

ТОМСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ



На правах рукописи

ЧУЛКОВ АРСЕНИЙ ОЛЕГОВИЧ

МЕТОДЫ И АППАРАТУРА АКТИВНОГО ТЕПЛОВОГО НЕРАЗРУШАЮЩЕГО
КОНТРОЛЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ И МНОГОСЛОЙНЫХ СТРУКТУР

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

2.2.8. – Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и
природной среды

Томск – 2025

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Научный консультант:

Вавилов Владимир Платонович

Доктор технических наук, профессор,
заслуженный деятель науки, заведующий научно-производственной лабораторией Тепловой контроль Инженерной школы неразрушающего контроля и безопасности ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет».

Официальные оппоненты:

Сясько Владимир Александрович

Доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры Теоретическая и прикладная метрология ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева».

Смирнов Александр Николаевич

Доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры Технологии машиностроения Института информационных технологий, машиностроения и автотранспорта, ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева».

Лобода Егор Леонидович

Доктор физико-математических наук, доцент,
заведующий кафедрой Физической и вычислительной механики механико-математического факультета ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский государственный университет».

Защита состоится «20» мая 2025 г. В ____ часов на заседании диссертационного совета ДС.ТПУ.13 при федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634028, г. Томск, ул. Савиных, 7, ауд. 215.



С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Томского политехнического университета и на сайте dis.tpu.ru при помощи QR-кода.

Автореферат разослан «____» _____ 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета ДС.ТПУ.13
кандидат технических наук, доцент

A handwritten signature in blue ink, located between the text of the academic secretary and the name of the academic secretary.

Шевелева Е.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность диссертационных исследований обусловлена следующими факторами:

1) отечественная промышленность испытывает необходимость в разработке новых методов неразрушающего контроля (НК) ответственных изделий из полимерных композиционных материалов (ПКМ) и металлов, в том числе, изготовленных с применением аддитивных технологий, а также теплозащитных покрытий, применяемых в авиационной и ракетно-космической технике, дефекты в которых не выявляются или выявляются с трудом стандартными ультразвуковым (УЗ), рентгеновским (РК) и другими видами НК;

2) обеспечение высокой производительности и надежности неразрушающих испытаний, в особенности, крупногабаритных и серийных изделий авиационной и ракетно-космической техники, требует разработки роботизированных комплексов НК, пригодных для применения как в условиях производства вышеупомянутых изделий, так и в процессе их эксплуатации;

3) наличие человеческого фактора в процедурах неразрушающих испытаний и обработки результатов контроля, приводящего к возможным пропускам критичных дефектов, требует повышения уровня автоматизации процедур дефектоскопии и дефектометрии, что также обеспечит повышение производительности и повторяемости получаемых результатов;

4) тепловой неразрушающий контроль (ТНК), доказавший свою эффективность при испытаниях ПКМ, теплозащитных покрытий и тонкостенных металлических изделий, характеризуется слабой проработкой аспектов практического применения как в условиях производства изделий высокотехнологичной техники, так и в процессе их эксплуатации.

Настоящая диссертационная работа направлена на совершенствование теории и методологии ТНК многослойных композитных структур, включая расширение номенклатуры практических источников тепловой стимуляции и их гибридизацию, а также на разработку оригинальных дефектоскопических устройств и программных алгоритмов автоматизированных процедур дефектоскопии и дефектометрии.

Таким образом, в работе сделан акцент на применение ТНК с целью решения вышеуказанных общих проблем НК материалов и изделий авиационной и ракетно-космической техники, включая решения следующих частных проблем ТНК:

1) низкая эффективность ТНК окрашенных изделий, например, элементов авиационной техники, а также стеклопластиковых изделий без окраски при использовании оптических источников нагрева;

2) отсутствие методологических решений высокопроизводительного ТНК крупногабаритных изделий авиационной и ракетно-космической техники для эффективного выявления внутренних дефектов;

3) разработка отечественных тепловых дефектоскопов, пригодных для практического применения, является нерешенной проблемой ТНК, особенно актуальной в условиях ограниченного доступа к зарубежному оборудованию;

4) идентификация дефектов различных типов, характерных для ПКМ, например, ударных повреждений, трещин и расслоений, требует использования определенных типов источников тепловой стимуляции и проведение контроля в несколько этапов, что повышает трудоемкость контроля;

5) анализ большого количества тепловых изображений (до нескольких тысяч) с целью обнаружения дефектов и определения их параметров в «ручном» режиме связан с высокими трудозатратами и вероятностью пропуска критичных дефектов, что стимулирует использование искусственного интеллекта (нейронных сетей) для обработки данных.

Степень разработанности темы исследования

Наибольшее развитие активный ТНК, с точки зрения практического применения в авиационной и ракетно-космической отраслях промышленности, получил в зарубежных научно-исследовательских и промышленных организациях. Известной зарубежной научной группой, разрабатывающей все аспекты ТНК, является коллектив лаборатории Х. Maldague (Университет Лавалья, Канада). Основной акцент в исследованиях данной группы сделан на алгоритмы обработки данных, в том числе, в автоматизированных системах контроля с использованием искусственных нейронных сетей (ИНС); известны также работы группы Х. Maldague и др. по применению роботизированных установок для ТНК протяженных объектов из ПКМ. Научная группа Р. Servais (NDTPro, Бельгия) создала сканирующую роботизированную установку ТНК для обнаружения дефектов

крупногабаритных изделий конической формы. Разработки в области автоматизированных алгоритмов обработки последовательностей инфракрасных (ИК) термограмм, в том числе, с использованием ИНС и роботизированных сканирующих систем, выполнены в лаборатории М. Omar (Университет Халифа, ОАЭ). Акцент на теоретические аспекты активного ТНК, а именно, исследования процессов теплопроводности в телах с дефектами, сделан группой J.-C. Batsale (Университет Бордо, Франция), дочерняя группа этой лаборатории, под руководством С. Pradere, занимается разработкой нового метода ТНК - терагерцовой ИК термографией, применимого для целей спектроскопии и НК стеклопластиковых ПКМ. Недавно возникшей, но заметной научной группой является группа профессора Н. Zhang (Харбинский университет технологии, Китай), исследования которой направлены на развитие метода тепловой томографии и синтез данных терагерцового и теплового видов НК. Тепловой контроль качества металлических литых изделий с использованием индукционного нагрева разрабатывает научная группа под руководством В. Oswald-Tranta (Университет Леобен, Австрия). Высокую публикационную активность в области ТНК качества предметов искусства проявляют Р. Bison (Институт технологии конструкций, Италия) и S. Sfarra (Университет Аквилы, Италия). Наиболее заметным американским исследователем и предпринимателем, создавшим коммерческую фирму по разработке и производству устройств активного ТНК в интересах авиационной и ракетно-космической отраслей промышленности, является S. Shepard (Thermal Wave Imaging, США). Известным специалистом в области практического применения активного ТНК в космической отрасли США является D. Burleigh. Активный ТНК композитов в ракетно-космической отрасли разрабатывает группа А. Siddiqui (Лаборатория передовых систем, Индия). Среди многочисленных немецких научных групп, занимающихся развитием ТНК, следует отметить научную группу С. Maierhofer (Федеральный институт исследования материалов, Германия), а среди коммерческих организаций, занимающихся разработкой тепловых дефектоскопов портативного и роботизированного типов - фирму Automation Technology (Германия). На российском рынке проявляла активность фирма Orgal (Израиль), устройства которой применяют для контроля качества ПКМ авиационной и ракетно-космической техники.

Среди отечественных ученых в области ТНК следует выделить научную группу О.Н. Будаина и С.О. Козельской (АО «ЦНИИСМ», г. Хотьково), разрабатывающих

способы и устройства контроля качества композиционных изделий ракетно-космической техники. В течение длительного периода М.И. Щербаков (ООО «ИРТИС/IRTIS», г. Москва) разрабатывал концепцию применения оригинального отечественного тепловизора «ИРТИС» в НК и технической диагностике. Существенный задел в части разработки систем ТНК крупногабаритных изделий из ПКМ сделан И.О. Котовщиковым (ООО «Локус», г. Санкт-Петербург). Научная группа под руководством профессора В.Н. Чернышова (ТГТУ, г. Тамбов) занимается разработкой теплофизических аспектов ТНК, включая алгоритмы автоматизированной обработки данных. О.А. Плехов, А.Ю. Изюмова (ПФИЦ УрО РАН, ИМСС УрО РАН, г. Пермь) и Е.А. Мойсейчик (БНТУ, г. Минск) исследуют возможности ИК термографии при анализе процессов упруго-пластического деформирования и разрушения материалов. Исследования в области активного ТНК авиационных ПКМ и покрытий проводит группа Г.П. Батова (НУЦ «Качество», г. Москва) и А.Б. Корнилова (ФАУ «ЦАГИ», г. Жуковский). Тепловизионную диагностику ограждающих конструкций зданий и сооружений развивает Е.В. Абрамова (НИИСФ РААСН, г. Москва). Различные применения ИК термографии на железнодорожном транспорте разрабатывает А.В. Лукьянов с сотрудниками (ИрГУПС, г. Иркутск). Крупная российская научная группа в области активного ТНК, руководимая В.П. Вавиловым (ТПУ, г. Томск), за последнее десятилетие сместила акцент исследований с теоретических аспектов ТНК в область его практического применения. Это отразилось в разработке и создании устройств активного ТНК изделий из ПКМ, а также металлических изделий с различного рода покрытиями в интересах промышленных предприятий. Исследования группы В.П. Вавилова были обобщены в ряде кандидатских диссертаций, а также в настоящей докторской диссертации.

