

Министерство образования и науки Российской Федерации
 Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
 высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
 ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт неразрушающего контроля
 Направление подготовки «Приборостроение»
 Кафедра физических методов и приборов контроля качества

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Разработка метода количественного определения воды в сотовых панелях самолетов методом ИК термографии

УДК 629.73.023.2:621.384.3

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1БМ5А	Московченко Алексей		

Руководитель

Должность	ФИО	Учёная степень, звание	Подпись	Дата
Зав. лаб. №34	Вавилов Владимир Платонович	Доктор технических наук, профессор		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Учёная степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент кафедры менеджмента	Николаенко Валентин Сергеевич			

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент кафедры экологии и	Анищенко Юлия Владимировна	Кандидат технических наук		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Зав. кафедрой	ФИО	Учёная степень, звание	Подпись	Дата
Физических методов и приборов контроля качества	Суржигов Анатолий Петрович	Доктор физико- математических наук, профессор		

Планируемые результаты обучения по ООП

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)	Требование ФГОС ВПО, критериев и/или заинтересованных сторон
P1	Способность совершенствовать и повышать свой интеллектуальный и общекультурный уровень и специальные знания в области математических, естественных, гуманитарных и экономических наук в комплексной инженерной деятельности на основе целостной системы научных знаний об окружающем мире;	Требования ФГОС (ОК-1) Критерий 5 АИОР (п.1.1, 1.3), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EURACE</i> и <i>FEANI</i>
P2	Способность адаптироваться к новым ситуациям, переоценивать накопленный опыт, анализировать свои возможности в понимании сущности и значения информации в развитии современного общества, владение основными методами, способами и средствами получения, хранения, переработки информации; использование для решения коммуникативных задач современных технических средств и информационных технологий в профессиональной области.	Требования ФГОС (ОК-1,2, ПК-19) Критерий 5 АИОР (п.1.4, 1.5, 1.6), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EURACE</i> и <i>FEANI</i>
P3	Способность использовать на практике умения и навыки в организации исследовательских и проектных работ, в управлении коллективом; эффективно работать индивидуально и в качестве члена команды, демонстрируя навыки руководства отдельными группами исполнителей; в том числе над междисциплинарными проектами, уметь проявлять личную ответственность, приверженность профессиональной этике и нормам ведения профессиональной деятельности.	Требования ФГОС (ОК-2, ПК-12,13,16-18,12,22) Критерий 5 АИОР (п.1.5), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EURACE</i> и <i>FEANI</i>
P4	Способность к самостоятельному обучению новым методам исследования, к изменению научного и научно-производственного профиля своей профессиональной деятельности; разрабатывать самостоятельно техническую документацию; четко излагать и защищать результаты комплексной инженерной деятельности в областях контроля качества продукции предприятий измерительной техники и точного приборостроения; приобретать с помощью информационных технологий и использовать в практической деятельности умения непосредственно не связанных со сферой деятельности.	Требования ФГОС (ОК-1,2, ОПК-2, ПК-10,19) Критерий 5 АИОР (п.1.2), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EURACE</i> и <i>FEANI</i>
P5	Умение использовать основные законы естественнонаучных дисциплин, методы математического анализа и моделирования, основы теоретического и экспериментального исследования в комплексной инженерной деятельности при разработке средств измерения и контроля, используя стандартные пакеты и средства автоматизированного проектирования в приборостроении..	Требования ФГОС (ОК-1, ПК-5-7), Критерий 5 АИОР (п.1.2, 1.4), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EURACE</i> и <i>FEANI</i>
P6	Умение профессионально эксплуатировать современное оборудование и приборы в соответствии с целями магистерской программы, организовывать технологическую подготовку производства приборных систем различного назначения и принципа действия, разрабатывать и внедрять новые технологические процессы с использованием гибких САПР и оценивать их экономическую эффективность и инновационные риски при их внедрении.	Требования ФГОС (ОПК-3, ПК-5,6,8,20), Критерий 5 АИОР (п.2.1), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EURACE</i> и <i>FEANI</i>
P7	Способность проектировать приборные системы и технологические процессы с использованием средств САПР и опыта разработки конкурентоспособных изделий; осуществлять проектную деятельность в профессиональной сфере на основе системного подхода.	Требования ФГОС (ОК-1, ПК-5,10,13,22), Критерий 5 АИОР (п.2.6), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EURACE</i> и <i>FEANI</i>
P8	Умение разрабатывать методики проведения теоретических и экспериментальных исследований по анализу, синтезу и оптимизации методов измерения контроля и диагностики,	Требования ФГОС (ОК-1,ПК-7,14,15) ПК-2,26,27,28)

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)	Требование ФГОС ВПО, критериев и/или заинтересованных сторон
	используемых в приборостроении; способность разработать и проводить оптимизацию натуральных экспериментальных исследований приборных систем с учётом критериев надёжности; использовать результаты научно-исследовательской деятельности и пользоваться правами на объекты интеллектуальной собственности.	Критерий 5 АИОР (п.2.3, 2.4), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EURACE</i> и <i>FEANI</i>
P9	Умение организовывать современное метрологическое обеспечение технологических процессов производства приборных систем и разрабатывать новые методы контроля качества выпускаемой продукции и технологических процессов; решать экономические и организационные задачи технологической подготовки приборных систем и выбирать системы обеспечения экологической безопасности в производстве и при технологическом контроле.	Требования ФГОС (ОК-2, ПК-2,6,14,20) Критерий 5 АИОР (п.2.2), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EURACE</i> и <i>FEANI</i>
P10	Способность проектировать математические модели анализа и оптимизации объектов исследования, выбирать численные методы их моделирования или разработать новый алгоритм решения задачи; выбирать оптимальные методы и программы экспериментальных исследований и испытаний, проводить измерения с выбором современных технических средств и обработкой результатов измерений.	Требования ФГОС (ОК-1,2, ОПК-2, ПК-1,2,6,13) Критерий 5 АИОР (п.2.5), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EURACE</i> и <i>FEANI</i>
P11	Способность формулировать цели, определять задачи, выбирать методы исследования в области приборостроения на основе подбора и изучения литературных и патентных и других источников; разрабатывать методические и нормативные документы, техническую документацию на объекты приборостроения, а также осуществлять системные мероприятия по реализации разработанных проектов и программ; составлять научно-технические отчеты, обзоры, публикации по результатам исследовательской деятельности	Требования ФГОС (ОПК-1,3, ПК-3,4,9,11) Критерий 5 АИОР (п.1.6, 2.4), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EURACE</i> и <i>FEANI</i>

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт неразрушающего контроля

Направление подготовки: «Приборостроение»

Кафедра физических методов и приборов контроля качества

УТВЕРЖДАЮ

Зав. кафедрой

Суржиков А.П.

