

На правах рукописи



Сазонникова Надежда Александровна

**ЛАЗЕРНЫЕ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ
СИСТЕМЫ ДЛЯ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ
ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ
И ДВИГАТЕЛЕЙ**

Специальность 05.11.16 – Информационно-измерительные
и управляющие системы (в промышленности и медицине)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

доктора технических наук

Самара– 2017

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» на кафедре автоматических систем энергетических установок

Научный консультант: доктор технических наук, профессор Мордасов Василий Иванович, профессор кафедры автоматических систем энергетических установок ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева»

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор Львов Алексей Арленович, профессор кафедры инфокоммуникационных систем и программной инженерии ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.»

доктор технических наук, профессор Соловьев Николай Алексеевич, заведующий кафедрой программного обеспечения вычислительной техники и автоматизированных систем ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет»

доктор технических наук, профессор, Шарнин Леонид Михайлович, заведующий кафедрой автоматизированных систем обработки информации и управления ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева - КАИ»

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет», г. Волгоград

Защита состоится "09" февраля 2018 г. в 10.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.288.02 ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» по адресу: 450008, г. Уфа, ул. К. Маркса 12

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» и на сайте www.ugatu.su.

Автореферат разослан _____ 2017 года

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук, доцент



А.Ю. Демин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Развитие авиационной и ракетно-космической отраслей имеет важное значение для обороноспособности и экономики страны. При этом первостепенное значение уделяется проблеме повышения надежности и долговечности летательных аппаратов (ЛА) и газотурбинных двигателей (ГТД), которая неразрывно связана с качеством деталей, так как практически все эксплуатационные показатели изделий определяются геометрическими параметрами, физико-механическими свойствами рабочих поверхностей. Совершенствование технологий и производственных процессов изготовления ЛА и ГТД, усложнение конструкций и ужесточение эксплуатационных требований обуславливают высокие требования к определению геометрии и комплекса физико-механических характеристик поверхности и точности проводимых измерений с помощью информационно-измерительных систем (ИИС).

Измерение комплекса характеристик поверхностей требуется также для решения ряда задач в процессе обнаружения и распознавания в процессе управления и сопровождения ЛА.

При изготовлении и эксплуатации требуется выявлять элементы геометрии поверхности с размерами от 50 мкм при дефектоскопии, от 30 см при обнаружении ЛА в воздухе и космосе, определять параметры рассеяния излучения для оценки характеристик материалов – шероховатости, рассеивающих частиц, структурных неоднородностей, температуры.

В процессе измерений с помощью ИИС должны быть соблюдены следующие требования: учет влияния температуры и других внешних факторов на результаты измерений, выявление дефектов и отклонений геометрии поверхности на фоне коррозии и структурных изменений состояния поверхности, обеспечение измерения комплекса параметров поверхности и соблюдение единства всех измерительных средств.

Указанным требованиям отвечают лазерные ИИС, позволяющие определять комплекс пространственно-распределенных параметров поверхности для оценки геометрии и спектрально-энергетических характеристик отраженного излучения для определения физико-механических свойств материалов поверхностей.

До настоящего времени не исследовано поведение отраженного сигнала при одновременном наличии различных видах дефектов и состояний поверхности, не изучено влияние параметров зондирующего излучения на точность определения геометрических характеристик поверхности и не создан банк данных оптических характеристик поверхности конструкционных материалов для формирования эталонов и априорной информации для построения ИИС зондирования поверхностей конструкционных материалов.

При построении ИИС к ним предъявляются требования по снижению массогабаритных характеристик и энергопотребления источников излучения. Указанным требованиям отвечают полупроводниковые лазеры. Однако для них уровень нестабильности мощности излучения и оси диаграммы направленности может достигать 20...25%, что приводит к существенному снижению

соотношения сигнал/шум и большим значениям инструментальной составляющей погрешности измерений.

Степень разработанности темы исследования. Существующие средства дефектоскопии не обеспечивают возможности одновременного выявления различных видов дефектов с учетом состояния поверхности, не имеют возможности определения места расположения и ориентации дефектов. Разработке лазерных дефектоскопических систем посвящены работы П.А. Сорокина, В.С. Котлярова, В.В. Котляра, А.Н. Малова, В.Г. Волостникова, А.Н. Шилина, В.В. Тарасова, Р.Т. Chang, I. Kaufman, D.Y. Shyong, An Shyang Chu, M.A. Butler, F. Delplancke и др. Однако данные системы предназначены для выявления частных видов дефектов или состояний поверхности конструкционных материалов и не обеспечивают возможности измерения комплекса параметров поверхностного слоя для распознавания дефектов, не обеспечивают измерения глубины дефектов и элементов поверхности для достоверного их распознавания.

В работах Б.А. Чичигина, В.Н. Демкина и др. авторов показана целесообразность применения полупроводниковых лазеров в ИИС для оценки состояния поверхности. При этом погрешность определения геометрических параметров дефектов определяется флуктуациями мощности источника излучения. Отмечается, что погрешность, связанная с нестабильностью оси диаграммы направленности, может достигать 15%. Однако до настоящего времени не выбраны перспективные виды излучателей, имеющие наименьшую чувствительность к колебаниям температуры, и не исследованы методы стабилизации характеристик полупроводниковых лазеров.

Теоретические и экспериментальные исследования в области регистрации и обработки оптических сигналов проводились П.А. Бакутом, Л.В. Лабунцом, Е.В. Бурым, В.Е. Зуевым, Е.Г. Лебедько, а также зарубежными учеными Н.Р. Baltes, W-M. Voerner и др. В работах этих авторов обсуждается перспективность применения импульсных лазерных излучателей в ИИС, в том числе полупроводниковых с импульсами малой длительности ($10^{-10} \dots 10^{-9}$ с) для снижения погрешности определения расстояний и получения оценок геометрических характеристик поверхности ЛА.

В настоящее время отсутствует комплексный подход к определению оптических характеристик поверхности для обеспечения требуемого уровня вероятностей обнаружения и распознавания объектов и элементов их поверхностей по совокупности оптических параметров, не разработаны обобщенных критериев для оценки влияния параметров зондирующего лазерного излучения на величину соотношения сигнал/шум, не выбраны наиболее приемлемые источники лазерного излучения и способы стабилизации параметров лазерного излучения для обеспечения требуемого соотношения сигнал/шум, не разработаны лазерные ИИС повышенной точности.

Таким образом, разработка теоретических основ создания лазерных ИИС для оценки состояния поверхностей элементов конструкции летательных аппаратов и двигателей является важной научной проблемой.

Данная работа выполнялась в рамках Приказа Комитета высшей школы Министерства высшей школы и технической политики об утверждении

межвузовской научно-технической программы «Высокие технологии Высшей школы» № 466 от 21.07.92 г., ОКР на создание космических систем ОН НК-00614, ТТЗ МО №198 от 31.03.96, научно-технической программы «Развитие научного потенциала высшей школы», по теме СПП РАН «Поисковые исследования методов и средств построения высокоточных оптико-электронных систем с лазерным подсветом для сопровождения высоколетящих целей в условиях сложной фоноцелевой обстановки» (шифр «Сугроб» 201х-093, 2001-2005 гг., Постановление Правительства Российской Федерации от 01.02.2001 г. №75-4), научно-технических программ Государственного комитета СССР по науке и технике «Лазерная техника и технология» и «Создание лазерной техники для народного хозяйства», Федеральной целевой программы «Государственная поддержка интеграции высшего образования и фундаментальной науки» (указ от 13 июня 1996 года № 903), Межвузовской научно-технической программы «Электронно-ионно-плазменные комплексные упрочняющие технологии» (приказ от 28.06.99 № 1797), научно-технической программы Министерства образования РФ «Научные исследования высшей школы по приоритетным направлениям науки и техники» (приказ от 19.02.2001 № 539), «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009-2013 годы» (Постановление № 568 от 28.07.2008 г.), «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы» (Постановление Правительства РФ от 21 мая 2013 г. № 426), по программе повышения конкурентоспособности Самарского национального исследовательского университета им. академика С.П. Королева (главное направление научно-образовательной деятельности «Аэрокосмическое двигателестроение»).

Объект исследования: лазерные информационно-измерительные системы для оценки состояния поверхностей конструкционных материалов.

Предмет исследования: точностные характеристики лазерных информационно-измерительных систем для измерения комплекса характеристик поверхностей конструкционных материалов.

Цель диссертационной работы – разработка теоретических основ построения лазерных ИИС повышенной точности для измерений комплекса геометрических и отражательных характеристик поверхностей элементов конструкции летательных аппаратов и двигателей за счет управления параметрами лазерного излучения.

Для достижения поставленной цели были определены следующие задачи:

1. Провести анализ характеристик поверхностного слоя элементов конструкций летательных аппаратов и двигателей и задач измерений при оценке состояния поверхностей с помощью лазерных ИИС.

2. Построить обобщенную математическую модель, описывающую величину отраженного сигнала в ИИС в зависимости от соотношения параметров зондирующего лазерного излучения и элементов поверхности, выполнить анализ факторов, ограничивающих точность измерений.

3. Исследовать влияния параметров зондирующего лазерного излучения на вероятность обнаружения и распознавания элементов поверхности элементов конструкций при использовании лазерных ИИС.

4. Разработать методики и испытательное оборудование для экспериментальной оценки эффективности лазерных ИИС для оценки состояния поверхностей элементов конструкций и определения оптических характеристик конструкционных материалов.

5. Выполнить теоретический анализ и экспериментальное исследование процессов, ограничивающих достижение высокой стабильности параметров лазерного излучения, исследование их влияния на точность проводимых измерений. Провести экспериментальное исследование зависимостей отражательных характеристик поверхности конструкционных материалов от вида его обработки, температуры поверхностного слоя с учетом пространственно-временных характеристик зондирующего излучения.

6. Создать обобщенную методику построения лазерных ИИС, обеспечивающих требуемую точность измерений параметров элементов поверхностей параметров ЛА и ГТД, и провести экспериментальную оценку их возможностей.

7. Разработать и внедрить методики измерений параметров поверхностей элементов конструкций ЛА и ГТД с использованием лазерных ИИС в производственных условиях и в составе систем сопровождения ЛА.

Положения, выносимые на защиту:

1. Обобщенная математическая модель величины отраженного сигнала лазерных ИИС для исследования состояния поверхностей конструкционных материалов в зависимости от параметров зондирующего лазерного излучения и характеристик поверхности.

2. Зависимости вероятностей обнаружения и распознавания элементов поверхности конструкционных материалов от параметров лазерного излучения с использованием лазерных ИИС, полученные в ходе численного моделирования.

3. Конструкция испытательных стендов для экспериментальной оценки работоспособности лазерных ИИС и определения оптических характеристик конструкционных материалов.

4. Банк данных отражательных характеристик конструкционных материалов в зависимости от угла падения излучения, длины волны, длительности и скважности импульса и плотности мощности излучения для формирования эталонных характеристик ИИС.

5. Обобщенная методика построения лазерной ИИС и разработанная на ее основе методика проведения дефектоскопии поверхности конструкционных материалов.

6. Экспериментальные зависимости возможностей лазерных ИИС обнаружения и распознавания, полученные с использованием фотометрических моделей.

Научная новизна настоящего исследования заключается в следующем:

1. Разработана обобщенная модель отраженного сигнала лазерной ИИС, которая в отличие от ранее существующих позволяет установить энергетическое

соответствие зондирующего сигнала и определить отдельно зависимости зеркальной и диффузной составляющих от параметров зондирующего лазерного излучения и элементов поверхности для определения комплекса геометрических и физико-механических характеристик поверхности. Основные положения математической модели подтверждены при проведении физического моделирования процесса отражения лазерного излучения от поверхности конструкционных материалов.

2. Впервые выявлена периодическая зависимость величины отраженного сигнала ИИС от числа переотражений n в элементе поверхности. Для обеспечения возможности определения геометрических характеристик элементов поверхности с точностью до половины ширины пятна с вероятностью не менее 0,8...0,85 необходимо проводить измерения при двух углах падения излучения при обеспечении разности значений показателя $\Delta n > 0,5$.

3. С использованием выявленных безразмерных критериев проведена классификация элементов поверхности с точки зрения их оптических свойств. Для трещин и других элементов геометрии поверхности при $n \leq 4$ точность определения глубины составляет половину ширины пятна.

