -0.986$ , углепластик-вода:  $G= 0.107$ , углепластик-клей:  $G= -0.445$ . Предложена концепция «кажущейся» тепловой инерции  $e_{ap}$ , отличающейся от истинной тем, что ее величину определяют экспериментально в зависимости от времени по формуле:

$$e_{ap}(\tau) = \frac{W}{T_{exp}(\tau)\sqrt{\pi\tau}}, \quad (2)$$

где  $T_{exp}(\tau)$  – функция изменения температуры во времени,  $W$  –поглощенная энергия,  $\tau$ -время.

Данная концепция проиллюстрирована на Рис. 3. Температурные отметки воды и клея (Рис. 3а,б) различаются только амплитудой полезного сигнала, и в случае неизвестной массы воды их невозможно различить. Однако вода, клей и воздух отчетливо различаются при анализе изменения кажущейся тепловой инерции во времени (Рис. 3в). Теоретически доказано, что, начиная с так называемой точки «перегиба», вода может быть идентифицирована по возрастающей величине тепловой инерции по сравнению со спадающей кажущейся тепловой инерции в зонах, заполненных эпоксидных клеом.

В первой главе также исследовано влияние на результаты ТК воды и клея в сотах материала обшивки сот (стекло- и углепластик), ее толщины и длительности теплового импульса нагрева.

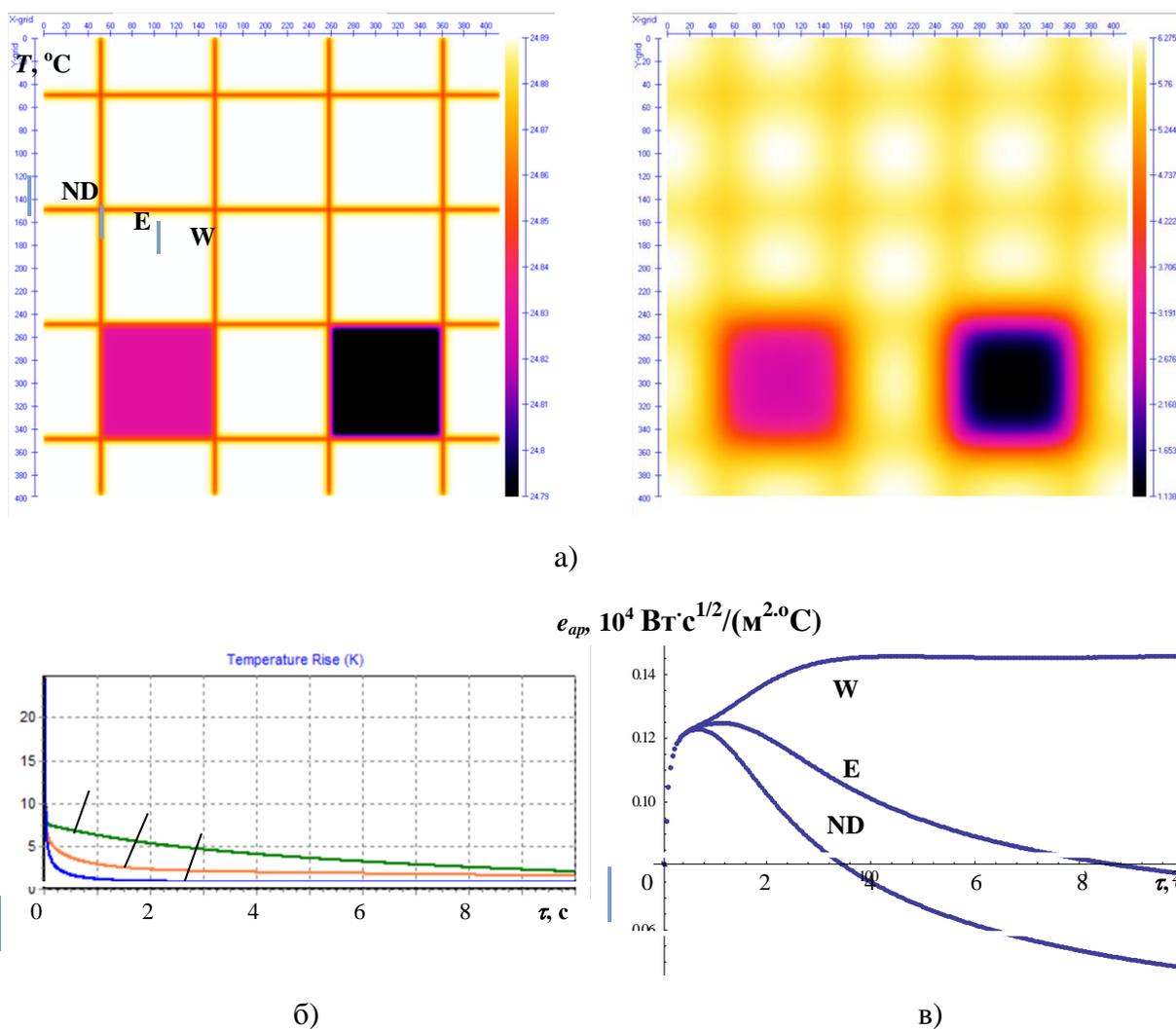


Рисунок 3 – Результат анализа 3D модели ТК воды и клея в сотах (см. Рис. 2, мощность импульса  $Q=10^5 \text{ Вт/м}^2$ , длительность импульса  $\tau_h=0,1 \text{ с}$ , влагосодержание 100%; W-вода, E-клей, ND-бездефектная область):

- а – распределение температуры в момент времени 0,1 с (слева) and 10 с (справа);
- б – температурный профиль  $T$  как функция  $\tau$ ;
- в –  $e_{ap}$  как функция  $\tau$ .