(Подпись)

(Дата)

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Магистерской диссертации

Студенту:

Группа	ФИО
1БМ5А	Московченко Алексей

Тема работы:

Разработка метода количественного определения воды в сотовых панелях самолетов
методом ИК термографии

Утверждена приказом директора (дата, номер)

Срок сдачи студентом выполненной работы:

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе:	Образцы сотовых панелей самолетов с углепластиковой и стеклопластиковой обшивкой, материал сот: алюминий, бумага «Nomex». Источники тепловой стимуляции: галогеновые, светодиодные и flash-лампы, промышленный фен. Тепловизор NEC9100 с температурной чувствительностью до 0,03 ⁰ С
Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	Создание математической модели теплового контроля сотовых панелей Экспериментальные исследования теплового контроля образцов сотовых панелей Разработка методики количественной оценки воды в авиационных сотовых панелях
Перечень графического материала	
<i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i>	

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы	
Раздел	Консультант
Раздел «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»	Ассистент кафедры менеджмента Николаенко Валентин Сергеевич
Раздел «Социальная ответственность»	Кандидат технических наук, доцент кафедры экологии и безопасности жизнедеятельности Анищенко Юлия Владимировна
Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:	

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	сентябрь 2015
---	----------------------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Зав. лаб. №34	Вавилов Владимир Платонович	Доктор технических наук, профессор		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1БМ5А	Московченко Алексей		

Министерство образования и науки Российской Федерации
 Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
 высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
 ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт неразрушающего контроля
 Направление подготовки: «Приборостроение»
 Уровень образования: Магистратура
 Кафедра физических методов и приборов контроля качества
 Период выполнения: осень 2015 г. – весна 2017 г.

Форма представления работы:

Магистерская диссертация

КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН

Выполнения выпускной квалификационной работы

Срок сдачи студентом выполняемой работы:

Дата контроля	Название раздела / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела
20.02.2016	Моделирование в программе ThermoCalc-3D	10
30.05.2016	Подбор оптимальных видов тепловой стимуляции	10
30.12.2016	Проведение экспериментальных исследований образцов сотовых панелей	20
20.02.2017	Модификация математической модели	10
20.04.2017	Проведение экспериментальных исследований образцов сотовых панелей с использованием flash-ламп в качестве нагревателя	20
20.05.2017	Анализ и интерпретация полученных результатов	20
30.05.2017	Написание текста ВКР	10

Составил руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Зав. лаб. №34	Вавилов Владимир Платонович	Доктор технических наук, профессор		

СОГЛАСОВАНО:

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Физических методов и приборов контроля качества	Суржиков Анатолий Петрович	Доктор физико-математических наук, профессор		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА

«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»

Студенту:

Группа	ФИО
1БМ5А	Московченко Алексей Игоревич

Институт	Неразрушающего контроля	Кафедра	ФМПК
Уровень образования	магистр	Направление/специальность	Приборостроение

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ	1. Потенциальные потребители результатов исследования 2. Анализ конкурентных технических решений 3. SWOT-анализ 4. Оценка готовности проекта к коммерциализации
2. Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности	1. Оценка абсолютной эффективности исследования;

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

--

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

--

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Николаенко В.С.	—		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1БМ5А	Московченко А.		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
1БМ5А	Московченко Алексею

Институт	Неразрушающего контроля	Кафедра	Физических методов и приборов контроля качества
Уровень образования	Магистр	Направление/специальность	Приборостроение

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения.	Рабочим оборудованием является тепловизор NEC 9100, который предназначен для дистанционного контроля температуры изделий и обнаружение наличия дефектов типа нарушения сплошности, определения координат дефектов.
---	--

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Производственная безопасность 1.1. Анализ выявленных вредных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения. 1.2. Анализ выявленных опасных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения.	Рабочий процесс проводится в научной лаборатории, где могут быть такие вредные факторы как: отклонение показателей микроклимата, повышенный уровень инфракрасной радиации, недостаточная освещенность рабочей зоны. В ходе выполнения работы возможно поражение электрическим током.
2. Экологическая безопасность	Во время проведения исследования и по его окончании не существуют источников загрязнения окружающей среды.
3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях	Возможно возникновение пожара.
4. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	Допускаются к работе с устройством лица не моложе 18 лет, не имеющие противопоказаний по здоровью, прошедшие инструктаж по технике безопасности и пожарной безопасности. Рациональная планировка рабочей зоны, требования к основным элементам рабочего места: рабочий стол, рабочий стул, тепловизор NEC 9100, углепластиковые образцы, галогенная лампа.

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
--	--

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Анищенко Ю.В.	к.т.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1БМ5А	Московченко Алексей		

Реферат

Выпускная квалификационная работа содержит: 70 с., 19 рис., 13 табл., 18 источников, 1 прил.

Ключевые слова: инфракрасная термография, тепловой контроль, сотовые панели, вода в сотах, влагосодержание

Объектом исследования является неразрушающий контроль воды в авиационных сотовых панелях эксплуатируемых самолетов.

Цель работы – разработка метода количественной оценки воды в авиационных сотовых панелях.

В процессе исследования проводились работы по моделированию теплового контроля воды в сотовых панелях, экспериментальные исследования с образцами сотовых панелей.

В результате исследования показана возможность количественной оценки воды в сотовых панелях при различном расположении воды внутри сот. Разработаны алгоритмы расчета количества воды в конкретных сотовых панелях.

Область применения: метод может применяться при технической диагностике и ремонте эксплуатируемых самолетов в аэропортах, на авиастроительных заводах, в экспертных организациях и лабораториях неразрушающего контроля.

В будущем планируется проведение дальнейших исследований в данной области для минимизации влияния внешних воздействий и шумов. Разработка методик количественной оценки воды для конкретных моделей самолетов.

Определения, обозначения, сокращения, нормативные ссылки

Определения

Инфракрасная термография - совокупность методов и технических средств для дистанционной регистрации и анализа характеристик тепловых (температурных) полей объектов по их тепловому (инфракрасному) излучению.

Тепловой неразрушающий контроль - метод (вид) неразрушающего контроля материалов и изделий, основанный на регистрации и анализе температурных сигналов на поверхности объектов контроля, которые, как правило, возникают в результате тепловой стимуляции материала.

Температурное поле - распределение поверхностной температуры на контролируемом участке объекта контроля.

Тепловой поток (мощность теплового потока) - тепловая энергия, передаваемая через объект контроля в единицу времени (обычно на единицу площади) Вт, Вт/м².

