

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего  
образования «Самарский национальный исследовательский университет имени  
академика С.П. Королева»

*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 медицине)

Диссертация на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Научный консультант:  
доктор технических наук, профессор  
Мордасов Василий Иванович

Самара – 2017

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение .....	5
1 Актуальность использования методов и приборов дистанционного зондирования поверхностей лазерным излучением для диагностики состояния конструкционных материалов .....	19
1.1 Поверхность элементов конструкций ЛА и ГТД как объект измерений .....	19
1.2 Методы исследования состояния поверхности элементов конструкций летательных аппаратов и двигателей.....	31
1.3 Лазерные системы обнаружения и распознавания летательных аппаратов и элементов их конструкций.....	53
1.4 Постановка задач исследования .....	64
Выводы по главе 1 .....	67
2 Математическая модель отражения лазерного излучения от поверхности .....	70
2.1 Преобразование сигнала лазерного излучения при отражении от поверхности. Информационные характеристики поверхности .....	70
2.2 Структура информационно-измерительной системы .....	74
2.3 Основные критерии подобия процесса отражения излучения от поверхности .....	76
2.4 Зависимость зеркальной составляющей отраженного излучения от параметров зондирующего излучения и характеристик поверхностного слоя .....	82
2.5 Зависимость диффузной составляющей от параметров лазерного излучения и характеристик поверхностного слоя конструкционных материалов.....	103
2.6 Установление величины погрешности измерений параметров поверхностного слоя конструкционных материалов и обеспечения	

заданной точности.....	106
Выводы по главе 2.....	127
3 Численное моделирование процессов обнаружения и распознавания элементов поверхности при отражении лазерного излучения .....	129
3.1 Основные типы измерительных систем и их характерные признаки	129
3.2 Определение необходимого числа и длительности прогонов при проведении численного моделирования.....	134
3.3 Определение зависимостей вероятностей обнаружения и распознавания от параметров измерительной системы и характеристик поверхностного слоя.....	141
Выводы по главе 3.....	150
4 Разработка испытательного оборудования для исследования процессов отражения лазерного излучения от поверхности .....	152
4.1 Стенд для определения оптических характеристик конструкционных материалов.....	152
4.2 Стенд для физического моделирования процессов обнаружения и распознавания летательных аппаратов.....	160
4.3 Исследование инструментальной составляющей погрешности, обусловленной источником излучения.....	165
4.4 Повышение стабильности излучательных характеристик полупроводниковых лазеров.....	169
Выводы по главе 4.....	190
5 Экспериментальные исследования процессов отражения лазерного излучения от поверхности .....	192
5.1 Определение зависимостей оптических характеристик конструкционных материалов от параметров лазерного излучения....	192
5.2 Определение допустимого уровня плотности мощности излучения при отсутствии повреждения материалов .....	199
5.3 Физическое моделирование переотражения лазерного излучения	

в элементах поверхности .....	207
Выводы по главе 5.....	213
6 Применение лазерных информационно-измерительных систем для обнаружения и распознавания элементов поверхностей ЛА и ГТД и экспериментальная оценка их возможностей.....	214
6.1 Экспериментальные исследования возможностей обнаружения и распознавания.....	214
6.2 Алгоритм построения и оптимизации лазерно-электронных систем дистанционного зондирования с учетом области их применения .....	225
6.3 Лазерный дефектоскоп для обнаружения и распознавания дефектов поверхностного слоя конструкционных материалов .....	229
6.4 Методика поверхностной дефектоскопии конструкционных материалов.....	232
6.5 Результаты поверхностной дефектоскопии .....	237
6.6 Дефектоскопия головного обтекателя ракеты-носителя.....	242
Выводы по главе 6.....	245
Заключение.....	247
Список сокращений и условных обозначений .....	250
Список литературы .....	253
Приложение А. Программа для численного моделирования процессов обнаружения и распознавания элементов поверхности при отражении лазерного излучения .....	277
Приложение Б. Результаты поверхностной дефектоскопии конструкционных материалов.....	284
Приложение В. Дефектоскоп для выявления повреждений в обсадных колоннах нефтяных и газовых скважин.....	291
Приложение Г. Прибор и методика исследования оптических характеристик тканей суставов .....	300
Приложение Д. Акты внедрения результатов исследований .....	308

## Введение

**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 проведении 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.

При проведении измерений 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.

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. Voegner 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 г., 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

материала, 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° – 25...30%,

при скважности импульса  $1 \leq S \leq 5$  – 30...35%, при изменении температуры в 173...373 К – 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 аппаратурное 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 Самарском национальном исследовательском университете 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 НК36СТ, 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 Самарском государственном медицинском университете 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, 1999 г., 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, 2004 г., IV Международной научно-технической конференции «Лазерные технологии и средства их реализации», Санкт-Петербург, 2004 г., Общероссийской научно-технической конференции «Третьи Уткинские чтения», Санкт-Петербург, 2007 г., Седьмой международной научно-практической конференции «Исследование, разработка и

применение высоких технологий в промышленности», 28-30.04.2009 г., 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, 2002 г., 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, 2012 г., 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.

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

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

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.

**В третьей главе** проведено статистическое моделирование процессов обнаружения и распознавания с помощью Матлаб 7.5 с целью оценки влияния параметров измерительной системы на вероятность обнаружения и распознавания элементов поверхностей конструкционных материалов.

**В четвертой главе** рассмотрено испытательное оборудование для экспериментальной оценки эффективности оптико-электронных систем с лазерной подсветкой и определения оптических характеристик конструкционных материалов. Проведена экспериментальная оценка стабильности характеристик излучателей и ее влияния на точность измерений.

**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. Выполнено физическое моделирование переотражения излучения в трещине с учетом выявленных безразмерных параметров.

**В шестой главе** проведено экспериментальное исследование возможностей систем обнаружения и распознавания. Разработана методика выбора параметров системы обнаружения и распознавания в зависимости от класса исследуемых объектов. Построены лазерные информационно-измерительные системы для дефектоскопии и обнаружения и распознавания летательных аппаратов.

# **1 Актуальность использования методов и приборов дистанционного зондирования поверхностей лазерным излучением для диагностики состояния конструкционных материалов**

## **1.1 Поверхность элементов конструкций ЛА и ГТД как объект измерений**

Роль и значение поверхности, если ее рассматривать в широком аспекте, глобальна [1, 2, 5]. При этом свойства различных объектов определяются не только собственно внешней поверхностью, но и свойствами и взаимодействием поверхностей различных элементов, составляющих этот объект [2, 3, 6]. Например, такое свойство, как сверхпластичность, зависит от свойств, протяженности и структуры границ зерен, представляющих собой поверхности раздела структурных составляющих. Аналогично этому свойства композиционного материала определяются взаимодействием поверхностей элементов, составляющих композицию. Наиболее контрастно роль поверхности и влияние ее на эксплуатационные свойства изделия проявляется в такой отрасли машиностроения, как производство и эксплуатация газотурбинных двигателей (ГТД) [1, 2, 6]. И это не случайно. С одной стороны, детали двигателей изготавливаются ажурными, пустотелыми и тонкостенными — это обусловлено необходимостью снижения веса. С другой, детали ГТД работают в условиях высоких и быстроменяющихся температур, агрессивных сред; одновременно материал деталей подвержен воздействию высоких статических и динамических напряжений, амплитуда и частота которых изменяются в широких пределах. Частая и быстрая смена температуры (тепловой удар) приводит к возникновению дополнительных термических напряжений. Не случайно в этой связи появление различного рода дефектов (разрушение материала вследствие потери жаропрочности, накопление дефектов структуры и развитие трещин усталости, коррозия, термоусталость, разрушение при контактном взаимодействии деталей) в подавляющем большинстве случаев наблюдается в тонком приповерхностном слое деталей, что является

первопричиной снижения общей прочности и разрушения деталей эксплуатации.

На рисунке 1.1 представлен такой объект, как поверхность. Предложенная система предусматривает тесную диалектическую взаимосвязь между конструктивным обликом поверхности, технологией ее получения и последующими изменениями на протяжении всего жизненного цикла двигателя [1, 2].

При решении задачи конструирования, изготовления и контроля поверхности возникает целый ряд трудностей методического, информационного, технологического и конструкторского плана. Необходимо выполнить целый ряд исследований, чтобы определиться с выбором информативного параметра, интегрально отображающим свойства поверхности. Как показывают исследования, в отдельных случаях это могут быть экзоэлектронная эмиссия, твердость (микротвердость), инфракрасное излучение, параметры субмикроструктуры, работа выхода электрона, электростатический потенциал, рентгеновская люминисценция и др. [1, 2].

Классификация дефектов в их взаимосвязи с различными этапами жизненного цикла и источниками возникновения приведена в работах Р.В. Херцберга [3]. Здесь также указывается на необходимость применения комплексных методов оценки состояния поверхности конструкционных материалов для составления прогноза работоспособности изделий.

В конкретной конструкционной детали можно обнаружить широкий набор дефектов [5, 6]. В качестве них могут выступать: металлургические дефекты в материале в исходном состоянии; дефекты, возникающие в процессе эксплуатации; дефекты, возникшие в результате неправильной эксплуатации. Что касается первого из упомянутых источников дефектов в исходном материале, то их можно обнаружить в состоянии поставки или они могут быть введены в материал при последующей обработке в процессе производства.

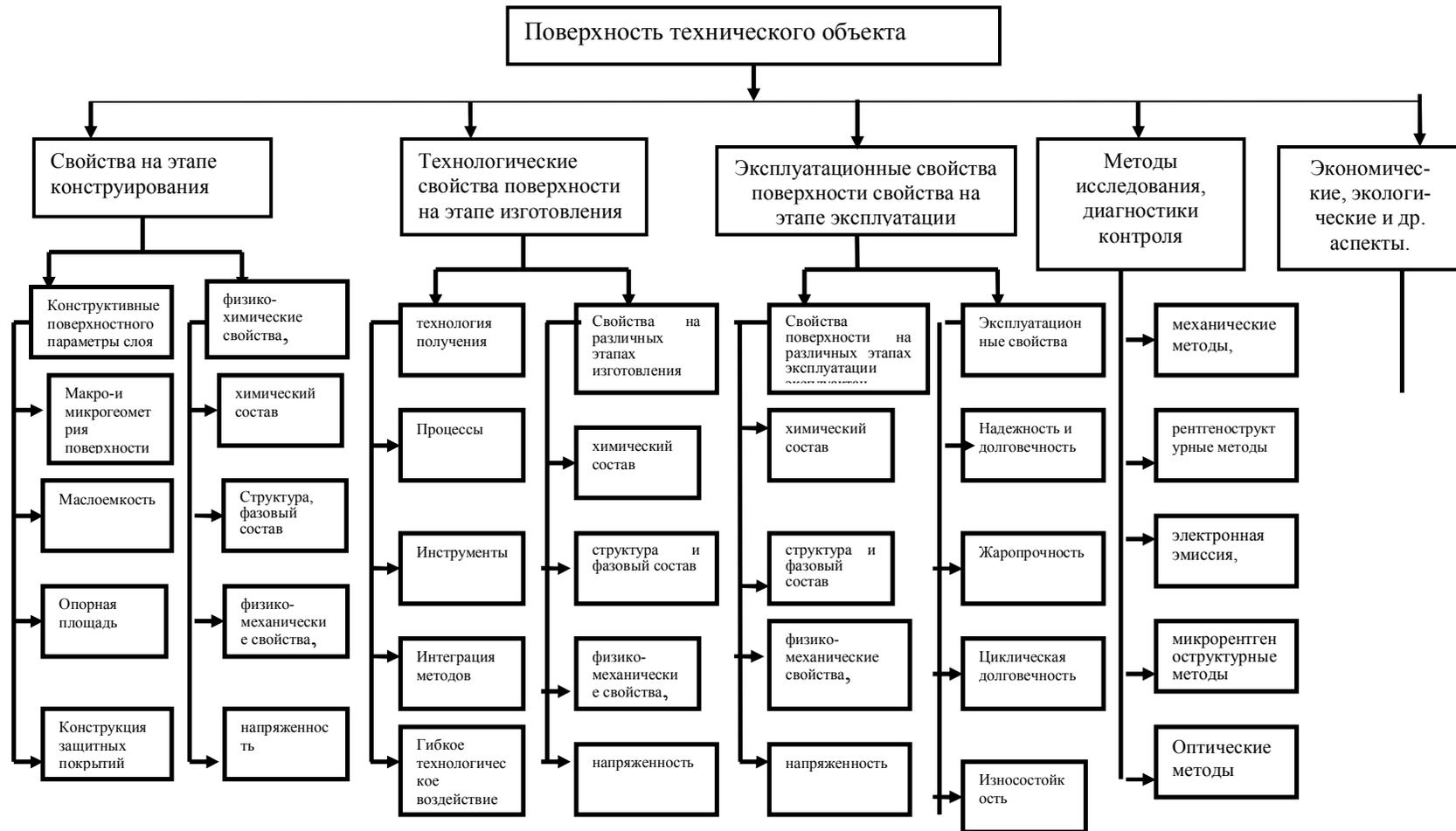


Рисунок 1.1 – Поверхность технического объекта как сложная система

К таким типичным дефектам материала относятся: избыточное содержание неметаллических включений, пористость, усадочные раковины, сегрегации химических элементов, неблагоприятно ориентированное при штамповке волокнистое строение, хрупкие крупные частицы вторых фаз, зернограничные сегрегации, дефекты, обусловленные отпускной хрупкостью и связанные с микроструктурой, возникшей при проведении неправильной термической обработки. Список возникающих в процессе производства дефектов также велик и включает: следы обработки резанием, шлифовки и листовой штамповки такие, как подрезы, прижоги, задиры, царапины и трещины, закаты, рубцы, расслои, обезуглероженные слои, неправильно проведенная цементация, а также дефекты, связанные со сваркой, например пористость, образование горячих и/или холодных трещин, недостаточная глубина проникновения и плохой профиль наплавленного валика.