**Третья глава** посвящена анализу возможности количественной оценки влагосодержания в композиционных сотовых панелях методом активного ТК. В качестве примера исследованных геометрий ТК на Рис. 4 приведены схемы активного ТК влагосодержания в горизонтальной сотовой панели.

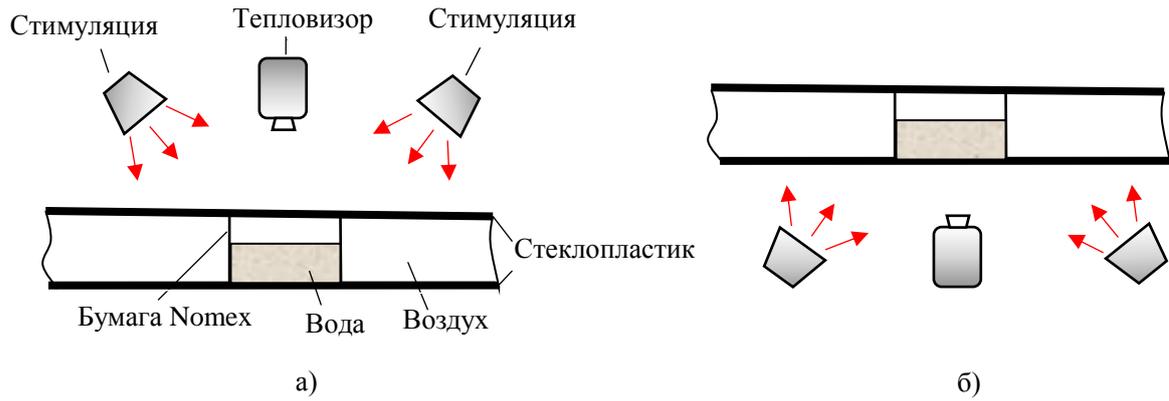
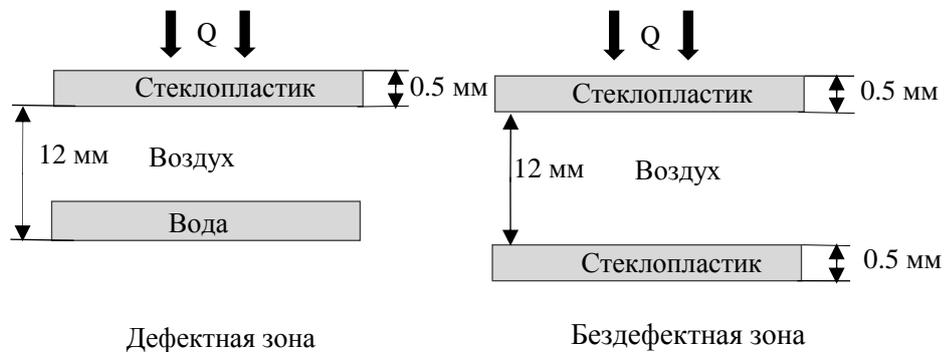


Рисунок 4 – Схема активного ТК влагосодержания в горизонтальных сотовых панелях сверху (а) и снизу (б).

На Рис. 5 показана одномерная модель ТК воды, которую анализировали с помощью программы Layer-3 Analytic, разработанной в ТПУ. В программе реализовано аналитическое решение задачи нагрева трехслойной пластины.

В ТК влагосодержания анализируют два параметра идентификации дефектов: дифференциальный температурный сигнал  $\Delta T = T_d - T_{nd}$  (вместе со временем его наблюдения  $\tau(\Delta T)$ ) и текущий контраст  $C = \Delta T / T_{nd}$  (вместе со временем его наблюдения  $\tau(C)$ ); здесь  $T_{nd}$  и  $T_d$  являются избыточными температурами в бездефектной и дефектной зонах соответственно. Вследствие линейности теплопередачи величины  $T$ ,  $T_d$  и  $T_{nd}$  пропорциональны мощности тепловой стимуляции  $Q$ , которую на практике с трудом удается контролировать. Поэтому безразмерный контраст  $C$ , не зависящий от  $Q$ , используют как наиболее эффективный критерий сравнения различных процедур ТК.



а)

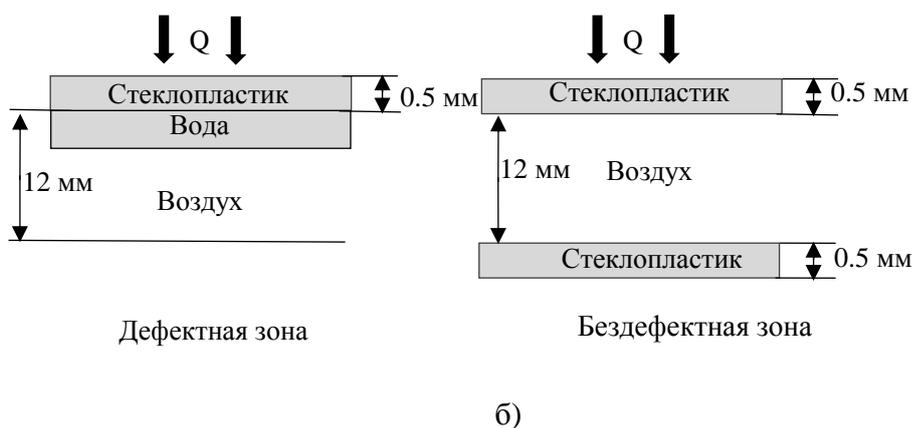


Рисунок 5 – Одномерная модель ТК воды (программа Layer-3 Analytic):  
а – схема согласно Рис. 4а, б – схема согласно Рис. 4б.