Теплопроводность (коэффициент теплопроводности) - справочная характеристика материала, характеризующая мощность теплового потока, распространяющегося от точки с большей температурой к точке с меньшей температурой, Вт/(м·К) (стеклопластик: = 0.2 Вт/(м·К), углепластик: = 0.6 Вт/(м·К), титан: = 14 Вт/(м·К)).

Температуропроводность (коэффициент температуропроводности) - справочная характеристика материала, характеризующая скорость изменения температуры материала в условиях нестационарного теплообмена, м²/с.

Композиционные материалы - искусственно созданный сплошной неоднородный материал, состоящий из двух или более компонентов с границей раздела между ними.

Обозначения и сокращения:

T - температура (в активном тепловом контроле - избыточная температура), °С;

T_{in} - начальная температура изделия, °С;
 ΔT - дифференциальный температурный сигнал, °С;
 α - температуропроводность материала, м²/с;
 λ, K - теплопроводность материала, Вт/(м·К);
 ρ - плотность материала, кг/м³;
 c - теплоемкость материала, Дж/(кг·К)
 W - энергия импульса нагрева, Дж;
 T_{amb} - температура окружающей среды, °С;
 L - толщина изделия, м;
 l - толщина покрытия, м;
 d - толщина дефекта, м;
 C - температурный контраст, $C(\tau) = \Delta T(\tau) / T(\tau)$;
 $t_m(\Delta T_m)$ – время соответствующее появлению максимального дифференциального температурного сигнала, с
 $t_m(C_m)$ - время соответствующее появлению максимального контраста, с
 e_{ap} – кажущаяся тепловая инерция,
 e – тепловая инерция материала, Вт·с^{1/2}/(м²·°С),
 $ИК$ - инфракрасный;
 $ТНК$ - тепловой неразрушающий контроль;
 $ТК$ - тепловой контроль;
 $ТФХ$ - теплофизические характеристики;
 $ТД$ - техническая диагностика;
 $УЗ$ - ультразвуковой;
 $ПО$ – программное обеспечение
 $ГосНИИ ГА$ – государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации;
 $НК$ - неразрушающий контроль;
 IR - infrared (инфракрасный).

Оглавление

Введение.....	14
1 Обзор литературы	17
2 Объект и методы исследования	20
2.1 Математическое моделирование в программе ThermoCalc-3D	20
2.2 Моделирование в пакете COMSOL Multiphysics.....	22
2.3 Экспериментальная установка.....	23
2.3.1 Определение оптимального способа тепловой стимуляции	23
2.3.2 Исследование возможности идентификации степени заполнения ячеек.....	24
2.3.3 Экспериментальные исследования реальных образцов сотовых панелей...	24
3 Расчеты и аналитика	27
3.1 Анализ результатов моделирования.....	27
3.1.1 Моделирование в программе ThermoCalc-3D.....	27
3.1.2 Моделирование в пакете COMSOL Multiphysics.....	30
3.2 Анализ экспериментальных результатов.....	33
3.2.1 Выбор оптимального источника тепловой стимуляции	33
3.2.2 Анализ исследования возможности идентификации степени заполнения ячеек водой.....	36
3.2.3 Анализ экспериментальных результатов контроля образцов сотовых панелей	39
4 Результаты проведенного исследования	44
4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.....	47
4.1 SWOT-анализ.....	48
5 Социальная ответственность	56
5.1 Производственная безопасность.....	56
5.1.1 Повышенная или пониженная температура воздуха рабочей зоны	56
5.1.2 Недостаточная освещенность рабочей зоны	58
5.1.3 Повышенный уровень теплового излучения.....	59
5.1.5 Электромагнитное излучение	61

5.2 Экологическая безопасность.....	62
5.3 Безопасность в чрезвычайных ситуациях.....	62
5.4 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	63
5.4.1 Правовые вопросы обеспечения безопасности.....	63
Заключение	66
Список публикаций.....	68
Список использованных источников	69
Приложение А	72

Введение

В современной авиационной промышленности широко распространены так называемые сотовые конструкции, которые получили свое название из-за схожести с пчелиными сотами. Сотовые панели обладают высокой прочностью и малым весом, однако при их эксплуатации возможно накопление воды в ячейках. При циклах замерзания/оттаивания вода разрушает панели и увеличивает их массу. Данная проблема является настолько серьезной для обеспечения безопасности полетов, что многие ведущие производители авиационной техники ставят вопрос об отказе от использования сотовых конструкций и возврате к использованию монолитных структур. Тем не менее, авиационная техника с сотовыми конструкциями будет эксплуатироваться еще многие годы. Поэтому неразрушающий контроль воды в сотах останется актуальным длительное время.

Существуют несколько методов определения воды в ячейках сот. Все они обладают как преимуществами, так и недостатками. Наиболее распространен ультразвуковой метод, который обеспечивает приемлемую точность, но является трудоемким и контактным. Рентгенографический метод не может применяться в условиях действующих аэропортов по соображениям техники безопасности. Предложен метод инфракрасной (ИК) термографии, основанный на анализе температурных полей на внешних поверхностях самолетов. С помощью специальных приборов – тепловизоров - регистрируют инфракрасное излучение, испускаемое всеми физическими объектами и связанное с их температурой. Благодаря своей высокой теплоемкости, вода долго нагревается и долго охлаждается, поэтому ее можно обнаружить в течение определенного времени после посадки самолета в процессе естественного нагрева, а также с помощью принудительной тепловой стимуляции. Данный метод отличается удобством и высокой производительностью, но не позволяет определить массу скрытой воды. Поэтому в настоящее время он применяется в основном как скрининговый метод.

Актуальность настоящего исследования обусловлена:

- экспериментально установленным фактом накопления воды в сотовых панелях эксплуатируемых самолетов, что может квалифицироваться, как опасный эксплуатационный дефект;
- широким применением сотовых панелей в отечественных самолетах нового поколения;
- необходимостью неразрушающего контроля воды в сотовых панелях самолетов, эксплуатируемых в российских аэропортах;
- целесообразностью разработки методики количественной оценки воды в сотах по результатам ИК обследований.

Объект исследования – неразрушающий контроль воды в авиационных сотовых панелях эксплуатируемых самолетов.

Предмет исследования – количественная оценка воды в сотовых панелях самолетов методом ИК термографии.

Научная новизна:

- разработаны ряд трехмерных математических моделей обнаружения воды в сотовых конструкциях с использованием различных пакетов программ (ThermoCalc 3D, COMSOL Multiphysics). В том числе с учетом процессов конвекции и теплообмена с окружающей средой;
- проведен сравнительный анализ источников тепловой стимуляции для активного теплового контроля воды в авиационных сотовых панелях;
- предложены способы оценки количества воды в сотах на основании отношения дифференциальных температурных сигналов и контрастов на поверхностях сотовой панели при двухстороннем контроле, на она оценке контраста на поверхности панели и на оценке кажущейся тепловой инерции;
- разработан алгоритм определения воды в сотовых панелях с углепластиковой обшивкой и бумажными сотами.