4. Исследованы зависимости отражательных характеристик поверхности от длины волны, угла падения излучения на поверхность, длительности и скважности импульса и создан банк данных оптических характеристик для формирования эталонов ИИС. Установлены зависимости показателя индикатрисы рассеяния от длины волны излучения, длительности импульса и температуры поверхности для однозначной оценки физико-механических свойств поверхности при изменении длины волны в диапазоне 0,56 мкм до 10,6 мкм, угла падения излучения в диапазоне 30...45°, скважности импульса от 1 до 6, температуры поверхности в диапазоне 173...373 К.

5. Показано что для измерения геометрических параметров элементов поверхности с точностью до 10 мкм, и отражательной способности с точностью до 0,1 необходимо использовать термостабилизированные полупроводниковые лазеры (с квантоворазмерной структурой активной среды с уровнем стабилизации инжекционного тока до 95...97 %)

Практическая значимость проведенных исследований и разработок заключается в следующем:

1. Определены требования к источнику излучения и выбраны наиболее приемлемые типы полупроводниковых излучателей для лазерных ИИС, характеризующиеся наименьшей чувствительностью к влиянию температуры и тока накачки, и способы стабилизации мощности лазерного излучения для снижения уровня флуктуаций мощности до величины 3...5%.

2. Выявлены условия измерений зеркальной составляющей отраженного сигнала ИИС, позволяющие определить геометрию элементов поверхности и диффузной составляющей отраженного сигнала ИИС при изменении частоты следования импульсов в диапазоне 10...30 Гц, длины волны излучения 3...10 мкм и скважности импульса (отношения периода повторения импульсов к их длительности) в диапазоне 1...5, изменения угла падения

излучения на поверхность в диапазоне $\pm 45^\circ$ для определения вида характеристик материалов внешней компоновки ЛА.

3. Создан банк данных оптических характеристик поверхностей материалов внешней компоновки летательных аппаратов, позволяющий получить априорную информацию для выбора параметров лазерной ИИС. Показано, что для различных материалов изменение коэффициента диффузного отражения составляет: при изменении длины волны в диапазоне 0,56 мкм до 10,6 мкм – 35...45%, при изменении угла падения излучения в диапазоне $30...45^\circ$ – 25...30%, при скважности импульса $1 \leq S \leq 5$ – 30...35%, при изменении температуры в $173...373\text{ K}$ – 30...35%. Уровень шумов ИИС, обусловленный неоднородностью отражательной способности конструкционных материалов, составляет 5...15%.

4. Разработано испытательное оборудование для экспериментальной оценки эффективности лазерных ИИС дистанционного зондирования поверхности и определения оптических характеристик конструкционных материалов, обеспечивающее перестройки длины волны в диапазоне $0,63\text{ мкм} \leq \lambda \leq 10,6\text{ мкм}$, частота следования импульсов $1 \leq f \leq 300\text{ с}^{-1}$, скважность импульса $1 \leq S \leq 5$.

5. Создана обобщенная методика построения и оптимизации лазерных ИИС для оценки состояния поверхностей конструкционных материалов с учетом области их применения. На ее основе разработаны методики проведения дефектоскопии и внедрены на предприятиях АО «РКЦ «Прогресс», ПАО «КУЗНЕЦОВ», НПП «Радиант». Применение дефектоскопии с использованием лазерных ИИС в условиях производства позволило снизить себестоимость проведения диагностики в 1,5...2,0 раза, повысить уровень использования в изделиях аэрокосмической техники деталей с улучшенными эксплуатационными характеристиками (в том числе с более высоким уровнем адгезионной прочности) на 20%. Использование лазерных ИИС для выявления поверхностных дефектов в виде трещин, забоин, отслоения покрытий, возникающих в процессе обработки, позволяет повысить показатели надежности элементов конструкций, увеличить гарантируемый срок работы с регламентируемой безопасностью серийно выпускаемых изделий. Разработана методика проектирования лазерной ИИС в составе системы обнаружения объектов и оценки ее эффективности с помощью созданного специализированного испытательного оборудования

Внедрение результатов. Основные результаты теоретических и экспериментальных работ внедрены в промышленность и учебный процесс.

1. На предприятии АО «РКЦ «Прогресс» (г. Самара) внедрены:

- Методика проведения и аппаратное обеспечение лазерной дефектоскопии конструкционных материалов в условиях производства;
- Методика проектирования оптико-электронной системы наблюдения, оценки ее эффективности с помощью созданного специализированного испытательного оборудования;
- Специализированный испытательный стенд и методика для экспериментальной оценки влияния фоновой обстановки на потери мощности лазерного излучателя при его прохождении через диспергированные среды;

- Обобщенная методика построения и оптимизации систем дистанционного зондирования с учетом области их применения;

- Рекомендации и руководящие технические материалы по оценке эффективности и повышению разрешающей способности обнаружения при использовании вспомогательного лазерного перестраиваемого импульсно-периодического излучения для построения систем сопровождения и сближения ЛА;

- Нормативно-техническая документация по дефектоскопии образцов конструкционных материалов при производстве элементов конструкций космических аппаратов «Фотон», «Бион», «Ресурс-ДК».

2. На предприятии ПАО «КУЗНЕЦОВ» (г. Самара) внедрены методика и руководящие технические материалы для лазерной дефектоскопии элементов конструкций газотурбинного двигателя с многослойными защитными и ударопрочными покрытиями.

3. В ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» внедрены:

- В НИИ Технологий и проблем качества - системы контроля и диагностики параметров процесса плазменного напыления покрытий при нанесении теплозащитного покрытия внутренней поверхности камеры сгорания газотурбинного двигателя НКЗ6СТ, срабатываемого покрытия лабиринтных уплотнений компрессора высокого давления НК-32, износостойкого покрытия цилиндра поршневого двигателя П-032 малоразмерного летательного аппарата. Разработаны руководящие технические материалы «Лазерный и терморadiационный контроль параметров плазменного нанесения покрытий»;

- В учебный процесс по курсам «Лазерные системы специального назначения», «Проектирование лазерных систем» - методики построения лазерных ИИС для оценки состояния поверхностей конструкционных материалов и проведения измерений с их применением.

4. На предприятии НПП «Радиант» (г. Самара) внедрена методика лазерной дефектоскопии конструкционных материалов.

5. В ФГБОУ ВО «Самарский государственный медицинский университет» внедрена диагностическая установка и метод исследования оптических характеристик тканей суставов (хряща).

Реализация результатов работы подтверждена актами внедрения.

Апробация работы. Основные результаты диссертации докладывались на конференциях: IX Межнациональном совещании «Радиационная физика твердого тела», Севастополь, 1999 г., V Российско-Китайском международном симпозиуме «Перспективные материалы и процессы», Байкальск, 1999г., Российско-Китайском симпозиуме по космическим наукам и технике, Самара, 1992 г., I Поволжской научно-практической конференции «Лазеры в медицине и экологии», Самара, 1998 г., Объединенной международной научно-технической конференции, посвященной памяти акад. Н.Д.Кузнецова, Самара, 1999 г., VIII Республиканской научно-методической конференции «Пути и методы совершенствования учебного процесса», Самара, 1999 г., Российском научно-методическом семинаре «Теория и практика экологического мониторинга в

образовательных учреждениях», Санкт-Петербург, 1999 г., Втором международном конгрессе «Лазер и здоровье' 99», Москва, 1999 г., Всероссийской конференции, посвященной 15-летию организации Самарского научного центра РАН и 60-летию образования кафедры производства летательных аппаратов и управления качеством в машиностроении, Самара, 2004г., IV Международной научно-технической конференции «Лазерные технологии и средства их реализации», Санкт-Петербург, 2004 г., Общероссийской научно-технической конференции «Третьи Уткинские чтения», Санкт-Петербург, 2007г., Седьмой международной научно-практической конференции «Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности», 28-30.04.2009, Санкт-Петербург, Третьей международной научно-технической конференции «Металлофизика, механика материалов, наноструктур и процессов деформирования «Металлдеформ – 2009», Самара, СГАУ, 3-5 июня 2009 г., Международной научно-практической конференции «Ашировские чтения», Самара, 2002г., XXXIII Научно-технической конференции «Проектирование систем», Москва, МГТУ им. Баумана, 2006 г., Международной научно-технической конференции «Проблемы и перспективы развития двигателестроения», Самара, 2003 г., Международной конференции «Проблемы и перспективы развития двигателестроения», Самара, 2006 г., Международной конференции «Проблемы и перспективы развития двигателестроения», Самара, 5 июня 2009 г., Международной конференции «Оптика и образование – 2012», Санкт-Петербург, 2012г., Международном научно-техническом форуме, посвященном 100-летию ОАО «Кузнецов» и 70-летию СГАУ, Самара, 2012 г., XIV Международной конференции «Проблемы управления и моделирования в сложных системах», Самара, 2012 г., Международной конференции «Лазеры. Измерения. Информация - 2012», Санкт-Петербург, 2012 г., Международной научно-технической конференции «Проблемы и перспективы развития двигателестроения», Самара, 2014 г.

Соответствие паспорту научной специальности. Область исследований соответствует паспорту специальности 05.11.16 – «Информационно-измерительные и управляющие системы (в промышленности и медицине)», а именно пункту 1 – «Научное обоснование перспективных информационно-измерительных и управляющих систем, систем их контроля, испытаний и метрологического обеспечения, повышение эффективности существующих систем» и пункту 6 – «Исследование возможностей и путей совершенствования существующих и создания новых элементов, частей, образцов информационно-измерительных и управляющих систем, улучшение их технических, эксплуатационных, экономических и эргономических характеристик, разработка новых принципов построения и технических решений».

Личный вклад автора в проведенное исследование заключается в проработке состояния вопроса, постановке цели и задач исследований, постановке экспериментальных исследований, разработке математических моделей и алгоритма статистического моделирования, организации внедрения, в ведущем участии в проведении экспериментальных исследований, расчетов, внедрении результатов исследований.

Публикации. По теме диссертационной работы опубликованы 55 работ, в том числе 19 статей в журналах, входящих в перечень издательств, рекомендованных ВАК РФ, 13 статей в других Российских и международных изданиях, 18 тезисов докладов на Российских и международных конференциях, посвященных созданию лазерных ИИС для диагностики состояния изделий авиационной техники, общего машиностроения, оборудования нефтегазодобывающей отрасли, 4 патента Российской Федерации и 1 свидетельство о регистрации программы.

Структура и объем работы. Диссертация содержит 330 страниц машинописного текста, 110 рисунков, 21 таблицу и состоит из введения, шести глав, общих выводов, списка использованных источников и приложений.

Основное содержание работы

Во введении показана актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи исследований, раскрыты научная новизна и практическая ценность, приведены результаты реализации и апробации.

В первой главе рассмотрена поверхность элементов конструкций летательных аппаратов и двигателей как объект измерений.

Отмечается, что поверхность элементов конструкций ЛА и ГТД характеризуется сложной формой и сочетанием различных материалов с различным размером рассеивающих частиц, шероховатостью, наличием окисных пленок, повреждений, загрязнений, различным распределением температуры по поверхности с одновременным наличием нескольких признаков. В настоящее время широко применяются конструкции с неоднородными поверхностями, в том числе композиционными материалами и многокомпонентными покрытиями. Совершенствование технологий и производственных процессов изготовления ЛА и ГТД, усложнение конструкций и ужесточение эксплуатационных требований обуславливают модернизацию и реконструкцию аппаратного обеспечения систем дистанционного зондирования поверхностей.

Приводится классификация основных видов производственных дефектов и повреждений поверхностей ЛА и ГТД, а также поверхности элементов конструкций.

Все элементы поверхности классифицируются по соотношению шага S неровностей (или ширины) к их высоте h (или глубине) (рисунок 1):

- элементы геометрии поверхности и макронеровности, представляющие собой отклонения поверхности от правильной геометрической формы, $S/h > 1000$;
- волнистость, характеризующаяся периодически повторяющимися неровностями, шаг которых значительно превышает их высоту $S/h > 50$;
- микронеровности или шероховатости, представляющие собой совокупность неровностей с относительно малым шагом $S/h < 50$.

В качестве критерия выступает средняя высота шероховатостей, которая оценивается согласно критерию Рэлея

$$h < \frac{\lambda}{8} \sin \phi, \quad (1)$$

где λ – длина волны; h – высота шероховатости; ϕ – угол падения.

В зависимости от соотношения размеров элементов поверхности с размерами пятна излучения и длиной волны, а также от угла падения возможно зеркальное отражение и переотражение излучения в одном элементе поверхности или усреднение характеристик нескольких элементов по пятну.