Обострение конкурентной борьбы на мировом рынке авиационного двигателестроения выдвигает новые требования по повышению надежности, работоспособности и экономичности газотурбинных двигателей (ГТД) [5].

В настоящее время основой технологического обеспечения повышения работоспособности и надежности лопаток первых ступеней турбины в процессе доводки серийных ГТД и разработки новых двигателей остается диагностика необратимых структурных изменений в материале лопаток, исследование эксплуатационных повреждений и разрушений лопаток. Обратная связь в цепочке «конструкция – технология – эксплуатация», основанная на диагностике лопаток, становится подтверждением правильности выполненных расчетов, выбора состава материала лопаток и защитных диффузионных покрытий, технологической схемы производства, или является основанием для доработки конструкции лопатки и оптимизации технологии ее производства.

В работах А.Н. Петухова [6] также показано, что разрушение деталей ГТД от многоциклового усталости на всех этапах жизненного цикла связано с

многообразием конструктивных, технологических и эксплуатационных факторов, влияющих на сложность прогнозирования состояния изделий. Эти факторы отражаются, в первую очередь на состоянии поверхностного слоя конструкционных материалов. При этом основные факторы, определяющие долговечность деталей, с высокой достоверностью определяются на этапе конструирования.

Улучшение качества двигателей, повышение их надежности и долговечности неразрывно связаны с качеством деталей, так как практически все эксплуатационные показатели изделий определяются геометрическими параметрами, физико-механическими свойствами рабочих поверхностей. Характерным является тот факт, что двигатели совершенно одинаковых конструктивных компоновок из одних и тех же материалов часто имеют весьма отличающуюся надежность. Причиной этого во многих случаях являются различия в технологических процессах изготовления деталей и машин. На участке дефектации так же, как и на всех других участках ремонта и сборки, должно соблюдаться единство всех измерительных и контрольно-проверочных средств [13].

Многие опасные дефекты, проявляющиеся в процессе эксплуатации, визуально-оптическими методами в большинстве своем не обнаруживаются. К таким дефектам относятся в первую очередь усталостные трещины небольших размеров, коррозионные поражения, структурные превращения материала, связанные с процессами естественного и искусственного старения и т.д.

В этих случаях используются физические методы неразрушающего контроля. Далеко не всегда необходимо пользоваться максимальной чувствительностью, которую может обеспечить данный метод с использованием конкретной аппаратуры. Чувствительность необходимо выбирать с таким расчетом, чтобы могли быть надежно выявлены лишь те дефекты материала, которые и являются дефектами изделия, т.е. делают данное изделие (деталь)

непригодным для эксплуатации (что должно быть оговорено в соответствующей нормативно-технической документации). Совокупность используемых методов позволяет выявить все возможные дефекты, возникающие при эксплуатации (трещины, забоины, износ контактирующих поверхностей, коррозию, нагар и другие).

Люминесцентные дефектоскопы позволяют выявить трещины шириной 0,01 мм. Дефекты авиационных двигателей с технологической точки зрения классифицируются как дефекты узлов и дефекты деталей. Дефекты деталей, в свою очередь разделяются на поверхностные и объемные. К поверхностным дефектам относятся искажения формы и размеров поверхностей, нарушения поверхностного слоя (налет, коррозии, забоины, надиры, риски, наклеп, следы схватывания, отклонения от круглости и цилиндричности, эрозия). На зарождение и развитие поверхностных дефектов особенно влияет качество поверхностного слоя и прежде всего остаточные напряжения и шероховатость поверхности.

Основными причинами дефектов являются [13]:

- износ элементов конструкции;
- конструктивные недостатки и производственные дефекты;
- нарушения правил эксплуатации.

Характерными производственными дефектами деталей двигателей являются несоответствие структуры металла в результате неправильной технологии штамповки, сварки или термообработки; остаточные напряжения в сварных конструкциях в результате нарушения режима сварки; поверхностные трещины в результате неправильных режимов шлифования; отслоения гальванопокровов в результате неверной заточки и заправки шлифовальных кругов и т.д.

При эксплуатации наиболее сильному физико-химическому воздействию подвергается поверхностный слой детали. Разрушение детали в большинстве случаев начинается с поверхности (например, развитие усталостной трещины, износ, эрозия, коррозия) [3,6,13].

К дефектам дисков, возникающим при эксплуатации, можно отнести усталостные трещины, повреждение поверхностей деталей, составляющих проточную часть двигателя, а также поверхностей расположенных вблизи подвижных элементов или в непосредственном контакте с другими деталями.

В отличие от компрессора в турбине наблюдаются еще и другие дефекты, причиной которых является воздействие высоких температур со стороны газового потока, который нагревается в камере сгорания. К подобным дефектам относятся коррозия и нагар. На лопатках турбин наблюдается выгорание материала и нагар. Все дефекты ответственных деталей сведены в таблицу 1.1 [13].

Таблица 1.1 – Виды дефектов деталей ГТД

Компрессор					
низкого давления			высокого давления		
диск	лопатки		диск	лопатки	
царапины	царапины		царапины	царапины	
износ	трещины		износ	смятие	
коррозия	смятие		коррозия	изменение длинновых размеров	
трещины в ободу диска в области пазов	изменение длинновых размеров		трещины от центрального отверстия к ободу	износ на боковых поверхностях хвостовика	
	износ на боковых поверхностях хвостовика				
Турбина					
высокого давления			низкого давления		
диск	лопатки	вал	диск	лопатки	вал
царапины	прогар	царапины	царапины	царапины	царапины
износ	коррозия	износ	износ	коррозия	износ
коррозия	нагар	коррозия	коррозия	нагар	коррозия
нагар	царапины	нагар	нагар		нагар

По данным этой таблицы видно, что на деталях наблюдаются однотипные дефекты. На деталях компрессора и турбины наблюдаются царапины, сколы,

задиры, повреждение сопрягающихся поверхностей, а на деталях турбины наблюдаются прогары и нагары.

Основные причины дефектов можно представить в виде классификации разделив их на три категории: механическое воздействие, термическое воздействие и химическое воздействие. В настоящее время в различных отраслях машиностроительного комплекса в связи с усложняющейся техникой и технологиями, а также расширяющейся номенклатурой и растущими масштабами производимой продукции предъявляются повышенные требования к способам и средствам оперативного контроля. Характерные геометрические параметры дефектов поверхности приведены в таблице 1.2. Здесь использованы следующие обозначения:  $H$  – глубина элемента дефекта,  $B$  – ширина дефекта,  $\Delta D$  – величина рассогласования элементов конструкции при сборке (сварке),  $D$  – толщина шва,  $L$  – протяженность элемента конструкции.

Таблица 1.2 – Характерные геометрические параметры поверхностных дефектов

Выявляемые элементы поверхности	Характерные геометрические параметры	Состояние поверхности
Трещины	$H=1 \dots 10$ мм $B=0,05 \dots 0,1$ мм $L=30 \dots 150$ мм	Шероховатость, рассеивающие частицы, кривизна поверхности
Царапины	$H=0,5 \dots 2$ мм $B=0,01 \dots 0,02$ мм $L=20 \dots 100$ мм	Шероховатость, рассеивающие частицы, кривизна поверхности
Плохая пригонка	$\Delta D=0,05 \dots 0,10$ мм $D=40 \dots 120$ мм	Шероховатость, рассеивающие частицы, кривизна поверхности
Качество нанесения покрытия	Частицы карбидов, оксидов с характерными размерами $0,5 \dots 2$ мкм	Отклонение профиля поверхности от заданной формы

В единой системе контроля качества изделий важное значение имеют пространственно распределенные параметры поверхностей геометрических тел.

Пространственно-временные изменения свойств любого геометрического тела первоначально проявляются в некоторых их технологических и конструктивных отклонениях от нормируемых значений. В совокупности таких отклонений отражается качественное состояние поверхностей и самих изделий.

Для характеристики случайных отклонений состояний и свойств поверхностей в большинстве случаев пользуются интенсивностью флуктуаций источников информации и корреляционной функцией ввиду незначительности среднего значения флуктуационного поля [3, 13].

При изготовлении элементов внешней компоновки космических летательных аппаратов и в ходе эксплуатации к ним предъявляются следующие требования [8]: необходимая толщина и сплошность покрытий, стойкость к воздействию атомарного кислорода и ионизирующих излучений, величина коэффициента отражения в установленных пределах допуска  $R \pm \Delta R$ . При этом чаще всего рассматриваются следующие материалы:

1. Композитные материалы с полимерной матрицей, графито-эпоксидные композиты; матрицы из термопластической резины.
2. Материалы твердых смазок:  $\text{MoS}_2$ ; мягкие металлы (Ag, Pb, In), полимеры.
3. Терморегулирующие покрытия (ТРИ): металлизированные полимеры: Al-тефлон, Al-каптон, органические краски (белые и черные).
4. Оптические материалы: металлические покрытия: Ag, Al, Ni, Au, Ta, Ti, Zr, диэлектрические покрытия:  $\text{MgF}_2$ ;  $\text{CaF}_2$ .
5. Компоненты космической энергетики: солнечные батареи, каптоновые пленки, серебряные контакты, стеклянные волоконные композиты.
6. Отражатели: кремний, акрилы, фтористые полимеры, поликарбонаты, Ag, Al.
7. Защитные покрытия материалов: Ni,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , ZnO, Ni/ $\text{SiO}_2$ ,  $\text{In}_2\text{O}_3$ .

Возможны следующие виды дефектов и повреждений поверхности элементов конструкций ЛА: участки со снижением отражательной способности вследствие изменения структуры материала, наличие загрязнений, снижение

толщины покрытий, растрескивание покрытий, трещины в хрупких материалах, термические повреждения (таблица 1.3).

При проведении экспериментальной оценки состояния поверхностей материалов внешней компоновки летательных аппаратов оцениваются следующие параметры: потери массы –  $\Delta m$ ;  $\Delta \alpha_s$  – изменение коэффициента поглощения солнечной радиации ТРП; коэффициент отражения –  $\Delta R$  зеркала; измерение электрического сопротивления проводников ( $\Delta g$ ); исследование морфологии поверхности с помощью сканирующего электронного микроскопа или профилографа.

Все элементы поверхности конструкционных материалов классифицируются по соотношению шага  $S$  неровностей (или ширины) к их высоте  $h$  (или глубине) [9, 33] (рисунок 1.2):

- элементы геометрии поверхности и макронеровности, представляющие собой отклонения поверхности от правильной геометрической формы;
- волнистость, характеризующуюся периодически повторяющимися неровностями, шаг которых значительно превышает их высоту;
- микронеровности или шероховатости, представляющие собой совокупность неровностей с относительно малым шагом.

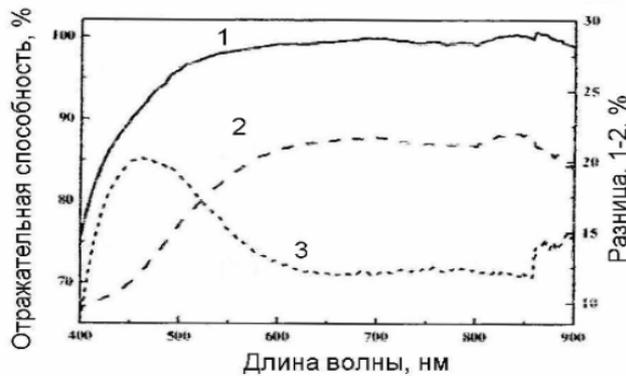
Неровности с отношением  $S/h < 50$  характеризуют шероховатость поверхности,  $S/h > 50$  – волнистость и при  $S/h > 1000$  – отклонения формы и элементы геометрии поверхности. Как видно из приведенных выше случаев рассеяния, в качестве критерия выступает средняя высота шероховатостей. Данная величина оценивается так же, как и в радиолокации, согласно критерию Рэлея [33]:

$$h < \frac{\lambda}{8} \sin \varphi, \quad (1.1)$$

где  $\lambda$  – длина волны;  $h$  – высота шероховатости;  $\varphi$  – угол падения.