Практическая значимость результатов ВКР. В Томском политехническом университете продолжают исследования, направленные на улучшение выявляемости и количественную оценку воды в сотовых

конструкциях по ИК термограммам. Результаты данной работы помогут минимизировать необходимость проведения ультразвукового контроля для оценки массы воды в сотовых панелях. На основании проведенной научно-исследовательской работы реализована программа, реализующая алгоритм количественной оценки воды в сотовых панелях.

Реализация и апробация работы. Результаты диссертационных исследований опубликованы в 4 статьях и представлены на следующих конференциях:

Thermosense: Thermal Infrared Applications XXXIX, Anaheim, California, U.S.A., April 09, 2017;

IX международная научно-техническая конференция «Политранспортные системы», Новосибирск, 17 – 18 ноября 2016;

V международная конференция «Ресурсоэффективные системы в управлении и контроле», Томск, 3 – 8 октября 2016;

"Quantitative InfraRed Thermography Conference", Poland, Gdansk, 4-8 July 2016;

II международная конференция «Актуальные проблемы авиации и космонавтики», Красноярск, 11 – 15 апреля 2016;

Российская школа-конференция «Информационные технологии в неразрушающем контроле», Томск, 27 – 30 октября 2015 г.

1 Обзор литературы

В конце XX-го века в мировой и отечественной авиационной промышленности широкое распространение получили авиационные сотовые конструкции, сочетающие в себе такие преимущества, как высокую жесткость и прочность с небольшой массой. С использованием данных материалов появилась необходимость разрабатывать новые методы неразрушающего контроля, позволяющие обнаруживать специфические дефекты, возникающие в таких материалах. В первые годы эксплуатации самолетов, использующих в своей конструкции сотовые панели (Ил-96, Ан-124 «Руслан», Ту-204), проявился такой дефект, как накопление воды в панелях фюзеляжа, элеронов и рулей высоты. Скапливающаяся в сотовых панелях вода стала опасным эксплуатационным дефектом и требовала разработки методов для ее обнаружения и количественной оценки.

Специалистами ГосНИИ ГА России (Н.Т. Азаровым и Ю.А. Миколайчуком) был разработан метод и аппаратура ультразвукового контроля воды в авиационных панелях. Данный метод позволяет количественно оценить массу скрытой воды по дискретным измерениям высоты водяного столбика в отдельных точках конструкций. Несмотря на приемлемую точность и возможность количественной оценки, данный метод обладает серьезными недостатками: дискретность измерений, низкая производительность, низкий уровень автоматизации, невозможность проведения контроля на вертикально-ориентированных и труднодоступных для ультразвукового оборудования поверхностях.

В руководящих технических документах [1] регламентируется использование радиационных и тепловых методов для неразрушающего контроля авиационных сотовых панелей. Радиационный метод целесообразно применять только на заводах-изготовителях и, в некоторых случаях, при ремонте авиационной техники. В процессе эксплуатации, при обследовании на стоянках и в ангарах, данный метод затруднительно применять по причинам

безопасности, и отсутствия двухстороннего доступа к панелям. Накопление воды в сотах является сугубо эксплуатационным дефектом, поэтому радиационные методы для ее обнаружения не используются.

Тепловой метод контроля регламентирован в нормативах по эксплуатации самолетов фирм Boeing и Airbus Industry. [2,3] В данных документах предлагается активный метод ТК снятых с самолета панелей с нагревом так называемым «тепловым одеялом». В России исследования по тепловому контролю сотовых панелей самолетов проводились в Томском НИИ интроскопии (ныне - Институт неразрушающего контроля ТПУ) в сотрудничестве с ГосНИИ ГА, НИИ ремонта авиационной техники МО РФ и АТБ некоторых российских аэропортов. Тепловой метод показал высокую производительность, дистанционность, высокий уровень автоматизации и документирования. Недостатком является сложность количественной оценки скрытой воды. Поэтому данный метод зарекомендовал себя как скрининговый. [4,5]

Настоящая работа является продолжением исследований методов теплового контроля воды в авиационных сотовых панелях, проводящихся в Томском политехническом университете. Данной работе предшествовала разработка активного способа ТК при нагреве оптическими источниками [6], разработка количественного анализа воды пассивным методом ТК на основании температурного плато при фазовом переходе лед-вода [7]. В рамках проведенных исследований был разработан и запатентован метод, комбинирующий тепловой и ультразвуковой контроль для оценки массы воды в сотовых панелях самолетов [8].

В зарубежных источниках, помимо технической документации авиапроизводителей, исследование возможности количественной оценки массы воды в сотовых панелях описаны в [9,10]. В [9] описан метод пассивного теплового контроля на основании время наступления максимального контраста между дефектной и бездефектной областью. Данный способ схож с методами, описанными в [7], но не учитывает процессы фазового перехода воды. Его

недостатки – длительность контроля, низкая точность и повторяемость, зависимость от внешних воздействий. В [10] предложен метод количественного анализа воды в сотовых панелях на основе анализа максимального контраста. В данной работе показана возможность количественной оценки воды при высоте столбика воды до 1,2 мм и при толщине обшивки 0,7 мм. Однако при большем количестве воды и большей толщине обшивки количественный анализ данным методом невозможен, что показано в настоящей работе.

2 Объект и методы исследования

2.1 Математическое моделирование в программе ThermoCalc-3D

Трёхмерное компьютерное моделирование выполнено с помощью программы ThermoCalc-3D, разработанной в Томском политехническом университете. Созданы математические модели сотовых конструкций, состоящих из углепластиковой обшивки, алюминиевых и бумажных сот. Размер образца: 50x50x7 мм. Размер ячеек: 4,8x4,8 мм. В модели распложены четыре области, заполненные водой. Моделирование проводилось для различного содержания воды в ячейках: от 10 до 100% воды. Мощность нагрева 10 кВт/м², время нагрева 5, 10, 15 секунд, шаг расчета 0,5 секунды, длительность теплового процесса 120 секунд. Вид модели в интерфейсе программы представлен на рисунке 1.