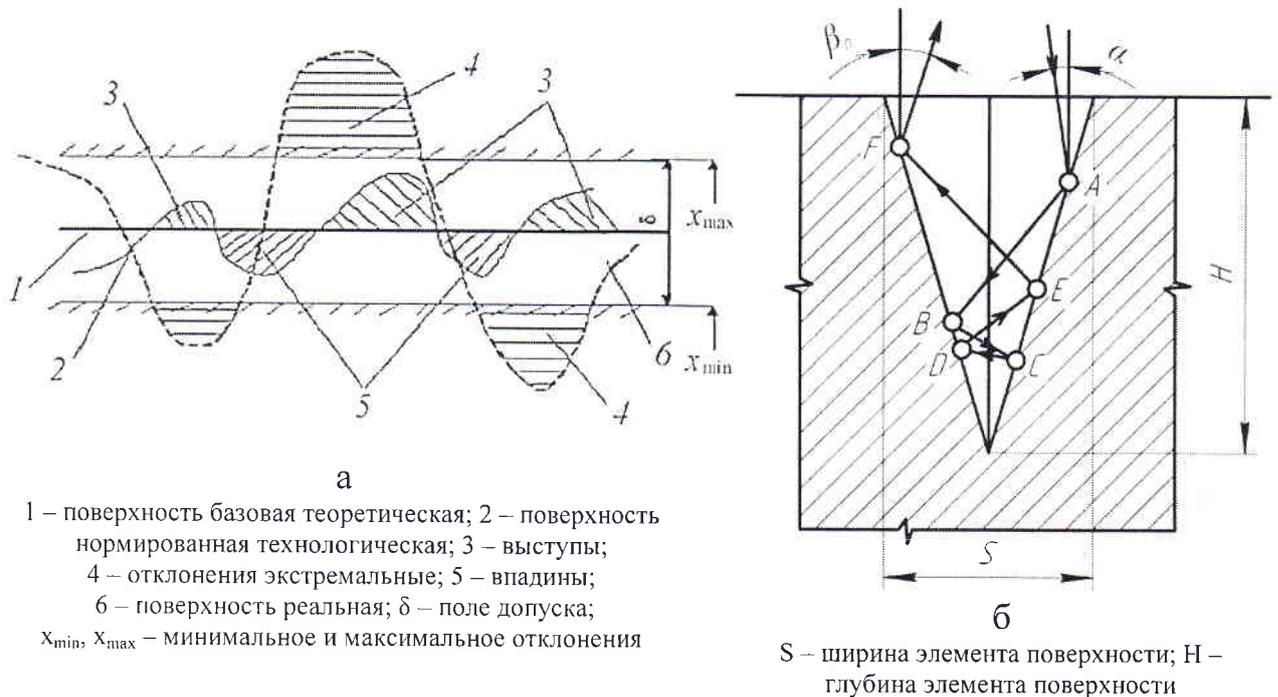


Рисунок 1 – модель элементарного контура поверхности (а) и модель элемента геометрии поверхности (б)

Для оценки характеристик материалов (качество нанесенного покрытия, размеры рассеивающих частиц, шероховатость, температура поверхности) также необходимо измерять зависимость отражательной способности и индикатрисы рассеяния от длины волны, угла падения излучения. Определение геометрических характеристик элементов поверхности и параметров рассеяния также проводится в измерительных системах, предназначенных для обнаружения и сопровождения ЛА для обеспечения возможности их идентификации.

Комплексный подход к описанию систем дефектоскопии и системам обнаружения и распознавания ЛА при использовании непрерывного и импульсного излучения возможен в рамках фотометрического описания сигналов. Как показано в работах И.А. Непогодина, фотометрическое описание сигналов для систем с импульсным излучением возможно, если форма отраженного импульса повторяет форму зондирующего. До настоящего времени недостаточно исследованы границы существования квазистационарного режима в зависимости от длительности и скважности импульсов.

Наиболее общим критерием информативности систем дистанционного зондирования поверхностей конструкционных материалов является повышение величин вероятностей обнаружения и распознавания элементов поверхностей за счет измерения требуемого комплекса оптических характеристик поверхности и

повышения точности измерения геометрических параметров поверхностного слоя и параметров рассеяния.

На основе анализа существующих методов измерений и их возможностей сформулированы цели и задачи исследования.

Во второй главе рассмотрена математическая модель процесса отражения излучения от поверхности, определены величины составляющих сигнала.

Исходя из функций информационно-измерительной системы для оценки состояния поверхностей элементов конструкции летательных аппаратов и двигателей, основными из которых являются получение измерительной информации от объекта исследования, ее обработка, представление информации в ЭВМ, представлена структурная схема информационно-измерительной системы (рисунок 2).

Информационно-измерительная система включает в свой состав: блок регистрации обратного сигнала, блок обработки обратного сигнала, ЭВМ, блок управления, служащий для организации взаимодействия всех узлов ИИС, блок формирования параметров зондирующего пучка лазерного излучения. В отличие от ранее существующих систем, она включает в свой состав блок источников излучения и блок управления параметрами лазерного излучения.

Установлены факторы, ограничивающие точность измерений геометрических параметров элементов поверхности: флуктуации мощности, оси диаграммы направленности и расходимости лазерного излучения, влияние величины и характера ее шероховатости, неоднородность коэффициента отражения поверхности, точность задания угла падения излучения на исследуемую поверхность и диаметра пятна.

Предлагаемая модель описывает особенности формирования изображений (интенсивности отраженного излучения в плоскости изображения) с учетом формы неровностей, т.е. без усреднения формы и размеров неровностей для анализа границ изображения и рельефа поверхности, оценки возможности регистрации и достоверности распознавания рельефа поверхности с учетом характеристик зондирующей системы. Зондирующая система описывается следующими параметрами: мощность лазерного излучения, длина волны, длительность импульса и возможность ее модуляции, угол падения излучения источника.

Исследуемая поверхность характеризуется следующими параметрами: форма элементов поверхности (варианты рельефа описываются конечным набором простых геометрических форм, окружность и дуга аппроксимируются ломаными линиями), отражающая способность исследуемой поверхности, индикатриса рассеяния, характеризующая микронеровности поверхности, ориентация относительно зондирующего пучка излучения. В данной модели учитывается переотражение излучения в элементах поверхности.

Основными критериями подобия при рассмотрении процесса отражения излучения от поверхности и оценке величины отраженного сигнала являются:

1. $K_1 = B_1 / \lambda$ – параметр оптической системы, определяющий разрешающую способность оптической системы при определении геометрии элементов поверхности.

2. $K_3 = \frac{K_1}{K_2} = \frac{S}{\lambda}$ – является характеристикой элемента поверхности, определяет отношение зеркальной и диффузной составляющих отраженного излучения.

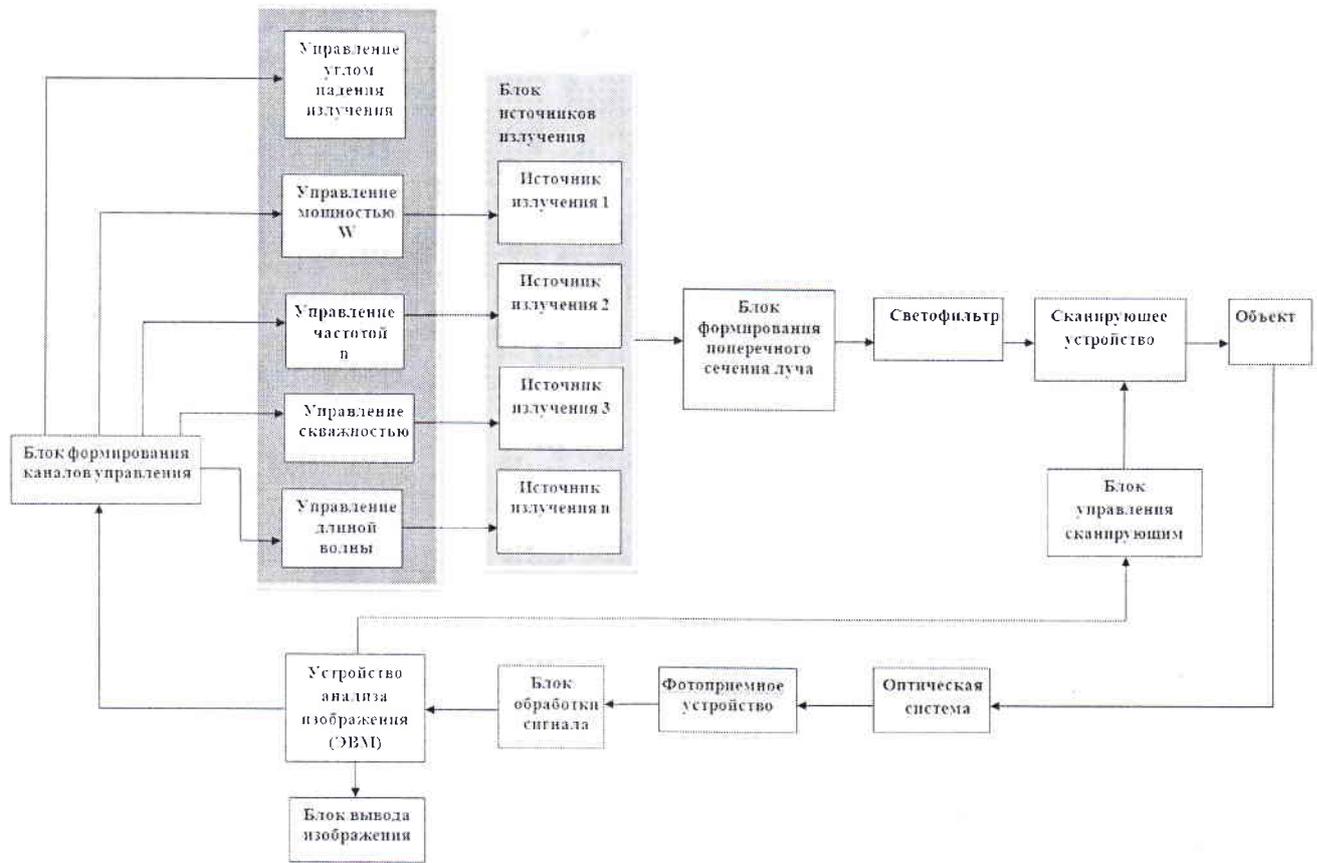


Рисунок 2– Схема информационно-измерительной системы

3. n – параметр, численно равный количеству переотражений излучения в элементе поверхности при целых его значениях. Он является интегральной характеристикой элемента поверхности и зависит от его геометрии и угла падения излучения. Данный параметр определяет направление распространения отраженного от поверхности излучения и распределение интенсивности излучения в плоскости приемного устройства в зависимости от формы объекта, для треугольной трещины параметр n определяется выражением $n = \frac{(\pi/2 - \alpha)}{\gamma}$, где α – угол падения излучения на поверхность, γ – угол раскрытия трещины.

4. Показатель индикатрисы рассеивания k . Величина $k = \infty$ соответствует равномерному рассеиванию отраженного излучения во все стороны (Ламбертовский источник), $k = 0$ соответствует зеркальному отражению от

поверхности, промежуточные значения соответствуют источнику излучения с Бесселевой корреляцией.

Зависимость изменения относительной величины отраженного сигнала (зеркальная составляющая) от координаты определяется соотношением

$$\frac{W}{W_0} = \frac{W_1}{W_0} + \frac{W_2}{W_0} \quad (2)$$

Величина отраженного сигнала состоит из двух слагаемых: первое – интенсивность излучения, отраженного от бездефектной поверхности, второе – интенсивность излучения, переотраженного трещиной.

Основные формулы для определения относительной величины сигнала от безразмерной координаты представлены в таблице 1. Зависимости относительной величины сигнала от безразмерной координаты показаны на рисунке 3.