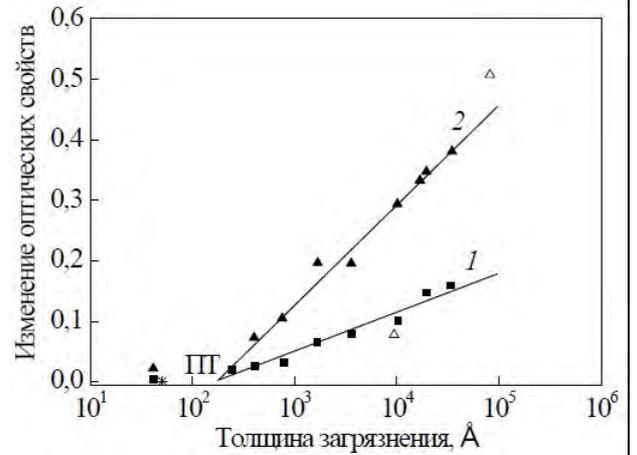
Таблица 1.3 – Виды повреждений элементов конструкций ЛА

Участки со снижением отражательной способности



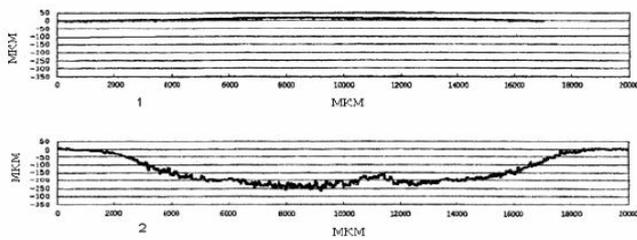
Спектральная зависимость коэффициента отражения образца Ag: 1 – до облучения; 2 – после облучения высокочастотной кислородной плазмой ( $\Phi \sim 1,5 \cdot 10^{19}$  атом/см<sup>2</sup>); 3 – различие в отражении Ag, до и после облучения

Наличие загрязнений



Изменение оптических свойств панелей анодированного оксида хрома в зависимости от толщины пленки загрязнений: 1 – изменение коэффициента излучения,  $d\epsilon$ ; 2 – изменение коэффициента поглощения  $d\alpha$

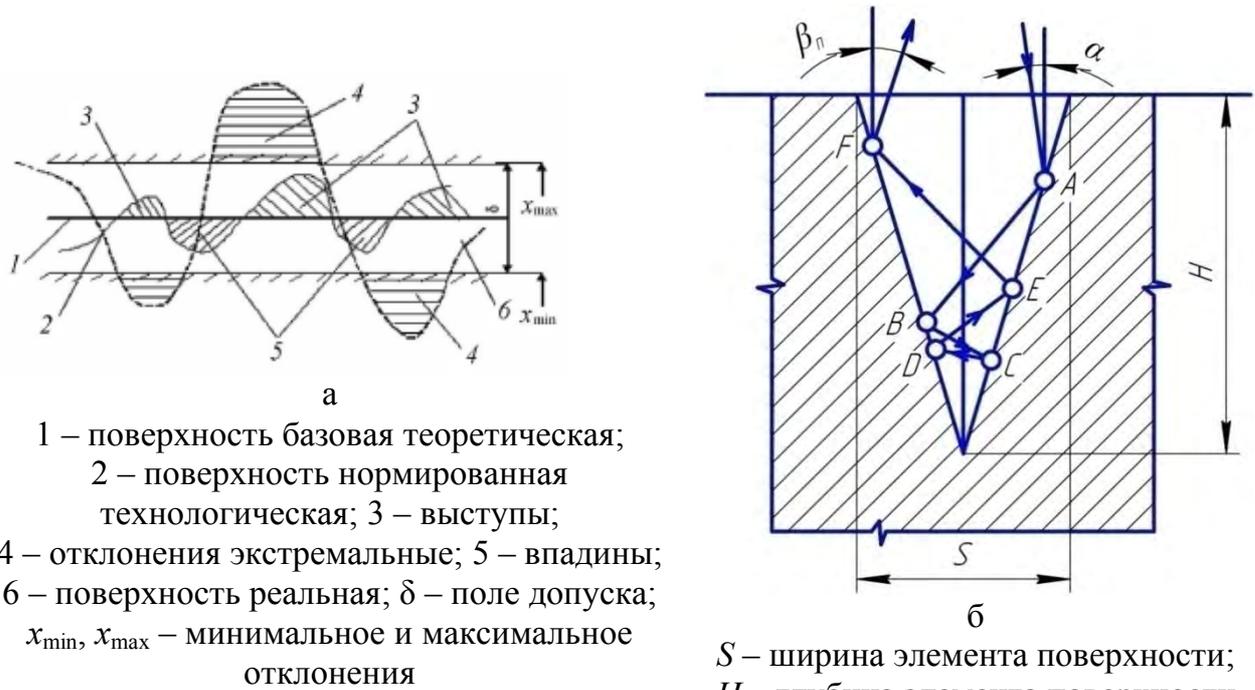
Снижение толщины покрытий



Растрескивание покрытий



технологические дефекты (отверстия) размером 1-5μм с концентрацией ( $\sim 10^3$  отв/см<sup>2</sup>) в защитном покрытии SiO<sub>2</sub> после нанесения



а  
 1 – поверхность базовая теоретическая;  
 2 – поверхность нормированная технологическая; 3 – выступы;  
 4 – отклонения экстремальные; 5 – впадины;  
 6 – поверхность реальная;  $\delta$  – поле допуска;  
 $x_{\min}, x_{\max}$  – минимальное и максимальное отклонения

б  
 $S$  – ширина элемента поверхности;  
 $H$  – глубина элемента поверхности

Рисунок 1.2 – Модель элементарного контура поверхности (а) и модель элемента геометрии поверхности (б)

Отсюда следует, что поверхность или объект обладают свойствами гладкости, если  $h/\lambda \rightarrow 0$  или  $\varphi \rightarrow 0$ . При значительных  $h/\lambda$ , но очень пологом угле падения, поверхность обладает свойствами гладкой, удовлетворяющей условиям зеркального отражения.

В оптическом диапазоне можно выделить три случая рассеяния объектом падающей на него волны: зеркальное рассеяние – средние размеры шероховатостей намного меньше длины волны, диффузионное рассеяние – средние размеры шероховатостей соизмеримы с длиной волны, средние размеры шероховатостей много больше длины волны. Если размеры неровностей соизмеримы с диаметром пятна излучения на поверхности, происходит переотражение излучения в элементах поверхности. 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.

Как видно из приведенного описания дефектов элементов конструкций летательных аппаратов и двигателей, они приводят либо к изменению геометрии поверхности, либо к изменению распределения коэффициента отражения по поверхности. До настоящего времени не существует обобщенно классификации дефектов с точки зрения их оптических свойств, позволяющей предсказать поведение величины оптического сигнала при отражении от поверхности.

## **1.2 Методы исследования состояния поверхности элементов конструкций летательных аппаратов и двигателей**

Предъявление жестких требований к качеству и надежности изделий аэрокосмической техники требует создание новых способов и испытательного оборудования для обнаружения дефектов поверхностного слоя изделий. При этом до 90% всех разрушений вызваны дефектами поверхностного слоя [2, 3, 5, 6, 29]. Они не обнаруживаются из-за отсутствия надежных методов и средств контроля. Поиск и выявление скрытых дефектов усложняются ограниченными возможностями традиционных механических и оптических методов (невозможность проведения исследования в условиях эксплуатации без остановки оборудования и разборки изделий, низкая чувствительность измерений, сложность определения вида повреждения и др.) и случайным характером распределения самих дефектов и их параметров (глубина и ширина трещин, одновременное наличие различных видов повреждений в виде трещин, царапин, забоин и др.). Широкое применение для контроля качества изделий среди оптических методов получили лазерные измерительные системы [4, 10, 12-16, 18-26, 27-29, 32, 37-39, 43-44]. Их преимущества – бесконтактность, высокая информативность, быстрое действие, возможность работы в реальном масштабе времени. Подобные аппаратные средства позволяют контролировать в процессе изготовления и эксплуатации изделий геометрические параметры их элементов

конструкций – размеры, форму, расположение и др. Сканирование лазерного излучения и визуализация изображений имеют превосходство перед другими способами контроля состояния поверхностей и широко применяются для обнаружения поверхностных трещин, дефектов сварных швов и резьб, определения шероховатости и износа поверхности. В связи с этим данное направление исследования по совершенствованию подобных лазерных измерительных систем является своевременным и актуальным.

Существуют различные методы, позволяющие выявить наличие дефектов на поверхности и определить их геометрические размеры: визуально-оптическая интроскопия, когерентно-оптическое обнаружение дефектов с использованием линзовых растров, оптическое сканирование с измерением интенсивности отраженного или рассеянного поверхностью излучения, оптическое сканирование с получением изображений исследуемой поверхности и др. На металлической поверхности изделий с многослойными защитными и ударопрочными покрытиями и без них возможны различные повреждения: трещины, царапины, забоины, изменение состояния поверхности в результате химического воздействия и абразивного износа. Для определения прогноза работоспособности изделия необходимо не только обнаружить дефекты, но и определить вид повреждения. Вероятность выявления дефектов определяется как конструкцией и параметрами оптической системы и излучателя, так и характером самих дефектов.

Оптические измерительные приборы позволяют контролировать в процессе изготовления и эксплуатации изделий их геометрические параметры – размеры, форму, координаты расположение элементов и их отклонения от номинальных значений [10, 11, 40, 47]. Методы оптического сканирования и визуализации изображений применяются для контроля состояния поверхности – обнаружения поверхностных трещин, дефектов сварных швов и резьб, определения шероховатости и износа поверхности [11-15, 17-19, 23-31, 37, 38, 47], контроля геометрических параметров изделий [43]. В процессе измерений определяются не

только наличие и расположение дефектов, но и их размеры (глубина, ширина). Эллипсометрические и поляриметрические методы определения параметров рассеянного по поверхности излучения также являются перспективным средством диагностики состояния поверхности и позволяют идентифицировать источник рассеяния: шероховатость поверхности, рассеивающие частицы в поверхностном и подповерхностном слое (в структуре композиционных материалов и биотканей), дефекты в поверхностном и подповерхностном слое [35, 39, 44, 50, 70, 76]. Рефлектометрические методы применяются для определения шероховатости поверхности и цветовых характеристик поверхностей, рассеивающих излучение [33, 42, 48]. Определение тепловых характеристик позволяет также оценить влияние динамических нагрузок и расположение внутренних дефектов [21, 22, 45, 49, 71]. Интерферометрические методы широко применяются для оценки качества изделий: определения шероховатости поверхности [36, 66], выявления дефектов поверхностной и подповерхностной структуры и определения толщины покрытий [42, 49, 59], а также для оценки влияния статических и динамических нагрузок [16, 22]. При этом определена вероятность пропуска дефекта в зависимости от площади считывающей апертуры при сканировании излучения по поверхности [17].

Для обнаружения поверхностных трещин, дефектов сварных швов и резьб могут применяться методы оптического сканирования [18] и визуализации изображения с помощью волоконно-оптических интроскопов [19].

Созданию лазерных систем поверхностной дефектоскопии посвящены работы Chang P.T., Kaufman I., Shyong D.Y (электроэнергетический институт в Пало-Альто, США) [12]. Ими предложен способ обнаружения поверхностных трещин оптическим сканированием. Изменению шероховатости поверхности соответствует слабое уменьшение интенсивности (на 20-30%). Наличие трещины приводит к рассеиванию значительной части излучения мимо детектора (до 90%). Показана возможность выявления трещин шириной 0,025 мм, глубиной 0,05 мм и

длиной 6,25 мм на поверхности турбинной лопатки. An-Shyang Chuand, M.A. Butler продемонстрирована возможность измерения геометрических характеристик элементов шероховатости поверхности с разрешением до 10 мкм при использовании низкоабберационной оптики.