Зависимости  $C$  и  $\tau(C)$  от параметров дефекта детально исследованы в теории ТК при выявлении газонаполненных дефектов. Применительно к обнаружению воды в сотовых панелях эволюция параметра  $C(\tau)$  показана на Рис. 6.

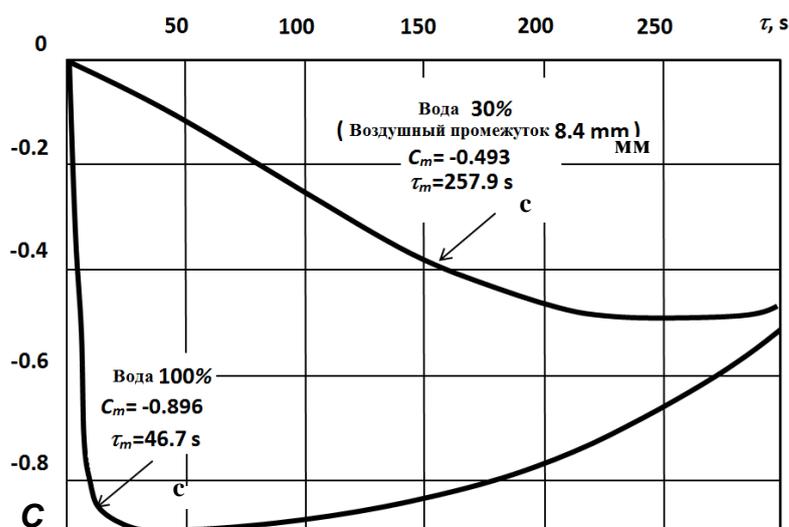


Рисунок 6 – Эволюция температурного контраста  $C(\tau)$  в одномерной модели (толщина стеклопластиковой обшивки 0,5мм, высота ячейки 12 мм, длительность нагрева 5 с).

В отличие от «классического» ТК, вода в качестве скрытого дефекта приводит к отрицательным дифференциальным температурным сигналам на поверхности, т.е. зоны скопления воды нагреваются медленнее, чем бездефектные участки. Когда вода прилегает к наблюдаемой обшивке (как показано на Рис. 5б), модуль температурного сигнала и контраста быстро достигает максимума. Наличие воздушного промежутка (как показано на Рис.

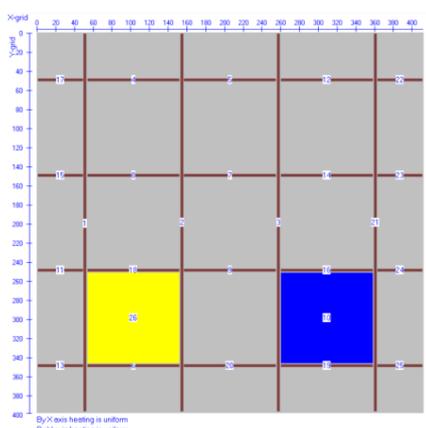
5а) ослабляет сигнал в дефектной зоне, и процесс изменения температурных сигналов происходит медленнее.

Анализировали авиационную сотовую панель, обшивка которой изготовлена из стеклопластика толщиной 0.5 мм при высоте ячеек 12 мм. Результаты моделирования, полученные для длительности тепловой стимуляции 5 с, приведены в Табл. 1.

Трехмерное моделирование применимо к дефектным зонам с любыми геометрическими параметрами. В частности, в трехмерной модели можно учитывать такие факторы как конечную толщину стенок сот сотовых конструкций, а также капиллярный эффект. На Рис. 7 показана трехмерная модель ТК при различных вариантах расположения воды, включая воду, поднимающуюся против действия сил гравитации тонким слоем вдоль стенок сот вследствие капиллярного эффекта (Рис. 7ж), а также гипотетический случай размещения тонкого слоя воды внутри ячейки на некоторой высоте (Рис. 7е). В расчетах использована программа ThermoCalc-3D ТПУ.