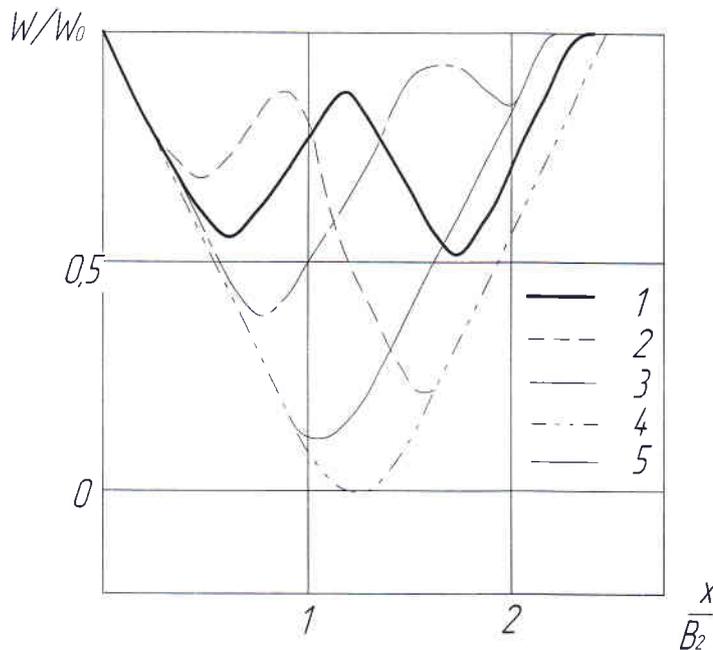


Рисунок 3 – Зависимость изменения относительной величины сигнала W/W_0 от безразмерной координаты x/B_1 для $\alpha=30^\circ$ и различных значений угла раскрытия трещины: 1 – $\gamma=30^\circ$, $n=2$, $S/B_1=1,15$; 2 – $\Delta\gamma=3^\circ$, $n=1,8$, $S/B_1=1,3$; 3 – $\Delta\gamma=-3^\circ$, $n=2,2$, $S/B_1=1,02$; 4 – $n \rightarrow \infty$, $H_1/B_1=1$, $S/B_1=1,3$; 5 – $n \rightarrow \infty$, $H_1/B_1=1$, $S/B_1=1,02$

Выявлена периодическая зависимость величины отраженного сигнала от числа переотражений в элементе поверхности (рисунок 4). Доказано, что для достоверного распознавания элементов поверхности необходимо сканирование при двух различных углах падения излучения. Число переотражений в элементах поверхности n позволяет провести классификацию элементов поверхностной структуры с точки зрения их оптических свойств.

Характерные значения параметра n (при $\alpha=\pi/6$): глубокие трещины – $n>6$, неглубокие трещины – $2<n<6$, царапины – $n<2$, абразивный износ поверхности – $0<n<1$, окисная пленка на поверхности – $n \approx 0$.

Таблица 1 – Определение относительной величины сигнала от безразмерной координаты и условия попадания излучения на объектив

$$\frac{W}{W_0} = \left\{ \begin{array}{l} \frac{B_1 / \cos \alpha - x}{B_1 / \cos \alpha} + \frac{A_2^2 (x - x_0)(-\Delta_1)}{A_1 B_1 / \cos \alpha (x_2 - x_1)} \text{ при } 2N - 0,5 \leq n \leq 2N + \Delta_1^* \cdot \Delta_1'' = -1, \text{ при } 2N \leq n \leq 2N + 0,5 \frac{W_2^*}{W_0} \neq 0, \Delta_1^* < 0, x \leq x_0 \\ \frac{A_2^2 (x_{\text{ср}} - x_0)(x_2 - x_1 + \Delta_1)}{A_1 B_1 / \cos \alpha (x_2 - x_1)} \text{ при } 2N - 0,5 \leq n \leq 2N + \Delta_1^* < 0 \text{ и } x > x_{\text{ср}}, \Delta_1^* > 0 \text{ и } x < 2H_2 \text{tg}(\gamma + \Delta\gamma) \\ \frac{x - 2H_2 \text{tg}(\gamma + \Delta\gamma)}{B_1 / \cos \alpha} + \frac{A_2^2 (x_{\text{ср}} - (x - B_1 / \cos \alpha))(x_2 - x_1 + \Delta_1)}{A_1 B_1 / \cos \alpha} \text{ при } 2N - 0,5 \leq n \leq 2N, x > 2H_2 \text{tg}(\gamma + \Delta\gamma), \Delta_2^* > 0, \text{ при } \Delta_2^* < 0 \frac{W_2^*}{W_0} = 0 \\ \frac{x - 2H_2 \text{tg}(\gamma - \Delta\gamma)}{B_1 / \cos \alpha} + \frac{A_2^2 (2H_2 \text{tg}(\gamma - \Delta\gamma) - x_0)(-\Delta_1)}{A_1 B_1 / \cos \alpha (x_2 - x_1)} \text{ при } 2N \leq n \leq 2N + 0,5, x > 2H_2 \text{tg}(\gamma + \Delta\gamma), \Delta_2^* > 0, \Delta_1^* < 0 \\ \frac{x - 2H_2 \text{tg}(\gamma - \Delta\gamma)}{B_1 / \cos \alpha} + \frac{A_2^2 (2H_2 \text{tg}(\gamma - \Delta\gamma) - (x - B_1 / \cos \alpha))(x_2 - x_1 + \Delta_1)}{A_1 B_1 / \cos \alpha (x_2 - x_1)} \text{ при } 2N \leq n \leq 2N + 0,5, x > 2H_2 \text{tg}(\gamma + \Delta\gamma), \Delta_1^* < 0, \Delta_2^* > 0 \\ \frac{x - 2H_2 \text{tg} \gamma}{B_1 / \cos \alpha} + \frac{A_2^2 x_2}{A_1 B_1 / \cos \alpha} + \frac{B_1 / \cos \alpha - x}{B_1 / \cos \alpha} \text{ при } n = 2N, \text{ для } B_1 > 1 \text{ и } H_2 < 1, 2H_2 \text{tg} \gamma \leq x \leq B_1 \Delta_1^* < 0 \end{array} \right.$$

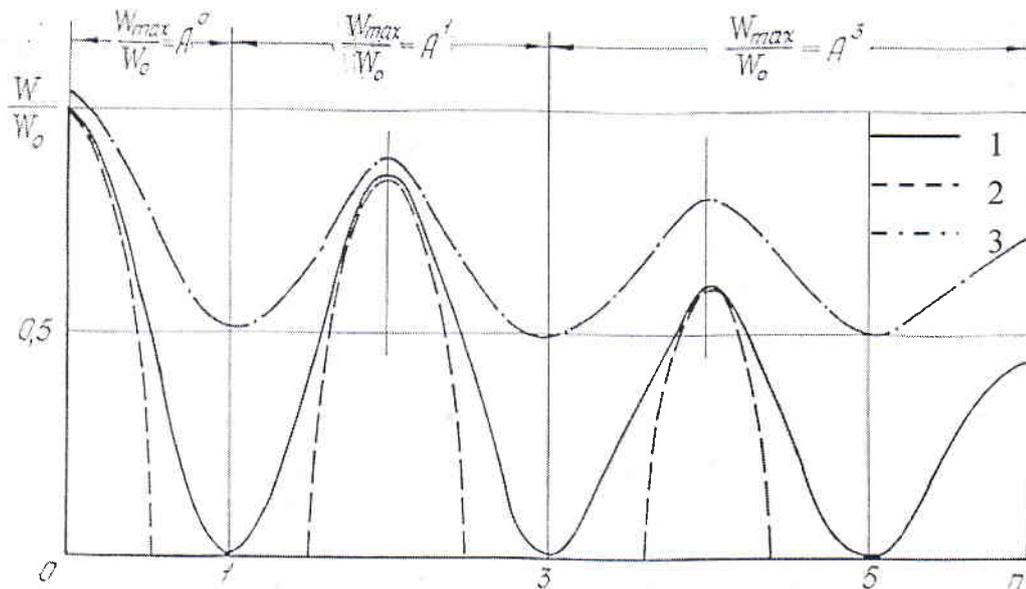


Рисунок 4 – Зависимость изменения относительной величины сигналов в центре трещины $W_{u.m.}/W_0$ от безразмерного параметра n при различных значениях высоты расположения приемного объектива над поверхностью H_1 и различных соотношениях размеров пятна и ширины трещины $(B_1/\cos\alpha)/S$: 1 $-H_1=0$, $(B_1/\cos\alpha)/S=1$; 2 $-H_1=B_1$, $(B_1/\cos\alpha)/S<1$; 3 $-H_1=0$, $(B_1/\cos\alpha)/S=2$

Форма индикатрисы рассеивания в полярных координатах для источника с бesselевой корреляцией описывается выражением:

$$\chi = A \frac{k+2}{2} \cos^k \varphi, \quad (3)$$

где $k = \infty$ – зеркальная поверхность, $k = 0$ – равномерное рассеивание во все стороны.

Построены зависимости изменения величины сигнала от показателя индикатрисы рассеивания при различных значениях параметра индикатрисы (рисунок 5).

Увеличение показателя индикатрисы рассеивания в диапазоне 2...8 (что соответствует изменению шероховатости в диапазоне 6-10 классов) приводит к увеличению величины сигнала на 30%. Изменение положения оси диаграммы направленности источника на угол 4...8° оказывает существенное влияние при значениях показателя индикатрисы $k > 3$ и приводит к снижению величины сигнала на 15...20% при $k = 8...10$.

Существует критический угол падения излучения на шероховатую поверхность $\Psi_{кр}$, начиная с которого наблюдается только зеркальное отражение света. В соответствии с результатами исследований А.С. Топорца и Ф. Енча величина этого угла составляет

$$\Psi_{кр} = \arccos \lambda / 3 Rz .$$

Для обеспечения возможности измерения геометрических параметров по зеркальной составляющей излучения необходимо обеспечить значение угла падения излучения на поверхность $\Psi > \Psi_{кр}$. Для обеспечения возможности

определения диффузной составляющей необходимо проводить измерения при условии $\Psi < \Psi_{кр}$.

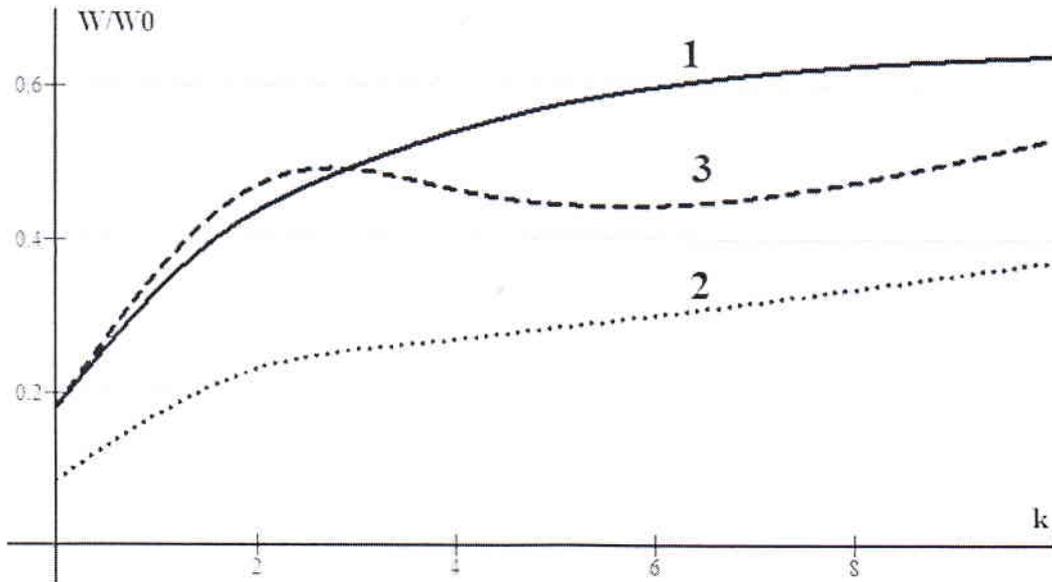


Рисунок 5 – Зависимость величины сигнала на фотоприемном устройстве от показателя индикатрисы и расположения приемного объектива: 1 – $D/H=1$; 2 – $D/H=1/2$; 3 – $\beta_2 - \beta_2' = 12^\circ$, D – диаметр фотоприемного объектива, H – высота расположения приемного объектива, β_2 – угол расположения фотоприемного объектива относительно вертикали, β_2' – угол отражения излучения от поверхности

Если между величинами, входящими в уравнение измерения (1), нет корреляционной зависимости, то среднеквадратичное отклонение может быть определено по следующей формуле:

$$\sigma_W^2 = \left(\frac{\partial W}{\partial B_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial W}{\partial \alpha}\right)^2 + \left(\frac{\partial W}{\partial x}\right)^2 \quad (4)$$

Зависимости изменения относительной погрешности от точности задания диаметра пятна излучения, угла падения излучения и координаты сканирования приведены на рисунке 6.

Результаты проведенных теоретических исследований показывают, что для достоверного определения геометрических параметров элементов поверхности шириной свыше 50 мкм с точностью до 10 мкм отраженный сигнал должен быть измерен с точностью до 10...12%. Для обеспечения указанной точности отклонение оси диаграммы направленности не должно превышать 5° , расходимость не более $2...3^\circ$, диаметра – не более 10%, отклонения мощности излучения не более 5%.