Сорокиным П.А., Котляровым В.С. [28] предложено фотоэлектронное устройство для обнаружения дефектов поверхности типа трещин, царапин, забоин, в котором одновременно регистрируются интенсивности зеркально отраженного и диффузно рассеянного излучения. Наличие расщепителя входного пучка излучения на две компоненты, фотодетекторов для формирования эталонного и измерительного сигналов обеспечивает более высокое отношение сигнал-шум, чем для приборов с одним измерительным фотодетектором (более 60%).

В.В. Котляр, А.Н. Малов, и др. [11] разработали метод когерентно-оптического обнаружения дефектов с использованием линзовых растров взамен сканирования с прямой регистрацией интенсивности излучения, рассеянного или отраженного контролируемой поверхностью. Использование когерентного монохроматического лазерного излучения снижает минимальный размер выявляемых дефектов до 10 мкм (для белого света – 50 мкм). Отрицательной стороной когерентно-оптических методов являются спекл-шумы, обусловленные шероховатостью поверхности.

Оптическое сканирование позволяет визуализировать трещины и измерять их ширину. Метод позволяет проводить диагностику неподвижных и вращающихся поверхностей. При обнаружении поверхностных дефектов оптическим сканированием возможны две схемы наблюдения (рисунок 1.3) [12]. В первой схеме сфокусированный луч лазера направляется на исследуемую поверхность и, зеркально отразившись, попадает в детектор (рисунок 1.3,а). При отсутствии дефектов отражательная способность поверхности неизменна, и интенсивность света, проходящего в детектор, постоянна. Изменению

шероховатости поверхности соответствует слабое уменьшение интенсивности. Наличие трещины приводит к рассеиванию значительной части излучения мимо детектора. Данная схема может быть реализована при неподвижном объекте и движущейся оптической установке, а также для дефектоскопии вращающегося объекта.

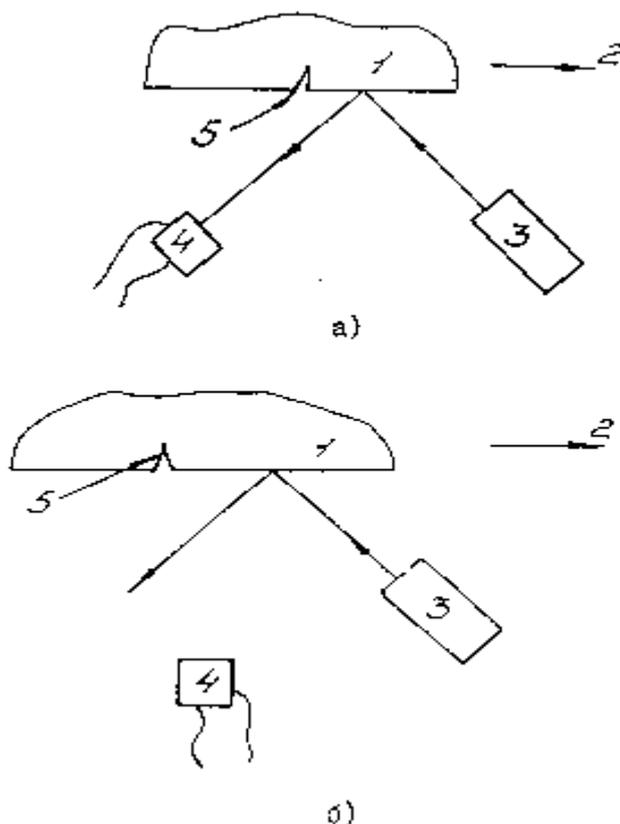


Рисунок 1.3 – Схемы наблюдения при обнаружении поверхностных трещин оптическим сканированием с зеркальным отражением (а) и рассеиванием (б): 1 – исследуемая поверхность, 2 – направление движения поверхности, 3 – источник излучения (лазер), 4 – оптический детектор, 5 – трещина

При использовании второй схемы (рисунок 1.3,б) при отсутствии трещин зеркально отраженный свет не попадает в детектор. При наличии трещин отраженный свет рассеивается, часть его собирается линзой и фокусируется на детектор. Преимуществами второй схемы являются более низкие требования к точности угловой установки аппаратуры, возможность работы при более низких

уровнях сигнала, меньшая чувствительность к волнистостям поверхности. Рассмотренные схемы могут применяться для формирования двумерных изображений неподвижной поверхности (с использованием синусоидального отклонения луча). Кроме визуализации трещин, рассмотренный метод позволяет также определять их ширину.

Описанные в работе [53] оптические системы для дефектоскопии поверхностного слоя изделий предназначены, в основном, для выявления трещин. Наличие повреждений такого рода определяется по изменению интенсивности зеркально отраженного света или диффузно рассеянного трещиной. Возможно одновременное измерение этих двух составляющих.

При измерении зеркальной составляющей наличие трещин, царапин и неровностей поверхности определяется по резкому снижению интенсивности отраженного излучения. Размеры дефекта определяются по временному интервалу, соответствующему изменению сигнала фотоприемника. Точность измерений повышается при установке между источником излучения и контролируемой поверхностью, а также в ходе лучей зеркально отраженного излучения собирающих линз.

Для исключения влияния флуктуаций интенсивности источника излучения используется опорный сигнал, формируемый с помощью устройства расщепления зондирующего луча на две составляющих и дополнительного фотоприемника. Величина падающего на контролируемую поверхность светового потока в зависимости от материала детали регулируется с помощью системы оптических клиньев. Следует отметить, что такая система сложна в изготовлении и требует ручной настройки прибора при переходе от одного материала к другому. Недостатком подобных систем является невозможность выявить колебания коэффициента отражения в пределах одной детали, например, вследствие окисления участка поверхности детали или абразивного износа и достоверно определить наличие трещин на фоне изменения состояния поверхности.

Трещины и царапины могут быть выявлены по увеличению интенсивности диффузно рассеянного поверхностью излучения [53-55]. Наличие расщепителя входного пучка излучения на две компоненты, фотодетектора для формирования эталонного сигнала и электросхемы для объединения выходных сигналов двух фотодетекторов (эталонного и измерительного) и формирования результирующего выходного сигнала обеспечивает более высокое отношение сигнал-шум, чем для приборов с наличием только измерительного фотодетектора. При использовании данного метода для определения размеров дефекта необходимо наличие двух измерительных фотодетекторов, регистрирующих максимумы интенсивности рассеянного краями трещины излучения с временной корреляцией полученных сигналов, а также необходим третий фотодетектор для формирования эталонного сигнала.

Существуют оптические схемы [28], в которых одновременно регистрируются интенсивности зеркально отраженного и диффузно рассеянного излучения. Измерение этих двух составляющих позволяет учитывать влияние флуктуаций интенсивности источника излучения и изменения состояния поверхности в пределах одной детали благодаря наличию компенсационной электрической схемы.

Существуют также лазерные сканирующие системы для апланометрических измерений, позволяющие контролировать в процессе производства плоскостность и параллельность направляющих поверхностей технологического оборудования [26]. Сканирование луча в двух взаимно ортогональных направлениях в сочетании с обработкой результатов измерений на ЭВМ дает возможность определять количественные характеристики формы в любом поперечном сечении: отклонение плоскостности и некруглости в пределах габаритных размеров с точностью до 0,5...1,0 мкм/мм, выявлять волнистость в диапазоне от 1 до 10 мм, шероховатость до 1 мкм. Данная измерительная система применялась в составе

средств комплексного контроля геометрических параметров изделий и автоматизации учета.

Таким образом, перечисленные методы применимы только для обнаружения повреждений поверхности и не позволяет определять количественные характеристики дефектов, а вероятность обнаружения повреждений в большой степени зависит от поисковых способностей контролера.

Контроль лопаток ГТД – важная и неотъемлемая часть технологического процесса их изготовления. В процессе производства контролю подлежат десятки геометрических параметров лопаток, определяемые требованиями технических условий, конструкторской и технологической документации, утвержденными образцам, эталонам и условиями поставки. Лопатка ГТД представляет собой изделие с очень сложной геометрической формой, и задача контроля геометрии лопаток ГТД стоит очень остро [5, 6, 12, 26, 29, 70].

Чичигиным Б.А. и Кетковичем А.А. предложена аналитическая модель оптико-электронной системы с использованием аппарата оптических передаточных функций, позволяющая оценить предельную точность системы измерения геометрии лопаток ГТД методом светового сечения [70]. Получены зависимости, описывающие закономерности рассеяния света поверхностью лопаток ГТД и предложен метод бесконтактного экспресс-контроля параметра шероховатости поверхности лопаток  $R_a$ , основанный на учете пространственного распределения рассеянного света (рисунок 1.4).

Созданный ими пилотный образец позволяет проводить измерений линейных размеров лопатки с точностью 0.01 мм со скоростью 20 сечений в минуту (рисунок 1.5, таблица 1.4). Анализ данных позволяет сделать вывод о том, что точность измерения геометрии составляет 0,01 мм. Совокупность разработанных методов и средств позволила создать систему лазерного контроля геометрии лопаток ГТД, обеспечивающую снижение погрешности до 0,01 мм и повышений быстродействия до 20 сечений в минуту.

Однако данная измерительная система требует предварительной настройки и предназначена для измерения ограниченного числа параметров поверхности.

В.В. Котляр, В.Н. Белопухов, В.Г. Волостников и др. разработали метод когерентно-оптического обнаружения дефектов с использованием линзовых растров и дифракционных оптических элементов взамен сканирования с прямой регистрацией интенсивности излучения, рассеянного или отраженного контролируемой поверхностью [11, 14, 15].

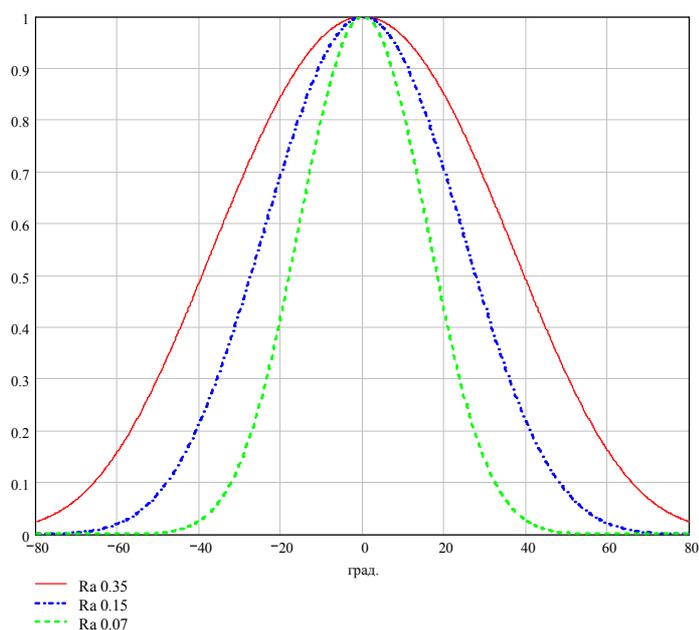


Рисунок 1.4 – Индикатрисы рассеянного света для лопаток с различными параметрами шероховатости ( $\lambda = 635$  нм)

Использование когерентного монохроматического лазерного излучения снижает минимальный размер выявляемых дефектов до 10 мкм (для белого света – 50 мкм).

По мнению авторов работ, выявление дефектов целесообразно проводить по измерению зеркальной составляющей, обладающей высокой чувствительностью для широкого класса поверхностных дефектов. Анализ отношения сигнал/шум показал, что размер минимально обнаруживаемых дефектов зависит от уровня

шероховатости поверхности, амплитуды ее вибраций и глубины резкости оптической системы.