**Таблица 1 - Результаты одномерного моделирования.**

Объем воды	$C_m/\tau_m, c$	
	модель по Рис 5а	модель по Рис 5б
100%	-0,896/46,7	-0,896/46,8
90%	-0,866/106,8	-0,896/46,9
70%	-0,777/199,3	-0,896/46,7
50%	-0,657/244,4	-0,896/45,4
30%	-0,493/257,9	-0,887/32,3
20%	-0,383/249,8	-0,866/21,9
10%	-0,225/221,6	-0,792/12,3



а)



б)

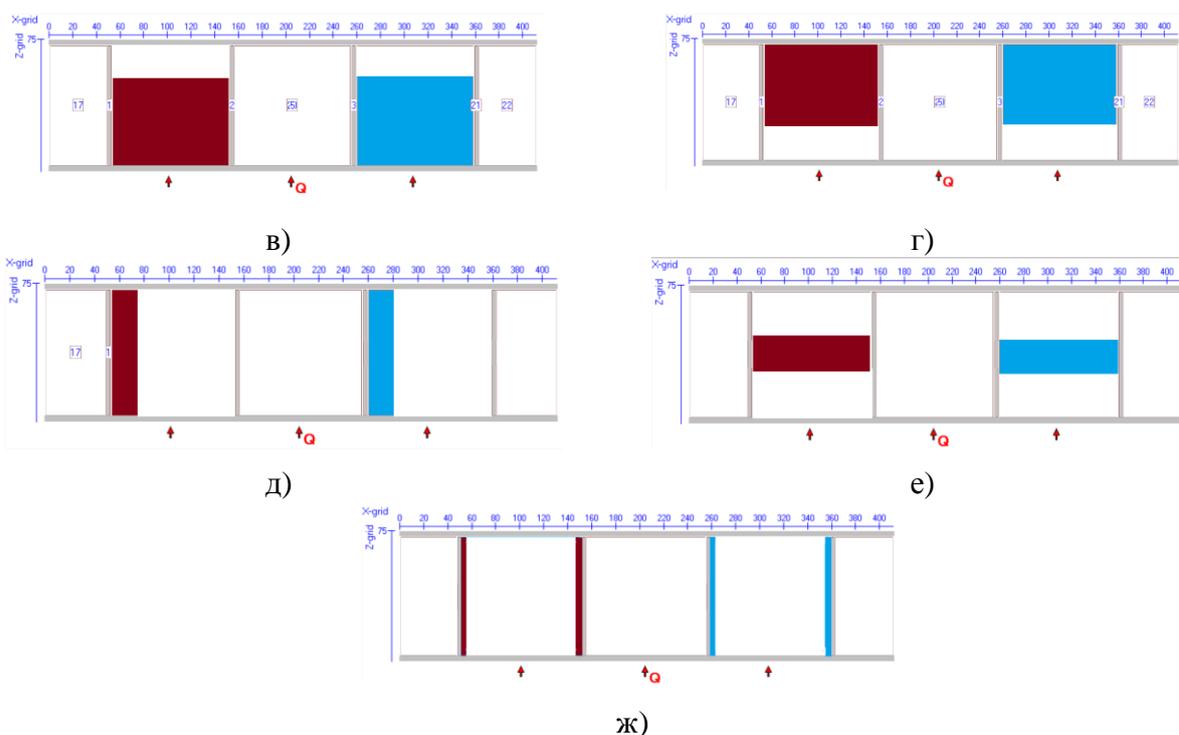


Рисунок 7 – Трехмерная модель (программное обеспечение ThermoCalc-3D): а – схема расчета (вид сверху); б – 100 % влагосодержание; в – вода внизу, нагрев снизу; г – вода внизу, нагрев сверху; д – «боковая» вода; е – гипотетический случай расположения воды; ж – капиллярная вода.

Количественная оценка воды может осуществляться умножением плотности воды на ее объем. В данной работе исследовали дифференциальный сигнал  $\Delta T_m$  и контраст  $C_m = (\Delta T/T)_m$ , а также соответствующие оптимальные времени наблюдения. Результат моделирования приведен в Табл. 2 и на Рис. 8. В дефектных зонах температура ниже, чем температура соседних участков (Рис 8а). Из Табл. 2 видно, что если вода прилегает к наблюдаемой обшивке и влагосодержание снижается от 100% до 10%, то контраст  $C_m$  уменьшается на 12,7 %. В случае эпоксидного клея снижение  $C_m$  составляет 23%. Надо подчеркнуть, что параметр  $C_m$  нас более интересует, поскольку он не зависит от мощности нагрева. Более чувствительным параметром является время наблюдения  $\tau_m$ : оно изменяется приблизительно на 62%. «Боковая» вода может быть легко обнаружена, несмотря на то, что объем воды невелик (Рис. 8в). Вышеуказанные особенности объясняются большой теплоёмкостью воды.