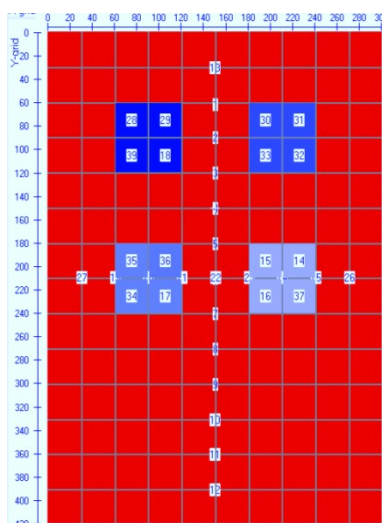


Рисунок 1 – Математическая модель сотовой панели в программе ThermoCalc-3D

Моделирование проводилось для 2-х случаев: 1) вода в контакте с контролируемой обшивкой; 2) воздушный зазор между водой и контролируемой поверхностью (рисунок 2).

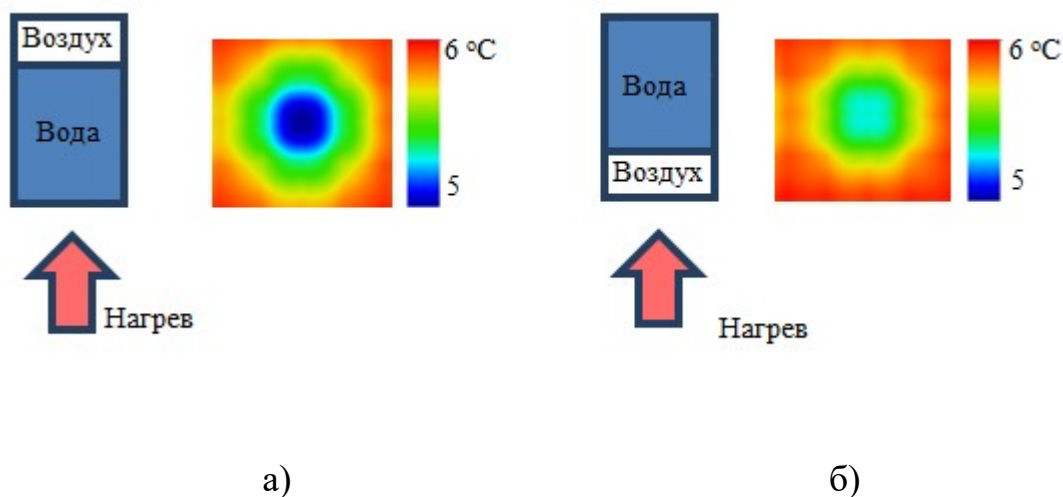


Рисунок 2 – Варианты расположения воды в ячейках сот:

а) вода в контакте с контролируемой поверхностью

б) воздушный зазор между водой и контролируемой поверхностью

Используемые при моделировании ТФХ материалов представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Теплофизические характеристики материалов

Материал	Теплопроводность, К, Вт/(м·°С)	Теплоемкость, с, Дж/(кг·°С)	Плотность, ρ, кг/м ³
Углепластик	0,61	1758	1500
Вода	0,59	4193	1000
Бумага Nomex	0,14	1100	1000
Эпоксидный клей	0,18	1100	1200
Воздух	0,07	928,4	1,3

Результатом расчета являлись последовательности двумерных температурных распределений (термограмм), на основе которых были получены графики дифференциальных температурных сигналов ΔT и текущих температурных контрастов

$$C = \Delta T / T, \quad (1)$$

где ΔT – дифференциальный температурный сигнал;

T – избыточная температура в бездефектной области

2.2 Моделирование в пакете COMSOL Multiphysics

В ходе проведения экспериментальных исследований появилась необходимость создания более подробной математической модели, учитывающей геометрические особенности сотовых панелей (шестиугольные ячейки), влияние ТФХ окружающего воздуха и конвекции, малый временной шаг для моделирования экспериментов с импульсным нагревом flash-лампами. Был использован программный пакет COMSOL Multiphysics. Предложенная модель состоит из шестиугольных алюминиевых и бумажных сот, углепластиковой обшивки переменной толщины, переменного содержимого ячеек (вода и воздух с различным соотношением и взаимным расположением), окружающего воздуха с учетом конвекции, источника импульсного нагрева мощностью 10 кВт/м^2 , длительность импульса – 20 мс. Для оптимизации времени расчета был выбран дифференцированный временной шаг: 1 с с частотой 100 Гц, 10 с с частотой 10 Гц, 120 с с частотой 1 Гц. На рисунке 3 приведена конечно-элементная сетка модели.

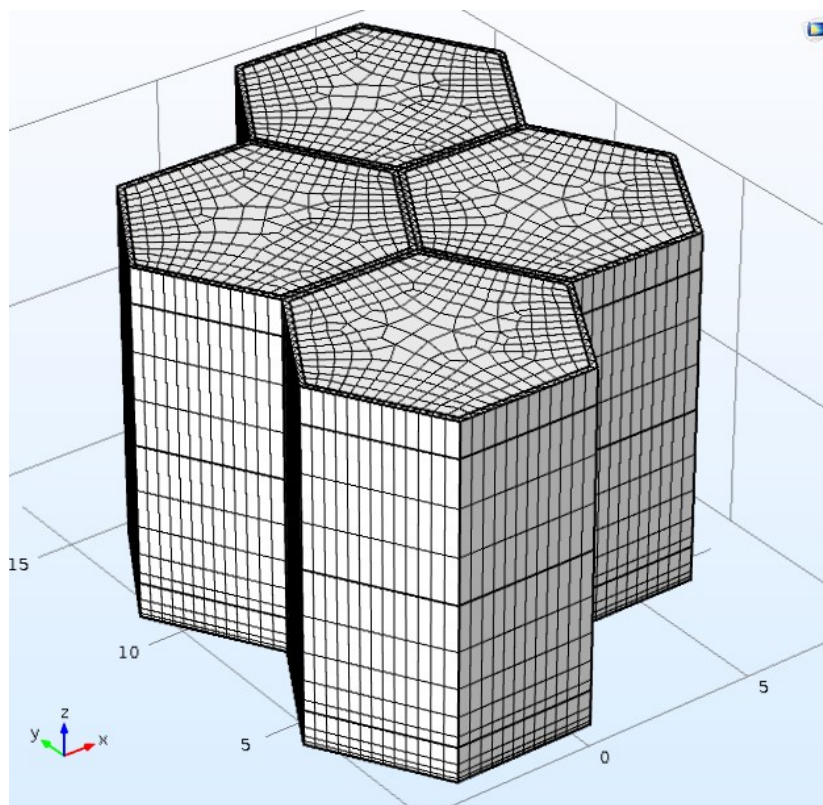


Рисунок 3 – Модель сотовой конструкции в COMSOL Multiphysics

Результатом моделирования является пространственное распределение температур моделируемого объекта, изменяющееся во времени. В нашем случае интерес представляет температура на контролируемой поверхности обшивки.