Для учета неоднородности отражательной способности результаты измерений сопоставляются со средним уровнем сигнала. Резкое снижение сигнала на величину свыше 10% говорит о наличии дефекта или иного элемента геометрии поверхности.

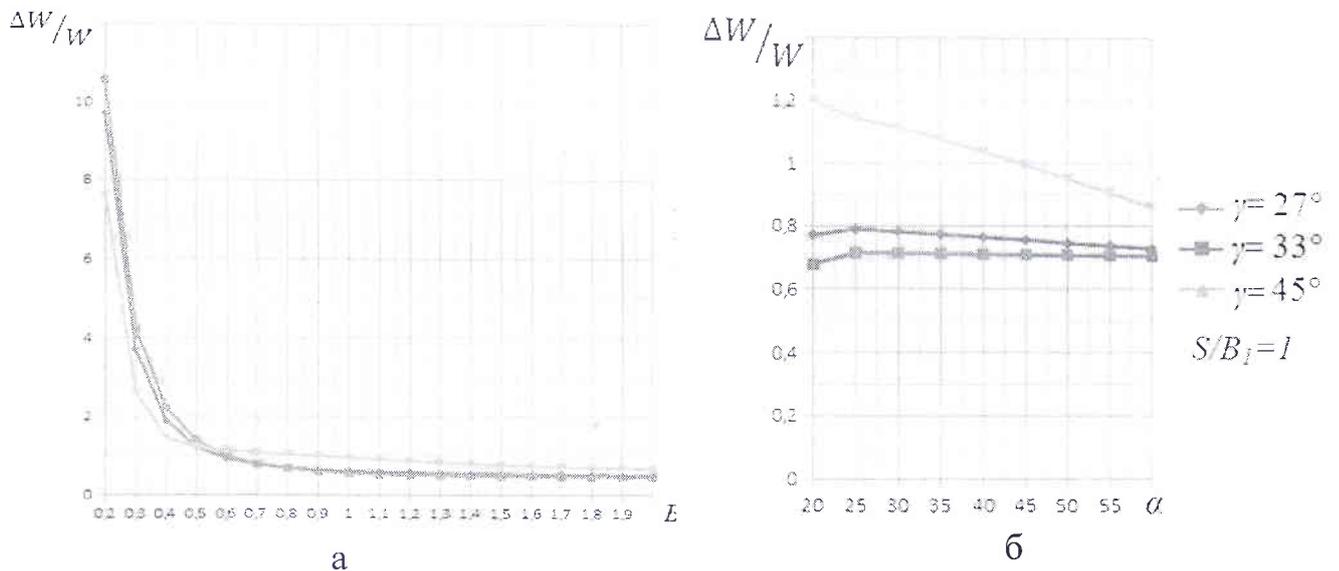


Рисунок 6 – Зависимость относительной погрешности от точности задания параметров измерительной системы: диаметра пятна (а) и угла падения излучения (б) при $S/B_1=1$

По результатам экспериментальных исследований изменение отражательной способности, вызванное неоднородностью оптических свойств поверхности, не превышает 10%. При изменении шероховатости и размеров рассеивающих частиц увеличивается разброс относительной средней линии, соответствующей профилю поверхности на величину 5...10%.

Для измерения зеркальной и диффузной составляющих необходимо проводить измерения при углах падения излучения, соответствующих зеркальному и диффузному отражению. При проведении измерений геометрических размеров на поверхности деталей со следами обработки, приводящей к анизотропии шероховатости, при сканировании поверхности необходимо располагать плоскость падения излучения ортогонально к направлению штрихов обработки. Для обеспечения возможности определения глубины элемента поверхности необходимо проводить измерения при двух углах падения излучения при обеспечении $\Delta n > 0,5$. При этом разность величин сигналов составляет $\Delta W > 0,25$. Для исключения вероятности пропуска элемента поверхности шаг сканирования выбирается в зависимости от допустимого размера дефекта и не должен превышать $0,5 S$. При измерении диффузной составляющей излучения флуктуация расходимости излучения не должна превышать $2...3^\circ$, что соответствует изменению относительной величины сигнала на уровне 10...15%.

Данные требования к параметрам измерительной системы использовались при создании измерительного оборудования.

В третьей главе проведено статистическое моделирование процессов обнаружения и распознавания с помощью Матлаб 7.5 (использован пакет *Statistic toolbox*).

На первом этапе статистического моделирования определялись необходимые длительность и число прогонов. При этом величина порогового сигнала составляла $W_{lim} = 0,15$. Использовались аналитические зависимости,

полученные в математической модели. Построены зависимости вероятности обнаружения от длительности прогонов и числа переотражений n . Необходимая длительность прогонов составляет: для относительного диаметра пятна $B_1=0.75$ – $n=40$; для $B_1=1$ – $n=80$; для $B_1=1.5$ – $n=140$. Оптимальное число прогонов равно 5. В этом случае погрешность моделирования не превышает 5%. Величина порога обнаружения определялась в зависимости от типа измерительной системы и уровня шумов. Влияние характеристик источника излучения на пороговую величину сигнала при обнаружении было оценено экспериментально. Относительная величина уровня шумов составляла в зависимости от источника излучения: 0...0,05 – гелий-неоновый лазер, 0...0,10 – твердотельный лазер (или полупроводниковый со стабилизацией 0,05), 0...0,25 – полупроводниковый лазер без стабилизации параметров излучения.

Построены зависимости вероятности обнаружения от безразмерных параметров измерительной системы и исследуемой поверхности (рисунок 7).

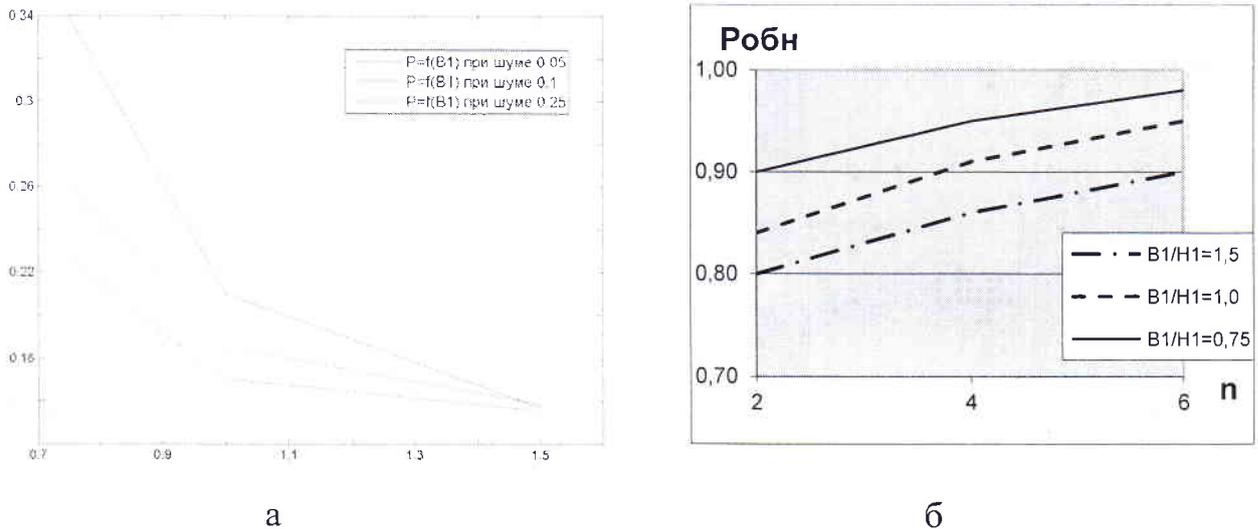


Рисунок 7 – Зависимость вероятности обнаружения от диаметра пятна (а) и параметра n (б)

Снижение диаметра пятна в диапазоне $B_1/H_1=1,5...0,75$ приводит к увеличению вероятности обнаружения на 15...20 % при уровне шумов 0,1. При уровне шумов 0,05 влияние диаметра пятна соизмеримо с погрешностью моделирования. Изменение параметра n в диапазоне 2...6 (т.е. изменение угла геометрии элемента поверхности в диапазоне $30...10^\circ$) приводит к увеличению вероятности обнаружения на 15% и снижению вероятности распознавания на 20...25%. Измерение величины зеркальной составляющей при двух различных углах падения позволяет повысить вероятность распознавания на 20...25%.

Увеличение соотношения сигнал/шум в интервале 2...5 приводит к росту вероятности обнаружения на 20...50% в зависимости от типа измерительной системы (20 – система обнаружения летательных аппаратов, 50 – промышленная дефектоскопия).

Для обеспечения возможности обнаружения и распознавания на уровне 90...95% необходимо обеспечить уровень нестабильности мощности источника

излучения на уровне не более 5%, стабильность диаметра пятна излучения на уровне 10%, стабильность угла падения излучения на уровне 5%.

В четвертой главе рассмотрено испытательное оборудование для экспериментальной оценки эффективности оптико-электронных систем с лазерной подсветкой и определения оптических характеристик конструкционных материалов.

Создано оборудование: испытательный стенд определения оптических характеристик конструкционных материалов поверхностей наблюдаемых объектов с учетом повреждаемости конструкционных материалов воздействием лазерного излучения и стенд моделирования процессов обнаружения летательных аппаратов.

Испытательный стенд для физического моделирования процессов обнаружения и распознавания (рисунок 8) включает механическую систему углового сопровождения и устройства оптической визуализации и необходим для решения следующих задач: проведение анализа уровня освещённости участков элемента конструкции, исследование оптических свойств поверхностей и распределение освещённости в зондирующем пучке освещения.

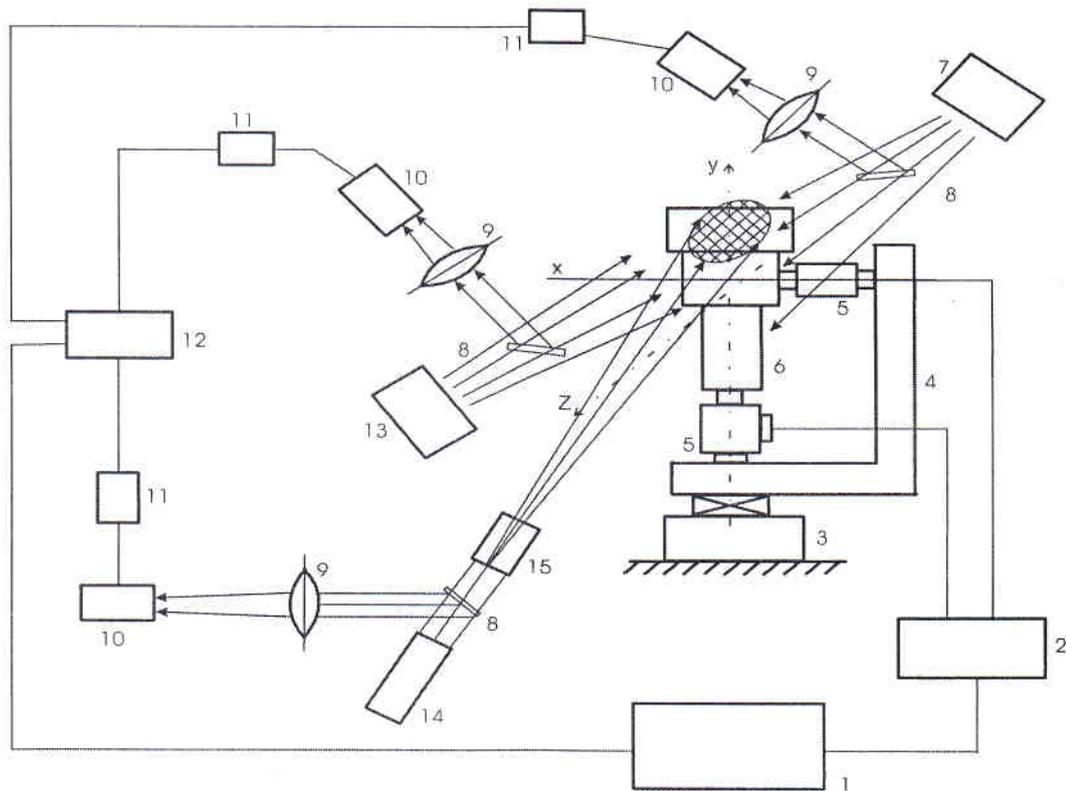


Рисунок 8 – Испытательный стенд для физического моделирования процессов обнаружения и распознавания: 1 – ПЭВМ; 2 – блок управления приводами модели; 3 – узел крепления стенда; 4 – рама крепления приводов; 5 – привод с датчиками углового поворота; 6 – модель цели; 7 – первый имитатор источника света; 8 – полупрозрачное зеркало; 9 – линза; 10 – фотоприемник; 11 – фоторегистратор; 12 – блок обработки информации; 13 – второй имитатор источника света; 14 – лазер; 15 – формирователь зондирующего пучка

Он включает следующее оборудование: привод модели, модель летящей цели, сканирующее устройство, имитаторы фонового излучения. В качестве моделей объектов используются космические аппараты *ALOS (Advanced Land Observation Satellite)* и космический аппарат (КА) *Ikonos*. При проведении экспериментальных исследований на испытательном стенде изучаемая модель типового изделия с помощью двух механизмов поворота может вращаться вокруг двух взаимно перпендикулярных осей. Угол поворота модели вокруг каждой оси отслеживается с помощью датчиков, каждый из которых представляет собой фотодиод и фотоприёмник, разделённый вращающимся диском с отверстиями, насаженным на вал электродвигателя механизма поворота. Электрические сигналы с датчиков угла поворота поступают в вычислительный комплекс, где количество поступивших импульсов пересчитывается в угол поворота. Для создания зондирующего пучка освещения модели служат лазеры с рабочими длинами волн излучения в диапазоне $(0,63-10,6) \cdot 10^{-6}$ м.