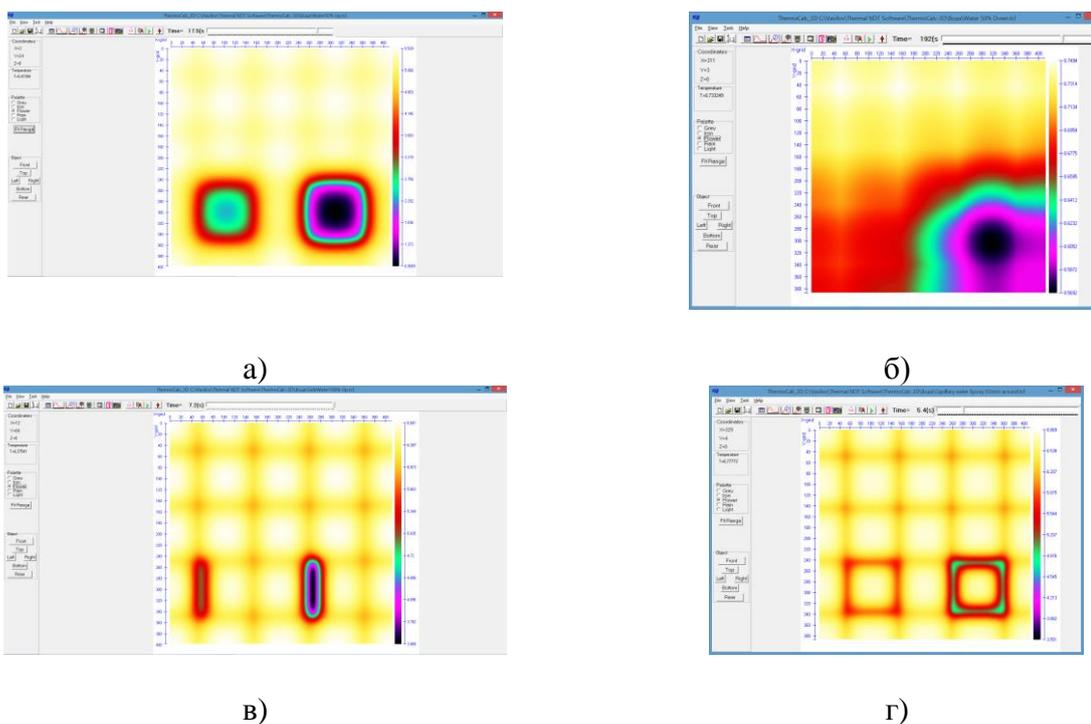


Рисунок 8 – Распределение температуры в трехмерной модели (ThermoCalc-3D):

- а – влагосодержание 50% (вода прилегает к наблюдаемой обшивке), время наблюдения 17,7 с;
- б – 50% (вода прилегает к задней обшивке), 192 с;
- в – 10% (боковая вода), 7,2 с;
- г – толщина водяного слоя 0.3мм (капиллярная вода), 5,4 с.

Моделирование показало, что при наличии воздушного промежутка между обшивкой и водой (см. Рис. 8) воздух действует как теплоизолятор, который снижает температурный сигнал и контраст и увеличивает время наблюдения. Ряд «аномальных» значений  $\tau(C_m)$  в Табл. 2 объясняются тем, что максимальные сигналы возникают при весьма больших временах наблюдения, когда температурный сигнал  $\Delta T$  становится пренебрежимо малым.

Значительное место в третьей главе посвящено экспериментальным исследованиям и их сравнению с теоретическими предсказаниями. Исследован ряд стандартных образцов сот с различным влагосодержанием. Пример качественного сравнения данных приведен на Рис. 9.

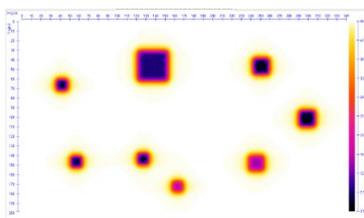
Таблица 2 - Результаты трехмерного моделирования (модели Рис. 8).

Дефект (объем ячейки)	Вода		Эпоксидный клей	
	$\Delta T_m, ^\circ\text{C}$ ( $\tau_m, \text{c}$ )	$C_m$ ( $\tau_m, \text{c}$ )	$\Delta T_m, ^\circ\text{C}$ ( $\tau_m, \text{c}$ )	$C_m$ ( $\tau_m, \text{c}$ )
100 % ( $\tau_h=0,1 \text{ s}$ )				
100%	-5,26 (6,4)	-0,836 (17,7)	-3,41 (9,6)	-0,574 (19,0)
100 % ( $\tau_h=3 \text{ s}$ )				
100%	-5,24 (8,0)	-0,832 (18,7)	-3,39 (11,1)	-0,573 (20,5)
Вода прилегает к наблюдаемой обшивке ( $\tau_h=0,1 \text{ c}$ )				
50%	-5,25 (6,4)	-0,835 (17,7)	-3,40 (9,6)	-0,573 (18,9)
25%	-5,25 (6,4)	-0,826 (14,3)	-3,39 (9,3)	-0,560 (15,5)
10%	-4,98 (4,5)	-0,730 (6,6)	-2,96 (5,5)	-0,442 (7,2)
5%	-4,21 (2,9)	-0,593 (3,7)	-2,18 (3,0)	-0,307 (3,7)
Вода прилегает к задней обшивке ( $\tau_h=0,1 \text{ c}$ )				
50%	-0,438 (63,4)	-0,215 (192)	-0,295 (50,3)	-0,099 (92,7)
25%	-0,148 (51)	-*	-0,103 (38)	-
10%	-0,0474 (64)	-	-0,0313 (59)	-
5%	-0,0223 (67)	-	-0,0149 (62)	-
Вода в центре ячейки ( $\tau_h=0,1 \text{ c}$ )				
10%	-0,440 (46,4)	-0,133 (70,2)	0,271 (33,6)	-0,663 (45,9)
Боковая вода ( $\tau_h=0,1 \text{ c}$ )				
10%	-3,25 (3,8)	-0,474 (7,2)	-1,64 (3,9)	-0,238 (6,0)
Капиллярная вода ( $\tau_h=0,1 \text{ c}$ )				
Толщина 0,3 мм	-1,279 (5,4)	-0,216 (20,1)	-0,938 (3,0)	-0,133 (4,5)

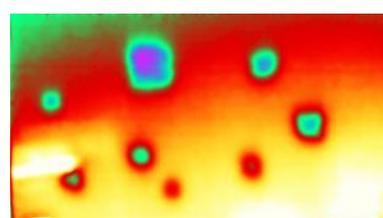
\* Отрицательный текущий контраст возрастает, когда дифференциальный сигнал стремится к нулю.