2.3 Экспериментальная установка

2.3.1 Определение оптимального способа тепловой стимуляции

Первая экспериментальная сессия была проведена с целью определения оптимального способа тепловой стимуляции, для чего была выбрана самолетная сотовая панель толщиной 10 мм, состоявшая из алюминиевых сот и стеклопластиковой обшивки (производства Чехии). Большая дефектная зона включала восемь смежных ячеек, полностью заполненных водой. В четыре ячейки было введено небольшое количество воды (около 20% от объема ячеек). Для нагрева использовали: 1) две светодиодные панели общей мощностью 1 кВт;

2) две галогеновые лампы общей мощностью 2 кВт; 3) фен мощностью 2 кВт; во всех случаях длительность нагрева составила 5 секунд. Температуру обшивки регистрировали с помощью тепловизора NEC Avio TH-9100 с частотой записи 1 Гц (заметим, что эксперименты с водой являются «медленными» и не требуют быстродействующих тепловизоров). Для обработки термограмм использовали программу ThermoFit Pro (Томский политехнический университет).

2.3.2 Исследование возможности идентификации степени заполнения ячеек

Возможность идентификации степени заполнения ячеек водой были исследованы на имитаторах сот с обшивкой из стеклопластика (размер ячеек 20×20×25 мм, толщина обшивки 0,5 мм). Большой размер сот исключал возможные эффекты капиллярного подъема воды, что возможно в сотах малого размера. Нагрев осуществляли в течение 3-5 секунд двумя галогеновыми лампами мощностью 500 Вт каждая. Частота записи термограмм с помощью тепловизора NEC Avio TH-9100 составила 10 Гц.

2.3.3 Экспериментальные исследования реальных образцов сотовых панелей

Исследования возможностей количественной оценки воды проводили на образцах сотовых панелей, состоящих из углепластиковых обшивок толщиной 1 мм, а также алюминиевых и бумажных сот (Рисунок 4). Объем ячеек: 0,25 мл и 0,15 мл для алюминиевых и бумажных ячеек соответственно. Эксперименты проводили для случаев контактирующей с обшивкой воды, а также наличия воздушного зазора.

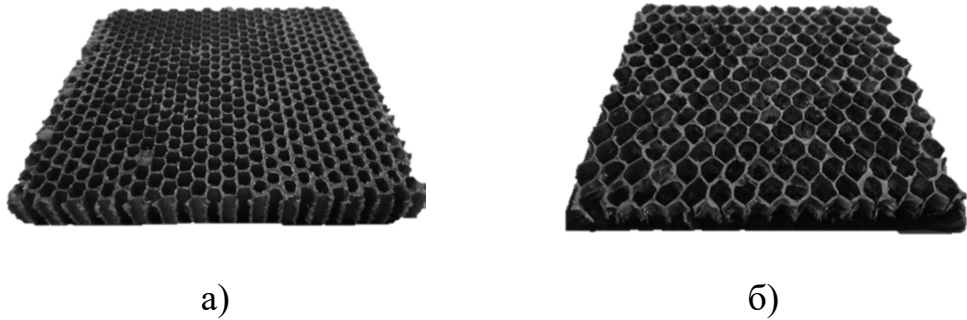


Рисунок 4 – образцы сотовых панелей:

- а) бумажные соты;
- б) алюминиевые соты.

Для данного исследования использовали разработанный в Томском политехническом университете прототип теплового дефектоскопа (рисунок 5), оснащенный четырьмя галогеновыми лампами общей мощностью 2 кВт в качестве источника тепловой стимуляции.

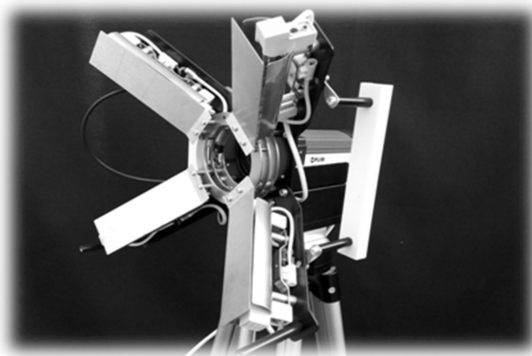


Рисунок 5 – Тепловой дефектоскоп

Кроме того, был проведен ряд экспериментов с использованием в качестве источника нагрева мощных импульсных flash-ламп, с общей энергией вспышки 6 кДж.

Термограммы записывали при помощи тепловизора FLIR A325sc. Частота записи для нагрева галогеновыми лампами – 10 Гц. При нагреве flash лампами для корректного расчета некоторых параметров необходима регистрация

теплового изображения объекта в момент вспышки, а, следовательно, высокая частота записи. Поскольку эксперименты с водой требуют длительное время записи, то есть не требуют высокой частоты регистрации температуры, запись производили с различными частотами: 1 с при частоте 100 Гц, 10 с при частоте 10 Гц, 120 с при частоте 1 Гц.

4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

Обнаружение скрытой воды в авиационных сотовых панелях является важной задачей неразрушающего контроля авиационной техники и напрямую влияет на безопасность полетов. Для обнаружения воды в конструкциях эксплуатируемых самолетов в основном применяют ультразвуковой и тепловой методы контроля. Ультразвуковой метод контроля позволяет достаточно точно оценить количество воды, но обладает рядом недостатков: низкая производительность, невозможность отличить воду от эпоксидного клея, сложность проведения контроля на вертикальных и наклонных поверхностях. Тепловой метод является быстрым и наглядным, но не позволяет определить количество скрытой воды.

Целью данной работы является усовершенствование метода инфракрасной термографии для возможности количественной оценки скрытой воды по термограммам.

В ходе работы было проведено трехмерное моделирование процессов теплового контроля сотовых панелей, проведены экспериментальные исследования на образцах и разработаны методы количественного анализа скрытой воды.

Реализация данных методов позволит ускорить процесс диагностики эксплуатируемых самолетов, снизить объемы необходимых ультразвуковых обследований и общую стоимость данных работ.

Целевой аудиторией данного проекта являются:

- экспертные организации, лаборатории неразрушающего контроля;
- аэропорты;
- авиастроительные заводы;
- лаборатории тепловых методов контроля в учебных заведениях.

4.1 SWOT-анализ

SWOT-анализ – представляет собой комплексный анализ научно-исследовательского проекта. SWOT-анализ применяют для исследования внешней и внутренней среды проекта.

Он проводится в несколько этапов.

Первый этап заключается в описании сильных и слабых сторон проекта, в выявлении возможностей и угроз для реализации проекта, которые проявились или могут появиться в его внешней среде.