Схема испытательного стенда для определения коэффициента диффузного отражения конструкционных материалов показана на рисунке 9.

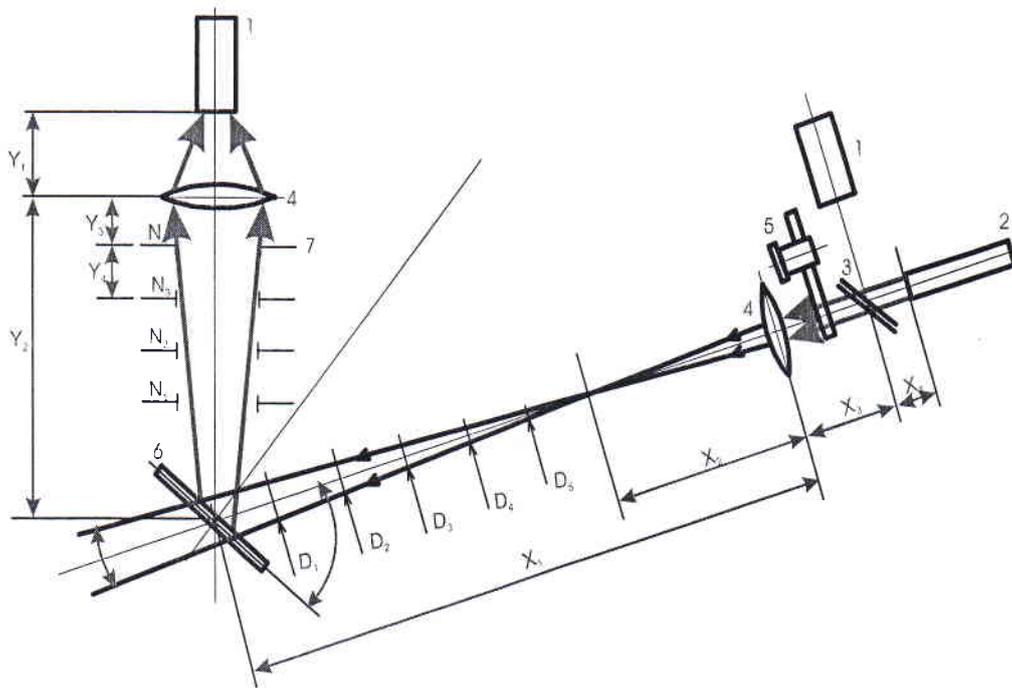


Рисунок 9 – Схема испытательного стенда для определения коэффициента диффузного отражения конструкционных материалов

Оптический стенд имеет измерительную систему параметров выходного излучения и формирователь зондирующего пучка. Отражённое от модели излучение регистрируется фотоприёмником, телекамерой или тепловизором. Для создания фоновой обстановки служит осветитель. Стыковка исполнительных механизмов оптического стенда с вычислительной машиной и комплексом для обработки изображений позволяет автоматизировать процесс обработки результатов исследований при оптической локации типового изделия.

При разработке стендов использовались излучатели на базе промышленно выпускаемых установок «Квант-15» ($\lambda=1,06 \cdot 10^{-6}$ м), ГОС 1001 ($\lambda=1,06 \cdot 10^{-6}$ м), ЛГН-703 ($\lambda=10,6 \cdot 10^{-6}$ м), оптические системы транспортировки зондирующего пучка и лазерной юстировки. Длины волн излучателей определялись окнами прозрачности атмосферы.

Полупроводниковые лазеры широко используются в системах оценки состояния поверхностей конструкционных материалов. Точность определения размеров элементов поверхности определяется координатой центра пятна зондирующего излучения, которая зависит от стабильности распределения мощности по сечению изображения пятна зондирующего излучения. Проведены исследования неустойчивости распределения плотности мощности по сечению изображения пятна для различных типов полупроводниковых лазерных диодов. Установлено, что изменение тока существенно влияет на характер распределения плотности мощности в сечении изображения пятна лазерного излучения.

Исследования показали, что стабильность излучательных характеристик полупроводниковых лазеров определяется структурой и материалом активной среды. Выявлено, что из рассмотренной группы полупроводниковых лазеров наиболее приемлемыми для измерительных систем являются полупроводниковые инжекционные лазеры с квантово-размерными структурами на основе материалов четверных систем, характеризующиеся отсутствием дефектов темных линий, слабой зависимостью величин порогового тока от температуры лазерного кристалла и окружающей среды, наибольшей стабильностью оси диаграммы направленности и отсутствием изгибов на ватт-амперной характеристике. Для исключения влияния неустойчивости мощности на точность измерений необходимо использовать стабилизированные источники лазерного излучения или вводить компенсацию влияния флуктуации лазерной мощности (введение опорного канала).

Возможны два способа стабилизации мощности излучения лазерного диода: обратная связь по току при измерении мощности с помощью встроенного фотодиода и обратная связь при использовании светодиода в качестве усилителя. Второй метод является более оптимальным, так как не влияет на величину тока лазерного диода.

Использование указанных мер позволяет снизить величину неустойчивости мощности лазерного излучения до 3...5%.

В пятой главе проведены экспериментальные исследования по определению отражательных характеристик поверхностного слоя в зависимости от материала, вида его обработки, температуры поверхностного слоя с учетом пространственно-временных характеристик зондирующего излучения (рисунок 10).

Проведено физическое моделирование переотражения излучения в трещине с учетом выявленных безразмерных параметров. Физическая модель строилась с учетом выявленных критериев подобия. Расходимость относительной величины сигнала при теоретическом исследовании и физическом моделировании не превышала 5%.

Изменение коэффициента диффузного отражения для различных материалов при различных углах падения излучения происходит не более чем на 10%, а при различной скважности импульса происходит не более чем на 15%.

Как показали проведенные экспериментальные исследования, деформация зондирующего импульса отсутствует при скважности, не превышающей 5.

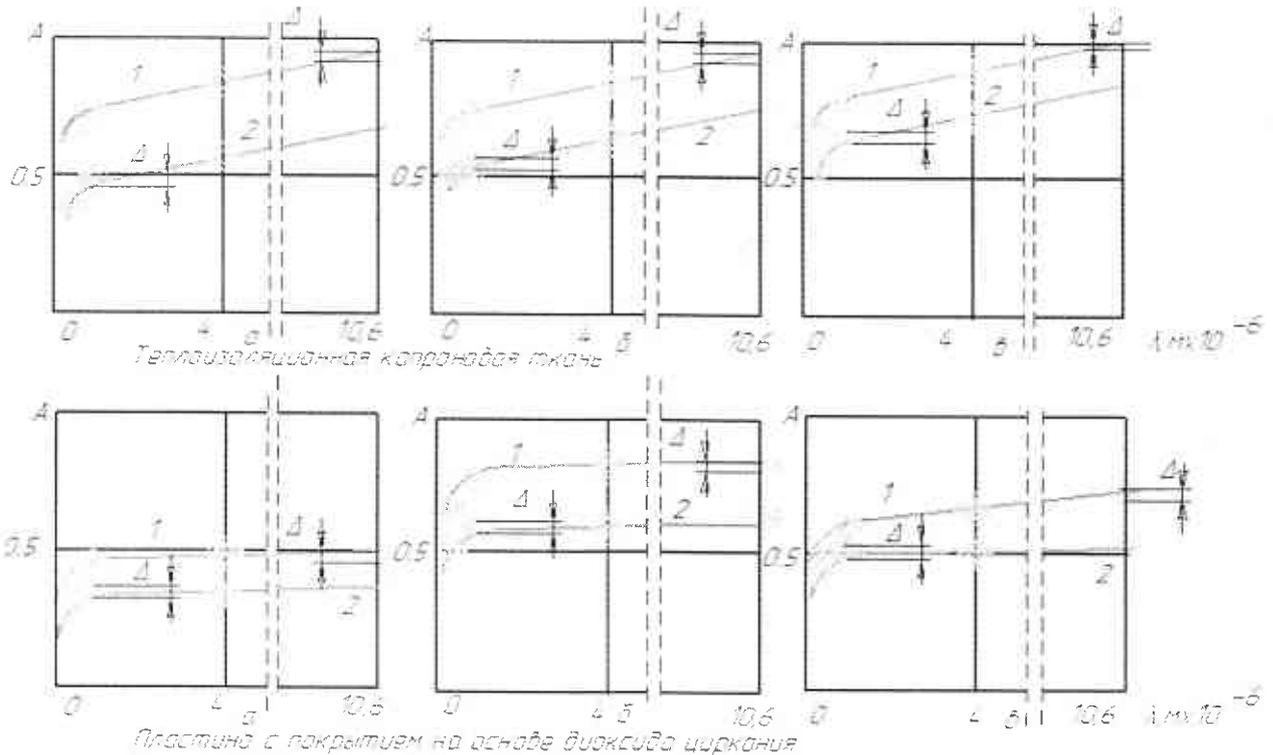


Рисунок 10 – Зависимость коэффициентов отражения от длины волны для теплоизоляционной капроновой ткани и пластины с покрытием на основе диоксида циркония: а – $T = 373 \text{ K}$, б – $T = 273 \text{ K}$, в – $T = 173 \text{ K}$, $\nu = 30 \text{ Гц}$, $S = 6$

Проведено физическое моделирование переотражения излучения в элементе поверхности с учетом выявленных безразмерных параметров процесса измерения и требований по точности к параметрам излучения. Расходимость относительной величины сигнала при теоретическом исследовании и физическом моделировании не превышала 5%.

Показано, что при увеличении интенсивности, частоты генерации и скважности импульса лазерного излучения коэффициент поглощения лазерного излучения возрастает на 15...20%. Менее стойкими к тепловому воздействию являются терморегулирующие покрытия на основе силикатной связки с наполнителем (ZrO_2 , MgO , ZnO). Превышение порогового значения падающего излучения сопровождается разрушением поверхности материала в виде его плавления, испарения и растрескивания. При прохождении излучения в рассеивающей среде уровень сигнала снижается на 10...15%.

В шестой главе рассмотрено применение лазерных ИИС для обнаружения и распознавания элементов поверхности ЛА и ГТД, разработана методика выбора параметров лазерных ИИС, проведено экспериментальное исследование их

возможностей, выполнена лазерная дефектоскопия поверхностей конструкционных материалов.

На рисунке 11, а приводится распределение удельной мощности излучения, отраженной от поверхности модели КА типа *Ikonos*. Процесс обнаружения объекта осуществлялся зондированием поверхности объектов лазерным пучком с изменением длины волны излучения λ , частоты генерации ν , величины скважности импульса S . Момент обнаружения объекта устанавливался по величине площади модели с отражением падающего сигнала по уровню $q/q_0 > 0,75$ (где q – регистрируемая оптической системой относительная мощность излучения, отраженного от поверхности модели, q_0 – относительная мощность зондирующего пучка). На первой стадии, при отсутствии регистрации изображения локационной системы, осуществляют выбор необходимой длины волны излучения. Случай $\lambda = 0,53 \cdot 10^{-6}$ м имеет наибольшую контрастность изображения участков объекта. При переходе излучателя на импульсно-периодический режим $\nu = 30$ Гц глубина резкости изображения объекта улучшается. Наилучшие результаты по обнаружению объекта достигаются в случае фиксирования величины скважности импульса периодического режима генерации $S = 5$. Здесь проявляется полная четкость контуров изображения объекта. Полное изображение объекта возникает при использовании более высоких мощностей излучения зондирующего пучка, т.к. величина коэффициента отражения у большинства материалов внешней компоновки резко уменьшается, а индикатриса рассеивания становится менее узконаправленной. Проведена экспериментальная оценка влияния длины волны излучения на вероятность обнаружения объектов при зондировании поверхности.. Коэффициент правдоподобия обнаружения P определяется как отношение площади видимого изображения, ограниченной распределением плотности мощности отраженного сигнала, к общей величине площади его изображения.