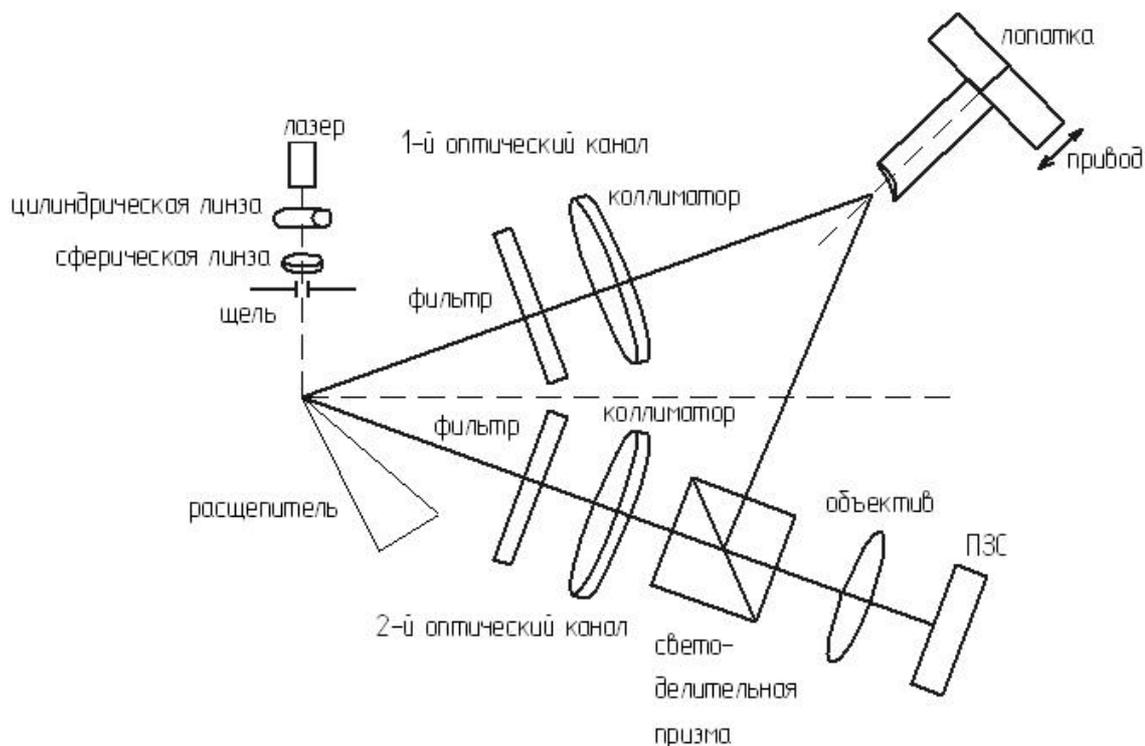


Рисунок 1.5 – Функциональная схема разработанной установки лазерного контроля геометрии лопаток

Таблица 1.4 – Основные технические характеристики разработанного комплекса

Габариты контролируемых изделий	до 50 x 100 x 180 мм
Погрешность измерений	0.01 мм
Быстродействие	двадцать сечений в минуту
Формат ПЗС матрицы	2500 x 1500
Габариты (без ПЭВМ)	200 x 400 x 600 мм
Оптический масштаб	3x
Длина волны лазера	635 нм
Мощность лазера	3 мВт
Потребляемая мощность	не более 100 Вт

Для лазерной дефектоскопии элементов конструкций изделий точного машиностроения предложены оптические схемы с одновременным освещением небольших участков поверхности значительным числом малых световых пятен ( $N=40$ ). Отрицательной стороной когерентно-оптических методов являются спекл-шумы, обусловленные шероховатостью поверхности.

Это позволяло не только выявлять дефекты поверхности, но и определять их размеры. Регистрация отраженного поверхностью излучения осуществляется системой фотоприемников. Здесь применялась пороговая обработка сигналов. Время контроля одной детали составляло 1-2 с. Однако, такие фотодиодные линейки имеют ограниченные возможности из-за интегральной неоднородности чувствительности. Отмечено, что увеличение числа каналов ухудшает отношение сигнал-шум.

В работе [15] предложена лазерная измерительная система с угловым сканированием для определения волнистости внутренних колец подшипников. Регистрация отраженного поверхностью излучения осуществлялась с помощью линейки фотоприемников с числом элементов 1024. Применение указанной системы позволяет выявлять волнистость поверхности с амплитудой порядка 2 мкм на базе 400 мкм. Данная дефектоскопическая система требует проведения предварительной настройки и применения алгоритмов численного интегрирования при обработке результатов измерений, применима для узкой номенклатуры контролируемых поверхностей.

В работе [45] рассмотрены устройства фотометрирования на базе многоэлементных фотоприемников (линеек фотодиодов) для систем контроля параметров изделий и технологических процессов с использованием дифрактометрии и спектрометрии. Показано, что областями наиболее эффективного применения многоэлементных фотоприемников являются контроль физико-химических параметров объектов методами спектрального анализа излучения, контроль геометрических параметров объектов с помощью методов

геометрической и волновой оптики, определение оптических характеристик объектов.

Таким образом, в настоящее время существуют различные способы выявления дефектов на поверхности металлических изделий (визуально-оптические, измерение интенсивности отраженного излучения при сканировании по поверхности, засветка поверхности многими малыми световыми пятнами, выявление дефектов по результатам обработки изображений, полученных при сканировании по поверхности). Все перечисленные методы позволяют лишь выявлять поверхностные повреждения при определении их местоположения и ширины. Для визуально-оптического метода, получившего широкое распространения для исследования состояния поверхности изделий авиационной техники характерно существенное влияние индивидуальных способностей контролера. Однако, для прогноза работоспособности изделий необходимо не только выявить повреждение, но и определить его характер, что не позволяют сделать существующие методы диагностики.

Для определения отношения сигнал/шум необходимо знать отражательную способность, определяемую шероховатостью и структурой поверхности. Существуют различные методы, позволяющие оценить параметры микрорельефа и структуры поверхности по изменению характеристик отраженного поверхностью излучения, поляриметрические, определение статических и динамических параметров рассеяния, а также интерферометрические методы.

На поверхности возможны различные оптические явления: дифракция, поляризация и деполяризация излучения, переотражение и рассеяние на элементах топологии поверхности и др., при этом на результаты измерений оказывают влияние размеры элементов структуры поверхности и параметры зондирующего пучка.

Так, например, дифракционные явления на поверхности композиционных материалов определяют величину отражательной способности при диаметре

пятна излучения на поверхности, превышающем размеры зерен материала [35, 36, 73].

Методы определения профиля поверхности широко развиты в настоящее время для многочисленных приложений измерения плоскостности, сферичности, структуры и глубины. Для этих целей могут применяться простые контактные пишущие профилометры [48, 49], сканирующие электронные микроскопы, атомные микроскопы [58], конфокальные оптические микроскопы [59-61], интерферометры белого света [62-64]. В работе [38] описана лазерная система определения профиля поверхности, позволяющая получать изображения, полученные по результатам измерения интенсивности переотраженного на микронеровностях поверхности излучения, которые качественно иллюстрируют микрорельеф поверхности. Принцип работы системы определения профиля поверхности показан на рисунке 1.6, схема прибора показана на рисунке 1.7.

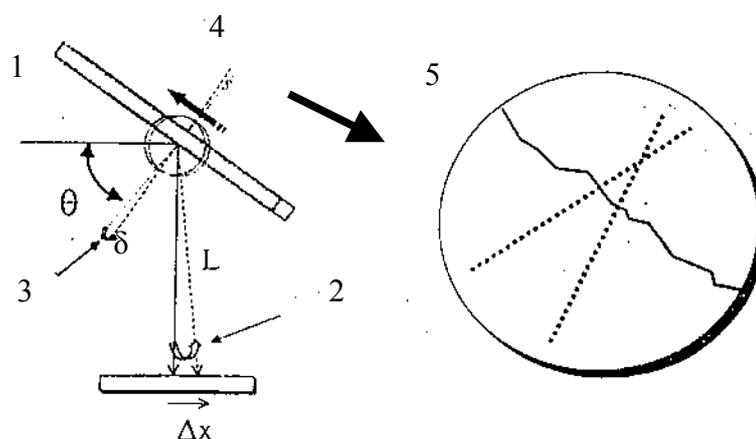


Рисунок 1.6 – Принцип работы системы определения профиля поверхности

Исследуемый образец располагается на поворотной ступени, сфокусированный лазерный пучок падает на поверхность под углом  $\theta=45^\circ$  и сканируется по поверхности образца. Отклонение положения нормали к поверхности на величину  $\delta$  приводит к отклонению отраженного луча на

величину  $2\delta$ . Изменения в направлении распространения отраженного потока регистрируются позиционно-чувствительным детектором. В качестве источника излучения использовался гелий-неоновый лазер.

Измерительная система имеет пространственное разрешение порядка размеров пятна излучения на поверхности ( $\sim 5$  мкм). Данная установка позволяет определять отклонения в направлении нормали к поверхности, которые имеют пространственный период более, чем размер пятна на поверхности образца. Более тонкие изменения, чем это, усредняются по пятну и приводят к перераспределению интенсивности излучения на детекторе или к рассеянию излучения.

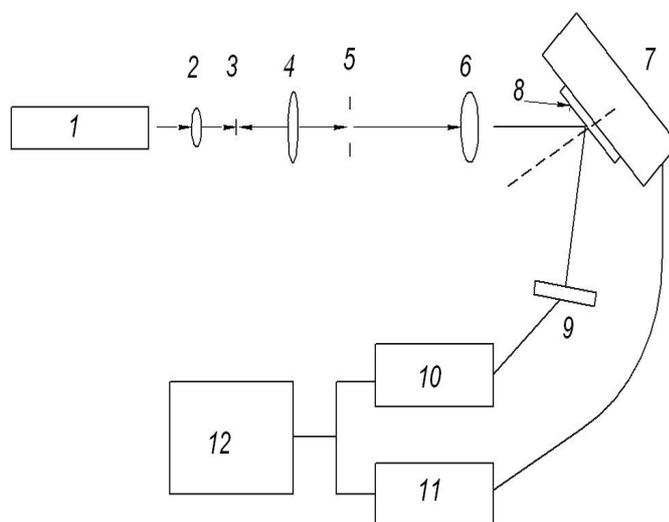


Рисунок 1.7 – Схема прибора для определения профиля поверхности: 1 – лазер, 2, 4, 6 – линзы пространственного фильтра, 3, 5 – диафрагмы, 7 – поворотная ступень, 8 – контролируемый образец, 9 – фотодетектор, 10 – контроллер, 11 – привод поворотной ступени, 12 – компьютер

Данный метод применим для поверхностей отражающего или полупрозражающего типа и предназначен, в основном, для качественной оценки микрорельефа поверхности и имеет сложную систему формирования зондирующего луча.

Неидеальности в структуре поверхности могут быть выявлены и идентифицированы на основе векторных теорий и методов измерений на их

основе. В этом случае однозначно определяются изменения поляризации света при отражении от поверхности, а также деполяризация, вызванная многократным рассеянием на шероховатой поверхности и высокой концентрацией рассеивающих частиц.

Одним из таких методов является определение элементов матрицы Мюллера – угловое распределение поляризации излучения при отражении от поверхности (непрозрачные образцы) и прозрачные образцы с двойным лучепреломлением. Эти методы могут быть применены для контроля состояния поверхности стальных и алюминиевых поверхностей после различных видов поверхностной обработки в машиностроении, автомобильной промышленности.

Показано, что знание всех 16 элементов матрицы Мюллера позволяет однозначно определить оптические свойства образца. Автоматизированная установка для определения параметров рассеянного излучения (фотополярометр) (рисунок 1.8) включает в свой состав He-Ne-лазер, плоский расщепитель потока для формирования опорного сигнала, поляризатор, два электро-оптических модулятора, расположенных под углами  $45^\circ$  и  $0^\circ$  к горизонтально пропускающей оси первого поляризатора.

Разработанная методика была применена для исследования структуры стальных листов с различными видами поверхностной обработки, применяемыми в автомобильной промышленности. Показано, что определение элементов матрицы Мюллера позволяет однозначно определить состояние поверхности и вид поверхностной обработки стального листа.

Недостатком данного метода является сложная система формирования зондирующего сигнала и необходимость контрольного образца для предварительной калибровки измерительной системы.

Для исследования шероховатости поверхности широко применяются рефлектометрические методы [33, 42, 48]. Обычно такие измерительные системы включают в свой состав три приемника излучения, которые воспринимают

излучение, отраженное в трех направлениях, определяемых углами  $\theta_1$ ,  $\theta_2$  и  $\theta_3$  от нормали к контролируемой поверхности. Однако, такие рефлектометры применяются, в основном, для измерения малой шероховатости поверхности. Для уменьшения погрешности измерения в [42] предложен рефлектометр с пятью приемниками излучения (рисунок 1.9).