Сильные стороны. Сильные стороны – это факторы, характеризующие конкурентоспособную сторону научно-исследовательского проекта. Сильные стороны свидетельствуют о том, что у проекта есть отличительное преимущество или особые ресурсы, являющиеся особенными с точки зрения конкуренции. Другими словами, сильные стороны – это ресурсы или возможности, которыми располагает руководство проекта и которые могут быть эффективно использованы для достижения поставленных целей. При этом важно рассматривать сильные стороны и с точки зрения руководства проекта, и с точки зрения тех, кто в нем еще задействован. При этом рекомендуется задавать следующие вопросы:

- Какие технические преимущества вы имеете по сравнению с конкурентами?
- Что участники вашего проекта умеют делать лучше всех?
- Насколько ваш проект близок к завершению по сравнению с конкурентами?

Слабые стороны. Слабость – это недостаток, упущение или ограниченность научно-исследовательского проекта, которые препятствуют достижению его целей. Это то, что плохо получается в рамках проекта или где он располагает недостаточными возможностями или ресурсами по сравнению с конкурентами. Чтобы прояснить в каких аспектах вас, возможно, превосходят конкуренты, следует спросить:

- Что можно улучшить?
- Что делается плохо?
- Чего следует избегать?

Возможности. Возможности включают в себя любую предпочтительную ситуацию в настоящем или будущем, возникающую в условиях окружающей среды проекта, например, тенденцию, изменение или предполагаемую потребность, которая поддерживает спрос на результаты проекта и позволяет руководству проекта улучшить свою конкурентную позицию. Формулирование возможностей проекта можно упростить, ответив на следующие вопросы:

- Какие возможности вы видите на рынке?
- В чем состоят благоприятные рыночные возможности?
- Какие интересные тенденции отмечены?
- Какие потребности, пожелания имеются у покупателя, но не удовлетворяются конкурентами?

Угроза. Угроза представляет собой любую нежелательную ситуацию, тенденцию или изменение в условиях окружающей среды проекта, которые имеют разрушительный или угрожающий характер для его конкурентоспособности в настоящем или будущем. В качестве угрозы может выступать барьер, ограничение или что-либо еще, что может повлечь за собой проблемы, разрушения, вред или ущерб, наносимый проекту. Для выявления угроз проекта рекомендуется ответить на следующие вопросы:

- Какие вы видите тенденции, которые могут уничтожить ваш научно-исследовательский проект или сделать его результаты устаревшими?
- Что делают конкуренты?
- Какие препятствия стоят перед вашим проектом (например, снижение бюджетного финансирования проекта, задержка финансирования проекта и т.п.)?
- Изменяются ли требуемые спецификации или стандарты на результаты научного исследования?
- Угрожает ли изменение технологии положению вашего проекта?

- Имеются ли у руководства проекта проблемы с материально-техническим обеспечением?

Результаты первого этапа SWOT-анализа представлены в таблице 5

Таблица 5 – Матрица SWOT-анализа.

<p>Сильные стороны научно-исследовательского проекта:</p> <p>С1. Быстрота и продуктивность проведения контроля;</p> <p>С2. Возможность дискриминации воды от других дефектов (эпоксидный клей, отслоение обшивки);</p> <p>С3. Экономичность и энергоэффективность;</p> <p>С4. Экологичность технологии;</p> <p>С5. Наглядность представления результатов исследования;</p> <p>С6. Квалифицированный персонал</p>	<p>Слабые стороны научно-исследовательского проекта:</p> <p>Сл1. Низкая точность и невозможность количественной оценки при большой толщине слоя воды;</p> <p>Сл2. Ограничения программного обеспечения для моделирования эксперимента;</p> <p>Сл3. Необходимость знания теплофизических характеристик материалов сотовых панелей;</p> <p>Сл4. Дороговизна оборудования для проведения контроля;</p> <p>Сл5. Влияние внешних факторов на результаты контроля;</p> <p>Сл6. Отсутствие бюджетного финансирования</p>
<p>Возможности:</p> <p>В1. Широкое применение сотовых панелей в авиакосмической отрасли</p> <p>В2. Существенные недостатки конкурентных методов</p> <p>В3. Использование инновационной инфраструктуры ТПУ</p> <p>В4. Улучшение существующего ПО добавлением в функциональные возможности разрабатываемой методики</p> <p>В5. Ужесточение требований безопасной эксплуатации авиационной техники</p>	<p>Угрозы:</p> <p>У1. Отказ от использования сотовых панелей в пользу новых материалов</p> <p>У2. Отсутствие спроса на новые технологии производства</p> <p>У3. Развитая конкуренция технологий неразрушающего контроля</p> <p>У4. Инертность российского рынка</p> <p>У5. Медленное внедрение технологических новшеств</p>

По результатам SWOT-анализа можно сделать следующие выводы:

Наглядность и скорость проведения контроля помогут во многих случаях отказаться от проведения ультразвукового контроля, а, следовательно, ускорить и удешевить процедуру технической диагностики. Однако, полностью

отказаться от ультразвуковых методов не удастся из-за недостаточной точности метода при высокой толщине слоя воды.

Несмотря на развитую конкуренцию технологий неразрушающего контроля, у предлагаемой методики отсутствуют прямые конкуренты, так как проведение ультразвукового обследования во многих случаях не представляется возможным из-за расположения контролируемых элементов. В данном случае тепловой контроль является единственным возможным методом. И применение разрабатываемой методики позволит существенно облегчить работу операторов и специалистов теплового контроля.

Необходимо внедрение методики в разрабатываемое в ТПУ программное обеспечение для теплового контроля авиационной техники.

Многие ведущие производители авиатехники, такие как Boeing и Airbus начинают отказываться от сотовых панелей в пользу более современных материалов. Однако, в отечественном авиастроении они до сих пор используются. А так же эксплуатируемый парк самолетов будет в ходу еще долгое время.

Матрица «Сильные стороны-возможности» (таблица 6) показывает, какие сильные стороны необходимо использовать, чтобы получить отдачу от возможностей во внешней среде.

Таблица 6 - Матрица «Сильные стороны-возможности»

	Сильные стороны						
		C1.	C2.	C3.	C4.	C5.	C6.
Возможности	B1.	+	-	+	+	+	-
	B2.	+	+	+	-	+	-
	B3.	-	-	-	+	-	+
	B4.	+	+	-	-	+	+
	B5.	-	+	-	+	-	-

Анализ таблицы 2 представляется в форме записи сильно коррелирующих сильных сторон и возможностей: B1C1C3C4C5, B2C1C2C3C5, B3C4C6, B4C1C2C5C6, B52.

Матрица «Слабые стороны-возможности» (таблица 3) показывает, за счет каких возможностей внешней среды организация сможет преодолеть имеющиеся слабости.