На рисунке 11, б приводятся сравнительные зависимости величины P для различных объектов типа КА с учетом изменяемой длины волны λ , частоты генерации ν и величины скважности импульса излучения S . Верхняя граница области обнаружения соответствует частоте генерации импульсов 20 Гц и скважности импульсов, равной 6, нижняя – непрерывному режиму излучения.

Разработана обобщенная методика построения и оптимизации систем дистанционного зондирования с учетом области их применения. Исходными данными являются: область применения системы дистанционного зондирования, требуемая вероятность распознавания объектов, количество классов объектов в исследуемой области. Выбор значений параметров измерительной системы, глубины их модуляции и определение допустимого уровня шумов в системе осуществляется с учетом требуемой вероятности распознавания в данной локационной ситуации и предполагаемого количества классов объектов в исследуемой области. Данный алгоритм предусматривает обучение системы распознавания с использованием тест-объектов или модельных объектов.

Методика проведения лазерной дефектоскопии поверхности внедрена на предприятиях АО «РКЦ «Прогресс», ОАО «Кузнецов». Проведена лазерная дефектоскопия деталей с многослойными защитными и ударопрочными

покрытиями на основе карбидов, нитридов и оксидов тугоплавких металлов (вольфрама, хрома, титана, циркония и др.), используемых в приводах и их деталях, элементах реверса тяг, корпусах подшипников, узлах крепления лопаток к дискам турбин двигателя НК-32, а также терморегулирующих покрытий деталей внешней компоновки изделий космических аппаратов наблюдения «Фотон», «Бион», «Ресурс-ДК».

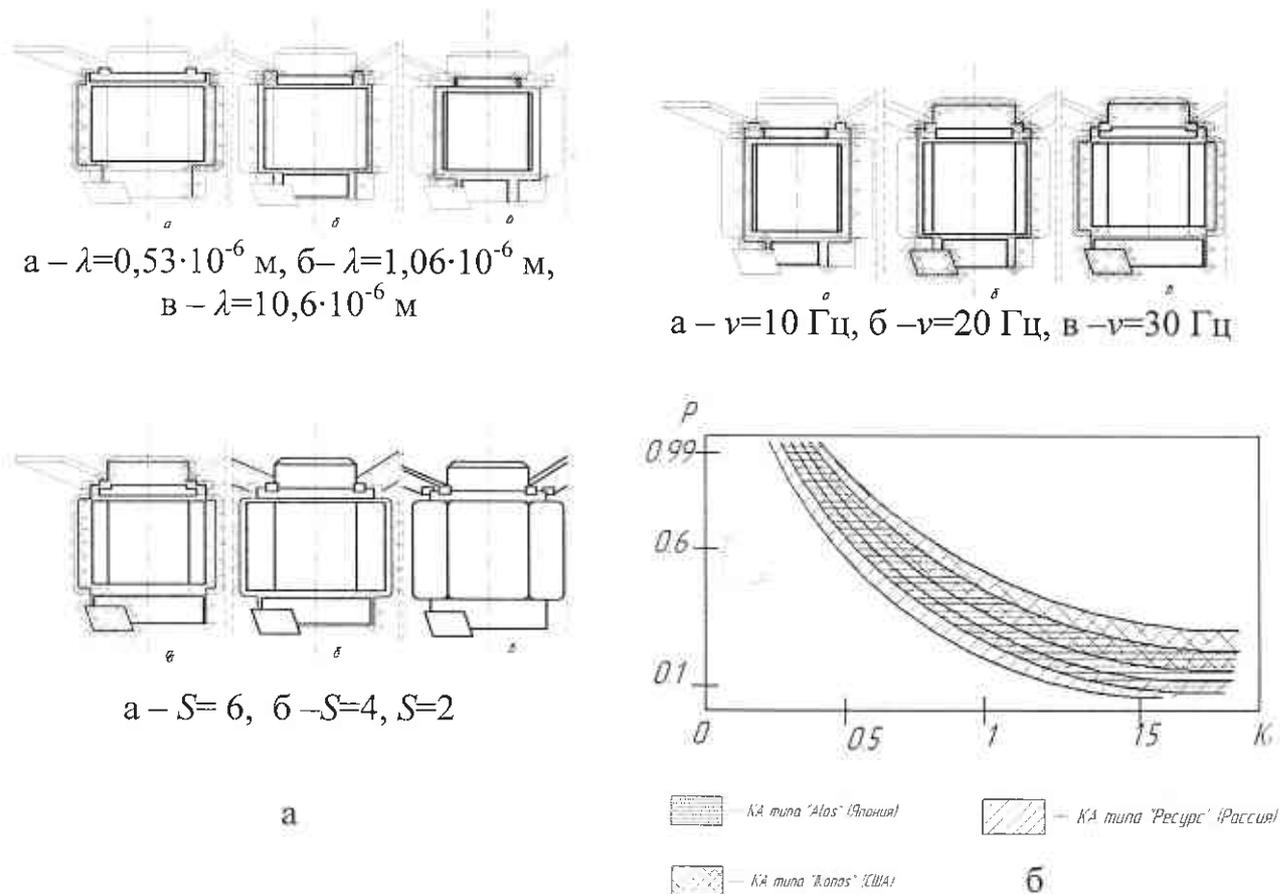


Рисунок 11 – Распределение удельной мощности излучения при непрерывном режиме генерации (а) и величина коэффициента правдоподобия в зависимости от длины волны излучения для моделей различных КА (б)

Применение лазерной дефектоскопии в условиях производства позволило снизить себестоимость проведения диагностики в 1,5...2 раза, повысить уровень использования в изделиях аэрокосмической техники деталей с улучшенными эксплуатационными характеристиками (в том числе с более высоким уровнем адгезионной прочности) на 20 %. Использование лазерных ИИС для выявления поверхностных дефектов в виде трещин, забоин, отслоения покрытий, возникающих в процессе обработки, позволяет повысить показатели надежности элементов конструкций, увеличить гарантируемый срок работы с регламентируемой безопасностью серийно выпускаемых изделий.

На предприятии АО «РКЦ «Прогресс» внедрены методика проектирования оптико-электронной системы наблюдения и экспериментальная методика оценки ее эффективности.

В приложении приведены созданные на основе предложенных в математической модели подходов лазерные ИИС для исследования оптических

материалов в других отраслях. Разработаны и внедрены в Самарском государственном медицинском университете диагностическая установка и метод исследования оптических характеристик тканей суставов (хряща). Создана технология и технические средства для дефектоскопии бурильных и обсадных колонн. Методика дефектоскопии поверхности конструкционных материалов также внедрена на ООО «Научно-производственное предприятие «Радиант».

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

В диссертационной работе на основе анализа существующих методов оценки состояния поверхностей конструкционных материалов решена проблема разработки теоретических основ построения лазерных ИИС повышенной точности для измерений комплекса геометрических и отражательных характеристик поверхностей элементов конструкции летательных аппаратов и двигателей и за счет управления параметрами лазерного излучения, что позволило выработать научно обоснованные технические и конструкторские рекомендации по их созданию и модернизации.

1. Проведен анализ характеристик поверхностей ЛА и ГТД. Показано, что для определения геометрических характеристик элементов поверхности с размерами от 50 мкм с погрешностью, не превышающей 10 мкм, и комплекса физико-механических характеристик поверхности ЛА и ГТД необходимо измерять зависимости зеркальной и диффузной составляющих отраженного сигнала лазерных ИИС при изменении частоты следования импульсов в диапазоне 10...30 Гц, длины волны излучения 3...10 мкм и скважности импульса (отношения периода повторения импульсов к их длительности) в диапазоне 1...5, изменения угла падения излучения на поверхность в диапазоне $\pm 45^\circ$. Выявлены факторы, ограничивающие точность измерения: не учитывается явление переотражения излучения в элементе поверхности, флуктуации мощности, оси диаграммы направленности и расходимости излучения полупроводниковых лазеров, не исследованы границы применимости фотометрического описания отраженного сигнала для импульсного излучения.

2. Получена обобщенная математическая модель лазерной ИИС дистанционного зондирования поверхностей конструкционных материалов, определяющая зависимости зеркальной и диффузной составляющих отраженного сигнала от параметров измерительной системы и состояния поверхности элементов конструкций. Выявлена периодическая зависимость величины отраженного сигнала от числа переотражений в элементе поверхности. Основные положения математической модели подтверждены с использованием физического моделирования переотражения излучения в трещине с погрешностью 3...5%. С использованием математической модели показано, что для достоверного определения геометрических параметров элементов поверхности шириной свыше 50 мкм с точностью до 10 мкм и определения показателя индикатрисы с точностью до 2 отраженный сигнал должен быть измерен с точностью до 5...10%. Для обеспечения указанной точности отклонение оси диаграммы направленности не должно превышать 5° , расходимость не более 2...3°, диаметра – не более 5-10 %, отклонения мощности излучения не более 5%.

3. При проведении численного моделирования показано, что для обеспечения возможности распознавания элементов поверхности необходимо проводить измерения при двух углах падения излучения при обеспечении разности показателя $\Delta n > 0,5$. При этом разность величин сигналов составляет $\Delta W > 0,25$. Для обеспечения возможности обнаружения и распознавания на уровне 90...95% необходимо обеспечить уровень стабильности мощности источника излучения на уровне не более 95%, уровень стабильности диаметра пятна излучения на уровне 90%, уровень стабильности угла падения излучения на уровне 95%.

4. Разработаны методики и испытательное оборудование для экспериментальной оценки эффективности лазерных ИИС и определения оптических характеристик конструкционных материалов, обеспечивающее перестройки длины волны в диапазоне $0,63 \leq \lambda \leq 10,6 \cdot 10^{-6}$ м, частота следования импульсов $1 \leq f \leq 300 \text{ с}^{-1}$, скважность импульса $1 \leq S \leq 5$.

5. Показано, что для различных материалов изменение коэффициента диффузного отражения составляет: при изменении длины волны в диапазоне 0,56...10,6 мкм – 35...45%, при изменении угла падения излучения в диапазоне $30...45^\circ$ – 25...30%, при скважности импульса $1 \leq S \leq 5$ – 30...35%, при изменении температуры в 173...373 К – 30...35%. Установлены зависимости показателя индикатрисы рассеяния от длины волны излучения, длительности импульса и температуры поверхности. Показано, что при скважности импульса, не превышающей 5, деформация отраженного импульса не происходит. Уровень шумов, обусловленный неоднородностью отражательной способности конструкционных материалов составляет 5...15%.

6. На основе комплекса проведенных исследований разработана обобщенная методика построения лазерных ИИС, обеспечивающих измерение комплекса параметров поверхностей ЛА и ГТД и проведена экспериментальная оценка их возможностей. Показано, что использование перестраиваемого лазерного излучения с длиной волны в диапазоне 0,56...10,6 мкм, углом падения излучения в диапазоне $30...45^\circ$ и скважностью импульса в диапазоне 2...6 позволяет повысить контрастность регистрируемых изображений в 1,5...2 раза вероятность обнаружения в 1,5...2 раза при уровне помехового сигнала на уровне 20...25%.

7. Разработана методика проектирования лазерной ИИС в составе системы обнаружения объектов и оценки ее эффективности с помощью созданного специализированного испытательного оборудования. Установлено, что параметры, характеризующие систему наблюдения с вероятностью 0,85 должны находиться в следующих диапазонах: длина волны излучения зондирующего потока ($0,63 \leq \lambda \leq 10,6$) 10^{-6} м, частота следования импульсов ($1 \leq f \leq 300$) с^{-1} , скважность импульса $1 \leq S \leq 6$. Созданы методики проведения дефектоскопии с использованием лазерных ИИС и внедрены на предприятиях АО «РКЦ «Прогресс», ПАО «КУЗНЕЦОВ», ООО НПП «Радиянт». Применение лазерных ИИС для дефектоскопии в условиях производства позволило снизить

себестоимость проведения диагностики в 1,5...2,0 раза, повысить уровень использования в изделиях аэрокосмической техники деталей с улучшенными эксплуатационными характеристиками (в том числе с более высоким уровнем адгезионной прочности) на 20%, повысить показатели надежности элементов конструкций, увеличить гарантируемый срок работы с регламентируемой безопасностью серийно выпускаемых изделий.