Защищаемая диссертационная работа является логическим продолжением исследований, ранее выполненных А.О. Чулковым в рамках кандидатской диссертации и содержит результаты научно-исследовательской и опытно-конструкторской деятельности в области активного ТНК, полученные в Томском политехническом университете, а также в ходе трех научных стажировок: в Университете Бордо (Франция) в научных группах J.-C. Batsale (2015 г.) и С. Pradere (2019 г.); в Университете Халифа (ОАЭ) в лаборатории М. Omar (2018 г.); в Университете Леобен (Австрия) в научной группе В. Oswald-Tranta (2019 г.). Основная часть научных результатов, вошедших в

настоящую диссертационную работу, была выполнена в рамках проектов, в которых А.О. Чулков являлся руководителем, а именно, в рамках трех проектов, поддержанных РФФИ; одного проекта, поддержанного РФФИ; двух проектов по Государственному заданию «Наука»; двух проектов в рамках стипендии Президента РФ для молодых ученых; исследовательского проекта «УМНИК». Кроме того, часть результатов диссертационной работы была получена в ходе выполнения проектов РФФИ, РФФИ, Государственного задания «Наука», а также ряда контрактов с промышленными предприятиями авиационной и ракетно-космической отраслей промышленности, в которых Соискатель являлся основным исполнителем.

Решаемая научная проблема – диссертация направлена на решение крупной научной проблемы неразрушающего контроля качества современных многослойных материалов и изделий авиационной и ракетно-космической техники, имеющей важное хозяйственное значение и связанной с разработкой новых, научно обоснованных технологических решений.

Объект исследования – изделия из монолитных угле- и стеклопластиковых ПКМ различной геометрической формы; композиционные сотовые панели; многослойные структуры типа металл-теплозащита; металлические лопатки газотурбинных двигателей.

Предмет исследования – нестационарные процессы теплопередачи в твердых многослойных телах; математические алгоритмы обработки последовательностей тепловых изображений, включая использование ИНС; методики и принципы построения приборов активного ТНК.

Цель исследования – разработка ориентированных на практическое применение способов, методик, программных алгоритмов и аппаратуры активного ТНК, обеспечивающих достоверное обнаружение и определение параметров скрытых дефектов композитных материалов и многослойных структур с высокой производительностью и в автоматизированном режиме.

Задачи исследования

- Разработать способ и соответствующую методику ТНК, обеспечивающие обнаружение структурных неоднородностей в изделиях из ПКМ, поверхность которых характеризуется существенным уровнем температурных шумов в силу неоднородной структуры поверхности и коэффициента излучения, а также материалов, полупрозрачных в видимом диапазоне спектра излучения.

- Разработать программный модуль с использованием алгоритмов на базе ИНС для автоматизированной обработки результатов ТНК изделий из ПКМ и провести его апробацию на контрольных образцах с целью обнаружения имитаторов дефектов производственного и эксплуатационного типов, определения их глубины залегания, толщины, поперечных размеров и координат.

- Разработать способ и соответствующую методику комбинированного ТНК, обеспечивающие обнаружение характерных для ПКМ дефектов, а именно, ударных повреждений, трещин и расслоений в течение одной процедуры контроля.

- Разработать способ и соответствующую методику ТНК крупногабаритных изделий плоской и цилиндрической формы, изготовленных из монолитных ПКМ и многослойных структур типа металл-теплозащита, обеспечивающие высокую производительность сплошного контроля (не ниже 10 м^2 в час).

- Разработать портативные и стационарные, в том числе роботизированные устройства ТНК изделий из ПКМ, металла, сотовых и многослойных структур типа металл-теплозащита, имеющих различные геометрические формы и габаритные размеры, пригодных для применения в промышленности.

Научная новизна

Соискателем впервые предложены новые способы ТНК и процедуры обработки температурных данных, основанные на теоретических расчётах (математическом моделировании) и подтвержденные экспериментальным путем. Соответствующие пункты научной новизны приведены ниже.

- Установлено, что предложенный способ тепловизионного сканирования при неразрушающих испытаниях крупногабаритных цилиндрических и плоских изделий из ПКМ и многослойных структур типа металл-теплозащита обеспечивает производительность сплошного ТНК до 25 м^2 в час, а применение разработанных методики и программного модуля позволяет получить результаты контроля в виде панорамных изображений.

- На основе разработанного программного модуля для численного моделирования процедур ТНК с импульсами нагрева и принудительного охлаждения, а также экспериментальных данных, установлено, что импульс принудительного охлаждения, примененный после импульса основного нагрева, снижающий температуру контролируемой поверхности до исходной в момент максимума температурного сигнала

обнаруживаемого дефекта, обеспечивает повышение температурного контраста до 10-ти раз, а отношения сигнал/шум до 2-х раз при ТНК изделий, характеризующихся уровнем температурного шума выше 5 %.

- Установлено, что применение в процедурах ТНК конвективных и контактных источников нагрева обеспечивает обнаружение структурных неоднородностей в изделиях из ПКМ, характеризующихся частичной или полной прозрачностью в видимом диапазоне спектра излучения и коэффициентом поглощения поверхности ниже 0,7.

- Установлено, что разработанные автоматизированные алгоритмы на базе ИНС, обученные на профилях температуры по времени, обеспечивают обнаружение дефектов, определение их глубины залегания с погрешностью до 16 %, площади и координат с погрешностью до 26 %, толщин с погрешностью до 65 %, а также классификацию дефектов по типам.

- Предложено последовательное использование оптического и УЗ источников тепловой стимуляции, а также комбинирование полученных результатов, что позволило в течение одной процедуры ТНК обнаруживать характерные для ПКМ дефекты в виде ударных повреждений, трещин и расслоений.

Новизна полученных научных результатов подтверждена 2-я патентами на способы ТНК, а также публикациями в высокорейтинговых журналах, которые приведены в Приложении А диссертации и списке основных опубликованных работ.

Теоретическая значимость работы

На основе численных решений трехмерных задач ТНК проанализированы эффекты теплопередачи в твердых телах со структурными неоднородностями, в результате чего предложены новые процедуры ТНК, основанные на особенностях поведения температурных сигналов в дефектных зонах, учитывающие полупрозрачность исследуемых материалов и знакопеременную тепловую стимуляцию. Теоретические решения задач теплопроводности положены в основу процедур обработки температурных данных перед их использованием в обучении ИНС, что улучшило идентификацию и определение параметров скрытых дефектов.

Практическая значимость работы

Разработаны пять модификаций портативных тепловых дефектоскопов, реализованных на базе оптических и конвективных источников нагрева для проведения ТНК в классической односторонней процедуре, а также соответствующие способы ТНК.

Одна из модификаций тепловых дефектоскопов вошла в 100 лучших изобретений России в 2019-2020 гг.

Разработан роботизированный дефектоскоп для комбинированного ТНК изделий из ПКМ, а также роботизированное устройство для ТНК теплозащитных покрытий крупногабаритных цилиндрических изделий способом тепловизионного сканирования. Устройство внедрено предприятием АО «Красмаш» (г. Красноярск) (работы выполнены совместно с ООО «УРТЦ «Альфа-Интех», г. Челябинск).

Разработан самодвижущийся тепловой дефектоскоп, предназначенный для ТНК плоских горизонтально ориентированных крупногабаритных изделий из ПКМ и металлов способом тепловизионного сканирования.

Разработана стационарная установка для ТНК изделий из ПКМ способом тепловизионного сканирования и внедрена предприятием АО «Композит» (г. Королев).

Разработана методика ТНК производственных дефектов в композиционных заготовках первого российского цельнокомпозитного самолета ТВС - 2ТДС, которая внедрена ФАУ «СибНИА им. С. А. Чаплыгина» (г. Новосибирск).

Разработаны стационарная и переносные установки термоакустического контроля (теплового контроля с УЗ стимуляцией) трещин металлических лопаток турбин и рабочих лопаток вентилятора газотурбинных двигателей, а также соответствующие методики ТНК, внедренные предприятиями ПАО «ОДК-Сатурн» (г. Рыбинск) и АО «Авиадвигатель» (г. Пермь).

Стационарная установка термоакустического контроля дефектов полимерных композиционных материалов авиационной и космической отраслей промышленности, а также соответствующая методика ТНК разработаны для ООО «НТЦ «Эталон» (г. Санкт-Петербург) и внедрены предприятием АО «НПО Энергомаш» (г. Москва) в составе комплекса НК.

Практическая ценность и реализуемость полученных результатов также подтверждена 9 - ю патентами на устройства ТНК, а также 11-ю свидетельствами о регистрации программ для ЭВМ, которые приведены в Приложении А диссертации.

Роботизированные и самодвижущиеся тепловые дефектоскопы, модификации портативных тепловых дефектоскопов, установка комбинированного ТНК, а также программные модули автоматизированной обработки данных, используются в образовательном процессе и научно-исследовательской деятельности в ТПУ (г. Томск).

Использование результатов настоящих диссертационных исследований подтверждено актами, а значимость работы подтверждена соответствующими отзывами, приведёнными в Приложении Б диссертации.