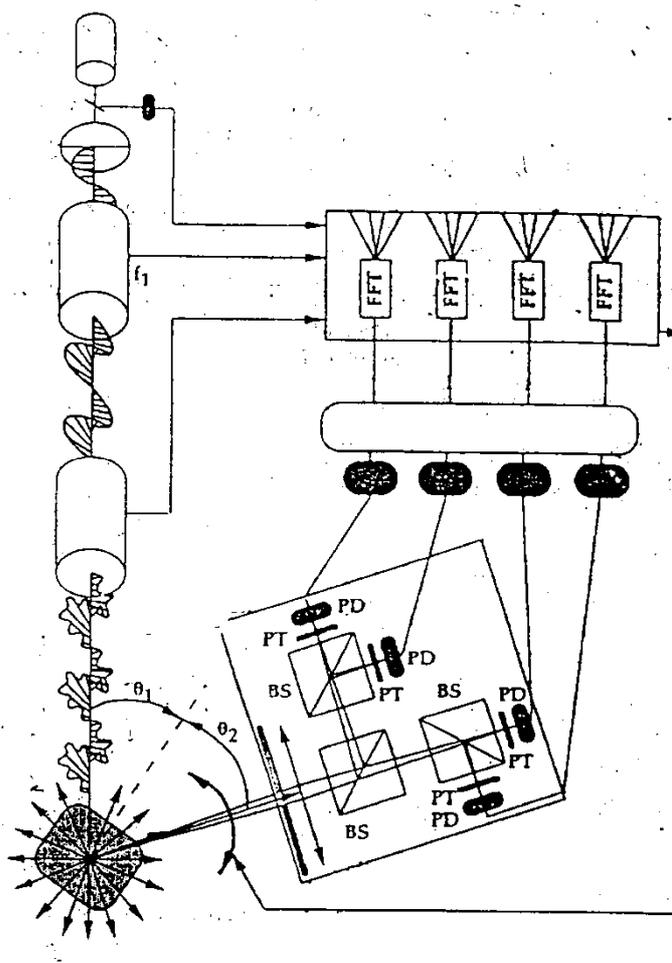


Рисунок 1.8 – Схема автоматизированного автополярометра для определения матрицы рассеяния Мюллера: FFT – преобразователи Фурье, BS – расщепители пучка, PT – поляризационные преобразователи, PD – фотодиоды

Этот рефлектометр применяется для определения шероховатости на границе таких двух сред, которые определяют сильную зависимость коэффициента отражения от угла падения. В этом случае усреднение результатов

вычисления по измеренным потокам излучений позволяет уменьшить погрешность определения параметров шероховатости.

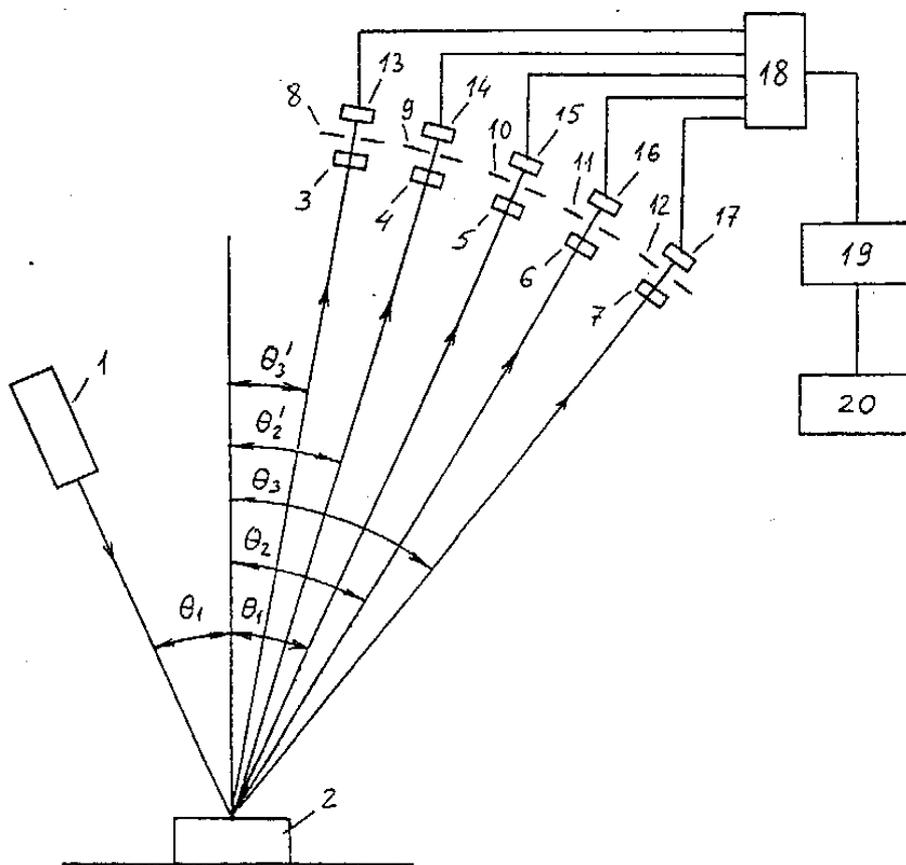


Рисунок 1.9 – Принципиальная схема рефлектометра для измерения шероховатости поверхности: 1 – источник излучения, 2 – измеряемая поверхность, 3-7 – нейтральные светофильтры, 8-12 – диафрагмы, 13-17 – приемники излучения, 18 – блок обработки сигналов, 19 – интерфейс, 20 – вычислительное устройство

В работе [48] предложен двухволновой оптический метод исследования шероховатости поверхности с определением зеркальной составляющей рассеянного поверхностью потока излучения. С помощью этого метода измеряется среднеквадратическое значение высоты микронеровностей. Величина коэффициента диффузного отражения определялась для материалов, используемых в целлюлозно-бумажной промышленности. В качестве источников

света использовались: лампа накаливания, прямой солнечный свет, рассеянный дневной свет.

Интенсивность зеркально отраженного излучения определяется выражением [33]:

$$I_3 = \rho I_0 \exp\{-\pi^2 h_{\text{ск}}^2 \cos^2 \varphi / \lambda^2\}, \quad (1.2)$$

где  $I_3$  – интенсивность зеркальной составляющей,  $I_0$  – интенсивность падающего излучения под углом  $\varphi$ ,  $\rho$  – эффективный коэффициент отражения,  $h_{\text{ск}}$  – среднеквадратическая высота микронеровностей. Величина  $\exp\{-\pi^2 h_{\text{ск}}^2 \cos^2 \varphi / \lambda^2\}$  представляет собой коэффициент зеркальности и показывает, какая доля излучения отражается зеркально.

Этот метод применим для значений шероховатости  $R_z > 0,2$  мкм, при меньших значениях шероховатости ошибка измерений сравнима с  $R_z$ . Наибольшую погрешность при определении  $h_{\text{ск}}$  имеет знаменатель дроби  $\cos^2 \varphi$ : при значениях угла падения излучения менее  $40^\circ$  она составляет 0,5%, при увеличении угла падения ( $\varphi > 80^\circ$ ) погрешность возрастает до 10-15%. Так как значение длины волны излучения всегда известно более точно, чем угол падения излучения, то для уменьшения погрешности определения  $h_{\text{ск}}$  был предложен двухволновой метод [48].

В настоящее время наиболее широко для измерения геометрических параметров узлов и деталей применяются методы: лазерной дефектоскопии, теневой и триангуляционный [22, 26, 37, 40]. Их совокупность дает возможность определить качество обработки поверхности, ее дефекты, контуры деталей, а также профиль поверхности изделия. Для лазерных дефектоскопов максимально достижимая точность измерений определяется флуктуациями мощности излучения лазера. При использовании теневого метода возникают ограничения, связанные с быстродействием, размерами рабочей зоны и синхронизацией результатов измерений нескольких измерителей. Лазерные триангуляционные измерители развиваются наиболее активно («РИФТЭК» – Беларусь; КТИ НП СО

РАН – Россия; «MTI Instruments Inc.» – США; «MEL» – Германия; «Keyence» – Великобритания), однако их массовое применение ограничено. Причина этого в том, что приборы рассчитаны для работы на поверхностях, имеющих равномерное рассеяние и расположенных ортогонально зондирующему лазерному пучку. Реальная поверхность всегда шероховата, может иметь царапины, ржавчину, следы обработки, отверстия. В результате прибор, рассчитанные на погрешность 10-50 мкм, дает погрешность миллиметры.

В работах Демкина В.Н. исследованы закономерности влияния на точность и стабильность работы активных систем стабилизации мощности газоразрядных лазеров флуктуации поляризационного соотношения. Показано, что флуктуации поляризационного соотношения вызывают значительные изменения коэффициента отражения светоделиителя, что существенно снижает эффективность работы систем стабилизации мощности [73].

Установленный факт влияния флуктуации мощности лазерного излучения на точность измерений в устройствах, использующих теневой лазерные метод с оптической разверткой. Предложен способ компенсации этого влияния, позволяющий при использовании стабильного светоделиителя повысить точность измерения.

Метод определения параметров триангуляционного измерителя и границы его применимости при работе на поверхностях с различной шероховатостью на основе приведенной в работе математической модели [73].

Зависимость изменения тока лазерного диода, обусловленная изменение температуры, влияющая на распределение интенсивности мощности по изображению пятна зондирующего лазерного излучения на многоэлементном фотоприемнике, приводящая к изменению координаты центра тяжести пятна и являющаяся одним из физических ограничений достижения высокой точности измерений триангуляционным методом.

Определено влияние изменений тока лазерного диода на точность измерений триангуляционным методом, связанное с изменением распределения интенсивности плотности мощности в отраженном сигнале.

В работе показано, что основными факторами, ограничивающими точность измерения указанными приборами, являются влияние флуктуации мощности лазерного излучения и времени экспозиции, а также оптические aberrации.

Накао и др. [71] разработали прибор и метод выявления поверхностных дефектов по измерению интенсивности рассеянного дефектом лазерного излучения (рисунок 1.10).

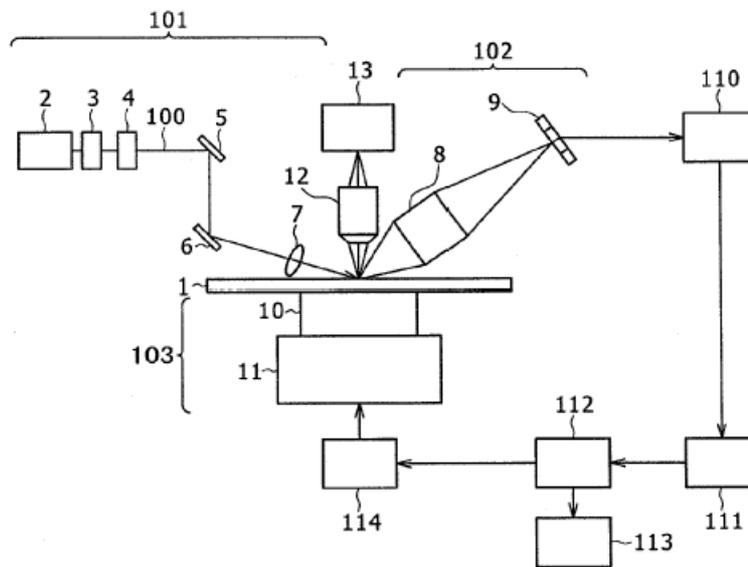


Рисунок 1.10 – Прибор для обнаружения дефектов: 101 – блок излучателя, 102 – оптическая система детектора, 103 – поворотная ступень, 110 – система обратной связи, 111 – система обработки сигнала, 1 – образец, 2 – лазер, 3 – расширитель пучка, 4 – преобразователь распределения мощности в пучке, 5, 6 – зеркала, 7 – линза, 8, 12 – оптические системы формирования изображения, 9 – фотодетектор, 10 – поворотная ступень, 11 – узел перемещения в радиальном направлении, 112 – компьютер, 113 – блок анализа результатов, 114 – контроллер поворотной ступени

Данный метод позволяет проводить корректировку угла установки и позиционирования источника излучения за счет многократных измерений отраженного сигнала с интервалом по времени и усреднения его значения. С целью более достоверного распознавания дефектов проводится измерение

величины отраженного сигнала при различных углах падения излучения. Также проводится оценка пространственного распределения рассеянного дефектом излучения.

Смит, Маллинс и др. [72] разработали прибор и способ для выявления дефектов в крупноразмерных объектах (рисунок 1.11).