а)



б)



в)

Рисунок 9 – Фото эксперимента (а), моделирование (б) и экспериментальный анализ (в) стандартного образца из стеклопластика (обшивка 0,5 мм; ячейки Nomex высотой 12 мм, нагрев в течение 5 с, вода в контакте с обшивкой, температурное поле через 12 с после начала охлаждения).

Количественные аспекты ТК исследовали на образце из углепластика, в котором влагосодержание изменяли от 10 до 100 %. Образец нагревали в течение 10 секунд двумя галогеновыми лампами мощностью 1 кВт каждая. Примеры ИК термограмм при контроле «сверху» приведены на Рис. 10; отчетливо видно влияние толщины воздушного промежутка между водой и контролируемой обшивкой; уверенно обнаруживается вода массой 70-90%.

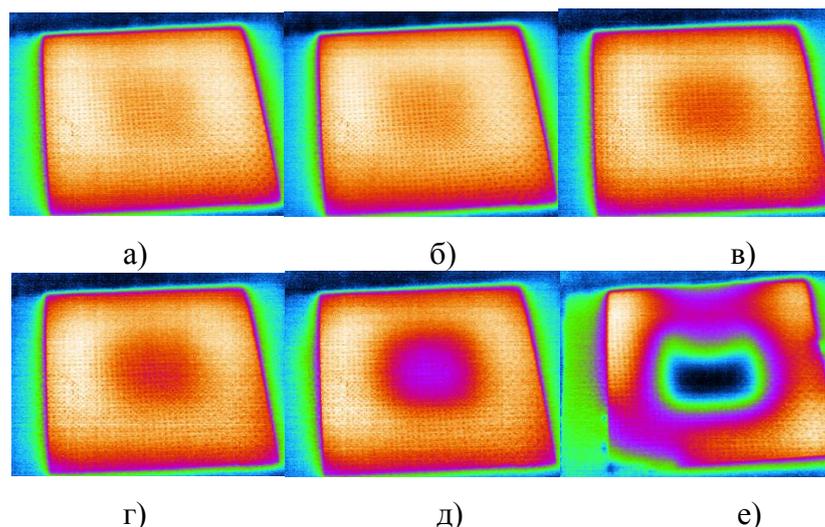


Рисунок 10 – Термограммы образца размером 100x100x22 мм с обшивкой из углепластика толщиной 2 мм (дефект размером 38x38 мм, влагосодержание изменяется от 10 до 100 %) при одностороннем ТК «сверху»: а – влагосодержание 10% (время оптимального отношения сигнал/шум 82,8с); б –30% (82,2 с); в –50% (127,2 с); г –70% (12,2с).

Анализ полученных результатов показал сравнительно слабую зависимость параметров идентификации  $\Delta T$  и  $C$  от  $W$  в диапазоне от 0 до 70%, что объясняет значительное отличие экспериментальных данных от теоретических (сравнительные данные приведены в Табл. 2). Соответствующая калибровочная кривая приведена на Рис. 11а.

Таблица 2 - Теоретические и экспериментальные результаты ТК «сверху» (образец Рис. 10).

Влагосодержание (толщина слоя воды, мм)	$C_m (\tau_m, c)$	
	Теория	Эксперимент
100% (18)	-0,749 (61,5)	-0,690 (52)
90% (16,2)	-0,4223 (160)	-0,321 (163)
70% (12,6)	-0,2103 (241,5)	-0,180 (194)
50% (9)	-0,1305 (279,5)	-0,134 (225)
30% (5,4)	-0,08784 (288,5)	-0,108 (172)
10% (0,9)	-0,06 (272,5)	-0,08 (166)

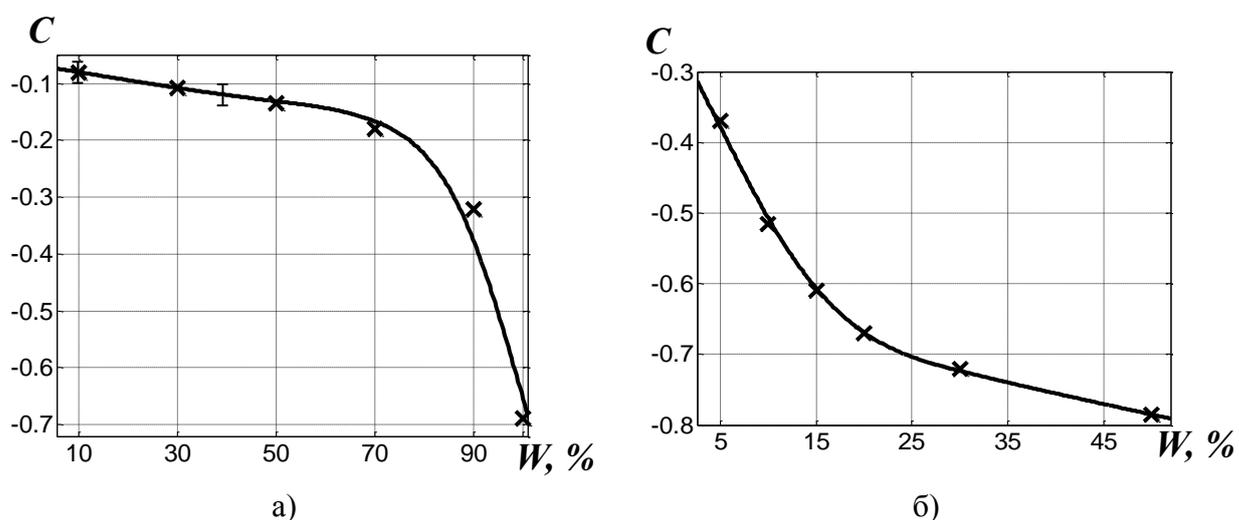


Рисунок 11 – Калибровочные зависимости текущего контраста от влагосодержания  $C(W)$  в образце: при одностороннем ТК: а – «сверху»; б – «снизу».