Методологические основы и методы исследования

Результаты диссертационного исследования были достигнуты, используя известные способы активного ТНК, применяемые в России и за рубежом, а также используя оригинальные результаты, основанные на особенностях теплопередачи в твердых телах. Численное и аналитическое моделирование, предшествующее экспериментальным исследованиям, было проведено с использованием коммерческих программных продуктов Matlab, Comsol Multiphysics, а также программного обеспечения ThermoCalc-3D Pro и программных модулей ThermoCalc_HC и ThermoSon, разработанных в ТПУ (г. Томск). Экспериментальные исследования были проведены с использованием современного тепловизионного оборудования мирового уровня, а также с использованием источников тепловой стимуляции 4-х типов, а именно, оптических, конвекционных, ультразвуковых и контактных. Исследования проводили как в классических одно- и двухсторонней процедурах ТНК, так и путем реализации разработанных способов тепловизионного сканирования и комбинированного ТНК. Обработку результатов ТНК, представляющих собой последовательности ИК термограмм, проводили с помощью разработанного в ТПУ программного обеспечения ThermoFit Pro, а также разработанных программных модулей Thermo_NN, ThermoScan, ThermoFusion, Thermo_Visual. В частности, для обработки данных были использованы пространственная и временная фильтрации, преобразование Фурье, метод анализа главных компонент (МАГК), метод термографической обработки сигнала (МТОС) и алгоритмы на базе ИНС, а также программные алгоритмы пространственной сшивки и синтеза данных. Полученные при тепловизионной регистрации температурные данные анализировали по критериям отношения сигнал/шум, дифференциальных температурных сигналов и контрастов.

Положения, выносимые на защиту

- Способ тепловизионного сканирования обеспечивает производительность ТНК крупногабаритных плоских и цилиндрических изделий до 25 м² в час, а также получение результатов контроля в виде панорамных изображений, характеризующихся большей равномерностью температурного поля, чем термограммы, полученные при классической

односторонней процедуре ТНК по отдельным зонам. Чередование областей контроля при ТНК крупногабаритных изделий способом тепловизионного сканирования снижает неравномерность температурного поля и повышает достоверность испытаний.

- Применение после основного импульса нагрева импульса принудительного охлаждения, снижающего температуру контролируемой поверхности до исходной в момент максимума температурного сигнала обнаруживаемого дефекта, обеспечивает повышение температурного контраста до 10-ти раз, а отношения сигнал/шум до 2-х раз при ТНК изделий, характеризующихся уровнем температурного шума больше 5 %.

- Применение в процедурах ТНК конвективных и контактных источников нагрева обеспечивает обнаружение структурных неоднородностей в изделиях из ПКМ, характеризующихся полной или частичной прозрачностью в видимом диапазоне спектра излучения и коэффициентом поглощения поверхности ниже 0,7.

- Использование алгоритмов на базе ИНС, обученных на профилях температуры по времени, обеспечивает в автоматизированном режиме дефектоскопию, а также дефектометрию с допустимой на практике погрешностью.

- Комбинирование оптического и УЗ источников тепловой стимуляции с последующим синтезом карт дефектов повышает достоверность обнаружения характерных для ПКМ структурных несплошностей в виде ударных повреждений, трещин и расслоений за счет взаимодополняющего характера результатов, полученных с применением различных источников тепловой стимуляции.

Достоверность полученных теоретических и экспериментальных результатов

подтверждается использованием методов и процедур ТНК, принятых международным научным сообществом и не противоречащих общепринятым научным положениям, а также данными, полученными другими авторами и опубликованными в соответствующих научных работах; использованием коммерческого программного обеспечения высокого уровня, предназначенного для численного моделирования задач математической физики; использованием современного оборудования мирового уровня, в частности, тепловизоров, источников нагрева, роботизированной и компьютерной техники; соответствием экспериментальных данных результатам математического моделирования. Результаты в части дефектоскопии и дефектометрии подтверждаются испытаниями контрольных образцов, разработанных при непосредственном участии

Соискателя, а также результатами применения альтернативных видов НК, в том числе, полученными промышленными заказчиками в рамках выполнения НИОКР.

Личный вклад Соискателя заключается в формулировании научной проблемы и цели исследования, реализации методологических и аппаратных решений задач исследования, в частности, по: 1) контролю качества ПКМ, характеризующихся частичной прозрачностью в видимом диапазоне спектра излучения, а также материалов, имеющих существенную неоднородность коэффициента излучения поверхности; 2) контролю качества крупногабаритных изделий плоской и цилиндрической формы; 3) комбинированному ТНК дефектов производственного и эксплуатационного типов, характерных для изделий из ПКМ, в том числе, сложной геометрической формы; 4) разработке и реализации автоматизированной обработки данных с применением алгоритмов на базе ИНС.

Соискателем лично проведены основополагающие экспериментальные исследования и математическое моделирование тепловых процессов. Технические решения, реализованные в устройствах ТНК, в частности, конструкции тепловых дефектоскопов самодвижущегося типа, компоновка и архитектура установок стационарного, портативного и роботизированного типов были предложены Соискателем. Личный вклад Соискателя подтверждается соавторством в опубликованных работах и зарегистрированных результатах интеллектуальной деятельности.

Апробация работы

Полученные научные результаты были представлены на международных конференциях: QIRT-Asia 2023 (ОАЭ, г. Абу-Даби); QIRT-Asia 2019 (Япония, г. Токио); QIRT - 2018 (Германия, г. Берлин); на международной конференции Thermosense (г. Анахайм, США, 2017 г.); в рамках деловых программ международного военно-технического форума «Армия» в 2021 - 2024 гг.; международного форума «Территория NDT» в 2021 - 2024 гг.; на Всероссийской конференции «ТестМат», проводимой ФГУП «ВИАМ», в 2018, 2021 и 2024 гг.

Разработанные опытные образцы портативных, самодвижущихся и роботизированных устройств активного ТНК были представлены в качестве экспонатов на международных выставках и форумах: «Армия» в 2016, 2021 - 2024 гг., «МАКС» в 2017, 2019 и 2024 (в онлайн формате) гг., а также на выставках при форуме

«Территория NDT» Российского общества неразрушающего контроля в 2017, 2018, 2020 - 2024 гг.

Внедрение результатов диссертационной работы заключалось в поставке устройств, соответствующих методик и программных модулей на промышленные предприятия высокотехнологичных отраслей промышленности.

Связь диссертационного исследования с научно-техническими проектами

Результаты диссертационных исследований были получены в ходе выполнения следующих научных проектов и контрактов с промышленными предприятиями в период с 2014 по 2024 гг. при непосредственном руководстве Соискателя (пп.1 - 11) и при участии Соискателя в качестве основного исполнителя (пп.12 - 26):

1. «Разработка научно-технических основ комплексного анализа качества композиционных материалов». Государственное задание «Наука» №5.0005.ГЗБ.2023.

2. «Разработка методологических и аппаратных основ теплового неразрушающего контроля композиционных авиационных материалов в режиме непрерывного линейного сканирования». РНФ №22-29-01469.

3. «Разработка высокопроизводительной самоходной аппаратуры ТНК полимерных композиционных материалов авиакосмического профиля, а также алгоритмов автоматизированной обработки результатов испытаний при непрерывном сканировании». Стипендия Президента РФ (СП-2305.2021.1).

4. «Теоретическое моделирование и экспериментальные исследования нестационарных трехмерных тепловых полей в анизотропных композиционных материалах, используемых в авиакосмической технике, для дефектоскопии и дефектометрии скрытых дефектов». РФФИ №19-29-13004.

5. «Разработка методики и программных алгоритмов активного теплового неразрушающего контроля изделий сложной формы из композиционных материалов с использованием искусственного интеллекта и роботизированной техники». РНФ №19 - 79-00049.

6. «Разработка методик и аппаратуры активного теплового контроля материалов и изделий авиакосмической и ракетной отраслей». ТПУ ВИУ-ИШФВП-196/2019.

7. «Разработка методов и аппаратуры активного ТНК материалов и изделий авиакосмической отрасли». ТПУ ВИУ-ИШФВП-304/2018.

8. «Разработка методов инфракрасной термографии нестационарных физических процессов в твердых телах с высокоскоростной коммуникацией». Государственное задание «Наука» №8.13264.2018/8.9.

9. «Разработка метода неразрушающего контроля крупногабаритных элементов ракетной техники с применением активной инфракрасной термографии и тепловой томографии». Стипендия Президента РФ (СП-1286.2018.1).

10. «Разработка методики и программного обеспечения инфракрасного термографического контроля изделий из композиционных материалов авиационной и ракетно-космической отрасли с автоматизированной идентификацией дефектов». РНФ №17-79-10143.

11. «Разработка мощного светодиодного источника нагрева для портативного теплового дефектоскопического аппарата». Программа «УМНИК» №5076 ГУ1/2014.

12. «Разработка научных основ технологии роботизированной мультипараметрической томографии на основе методов обработки больших данных и машинного обучения для исследования перспективных композиционных материалов». Государственное задание «Наука» №5.0017.ГЗБ.2020.

13. «Разработка методических, программных и аппаратных основ автоматизированного теплового неразрушающего контроля композиционных материалов и изделий авиационной и ракетно-космической техники». РНФ №22 - 19 - 00103.

14. «Разработка метода и аппаратуры динамической тепловой томографии композиционных материалов». РНФ №17-19-01047.

15. «Развитие научных основ проектирования и диагностики углепластиковых композитов на основе исследования взаимосвязи их структуры и динамических характеристик с использованием комплексного расчетно-экспериментального подхода, включающего сканирующую лазерную виброметрию и численное моделирование». РФФИ №18-41-703002.

16. «Изготовление и поставка стационарной установки термоакустического контроля дефектов полимерных композиционных материалов». Контракт с ООО «НТЦ «Эталон» №16.02.03-157/2024у.

17. «Отработка термоакустического метода контроля полый широкохордной РЛВ двигателя ПД-14, разработка оборудования для термоакустического контроля полый

широкохордной РЛВ двигателя ПД-14 в условиях эксплуатации и ремонта». Контракт с АО «Авиадвигатель» № 16.02.03-131/2023.