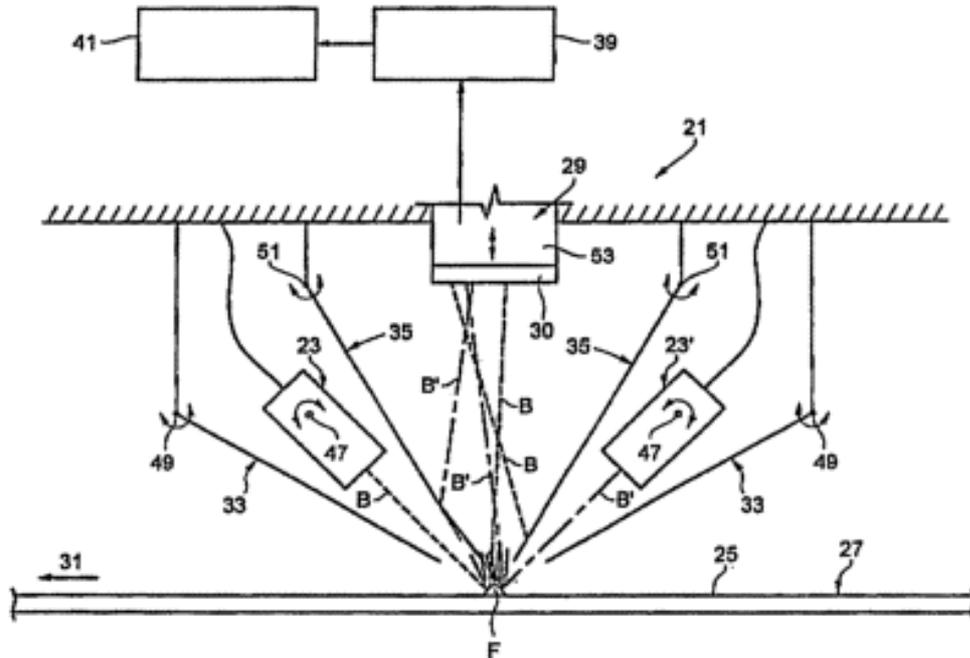


Рисунок 1.11 – Устройство и способ для высокоскоростной дефектоскопии отражающего материала: 23, 23' – источник света, 25 – поверхность материала, 27 – образец, 29 – фотодиод, 30 – объектив, 31 – направление перемещения, 33, 35 – световые заслонки, 37 – зона сканирования, 39 – контроллер, 47 – ось источника, 49, 51 – оси поворота, 53 – телескопический узел, B, B' – отраженный луч света при наличии и отсутствии дефекта

Точность измерений повышается при использовании нескольких источников с разными длинами волн. Регистрируется отклоненное и рассеянное дефектом излучение. Используются регулируемые заслонки для экранирования фонового излучения. Датчик 29 предпочтительно монтируется так, что он находится в пределах в пределах около 0,5-3 мм от материала.

На рисунке 1.12 представлена структурная схема отраженного сигнала, предложенная в работах Шилина А.Н. [4].

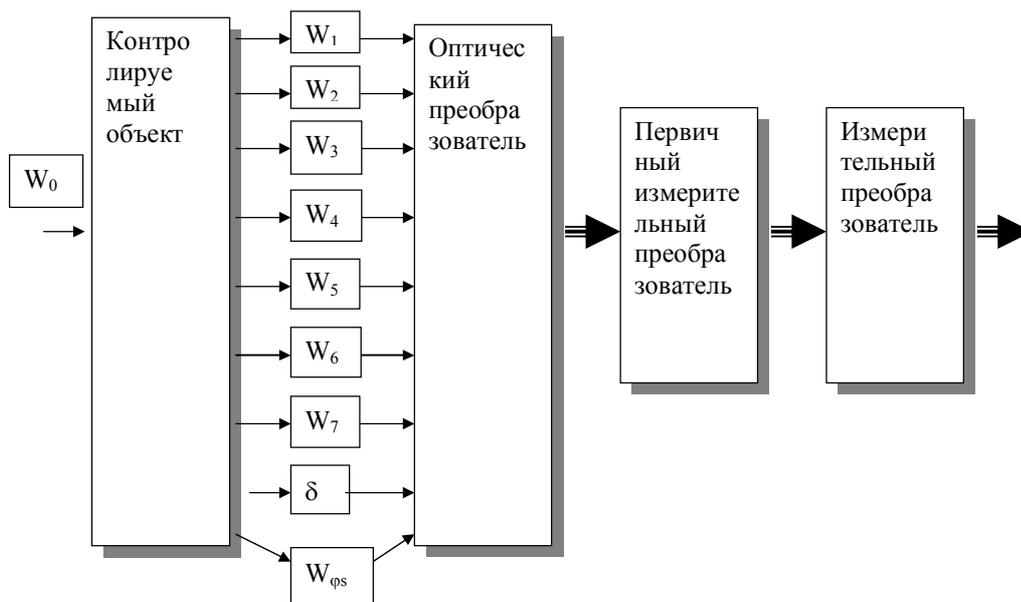


Рисунок 1.12 – Структурная схема определения состояния поверхности:  
 $W_0$  – зондирующий сигнал,  $W_1$  – отраженный сигнал,  $W_2$  – рассеяние вперед и обратное рассеяние,  $W_3$  – пропускаение,  $W_4$  – собственное излучение,  $W_5$  – флуоресценция,  $W_6$  – определение координаты, размера,  $W_7$  – определение поляризационных составляющих,  $\delta$  – определение фазы,  $W_{\text{фс}}$  – интенсивность излучения, рассеянного вне плоскости падения

Таким образом, проведен анализ современного состояния проблемы использования оптических методов оценки качества изделий. Отмечается, что данные оптические методы применяются для решения широкого спектра задач по выявлению внутренних и поверхностных дефектов, для оценки динамических нагрузений, исследования нестационарных распределений температуры. Важным вопросом является выбор пространственно-временных характеристик зондирующих лазерных пучков, энергетического соответствия сигнала геометрическим параметрам поверхностных дефектов, а также разработка методики распознавания различных видов повреждений оптическим сигналом. Отсутствие теоретических основ выбора параметров зондирующего пучка в лазерно-электронных системах ограничивает диагностические возможности и затрудняет дальнейшее их совершенствование. Существующие разработки не позволяют создать высокочувствительное диагностическое оборудование, с

одновременным выявлением нескольких повреждений, а также не приемлемы для контроля высоконагруженных элементов конструкций, выполненных из современных материалов.

### **1.3 Лазерные системы обнаружения и распознавания летательных аппаратов и элементов их конструкций**

В системах дистанционного зондирования поверхности Земли наблюдение ведется при естественных источниках освещения и тепловом излучении объектов или используется вспомогательная лазерная подсветка. Значительное число таких систем базируются на летательных аппаратах – самолетах, вертолетах, космических аппаратах (являются одним из видов систем летательных аппаратов). Отличительной особенностью военных систем обнаружения и распознавания является применений стелс-технологий – поглощающих покрытий, формы объекта, снижающей возможность зарегистрировать сигнал, пониженный уровень ИК-излучения.

Отличительной особенностью военных ЛА является применений стелс-технологий в материалах внешней компоновки – поглощающих покрытий, формы объекта, снижающей возможность зарегистрировать сигнал, пониженный уровень ИК-излучения. В настоящее время в ЛА широко применяются конструкции с неоднородными поверхностями, в том числе композиционными материалами и многокомпонентными покрытиями. Характерные геометрические параметры элементов конструкции ЛА приведены в таблице 1.5. Здесь использованы следующие обозначения:  $A$  – отражательная способность,  $H$  – глубина элемента конструкции,  $B$  – ширина, элемента конструкции,  $L$  – протяженность элемента конструкции.

Построению лазерно-электронных систем дистанционного зондирования посвящены работы Немтинова В.Б., Шилина А.Н., Карасика В.Е., Белова М.Л., Бурого Е.В., Волкова И.К., Шаргородского В.Д., Тарасова В.В., Демкина В.Н.,

Бакута П.А., Зуева В.Е., Лабунца Л.В., Лебедько Е.Г., Матвеева И.Н., Якушенкова Ю.Г., а также зарубежных ученых Р. Шеннон, Н.Р. Batles, С.Л. Bennet, W-M. Boerner, G. Ross, P.T. Chang., I. Kaufman., D.Y. Shyong, An-Shyang Chu, M.A. Butler, E. Schweicher, D. Clement, S. Marni и др. [4, 8, 9, 43, 66, 78-81, 82-87, 88-91].

Таблица 1.5 – Характерные геометрические параметры элементов конструкции ЛА

Обнаружение и распознавание ЛА и элементов их конструкции	Корпус ракеты-носителя	$A=0,2...0,85$ $H=0,1...1$ м $B=0,4...1,5$ $L=0,5...5$ м	Неравномерность температуры по поверхности, шероховатость, рассеивающие частицы 0,2...5 мкм
	Блок спец. аппаратуры	$A=0,35...0,7$ $H=0,1...1$ м $B=0,2...1$ м $L=0,4...1,5$ м	Шероховатость, рассеивающие частицы, кривизна поверхности
	Фрагменты фюзеляжа самолета	$A=0,15...0,8$ $H=0,1...1$ м $B=0,2...2$ м $L=1...15$ м	Неравномерность температуры по поверхности, шероховатость, рассеивающие частицы
	Терморегулирующие батареи	$A=0,87...0,91$ $H=0,1...0,4$ $B=0,1...0,5$ м $L=0,2...2$ м	Рассеивающие частицы 0,2...5 мкм, Неравномерность температуры
	Телескоп	$A=0,92...0,95$ $H=0,1...0,2$ м $B=0,1...0,5$ м $L=0,1...0,5$ м	

Уникальными возможностями вспомогательной лазерного излучения являются перестройка длины волны ( $(0,63 \leq \lambda \leq 10,6) \cdot 10^{-6}$  м), и импульсно-периодического режима (частота следования импульсов  $1 \leq f \leq 300$  с<sup>-1</sup>, скважность импульса ( $1 \leq \Lambda \leq 5$ )).

Последнее позволяет получать эффекты, недостижимые для естественного освещения, открывает дополнительные возможности для обнаружения замаскированных и других объектов (определение вида материалов, температуры, коэффициента отражения внешней поверхности). Увеличение освещенности в

2...5 раз и использование направленного лазерного излучения также являются определяющими факторами для повышения обнаружительной способности лазерных измерительных систем [75-79].

В настоящее время известны стенды для моделирования процессов обнаружения и распознавания объектов и элементов их поверхностей лазерной локацией [78-91].

Анализ этих работ показал, что для увеличения возможности обнаружения и распознавания объектов, необходимо увеличить число рассматриваемых признаков объекта, т.е. увеличит число информационных каналов в системе. Эта цель может быть достигнута различными способами:

1. Наблюдение объекта и определение отражательной способности при различных углах падения излучения, например метод синтезированной апертуры (SAR), т.е. компрессии изображений.

2. Исследование зависимости отражательной способности поверхности от длины волны и сравнение ее с эталонными спектральными зависимостями из имеющегося банка данных.

Альтернативным вариантом формирования заданных спектральных полос наблюдения по сравнению с использованием микропримзм является использование лазерного источника с перестраиваемой длиной волны излучения, что позволяет не только формировать требуемый спектральный диапазон для наблюдения объекта, но заданные условия освещения (угол падения излучения, интенсивность, размеры пятна и др.)

3. Использование импульсного излучения с заданной длительностью импульсов и частотой их следования.

Формирование отраженного сигнала при освещении импульсным излучением носит принципиально другой характер по сравнению с освещением непрерывным излучением. Результирующий отраженный сигнал является интерференционным, т.е. результатом взаимодействия частей импульса,

модулированных при отражении поверхностью объекта. Степень модуляции зависит от структуры, формы элементов поверхности и характеристик исходного излучения – длины волны, длительности и формы импульса. Существенным фактором является соотношение длины когерентности и расстояния от источника излучения до зондируемой поверхности, т.е. степени пространственной когерентности взаимодействующих пучков.

4. Зондирование при различных углах падения также необходимо для идентификации фона и возможности выделения объекта относительно этого фона. Фоновые поверхности чаще всего являются серыми телами, т.е. их отражательная способность зависит от угла падения излучения.

5. Измерение поляризационных характеристик излучения позволяет исследовать зависимость отражательной способности от различных параметров структуры поверхности: состав и размер частиц композиционных материалов, форма и размеры неровностей поверхности, связанные с методом обработки исследуемой поверхности.

В работах Лабунца Л.В, Карасика В.Е., Белова М.Л., Бурого Е. В. (МГТУ им. Баумана) [67-69] рассмотрены системы связи с уголковыми отражателями для систем стыковки ЛА, а также системы обнаружения и распознавания ЛА в полете. В таких измерительных системах диаметр пятна превышает размеры исследуемого объекта, измерения проводятся в дальней зоне. Показано, что основным безразмерным параметром для диффузной составляющей отраженного сигнала является показатель индикатрисы рассеяния. Показаны возможности определения ЭПР в плоскостях тангажа, курса и крена для определения ориентации ЛА и определения характеристик материалов внешней компоновки. Здесь не учитывается влияние параметров зондирующего лазерного излучения на вероятность обнаружения и распознавания объектов. Проведено физическое моделирование процесса обнаружения и рассмотрены требования к фотометрическим моделям.