Аналогичные эксперименты были проведены при ТК «снизу». Установлено, что при визуальном восприятии результатов ТК практически невозможно выявить различия в массе воды, если влагосодержание превышает 15%, поскольку соответствующие дефектные отметки выглядят так же, как и при 100%-м заполнении ячеек. Очевидно, что это связано с общей высокой теплоемкостью слоя воды, прилегающей к обшивке, по сравнению с теплоемкостью обшивки над «сухими» сотами. Визуальная оценка массы воды в этом режиме возможна только в интервале влагосодержания от 0 до 15%. Более строгий вывод о возможности количественной ИК термографии следует из графика Рис. 11б, иллюстрирующего зависимость  $C$  от  $W$ . Видно, что эта зависимость является весьма крутой в диапазоне 0-15%, тем не менее, возможность оценивать массу воды, то есть определять толщину «столбика» воды, сохраняется до  $W \sim 50\%$ . Сравнение теории и эксперимента для данного случая приведено в диссертации.

Исследован такой практический фактор ТК реальных самолетов как расположение контролируемых панелей под углом к горизонту. Установлено, что различия при контроле наклонной и горизонтальной панелей сравнительно невелики, что говорит о слабом влиянии толщины столбика воды на регистрируемые параметры температурного поля.

В целом, экспериментальные исследования, проведенные на стандартном образце сотовой панели, продемонстрировали разумное согласие

экспериментальных и теоретических величин  $C_m$  и  $\tau_m$ , в то время как ряд алгоритмов обработки данных, принятых в ТК, в частности, нормализация, Фурье-анализ, метод анализа главных компонент и корреляционный анализ, обеспечивают приблизительно двукратное улучшение отношения сигнал/шум.

В **четвертой** главе приведены технические характеристики тепловизионного модуля ThermApp производства фирмы Orgal и описано программное обеспечение на платформе Android для ТК воды в сотовых конструкциях. Опыт применения тепловизоров в ряде российских аэропортов показал, что практически приемлемым средством технической диагностики самолетов являются малогабаритные тепловизионные модули, в особенности, устанавливаемые на смартфонах. Устройство ThermApp позволяет записывать отдельные термограммы, но не последовательности ИК изображений, что необходимо для тепловизионной диагностики воды. Кроме того, в настоящее время в мире отсутствуют приложения на платформе Android, предназначенные для обработки инфракрасных термограмм по определенным алгоритмам.

Проверка применимости модуля ThermApp и разработанного программного обеспечения выполнены при диагностике самолета Boeing-737 в аэропорту Богашево г. Томска (Рис. 12а) по договоренности с авиакомпанией «Аэрофлот». Сделан вывод об удовлетворительном состоянии самолета с точки зрения содержания воды в сотовых конструкциях. Обнаружено две зоны предположительного влагосодержания в руле направления и фюзеляже самолета (Рис. 12б).

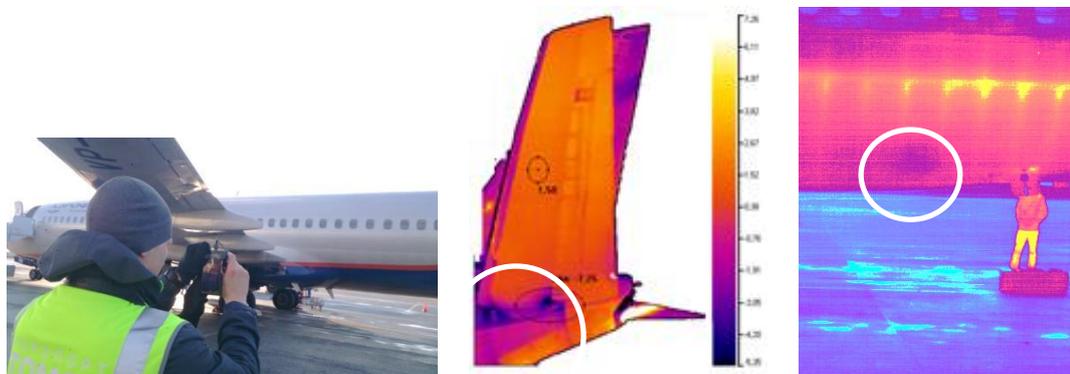


Рисунок 12 – Тепловизионное обследование самолета Boeing-737 (Томск, апрель 2018 г.): рабочий момент съемки модулем ThermApp и термограммы двух зон с предположительным влагосодержанием (обозначены овалами белого цвета).

### **Выводы по диссертационным исследованиям**

- Сотовые панели являются важным конструкционным элементом планера самолетов и применяются при изготовлении рулей высоты и направления, фюзеляжа, обтекателя антенны, закрылков и т.д. Скрытая вода является типичным дефектом сотовых панелей, следовательно, контроль и диагностика этого вида дефекта актуальны для обеспечения экономичности и безопасности полета.