18. «Разработка методического руководства и внедрение термографического метода неразрушающего контроля с ультразвуковой стимуляцией нагрева для выявления трещин в лопатках турбины из жаропрочного никелевого сплава. Разработка, изготовление и поставка установки для проведения термографического метода неразрушающего контроля с ультразвуковой стимуляцией нагрева». Контракт с ПАО «ОДК-Сатурн» №16.02.03-242/2022.

19. «Формирование исходных технических требований, разработка и создание системы дистанционного ТНК лазерной резки газодиффузионных машин». Контракт с АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ» № 226/3903-Д/16.02.03-363/2021.

20. «Применение методов тепловизионной диагностики для обнаружения внутренних дефектов и ударных повреждений в композитных образцах». Контракт с ФАУ «ЦАГИ» № 17705596339190002180/16.02.03-212/2021.

21. «Исследование уровня повреждений КПО угле- и стеклопластиков методом ИК-термографии». Контракт с ФАУ «ЦАГИ» № 5-527/16.

22. «Исследования и консультационное обслуживание по разработке техники передового термографического неразрушающего контроля». Контракт с Лабораторией передовых систем (Индия) №34/63.

23. «Разработка и поставка аппаратно-программного модуля бесконтактного контроля изделий цилиндрической формы». Контракт с ООО УРТЦ «Альфа-Интех» №16.1-105/2017.

24. «Разработка методики применения активного ТНК с использованием оптических и ультразвуковых стимуляций для оперативной дефектоскопии элементов конструкций МВЛ сложной формы из углепластика на этапе их производства». Контракт с ФАУ «СибНИА им. С. А. Чаплыгина» №16.15-358-2017.

25. «Установка «Термоскоп-К» для анализа дефектности тонкостенных элементов конструкций из композиционных материалов». Контракт с АО «Композит» № 5-548/16.

26. «Неразрушающий контроль авиационных и космических материалов методом активной количественной инфракрасной термографии». Контракт с ООО «Солютерм» (бывший российский представитель корпорации Airbus), № 5-285.14.

Публикации по теме диссертации

Соискателем по теме диссертации опубликовано 158 научных статьи, 74 из которых - в журналах, индексируемых в базах данных Scopus и Web of Science, включая 38 публикаций в журналах 1-го и 2-го квартилей. Кроме того, список опубликованных работ Чулкова А.О. включает 22 патента на устройства и способы, свидетельства о регистрации программ для ЭВМ. Индекс Хирша Соискателя по базе Scopus – 15.

Структура и объем диссертационных исследований

Диссертационная работа состоит из введения, 6 глав, списка цитируемой литературы, а также включает 3 Приложения. Объем диссертации составляет 321 страницу, включает 85 рисунков (в том числе 5 рисунков Приложения В), 28 таблиц, 25 формул и 270 библиографических источников.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обозначены актуальность темы исследования и степень её проработанности. Сформулированы цель и задачи исследований, приведены сведения о научной новизне, практической ценности и апробации результатов работы. Представлены положения, выносимые на защиту.

В **Главе 1** изложены основные этапы развития ТНК, описаны преимущества и недостатки различных процедур ТНК в сравнении с другими видами НК, а также описаны области применения и решаемые задачи ТНК. Перечислены ведущие зарубежные и отечественные научные группы, выполняющие исследования по различным направлениям ТНК. Приведен список основных алгоритмов обработки данных, используемых в ТНК, а также описаны портативные, стационарные и роботизированные установки ТНК зарубежного производства, применяемые на практике для контроля качества изделий из ПКМ.

В целом, в **Главе 1** описаны основные мировые достижения в области ТНК, послужившие фоном настоящего научного исследования по разработке способов и методик ТНК, а также соответствующих программных алгоритмов и аппаратуры, в особенности, пригодных для практического применения.

В **Главе 2** обобщены теоретические аспекты нестационарной теплопроводности в многослойных твердых телах, содержащих внутренние дефекты. Описаны зависимости

основных анализируемых в ТНК параметров – амплитуд температурных сигналов ΔT , контрастов C и времени наступления их экстремумов τ_m , от режимов ТНК, параметров дефектов и ТФХ контролируемых материалов, а именно: 1) длительности τ_h и мощности Q импульса нагрева; 2) длительности процедуры контроля τ ; 3) коэффициента излучения поверхности объекта контроля ε ; 4) уровня температурных шумов (аддитивной и мультипликативной составляющих); 5) толщины L и ТФХ объекта контроля λ , ρ , C ; 6) геометрических размеров d_x , d_y , d_z , глубин залегания h и ТФХ дефектов λ , ρ , C ; 7) интенсивности теплообмена объекта контроля с окружающей средой α^F , α^R .

Графически показаны изменения температурных сигналов ΔT над дефектами, расположенными на различной глубине при импульсах нагрева с различной длительностью. Показано, что с увеличением глубины залегания дефектов, например, от 0,25 мм до 1 мм при одностороннем ТНК амплитуда ΔT снижается практически в 10 раз (см. рисунок 1).



Рисунок 1 – Результаты моделирования ТНК пластины из углепластика толщиной 6 мм при нагреве импульсами длительностью 3, 5 и 10 секунд

Показаны зависимости амплитуды температурных сигналов ΔT и времени их экстремумов от поперечных размеров внутренних дефектов при одно- и двухстороннем ТНК (см. рисунок 2) по которым видно, что существенное изменение амплитуды происходит только до определенных поперечных размеров дефектов.

Кроме того, в Главе 2 рассмотрено влияние температурных шумов аддитивного и мультипликативного типов на результаты ТНК, а также проанализирована инверсия температурных сигналов, связанная с ТФХ материалов контролируемых изделий и глубиной залегания дефектов.

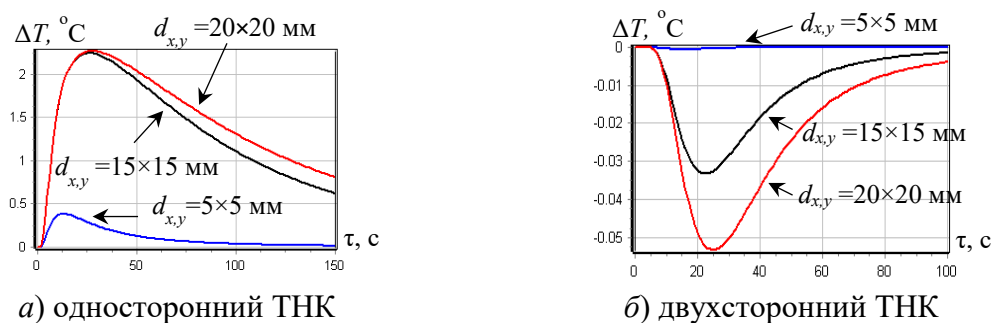


Рисунок 2 – Графики изменения температурных сигналов ΔT в зависимости от поперечных размеров дефектов (результаты моделирования)

Глава 3 посвящена разработке нового способа тепловизионного сканирования, предназначенного для высокопроизводительного контроля качества крупногабаритных плоских и цилиндрических изделий из ПКМ и структур металл-теплозащита. Способ основан на использовании непрерывного линейного нагрева, равномерно перемещающегося относительно контролируемой поверхности и одновременной записи ИК термограмм с их последующей реконструкцией в панорамные изображения (патент РФ №2774040С1 «Способ теплового неразрушающего контроля крупногабаритных цилиндрических изделий», свидетельство о регистрации программы для ЭВМ «ThermoScan» №2021664038).

Описаны лабораторные установки, в том числе роботизированного типа (рисунок 3), разработанные для реализации ТНК способом тепловизионного сканирования плоских и цилиндрических изделий.



Рисунок 3 – Лабораторные установки для реализации ТНК способом тепловизионного сканирования

На контрольном образце в виде многослойной структуры полимер-металл экспериментально было установлено, что результаты ТНК, полученные способом

тепловизионного сканирования, например, с помощью самодвижущегося теплового дефектоскопа (патент РФ №2786045С1 «Сканирующий тепловизионный дефектоскоп»), характеризуются большими величинами отношения сигнал/шум по сравнению с результатами классического одностороннего ТНК, что эквивалентно лучшей выявляемости дефектов, и связано с более интенсивным и равномерным линейным нагревом (см. рисунок 4).

Следует отметить, что приведенные в диссертации экспериментальные результаты были получены на контрольных образцах №1-26, изготовленных в ТПУ при участии Соискателя и представляющих собой многослойные полимерные изделия различной геометрической формы, а также структурах типа металл-полимер, суммарно отражавших более 300 различных дефектных ситуаций.