Таблица 7– Матрица «Слабые стороны-возможности»

	Слабые стороны						
		Сл1.	Сл2.	Сл3.	Сл4.	Сл5.	Сл6.
Возможности	В1.	-	-	+	+	-	+
	В2.	+	-	+	+	+	-
	В3.	-	+	+	+	-	+
	В4.	-	+	+	-	-	+
	В5.	-	-	-	-	-	-

Анализ таблицы 7 представляется в форме записи сильно коррелирующих слабых сторон и возможностей: В1Сл3Сл4Сл6, В2Сл1Сл3Сл4Сл5, В3Сл2Сл3Сл4Сл6, В4Сл2Сл3Сл6

Матрица «Сильные стороны-угрозы» (таблица 4) показывает, какие силы необходимо использовать организации для устранения угроз.

Таблица 8 – Матрица «Сильные стороны-угрозы»

	Сильные стороны						
		С1.	С2.	С3.	С4.	С5.	С6.
Угрозы	У1.	-	-	-	-	-	-
	У2.	-	-	+	-	-	-
	У3.	-	+	+	-	+	+
	У4.	-	-	-	-	-	-
	У5.	-	-	-	-	-	-

Анализ таблицы 8 представляется в форме записи сильно коррелирующих сильных сторон и угроз: У2С3, У3С2С3С5С6.

Матрица «Слабые стороны-угрозы» показывает (таблица 5), от каких слабостей необходимо избавиться, чтобы попытаться предотвратить нависшую угрозу.

Таблица 9 – Матрица «Слабые стороны-угрозы»

	Слабые стороны						
		Сл1.	Сл2.	Сл3.	Сл4.	Сл5.	Слб.
Угрозы	У1.	-	-	-	-	-	-
	У2.	0	0	0	+	0	-
	У3.	-	-	-	-	-	-
	У4.	-	-	0	+	+	-
	У5.	-	-	-	-	-	-

Анализ таблицы 9 представляется в форме записи сильно коррелирующих слабых сторон и угроз: У2Сл4, У4Сл4Сл5.

По окончании третьего этапа была составлена итоговая матрица SWOT-анализа, которая приведена в таблице 6.

Увеличение финансирования, модернизация методик и их внедрение в ПО поможет улучшить эффективность неразрушающего контроля эксплуатируемых самолетов. Снизится стоимость и время проведения технической диагностики самолетов. Улучшится качество и надежность.

Таблица 10 -SWOT-анализ

	<p>Сильные стороны научно-исследовательского проекта:</p> <p>С1. Быстрота и продуктивность проведения контроля;</p> <p>С2. Возможность дискриминации воды от других дефектов (эпоксидный клей, отслоение обшивки);</p> <p>С3. Экономичность и энергоэффективность;</p> <p>С4. Экологичность технологии;</p> <p>С5. Наглядность представления результатов исследования;</p> <p>С6. Квалифицированный персонал</p>	<p>Слабые стороны научно-исследовательского проекта:</p> <p>Сл1. Низкая точность и невозможность количественной оценки при большой толщине слоя воды;</p> <p>Сл2. Ограничения программного обеспечения для моделирования эксперимента;</p> <p>Сл3. Необходимость знания теплофизических характеристик материалов сотовых панелей;</p> <p>Сл4. Дороговизна оборудования для проведения контроля;</p> <p>Сл5. Влияние внешних факторов на результаты контроля;</p> <p>Сл6. Отсутствие бюджетного финансирования</p>
--	---	--

<p>Возможности:</p> <p>В1. Широкое применение сотовых панелей в авиакосмической отрасли</p> <p>В2. Существенные недостатки конкурентных методов</p> <p>В3. Использование инновационной инфраструктуры ТПУ</p> <p>В4. Улучшение существующего ПО добавлением в функциональные возможности разрабатываемой методики</p> <p>В5. Ужесточение требований безопасности эксплуатации авиационной техники</p>	<p>В1С1С3С4С5, В2С1С2С3С5, В3С4С6, В4С1С2С5С6, В52.</p> <p>Минимизация использования трудоемких и дорогих методов контроля.</p>	<p>В1Сл3Сл4Сл6, В2Сл1Сл3Сл4Сл5, В3Сл2Сл3Сл4Сл6, В4Сл2Сл3Сл6</p> <p>Необходимо увеличить финансирование научно-исследовательских работ. Проводить исследования направленные на устранение недостатков разрабатываемой методики.</p>
<p>Угрозы:</p> <p>У1. Отказ от использования сотовых панелей в пользу новых материалов</p> <p>У2. Отсутствие спроса на новые технологии производства</p> <p>У3. Развитая конкуренция технологий неразрушающего контроля</p> <p>У4. Инертность российского рынка</p> <p>У5. Медленное внедрение технологических новшеств</p>	<p>У2С3, У3С2С3С5С6.</p> <p>Экономическое обоснование внедрения современных методов в индустрию</p>	<p>У2Сл4, У4Сл4Сл5.</p> <p>Повышение точности и надежности метода</p>

В данном разделе ВКР были определены потенциальные потребители результатов научно-исследовательской работы. В проекте могут быть заинтересованы владельцы и эксплуататоры авиационной техники, такие как аэропорты, и авиазаводы. Лаборатории неразрушающего контроля и экспертные организации, занимающиеся технической диагностикой авиационной техники. Научно-исследовательские и учебные лаборатории ВУЗов.

Проведен SWOT- анализ разрабатываемой методики количественной оценки воды в авиационных сотовых панелях. По результатам анализа можно сделать вывод, что выполняемая научно исследовательская работа перспективна. Разрабатываемая методика позволит улучшить качество и снизить временные и финансовые затраты на процедуры неразрушающего контроля авиационной техники. Для преодоления угроз необходимо проводить дальнейшие исследования в данной области с целью повышения точности и надежности данного метода.

Список публикаций

1) A. O. Chulkov, A. I. Moskovchenko. "Quantitative evaluation of water content in composite honeycomb structures by using one-sided IR thermography: is there any promise?» Proc. SPIE 10214, Thermosense: Thermal Infrared Applications XXXIX, 102140U (May 5, 2017); doi:10.1117/12.2262435

2) V. P. Vavilov, Y. Pan, A. I. Moskovchenko and A. Čapka "Modeling, detecting and evaluating water ingress in aviation honeycomb panels" 2016 Quantitative InfraRed Thermography 10.21611/qirt.2016.144

3) O.S. Simonova, S.V. Kasianov, A.I. Moskovchenko and G. Xingwang. "Analyzing the thermal regime of power supply units in portable betathrons by using infrared thermography", MATEC Web Conf. Volume 92, 2017, article number 01017

4) 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 октября (с. 4-10).