**Основные положения диссертации опубликованы
в следующих работах:**

*Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ и международных
издательствах:*

1. Сазонникова, Н.А. Исследование влияния параметров лазерного излучения на эффективность оценки состояния поверхностей летательных аппаратов [Текст] / Н.А. Сазонникова // Вестник СГАУ, 2011, №3 (27). – С. 315-319.
2. Сазонникова, Н.А. Экспериментальное исследование эффективности лазерно-электронных систем дистанционного зондирования поверхностей летательных аппаратов [Текст] / Н.А. Сазонникова // Вестник СГАУ, 2011, №6(30). – С. 22-30.
3. Сазонникова, Н.А. Повышение эффективности лазерных измерительных систем для оценки состояния поверхности летательных аппаратов и двигателей [Текст] / Н.А. Сазонникова // Вестник СГАУ, 2012, №3(34). Ч.2. – С.41-46.
4. Сазонникова, Н.А. Исследование эффективности лазерно-электронных систем дистанционного зондирования поверхностей летательных аппаратов [Текст] / И.А. Абдуллин, Н.И. Лаптев, Н.А. Сазонникова // Вестник Казанского технологического университета, 2012, №22. – С.134-137.
5. Сазонникова, Н.А. Экспериментальное исследование эффективности лазерно-электронных систем дистанционного зондирования поверхностей летательных аппаратов [Текст] // Н.А. Сазонникова // Вестник Самарского государственного технического университета, серия «Технические науки», 2013, №3(39). – С.86-91.
6. Сазонникова, Н.А. Повышение эффективности обнаружения при лазерном зондировании поверхности [Текст] / Н.А. Сазонникова // Вестник СГАУ, 2009, №3(19). Ч. 2. – С. 219-226.
7. Сазонникова, Н.А. Лазерное инициирование воспламенения высокоэнергетических веществ [Текст] / В.И. Мордасов, Н.А. Сазонникова, Е.Г. Иванова, Н.И. Лаптев, В.В. Пойлов // Вестник СГАУ, 2009, №33(19). Ч.3. – С.13-18.
8. Сазонникова, Н.А. Использование эффекта обратной связи в полупроводниковых лазерах для построения систем диагностики состояния многослойных сотовых оболочек [Текст] / Д.Н. Гребнев, Н.А. Сазонникова, О.В. Шулепова // Вестник СГАУ, 2009, №3(19). Ч.1. – С. 382-388.

9. Сазонникова, Н.А. Исследование преотражения излучения в элементах поверхности [Текст] / Н.А. Сазонникова // Компьютерная оптика, 2002. Вып. 22. – С.23-28.
10. Сазонникова, Н.А. Выявление поверхностных повреждений покрытий оптическим методом [Текст] / Н.А. Сазонникова, В.И. Мордасов // Перспективные материалы, 2000, №3. – С.95-99.
11. Сазонникова, Н.А. Методика выявления поверхностных повреждений [Текст] / Н.А. Сазонникова, // Проблемы машиностроения и автоматизации, 2000, №2. – С.41-49.
12. Сазонникова, Н.А. Обнаружение поверхностных повреждений при нанесении покрытий на металлическую поверхность [Текст] / Н.А. Сазонникова, В.И. Мордасов // Изв. Акад. наук «Металлы», 2000, №4. – С.56-60.
13. Сазонникова, Н.А. Оптический способ оценки поверхностных повреждений [Текст] / Н.А. Сазонникова, В.И. Мордасов, А.А. Шуваев // Компьютерная оптика, 2000. Вып. 20. –С.106-116.
14. Сазонникова, Н.А. Оценка механических повреждений оптическим методом [Текст] / Н.А. Сазонникова, В.И. Мордасов, В.П. Шорин // Известия Самарского научного центра Российской академии наук, 1999, №2. – С. 270-276.
15. Сазонникова, Н.А. Использование лазерной подсветки для обнаружения подвижных объектов [Текст] / Н.А. Сазонникова, В.И. Мордасов, В.И. Кузнецов // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета, 2006, №2(10).Ч.2. –С.27-31.
16. Сазонникова, Н.А. Разработка диагностической системы для выявления поверхностных повреждений деталей [Текст] / Н.А. Сазонникова, В.И. Мордасов // Проблемы машиностроения и автоматизации, 2002, №4. – С. 13-17.
17. Сазонникова, Н.А. Построение и применение лазерной системы для диагностики состояния суставного хряща [Текст] / Н.А. Сазонникова, В.И. Мордасов, Ю.В. Ларцев, С.А. Гусев // Компьютерная оптика, 2001. Вып. 21. –С.150-153.
18. Сазонникова, Н.А. Исследование энергоемкости взаимодействия лазерного излучения с высокоэнергетическими веществами [Текст] / Н.А. Сазонникова, В.В. Пойлов, Г.А. Галимова, М.Р. Хайрутдинов // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета, 2006, №2(10). Ч. 2. – С. 50-54.
19. Sazonnikova, N.A. Method of laser vibrating defectoscopy of multilayer composite materials [Text] / Vasily I. Mordasov, Nadezhda A. Sazonnikova, Alexander D. Storozh, Nikolay E. Grebnev, Dmitry N. Grebnev//Procedia Engineering, Vol. 106 (2015), p.240-246.

Статьи, опубликованные в других журналах и сборниках конференций:

20. Сазонникова, Н.А. Повышение эффективности обнаружения при лазерном зондировании поверхности [Текст] / Н.А. Сазонникова // Материалы

докладов Международной конференции «Проблемы и перспективы развития двигателестроения». - Самара: СГАУ, 2009. Ч. 2. –С. 25-27.

21. Сазонникова, Н.А. Использование эффекта обратной связи в полупроводниковых лазерах для построения систем диагностики состояния многослойных сотовых оболочек [Текст] / Н.А. Сазонникова, Д.Н. Гребнев, О.В. Шулепова // Материалы докладов Международной конференции «Проблемы и перспективы развития двигателестроения. - , Самара: СГАУ, 2009. Ч. 1. –С. 238-239.

22. Сазонникова, Н.А. Повышение эффективности обнаружения при лазерном зондировании поверхности [Текст] / В.И. Мордасов, Н.А. Сазонникова, Д.Н. Гребнев // Материалы XIII Международной конференции «Решетневские чтения». - Красноярск: СибГАУ, 2009. Т.1. –С. 233-234.

23. Сазонникова, Н.А. Лазерно-электронные системы дистанционного зондирования поверхности изделий авиационной и космической техники [Текст] / Н.А. Сазонникова // Материалы XIII Международной конференции «Решетневские чтения».- Красноярск: СибГАУ, 2009. Т.1. –С. 169-170.

24. Сазонникова, Н.А. Методика повышения эффективности лазерно-электронных систем дефектоскопии поверхности машиностроительных материалов [Текст] / В.И. Мордасов, Н.А. Сазонникова, Т.С. Карпухина // Материалы доклада 22-й Всерос. НТК «Электромеханические и внутрикамерные процессы в энергетических установках, струйная акустика и диагностика, природы и методы контроля природной среды, веществ материалов и изделий». – Казань: КВВКУ, 2010. – С. 122-125.

25. Сазонникова, Н.А. Методика лазерной дефектоскопии бурильных и обсадных труб [Текст] / Е.П. Варламов, В.И. Мордасов, В.Е. Чемоданов // Науч.-техн. журнал «Интервал. Передовые нефтегазовые технологии». - Самара: Венсис, 2002, №1(36). – С. 61–66.

26. Сазонникова, Н.А. Использование лазерной дефектоскопии для исследования поверхностей бурильных и обсадных труб [Текст] / Е.П. Варламов, В.И. Мордасов, Н.А. Сазонникова, Г.М. Файн // Научный журнал «Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и море». - М.: ВНИИОЭНГ, 2002, №9. – С. 14-19.

27. Сазонникова, Н.А. Математическое описание лазерной поверхностной дефектоскопии элементов конструкций [Текст] / Н.А. Сазонникова, В.И. Мордасов, Г.В. Гусева, О.Р. Адиярова // Материалы III Всерос. Науч.-техн. конф. «Проблемы решения краевых задач прикладной математики». - Самара: СамГТУ, 2004. – С. 174-177.

28. Сазонникова, Н.А. Использование эффекта обратной связи в полупроводниковых лазерах для построения систем диагностики элементов конструкций [Текст] / В.И. Мордасов, Н.А. Сазонникова // Сб.: Лазерные технологии и средства их реализации: IV Междунар. науч.-техн. конф., СПб.: СПбГПУ, 2004. – С. 92-93.

29. Сазонникова, Н.А. Измерительная система дефектоскопии крупногабаритных оболочек [Текст] / Н.И. Лаптев, В.И. Мордасов, В.В. Пойлов, Н.Е. Гребнев, Н.А. Сазонникова, О.В. Шулепова // Сб.: Исследование, разработка

и применение высоких технологий в промышленности: VII Междунар. науч.-практ. конф., - СПб.: Изд-во Политех. ун-та, 2009. Т. 2. – С. 122-123.

30. Сазонникова, Н.А. Повышение эффективности обнаружения объектов при лазерном зондировании поверхности [Текст] / В.И. Мордасов, Е.Г. Иванова, Н.А. Сазонникова, О.В. Шулепова // Сб.: Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности: VII Междунар. науч.-практ. конф., - СПб., Изд-во Политех. ун-та, 2009. Т. 2. – С. 132-134.

31. Сазонникова, Н.А. Обнаружение объектов при лазерном зондировании поверхности [Текст] / В.И. Мордасов, Е.Г. Иванова, Н.А. Сазонникова, О.В. Шулепова // Сб.: Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности: VII Междунар. науч.-практ. конф. - , СПб.: Изд-во Политех. ун-та, 2009. Т. 1. – С. 228-229.

32. Сазонникова, Н.А. Лазерный метод исследования поверхностных дефектов штамповой оснастки [Текст] / В.И. Мордасов, Н.А. Сазонникова // Сб.: Металлофизика, механика материалов, наноструктур и процессов деформирования: III междунар. научн.-техн. конф. «Металлдеформ – 2009». - Самара: СГАУ, 2009. Т. 2. – С. 149-157.

Патенты на изобретения и свидетельство о государственной регистрации программ:

33. Пат. РФ №2150690 МПК G01N21/954. Оптический дефектоскоп для контроля внутренней поверхности жидкостных трубопроводов [текст] / В.Н. Гришанов, В.И. Мордасов, В.М. Русанов, Н.А. Сазонникова. Оpubл. 10.06.2000, Бюл. №15.

34. Пат. РФ №2153159 МПК G01N21/59. Измеритель оптической плотности газов с включениями твердой фазы / Н.А. Сазонникова, В.Н. Гришанов, А.В. Гришанов, В.И. Мордасов, А.Н. Крючков, С.Е. Пронин. Оpubл. 20.07.2000, Бюл. №17.

35. Пат. РФ №2203609 МПК A61B5/00, A61N5/067. Устройство для диагностики поражения тканей суставов человека / Н.А. Сазонникова, С.А. Гусев, Ю.В. Ларцев, Г.П. Котельников, В.И. Мордасов. Оpubл. 10.05.2003, Бюл. №20.

36. Пат. РФ №2528033 МПК G01B 11/24. Устройство для диагностики состояния внутренней поверхности труб / В.И. Мордасов, Н.А. Сазонникова. Оpubл. 10.09.2014, Бюл. №25.

37. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ №201660136. Программа для численного моделирования процессов обнаружения и распознавания элементов поверхности с помощью лазерной измерительной системы/ Сазонникова Н.А. от 07.09.2016.

Соискатель



Н.А. Сазонникова

САЗОННИКОВА НАДЕЖДА АЛЕКСАНДРОВНА

**ЛАЗЕРНЫЕ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ
СИСТЕМЫ ДЛЯ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ
ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ
И ДВИГАТЕЛЕЙ**

**Специальность 05.11.16 – Информационно-измерительные
и управляющие системы (в промышленности и медицине)**

**АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук**

Подписано в печать 16.03.2017. Формат 60x84/16.
Усл. печ. л. 2. Тираж 100 экз.
Отпечатано с готового оригинал-макета
443086, Самара, Московское шоссе, 34, Самарский университет