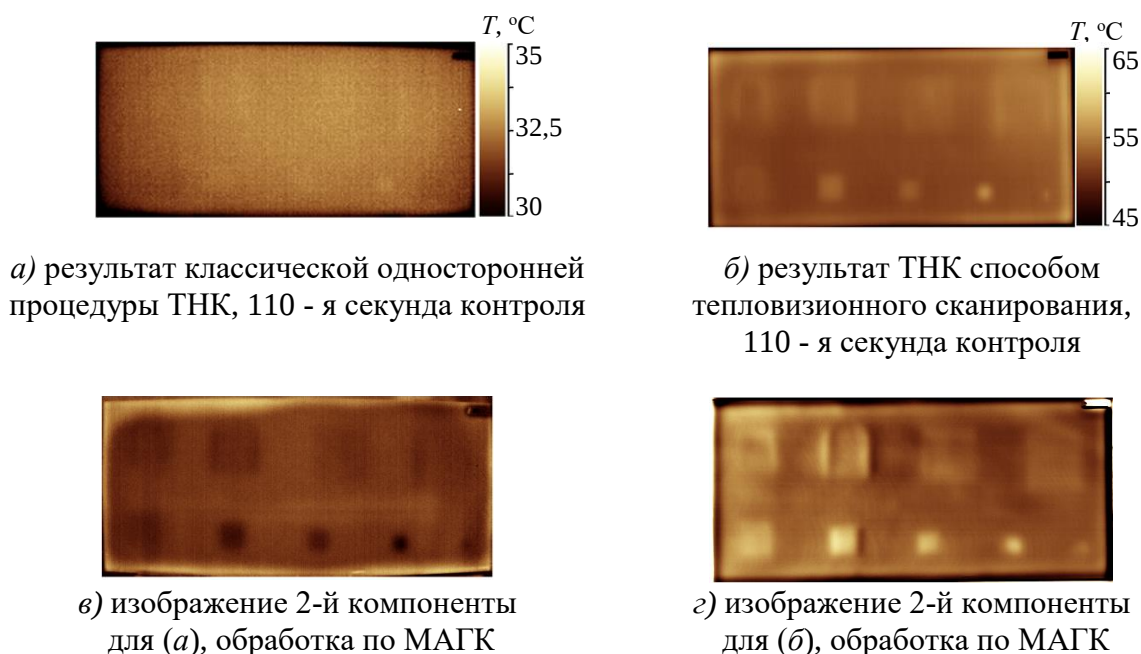


Рисунок 4 – Сравнение экспериментальных результатов ТНК при импульсном распределённом нагреве и способе тепловизионного сканирования многослойной структуры полимер-металл

Приведены результаты численного моделирования процедуры ТНК крупногабаритного цилиндрического изделия способом тепловизионного сканирования, демонстрирующие эффективность чередования контролируемых кольцевых областей, например, один через один, по сравнению со сплошным контролем (см. рисунок 5).

В **Приложении В** диссертации приведена методика проведения ТНК крупногабаритных цилиндров способом тепловизионного сканирования с чередованием

кольцевых областей при использовании роботизированного дефектоскопа, обеспечивающего производительность испытаний до 25 м² в час (патент РФ №2697437С1 «Устройство для теплового неразрушающего контроля крупногабаритных цилиндрических изделий»).

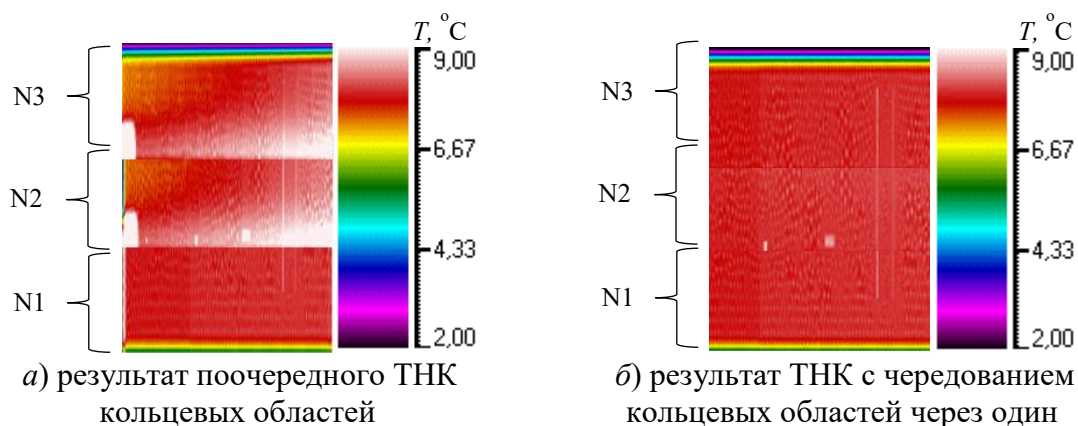


Рисунок 5 – Панорамные изображения, полученные путем численного моделирования, «сшитые» из трех разверток кольцевых областей цилиндрического объекта, соответствующих 100-й секунде ТНК

Глава 4 посвящена разработке способов автоматизированной обработки результатов ТНК с использованием алгоритмов на базе ИНС. В частности, на примере экспериментальных результатов испытаний пластины из стеклопластика с искусственными дефектами в виде плоскодонных отверстий описан способ выбора и подготовки температурных данных (профилей по времени) для обучения и применения ИНС с целью автоматизированной дефектоскопии и дефектометрии (рисунок 6).

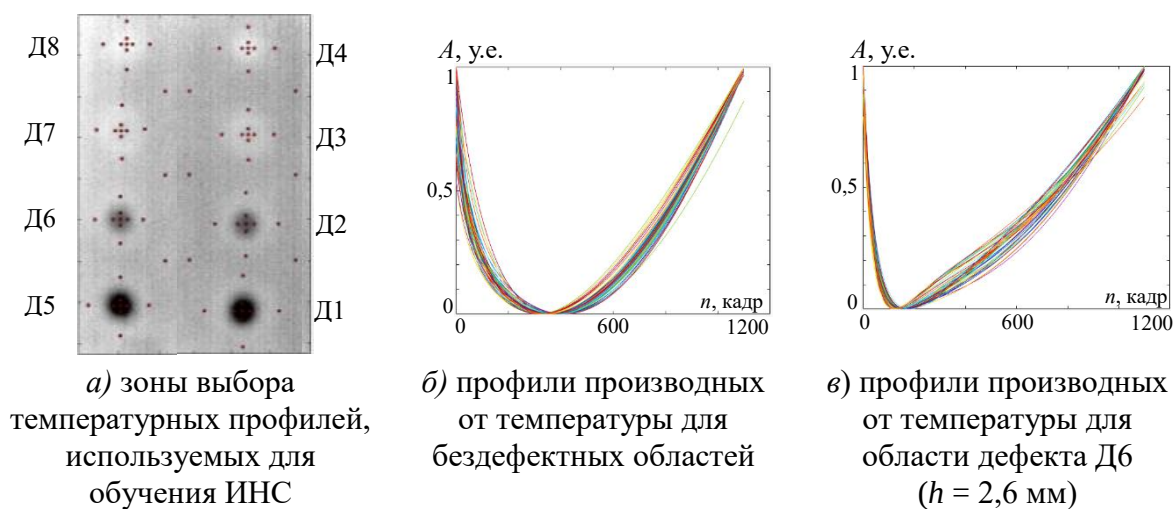


Рисунок 6 – Схема расположения зон для формирования набора температурных данных (а), подаваемых на вход ИНС, и пример таких данных (б, в)

Описаны результаты применения разработанного программного модуля «Thermo_NN» (свидетельство о регистрации программы для ЭВМ №2020619186) реализованного на базе алгоритмов ИНС, которые продемонстрировали эффективность определения глубины залегания дефектов, их толщины, поперченных размеров, площади и координат в автоматизированном режиме (см. рисунок 7).

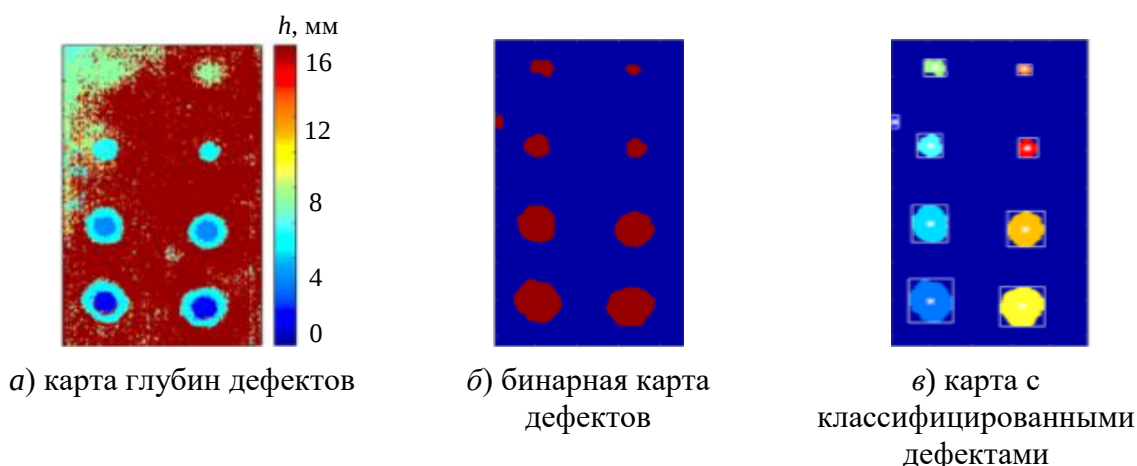


Рисунок 7 – Этапы автоматизированной дефектометрии стеклопластиковой пластины с дефектами, полученные с использованием ИНС, обученной на экспериментальных данных

По результатам ТНК набора из 22-х контрольных образцов установлено, что использование алгоритмов на базе ИНС, обученных на профилях температуры, полученных экспериментально, обеспечивает автоматизированное обнаружение дефектов (см. рисунок 8), определение их глубины залегания с погрешностью до 16% (см. таблицу 1), площади и координат с погрешностью до 26%, толщины дефектов с погрешностью в диапазоне от 0 до 127% (средняя величина 65%), а также классификацию дефектов по типам.