- Используют несколько методов обнаружения воды в самолетных панелях, в частности, рентгеновский, ультразвуковой и тепловой. Исходя из таких требований как портативность, безопасность, производительность и возможность количественной оценки влагосодержания, тепловой неразрушающий контроль можно рассматривать в качестве приоритетного метода контроля.

- В настоящей работе систематизированы теоретические и экспериментальные данные по обнаружению скрытой воды в авиационных сотовых панелях. Основные научные результаты исследования можно сформулировать следующим образом. Если, благодаря гравитации, вода в ячейках сот находится в контакте с обшивкой (именно в этом случае, названном контролем «снизу», используют ультразвуковой контроль), то также создаются оптимальные условия и для применения ТК. Важной особенностью ТК «снизу» является существенное превышение температурных сигналов уровня шума, что позволяет диагностировать воду без применения сложных алгоритмов обработки данных. Количественная оценка массы воды на базе исключительно ИК термографических данных возможна, если соты заполнены водой менее, чем на 50%. Особое внимание в данном исследовании уделено ситуации, когда вода не заполняет полностью ячейки, то есть отделена от обшивки воздушным промежутком. В этом случае применение ультразвукового контроля становится проблематичным, в то время как ИК термография способна обнаружить скрытую воду в процедуре так называемого контроля «сверху»; в этом случае, количественные оценки возможны, если вода заполняет более 70% объема.

- В классической процедуре активного ТК вода и эпоксидный клей практически неразличимы, если дискриминацию этих веществ проводить только по температуре поверхности. Предложена концепция кажущейся тепловой инерции, в рамках которой теоретически и экспериментально показано, что, начиная с так называемой точки «перегиба», вода может быть идентифицирована по возрастающей величине тепловой инерции по сравнению со спадающей кажущейся тепловой инерции в зонах, заполненных эпоксидным клеем. Использование предложенного алгоритма позволяет предотвратить манипуляции с контролируемой панелью для удаления скрытой воды.

- Впервые в мировой практике разработано специализированное приложение для смартфонов на платформе Android, позволяющее регистрировать последовательности ИК термограмм с сохранением температурных значений при использовании тепловизионного модуля ThermApp. Предварительная проверка модуля и программы проведена при обследовании самолета Boeing-737 авиакомпании «Аэрофлот» в апреле 2018 г.

- По результатам диссертационных исследований опубликовано 8 работ, все по теме диссертации, в том числе, 1 статья в журнале, входящем в список ВАК, 5 статей в изданиях, индексируемых в базах данных SCOPUS и Web of Science (4 статьи в журналах с импакт-фактором более 1, входящих в квартили Q1 и Q2).

**СПИСОК ТРУДОВ СОИСКАТЕЛЯ**

1. Vavilov V.P., **Pan Y.Y.**, Nesteruk D.A. Infrared thermographic inspection of water ingress in composite honeycomb panels. - *Applied Optics*, 2016, Vol. 55, № 34, p. 120-125.
2. Chulkov A.O., Vavilov V.P., Moskovchenko A.I., **Pan Y.-Y.** Quantitative evaluation of water content in composite honeycomb structures by using one-sided IR thermography: is there any promise? - *Thermosense: Thermal Infrared Applications XXXIX*, edited by Paolo Bison, Douglas Burleigh, Proc. of SPIE, vol. 10214, *Thermosense: Thermal Infrared Applications XXXIX*, p.102140U, doi: 10.1117/12.2262435.
3. Vavilov V.P., **Pan Y.**, Moskovchenko A.I., Čapka A. Modelling, detecting and evaluating water ingress in aviation honeycomb panels. - *Quantitative InfraRed Thermography Journal*, 2017. Vol. 14, No. 2, p. 206-217, doi: 10.1080/17686733.2017.1317443.
4. Vavilov V.P., Chulkov A.O., Derusova D.A., **Pan Y.** Thermal NDT research at Tomsk Polytechnic University. - *Quantitative InfraRed Thermography Journal*, Published online 28 January 2016, doi: 10.1080/17686733.2015.1131855
5. Вавилов В.П., Чулков А.О., Дерусова Д.А., **Пань Я.** Новые идеи в активном тепловом контроле. - *В мире неразрушающего контроля*, 2016, том 19, № 1, с. 5-7, doi: 10.12737/18020.
6. Vavilov V.P., Marinetti S., **Pan Y.**, Chulkov A. Detecting water ingress in aviation honeycomb panels: Qualitative and quantitative aspects. - *Polymer Testing*, 2016, Vol. 54, p. 270-280.
7. V.P. Vavilov, **Y. Pan**, A.I. Moskovchenko, A. Čapka. Modeling, detecting and evaluating water ingress in aviation honeycomb panels. –Proc. Intern. QIRT Conf., 4-8 July 2016, Gdansk, Poland. [Qirt.gel.ulaval.ca/archives/qirt2016/papers/144.pdf](http://qirt.gel.ulaval.ca/archives/qirt2016/papers/144.pdf).
8. Московченко А.И., **Пань Я.**, Нестерук Д.А., Вавилов В.П. О возможности количественной оценки скрытой воды в авиационных сотовых панелях методом инфракрасной термографии. - *Контроль. Диагностика*, 2016, №10, с. 4-10.