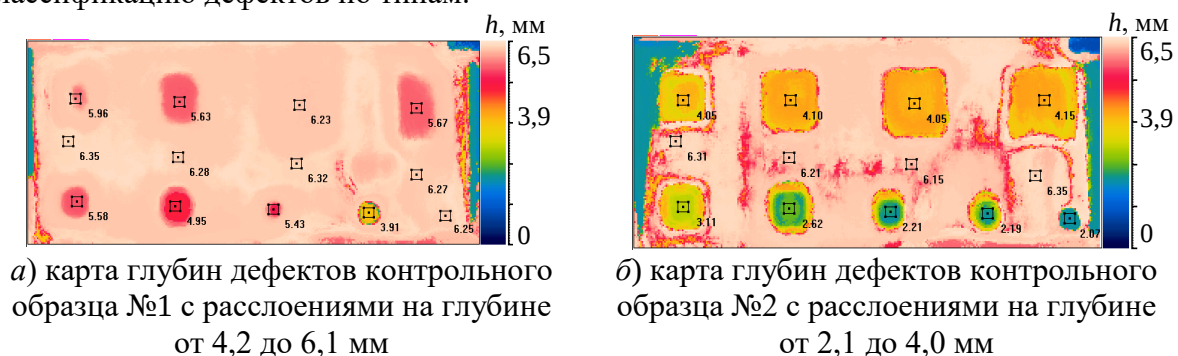


Рисунок 8 – Результаты дефектометрии многослойных структур типа полимер - металл, имеющих по 9 дефектов в виде расслоений различных размеров и глубины залегания, заполненных воздухом

Полученные результаты, учитывая автоматизированный характер их получения, являются допустимыми для решения большинства практических задач ТНК.

Таблица 1 – Результаты дефектометрии контрольных образцов №1 и №2, полученные с помощью ИНС, обученной на экспериментальных данных 20-и подобных контрольных образцов

№ образца	Параметр дефекта	Номер дефекта								
		Д9	Д8	Д7	Д6	Д5	Д4	Д3	Д2	Д1
№1	h_t , мм	6,1	6,1	5,9	5,9	5,7	5,2	4,7	4,2	4,2
	h_e , мм	5,67	6,23	5,63	5,96	5,58	4,95	5,43	3,91	6,25
	ε_r , %	7	2	5	1	2	5	16	7	49
№2	h_t , мм	4,0	4,0	3,8	3,8	3,6	3,1	2,6	2,1	2,1
	h_e , мм	4,15	4,05	4,1	4,05	3,11	2,62	2,21	2,19	2,07
	ε_r , %	4	1	8	7	14	15	15	4	1

В Главе 5 описаны новые процедуры ТНК, представляющие собой модификации способа тепловизионного сканирования, существенно улучшающие результаты контроля материалов и изделий, характеризующихся повышенными температурными шумами и частичной прозрачностью в видимом диапазоне спектра излучения. В частности, на основе данных численного моделирования, полученных с помощью программного модуля «ThermoCalc_НС» (свидетельство о регистрации программы для ЭВМ №2022662003) и экспериментов установлено, что импульс принудительного охлаждения, примененный после основного импульса нагрева и обеспечивающий кратковременное снижение температуры контролируемой поверхности до исходной в момент максимума температурного сигнала от дефекта, приводит к повышению температурного контраста до 10 раз, а отношения сигнал/шум до 2-х раз (см. рисунок 9). На устройство, реализующее предложенный способ ТНК с принудительным охлаждением, подана заявка на патент РФ №2024137869 «Сканирующий тепловизионный дефектоскоп».

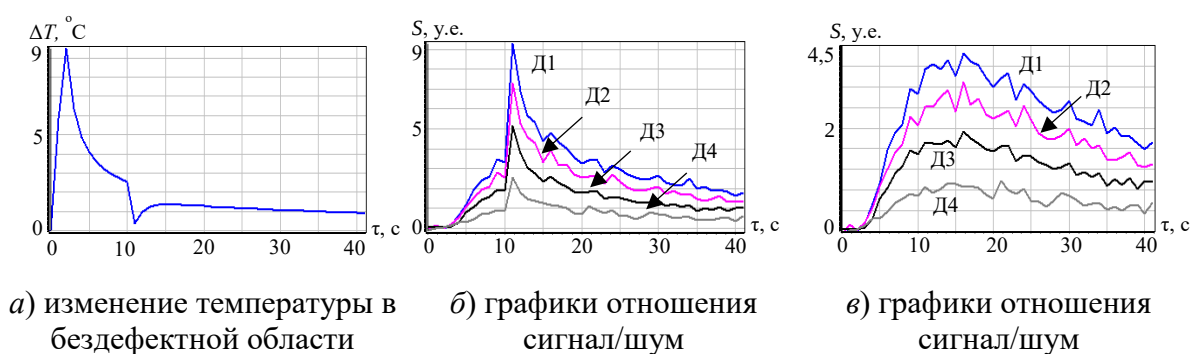


Рисунок 9 – Результаты ТНК с применением импульса принудительного охлаждения (а, б) и без него (в), полученные путем численного моделирования

Применение конвективного и контактного видов нагрева в процедуре ТНК способом тепловизионного сканирования позволило решить проблему контроля качества неокрашенных материалов, характеризующихся частичной прозрачностью в видимом диапазоне спектра излучения. Кроме того, полученные экспериментальные данные ТНК изделий с неравномерным коэффициентом поглощения поверхности, а также данные ТНК изделий с окраской белого и серого тонов, коэффициент поглощения поверхности которых ниже 0,7, продемонстрировали высокую эффективность обнаружения внутренних дефектов при конвективном виде нагрева по сравнению с оптическим нагревом (см. рисунок 10). Также, конвективный способ тепловой стимуляции, по сравнению с контактным нагревом, обеспечил более равномерное температурное поле контролируемой поверхности изделий, имеющих выступающие элементы, например, заклепки, ребра и. т.п., что соответственно обеспечило повышение эффективности дефектоскопии. На устройства, реализующие ТНК с применением контактного и конвективного источников нагрева, поданы заявки на патенты РФ №2024138277 «Сканирующий тепловой дефектоскоп для контроля перфорированных изделий» и №2024138445 «Сканирующий тепловой дефектоскоп для контроля полупрозрачных изделий».

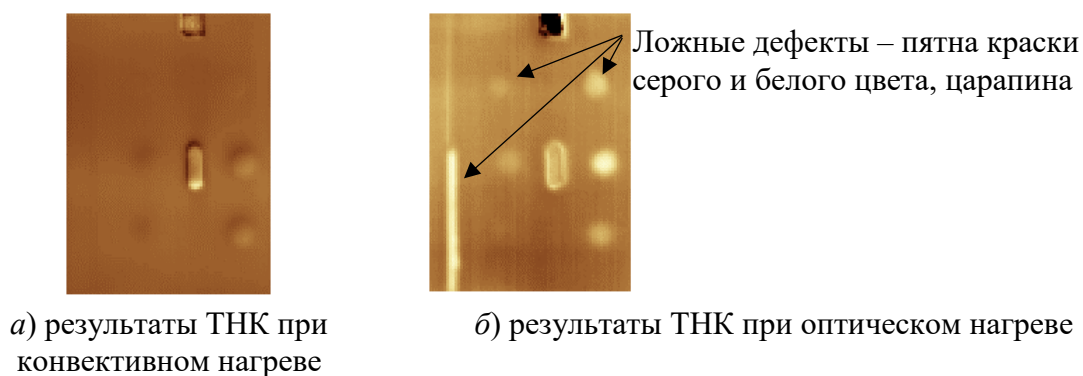


Рисунок 10 – Карты дефектов контрольного образца – многослойной полимерной пластины с внутренними расслоениями и ложными дефектами, полученные после обработки по МАГК

В **Главе 6** описаны разработанные портативные тепловые дефектоскопы, стационарные и роботизированные системы, представляющие собой функционирующие опытные образцы, часть из которых были разработаны для решения конкретных практических задач ТНК композиционных и многослойных структур в интересах промышленных заказчиков. В частности, приведены технические характеристики

роботизированного устройства ТНК крупногабаритных цилиндрических изделий (патент РФ №2697437С1), самодвижущегося теплового дефектоскопа (патент РФ №2786045С1), портативного теплового дефектоскопа (патент РФ №2696933С1), а также приведены соответствующие результаты испытаний контрольных образцов (см. рисунок 11).



а) роботизированная установка ТНК крупногабаритных объектов



б) самодвижущийся тепловой дефектоскоп



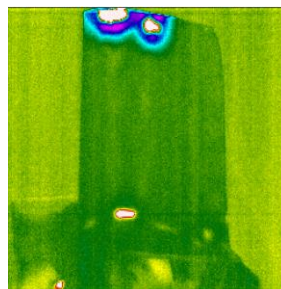
в) портативный тепловой дефектоскоп

Рисунок 11 – Устройства ТНК сканирующего типа (а, б) и устройство для контроля по отдельным зонам (в)

Приведено описание установок стационарного и портативного типов с УЗ источником тепловой стимуляции для ТНК металлических изделий с покрытиями, в частности, лопаток газотурбинных двигателей (рисунок 12).



а) внешний вид установок термоакустического контроля



б) карта дефектов лопатки турбины с выявленными трещинами

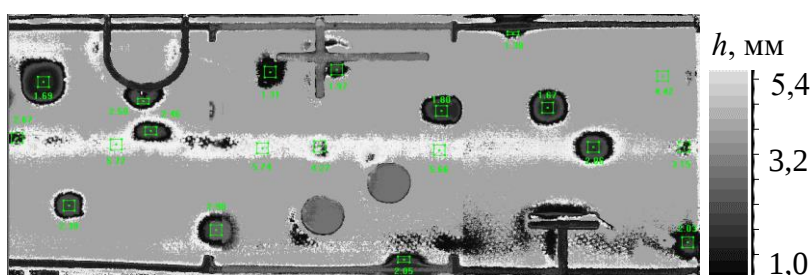
Рисунок 12 – Стационарная и портативная установки термоакустического контроля лопаток турбин (а) и результат термоакустического контроля (б)

Кроме того, в Главе 6 описана роботизированная установка комбинированного ТНК, основанного на поочерёдном использовании оптического и УЗ источников тепловой стимуляции (рисунок 13). Приведены соответствующие результаты

комбинированного ТНК изделия сложной геометрической формы из ПКМ, содержащего имитаторы производственных и эксплуатационных типов дефектов.



а) роботизированная лабораторная установка комбинированного ТНК



б) результаты комбинированного ТНК

Рисунок 13 – Роботизированная лабораторная установка (*а*) и результаты комбинированного ТНК изделия из ПКМ сложной геометрической формы (*б*)

Следует отметить, что обработка результатов комбинированного ТНК, полученная с помощью программных модулей ThermoFusion (свидетельство о регистрации программы для ЭВМ №2021663926) и Thermo_NN, позволяет классифицировать дефекты по типам, а также получать информацию об их параметрах в автоматизированном режиме.

В **Приложении А** диссертационной работы приведены патенты на изобретения устройств и способов, а также свидетельства о регистрации программ для ЭВМ. В **Приложении Б** приведены акты использования результатов диссертационного исследования и отзывы на научную работу Соискателя. В **Приложении В** приведены методика ТНК крупногабаритных цилиндрических объектов, методика ТНК с применением импульса принудительного охлаждения, а также методика комбинированного ТНК с описанием соответствующей процедуры обработки данных.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В диссертационной работе описаны основные результаты многолетних разработок методов, портативных и стационарных устройств ТНК различных материалов и изделий, включая программные алгоритмы дефектоскопии и дефектометрии, полученные Соискателем в Томском политехническом университете. Существенной особенностью диссертации, с точки зрения развития видов НК в целом, является ее практическая ориентированность, что подтверждается выполнением договоров с промышленными предприятиями передовых отраслей промышленности с соответствующим экономическим и социальным эффектом. В диссертационной работе соблюден принцип последовательности и комплексности исследований, включая теоретический анализ и практическое внедрение результатов. Разработки в области математических алгоритмов и программных модулей для обработки экспериментальных данных позволили существенно повысить производительность и повторяемость процедур тепловой дефектоскопии и дефектометрии. В части приборостроения разработаны оригинальные устройства, реализующие новые способы ТНК, которые обеспечивают высокую производительность испытаний изделий из композиционных материалов и многослойных структур.

Основные результаты работы - следующие.

Разработаны способ ТНК, основанный на применении принудительного охлаждения, и соответствующая методика ТНК, обеспечивающие обнаружение структурных неоднородностей в изделиях из ПКМ, поверхность которых характеризуется контрастом шума более 5 %, а также способ ТНК материалов, полупрозрачных в видимом диапазоне спектра излучения, основанный на использовании равномерно перемещающегося источника конвективного нагрева.

Разработана методика анализа температурных данных для автоматизированной дефектоскопии и дефектометрии, а также классификации дефектов по типам с помощью алгоритмов на базе ИНС. Разработан соответствующий программный модуль.

Разработаны способ и соответствующая методика комбинированного ТНК, обеспечивающие обнаружение характерных для ПКМ дефектов, а именно, ударных повреждений, трещин и расслоений, в течение одной процедуры контроля.

Разработаны способ и соответствующая методика ТНК крупногабаритных изделий плоской и цилиндрической формы, изготовленных из монолитных ПКМ и

многослойных структур типа металл-теплозащита, обеспечивающие производительность контроля до 25 м² в час.

Разработаны портативные и стационарные, в том числе роботизированные устройства ТНК изделий из ПКМ, металла, сотовых и многослойных структур типа металл-теплозащита, имеющих различные геометрические формы и габаритные размеры, пригодные для применения в лабораторных условиях и производственных помещениях.

Предложенные способы и методики, формирующие новые методы ТНК, в совокупности с разработанной аппаратурой, способствуют развитию и внедрению теплового вида неразрушающих испытаний, который, с учетом современных тенденций внедрения многослойных материалов и сложных структур, приобретает широкие перспективы применения на отечественных предприятиях авиационной и ракетно-космической отраслей промышленности.

Таким образом, Соискатель полагает, что выполненные диссертационные исследования вносят существенный вклад в решение крупной научной проблемы неразрушающего контроля качества современных многослойных материалов и изделий авиационной и ракетно-космической техники, имеющей важное хозяйственное значение и связанной с разработкой новых, научно обоснованных технологических решений.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

Приведены статьи в изданиях, индексируемых в базах данных Scopus и Web of Science, относящихся к 1-му и 2-му квартилям.

1) Vavilov V.P., **Chulkov A.O.**, Shiryayev V.V., Kuimova M.V., Zhang H. Noise suppression in pulsed IR thermographic NDT: Efficiency of data processing algorithms // NDT and E International. – 2024. – V. 148. – P.103240. DOI: 10.1016/j.ndteint.2024.103240 (Q1).

2) **Chulkov A.**, Moskovchenko A., Vavilov V. Enhancing generalizability of a machine learning model for infrared thermographic defect detection by using 3d numerical modeling // Frattura ed Integrita Strutturale. –2024. –V. 18. –P. 177–191. DOI:10.3221/IGF-ESIS.70.10 (Q2).

3) Vavilov V., **Chulkov A.**, Shiryayev V., Kladov D. A novel reference-free technique for processing one-sided thermal NDT results in the time domain // NDT & E International. – 2024. – T. 143. – C. 103032 (Q1).

4) Vavilov V.P., **Chulkov A.O.**, Nesteruk D.A., Kladov D.Y. Principle, equipment and applications of line-scanning infrared thermographic NDT // Journal of nondestructive evaluation. – 2023. DOI: 10.1007/s10921-023-01001-4 (Q2).

5) **Chulkov A.O.**, Vavilov V.P., Shagdyrov B., Kladov D. Automated detection and characterization of defects in composite-metal structures by using active infrared

thermography // Journal of Nondestructive Evaluation. – 2023. DOI:10.1007/s10921-023-00929-x (Q2).

6) **Chulkov A.**, Vavilov V., Nesteruk D., Burleigh D., Moskovchenko A. A method and apparatus for characterizing defects in large flat composite structures by Line Scan Thermography and neural network techniques // *Frattura ed Integrità Strutturale*, – 2023. – 17. – P. 110–121 (Q2).

7) Vavilov V.P., **Chulkov A.O.**, Smotrova S.A., Smotrov A.V., Scherbakov V.N., Storozhenko V.A. Infrared thermographic analysis of thermal property variations in composites subjected to impact damage, thermal cycling and moisture saturation // *Composite Structures*. – 2022. – T. 296. – P. 115927 (Q1).

8) Vavilov V.P., **Chulkov A.O.**, Shiryayev V.V. Practical limits of pulsed thermal NDT: The concept of additive/multiplicative noise // *NDT & E International*. – 2022. – T. 130. – P. 102677 (Q1).

9) Moskovchenko A., Švantner M., Vavilov V., **Chulkov A.** Analyzing probability of detection as a function of defect size and depth in pulsed IR thermography // *NDT & E International*. – 2022. – T. 130. – P. 102673 (Q1).

10) Nesteruk D., Vavilov V., **Chulkov A.**, Burleigh D. Simple and robust methodology of defect thermal characterization based on thermal quadrupoles and polynomial approximation // *NDT and E International*. – 2021. – V. 124. – P. 102522 (Q1).

11) **Chulkov A.O.**, Tuschl C., Nesteruk D.A., OswaldTranta B., Vavilov V.P., Kuimova M.V. The detection and characterization of defects in metal/nonmetal sandwich structures by thermal NDT, and the comparison of areal heating and scanned linear heating by optical and inductive methods // *Journal of Nondestructive Evaluation*. – 2021. DOI: 10.1007/s10921-021-00772-y (Q2).

12) **Chulkov A.O.**, Nesteruk D.A., Vavilov V.P., Shagdyrov B., Omar M., Siddiqui A.O., Prasad Y.L.V.D. Automated procedure for detecting and characterizing defects in GFRP composite by using thermal nondestructive testing // *Infrared Physics & Technology*. – 2021. – V. 114. – P. 103675 (Q2).

13) Moskovchenko A.I., Švantner M., Vavilov V.P., **Chulkov A.O.** Characterizing depth of defects with low size/depth aspect ratio and low thermal reflection by using pulsed IR thermography // *Materials*. – 2021. – T. 14. – № 8 (Q2).

14) Vavilov V., **Chulkov A.**, Dubinskii S., Derusova D., Zhvyrbliia V. Nondestructive testing of composite T-Joints by TNDT and other methods // *Polymer Testing*. – 2021. – V. 94. – P. 107012 (Q1).

15) **Chulkov A.O.**, Vavilov V.P., Sommer A., Pradere C., Siddiqui A., Prasad Y.L. Analyzing efficiency of optical and THz infrared thermography in nondestructive testing of GFRP by using the Tanimoto Criterion // *NDT & E International*. – 2022. DOI:10.1016/j.ndteint.2020.102383 (Q1).

16) Moskovchenko A.I., Vavilov V.P., **Chulkov A.O.**, Bernegger R., Maierhofer C. Detecting delaminations in semitransparent glass fiber composite by using pulsed infrared thermography // *Journal of Nondestructive Evaluation*. – 2020. – T. 39. – № 3. – P. 69 (Q2).

17) López F., Sfarra S., **Chulkov A.**, Vavilov V., Ibarra-Castaneda C., Zhang H., Maldague X.P.V., Omar M.A. Thermal stresses applied on helicopter blades useful to retrieve defects by means of infrared thermography and speckle patterns // *Thermal Science and Engineering Progress*. – 2020. – T. 18. – P. 100511 (Q1).

18) Moskovchenko A.I., Vavilov V.P., **Chulkov A.O.** Comparing the efficiency of defect depth characterization algorithms in the inspection of CFRP by using one-sided pulsed thermal NDT // *Infrared Physics & Technology*. – 2020. – T. 107. – P. 103289 (Q2).

19) **Chulkov A.O.**, Nesteruk D.A., Vavilov V.P., Moskovchenko A.I., Saeed N., Omar M. Optimizing input data for training an artificial neural network used for evaluating defect depth in infrared thermographic nondestructive testing // *Infrared Physics and Technology*. – 2019. DOI: 10.1016/j.infrared.2019.103047 (Q2).

20) **Chulkov A.O.**, Vavilov V.P., Sfarra S., Zhang H., Maldague X.P.V., Osman A., Szielasko K., Stumm C., Sarasini F., Fiorelli J. Evaluating thermal properties of sugarcane bagasse-based composites by using active infrared thermography and terahertz imaging // *Infrared Physics & Technology*. – 2019. – Т. 97. – Р. 432-439 (Q2).

21) Vavilov V., **Chulkov A.**, Moskovchenko A., Smotrov A., Smotrova S. Characterizing impact damage in GFRP/CFRP composites by determining thermal effusivity/diffusivity // *Measurement Science and Technology*. – 2019. – Т. 30. – № 3. – Р. 034003 (Q1).

22) Vavilov V.P., Marinetti S., **Chulkov A.O.**, Pan Y. Detecting water ingress in aviation honeycomb panels: Qualitative and quantitative aspects // *Polymer Testing*. – 2016. – V. 54. – Р. 270-280. DOI:10.1016/j.polymertesting.2016.07.023 (Q1).

23) Vavilov V.P., **Chulkov A.O.**, Derusova D.A., Pan Y. Thermal NDT research at Tomsk Polytechnic University // *Quantitative InfraRed Thermography Journal*. – 2016. – V.13. – Р.128-143. DOI:10.1080/17686733.2015.1131855 (Q2).

24) Romano M., **Chulkov A.O.**, Sommier A., Balagas D., Vavilov V.P., Pradere C., Batsale J-C. Broadband Sub-terahertz Camera Based on Photothermal Conversion and IR Thermography // *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*. – 2016. – V.37. – Р. 448-461. DOI: 10.1007/s10762-015-0241-x (Q1).

Патенты и свидетельства о регистрации программ для ЭВМ.

1) Сканирующий тепловизионный дефектоскоп: пат. №2786045 С1. Российская Федерация: МПК 51 G01N 25/72, G01J 5/60 / **Чулков А.О.**, Вавилов В.П., Нестерук Д.А., Ширяев В.В.: патентообладатель Томский политехнический университет. Дата публикации 16.12.2022. Бюл. 35.

2) Способ теплового неразрушающего контроля крупногабаритных цилиндрических изделий: пат. №2774040 С1. Российская Федерация: МПК 51 G01N 25/72, G01J 5/00 / Вавилов В.П., **Чулков А.О.**, Нестерук Д.А., Ширяев В.В., Шильников Г.В., Щепелин В.Я., Перепелица А.А.: патентообладатель Томский политехнический университет. Дата публикации 14.06.2022. Бюл. 17.

3) Устройство для теплового неразрушающего контроля крупногабаритных цилиндрических изделий: пат. №2697437 С1. Российская Федерация: МПК 51 G01N 25/72 / Вавилов В.П., Ширяев В.В., Нестерук Д.А., **Чулков А.О.**, Шильников Г.В., Щепелин В.Я., Перепелица А.А.: патентообладатель Томский политехнический университет. Дата публикации 14.08.2019. Бюл. 23.

4) Тепловой дефектоскоп: пат. №2696933С1. Российская Федерация: МПК 51 G01N 25/72, G01J 5/00, G01J 5/60 / Вавилов В.П., Ширяев В.В., **Чулков А.О.**: патентообладатель Томский политехнический университет. Дата публикации 07.08.2019. Бюл. 22.

5) Устройство для бесконтактного определения коэффициента температуропроводности твердых тел: пат. №2549549. Российская Федерация: МПК 51 G01N 25/18, G01J 5/60 / Вавилов В.П., **Чулков А.О.**, Ширяев В.В.: патентообладатель Томский политехнический университет. Дата публикации 27.04.2015. Бюл. № 12.

6) Тепловой дефектоскоп: пат. №144096U1. Российская Федерация: МПК 51 G01N 25/00 / Вавилов В.П., Ширяев В.В., **Чулков А.О.**: патентообладатель Томский политехнический университет. Дата публикации 10.08.2014г. Бюл. № 22.

7) Тепловой дефектоскоп для неразрушающего контроля цилиндрических металлических изделий: пат. №142185 U1. Российская Федерация: МПК 51 G01N 25/00 / Вавилов В.П., **Чулков А.О.**, Ширяев В.В.: патентообладатель Томский политехнический университет. Дата публикации 20.06.2014. Бюл. 17.

8) Тепловизионная дефектоскопическая система: пат. №2599919C1. Российская Федерация: МПК 51 G01N 25/72 / Вавилов В.П., Ширяев В.В., **Чулков А.О.**: патентообладатель Томский политехнический университет. Дата публикации 20.10.2016 г. Бюл. № 29.

9) Способ бесконтактного одностороннего активного теплового неразрушающего контроля: пат. №2590347. Российская Федерация: МПК 51 G01N 25/72 / Вавилов В.П., Ширяев В.В., **Чулков А.О.**: патентообладатель Томский политехнический университет. Дата публикации 10.07.2016. Бюл. № 19.

10) Тепловизионная система для проведения наружной тепловизионной съемки: пат. №2575798 C1. Российская Федерация: МПК 51 G01N 25/00 / Вавилов В.П., Ширяев В.В., **Чулков А.О.**, Лариошина И.А.: патентообладатель Томский политехнический университет. Дата публикации 20.02.2016 г. Бюл. № 5.

11) Тепловизионный дефектоскоп: пат. №2580411C1. Российская Федерация: МПК 51 G01N 25/00, G01J 5/60 / Вавилов В.П., Ширяев В.В., **Чулков А.О.**, Нестерук Д.А. патентообладатель Томский политехнический университет. Дата публикации 10.04.2016. Бюл. 10.

12) Автоматизированная идентификация дефектов в инфракрасных термограммах: свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ №2018615349. Российская федерация / **Чулков А.О.**, Нестерук Д.А., Вавилов В.П.: патентообладатель Томский политехнический университет. Дата публикации 07.05.2018. Бюл. № 5.

13) Расчет температурных полей в анизотропных телах с внутренними источниками тепловыделения: свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ №2018615919. Российская федерация / Суханов М.С., Симонова О.С., Вавилов В.П., **Чулков А.О.**: патентообладатель Томский политехнический университет. Дата публикации 18.05.2018. Бюл. № 5.

14) Выявление дефектов и расчет их площади по предоставленному изображению в заданном диапазоне оттенков: свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ №2020612786. Российская федерация / Шпильной В.Ю., Дерусова Д.А., **Чулков А.О.**: патентообладатель Томский политехнический университет. Дата публикации 03.03.2020. Бюл. № 3.

15) Thermo_NN: свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ №2020619186. Российская федерация / **Чулков А.О.**, Нестерук Д.А., Вавилов В.П.: патентообладатель Томский политехнический университет. Дата публикации 13.08.2020. Бюл. № 8.

16) ThermoSon: свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ №2020619856. Российская Федерация / Суханов М.С., Вавилов В.П., **Чулков А.О.**, Дерусова Д.А.: патентообладатель Томский политехнический университет. Дата публикации 25.08.2020. Бюл. № 9.

17) ThermoScan: свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2021664038. Российская Федерация / **Чулков А.О.**, Нестерук Д.А., Вавилов В.П.; патентообладатель Томский политехнический университет. Дата публикации 30.08.2021. Бюл. № 9.

18) ThermoFusion: свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ №2021663926. Российская Федерация / **Чулков А.О.**, Нестерук Д.А., Вавилов В.П.:

патентообладатель Томский политехнический университет. Дата публикации 26.08.2021. Бюл. № 9.

19) Thermo_Visual: свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ №2022662013. Российская Федерация / **Чулков А.О.**, Нестерук Д.А., Вавилов В.П.: патентообладатель Томский политехнический университет. Дата публикации 29.06.2022. Бюл. № 7.

20) ThermoCalc_HC: свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ №2022662003. Российская Федерация / **Чулков А.О.**, Нестерук Д.А., Вавилов В.П., Суханов М.С.: патентообладатель Томский политехнический университет. Дата публикации 29.06.2022. Бюл. № 7.

21) ThermoWaves_NDT: свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ №2023660384. Российская Федерация / Ширяев В. В., **Чулков А.О.**, Вавилов В.П.: патентообладатель Томский политехнический университет. Дата публикации 19.05.2023. Бюл. № 5.

22) ThermoCalc 3D Pro: свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2023688527. Российская Федерация / Вавилов В.П., Суханов М.С. **Чулков А.О.**; патентообладатель Томский политехнический университет. Дата публикации 22.12.2023. Бюл. № 1.