Разработанная Хмаровым И.М. [91] установка для измерения комплекса отражательных характеристик материалов позволяет определять зависимость отражательной способности от длины волны, шероховатости и температуры (рисунок 1.13). Она содержит мощный лазер в качестве нагревателя образцов материалов и лазерный гониометрический стенд для измерения индикатрис рассеяния образцов материалов в оптическом диапазоне электромагнитных волн,

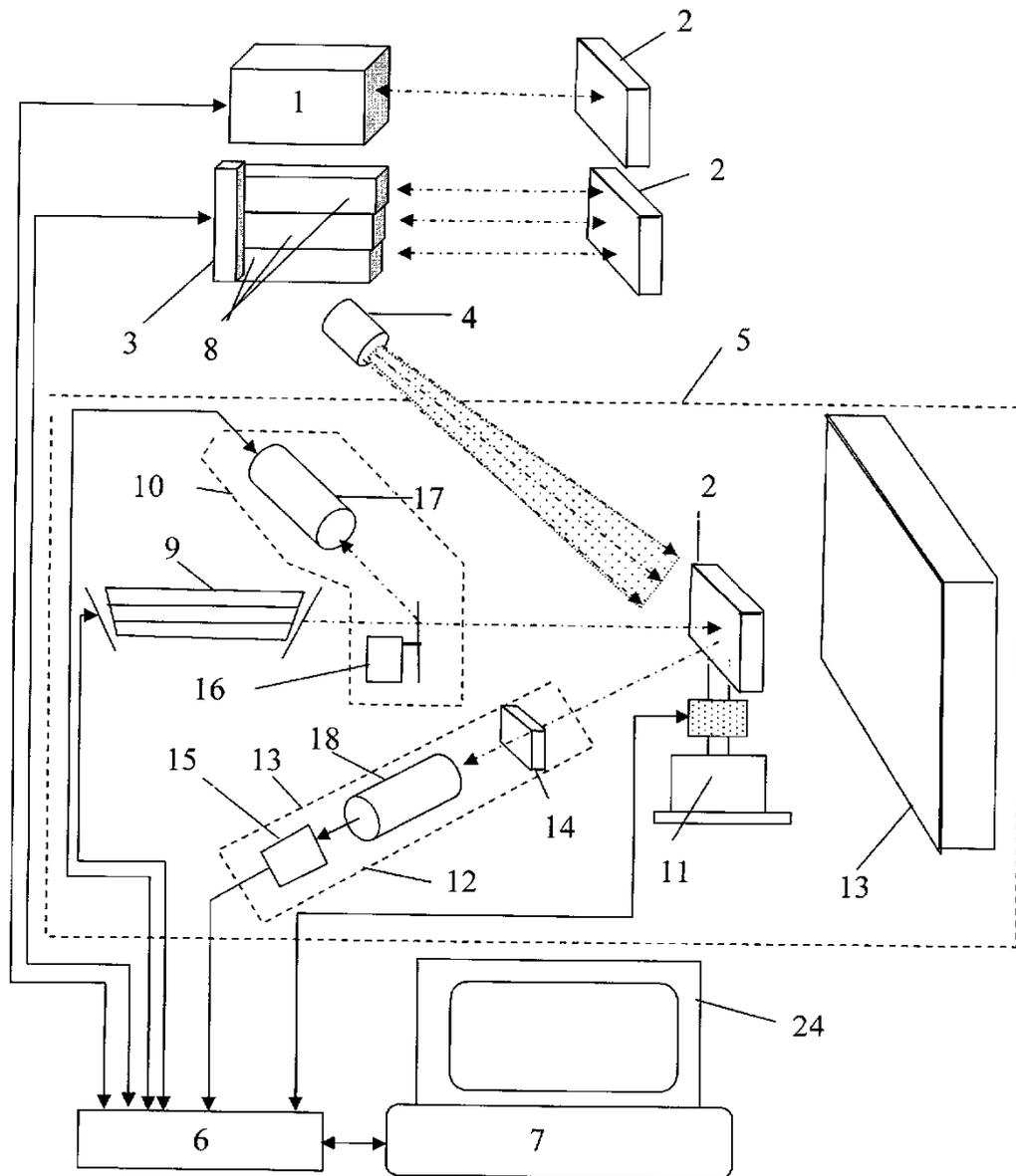


Рисунок 1.13 – Установка для измерения отражательных характеристик материалов: 1 – профилограф, 2 – образец, 3 – спектрофотометр, 4 – нагреватель (мощный лазер), 5 – лазерный гониометрический стенд, 6 – аналогово-цифровой преобразователь, 7 – ЭВМ, 8 – блок-спектрофотометр, 9 – измерительный лазер, 10 – устройство контроля мощности излучения, 11 – механизм крепления образца, 12 – приемник лазерного

излучения, 13 – отражающий экран, 14 – интерференционный фильтр, 15 – селективный усилитель, 16 – электромеханический модулятор, 17 – фотоприемник, 18 – матричный фотоприемник, 24 – монитор с сенсорной панелью управления

соединенные через аналогово-цифровой преобразователь с ЭВМ обработки результатов измерений. Хмаровым И.М. также разработана экспериментальная установка для физического моделирования процессов лазерной локации [91]. Здесь предусмотрено физическое моделирование объектов обнаружения и помех, определение индикатрисы рассеяния, ЭПР объекта с учетом физических явлений при дистанционном зондировании поверхности объекта, оценка статистического распределения амплитуды сигнала, отраженного от диффузно-зеркального объекта и учет эффекта вырождения зеркального компонента в когерентный сигнал с компенсацией активной фоновой засветки. Данный измерительный комплекс позволяет создать базу данных по отражательным характеристикам внешних покрытий объектов, ложных объектов и пространственно-распределенных помех, базу данных по прозрачности и турбулентности атмосферы, базу данных по элементам лазерных локационных систем и параметрам режимов их работы, включая тип модуляции сигналов.

В лазерных системах обнаружения для оценки отражательных свойств в дальней зоне, когда размеры поперечного сечения зондирующего пучка превышают размеры объекта, применяют понятие эффективной площади рассеяния (ЭПР) цели [69, 81-85]. Проведение натурных измерений указанной характеристики заметности для отдельных целей даже при небольшом числе случаев их ориентации относительно направления визирования представляет собой дорогостоящую, а в ряде случаев технически не реализуемую задачу. В последнее время широкое распространение получили взаимно дополняющие друг друга методы физического и математического моделирования отражательных свойств объектов. В цикле работ Непогодина И.А., Родионова И.Д., Сочинского В.П., Тымкула Л.В., Холопова Г.К. и Шубы Ю.А. [81-82] представлены методы, аппаратура и обширные теоретические и экспериментальные результаты

исследований пространственно-временных отражательных характеристик масштабных моделей ряда космических, воздушных и наземных целей в оптической локации. Однако исследование импульсных условий облучения в лабораторных условиях является также технически сложным, так как при интегральном способе измерения требует уменьшения длительности зондирующего импульса порядка 10-20 нс пропорционально масштабу фотометрической модели порядка 1:100. При дифференциальном способе требуется измерение двумерной функции яркости цели и отвечающей ей матрицы временных задержек отраженных импульсов с последующим их пересчетом на компьютере. Указанных недостатков, в значительной степени, лишены расчетные методы.

Геометрическая схема однопозиционной локации корабля SpaceShuttle представлена на рисунке 1.14.

Экспериментальные измерения показали [69], что направленная составляющая индикатрисы формируется в значительной степени за счет отражения излучения случайно ориентированными зеркальными микрогранями шероховатой поверхности покрытия и, т.е. может быть описана моделью Бугера.

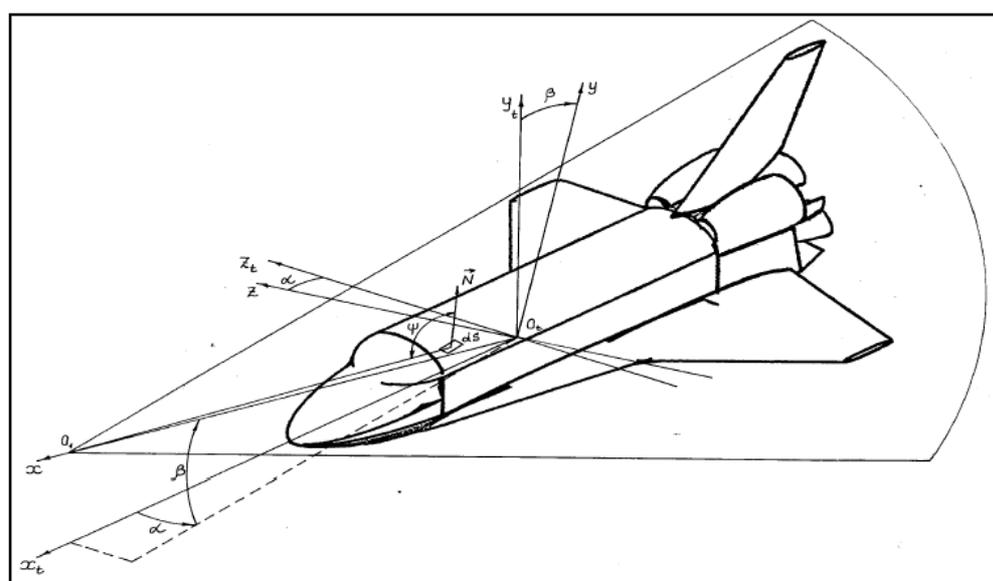


Рисунок 1.14 – Геометрическая схема однопозиционной локации корабля SpaceShuttle

Рассеяние излучения в приповерхностном слое покрытия учитывается добавлением к направленной диффузной составляющей, подчиняющейся закону Ламберта.

Значение ЭПР при стационарном облучении объекта определяется выражением:

$$A(\alpha, \beta) = \tilde{h}(T | \alpha, \beta) = \int_{-R}^R \int_{-R}^R \delta(y, z) \xi_{\lambda}(\psi | y, z) \cos \psi \, dydz, \quad (1.5)$$

т.е. величина, равная площади равномерно, диффузно и без потерь отражающего щита, установленного перпендикулярно падающему потоку и создающего в точке приёма в направлении обратного отражения ту же облучённость приёмника, что и цель. В формуле (1.5)

$$T = T(\alpha, \beta) = 2\{x_{\max}(y, z) - x_{\min}(y, z)\}/c \quad (1.6)$$

– выраженный в единицах времени размер объекта  $c$  фиксированного ракурса.

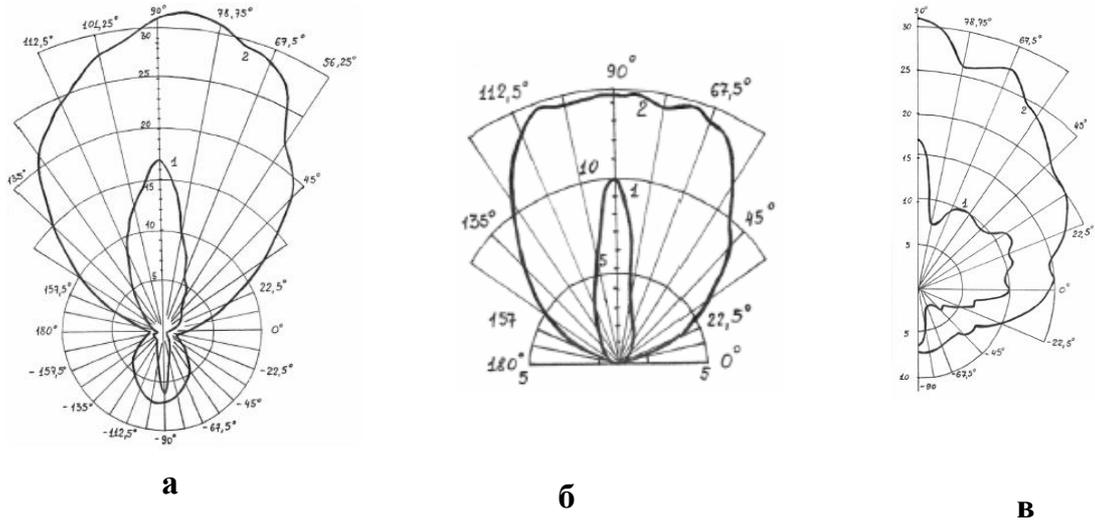
В оптической локации условия дальней зоны выполняются по параметрам шероховатости покрытия цели. Поэтому для физического моделирования процесса обнаружения объектов необходимо соблюдать принцип дифракционного подобия полей, рассеянных объектом и его масштабной моделью. Указанный принцип обуславливает требования, предъявляемые к оптическим характеристикам моделирующей установки и модели цели. Установка должна обеспечивать идентичность углов облучения и приема по сравнению с локатором. Результаты определения ЭПР для диффузных и зеркальных поверхностей приведены на рисунке 1.15.

Требования к оптическим характеристикам модели цели заключаются в достаточно подробном воспроизведении в масштабе копии объекта локации и имитации характеристик рассеяния его покрытия [69].

Известно, что для фотометрических моделей целей, имеющих диффузные и направленно-рассеивающие покрытия, условия дальней зоны состоят в выполнении неравенства  $\psi/\theta_{0,5} \ll 4\pi$ , где  $\psi$  – угол падения излучения на

дифференциально малый участок модели, а  $\theta_{0,5}$  – угловая ширина индикатрисы коэффициента яркости покрытия при отражении назад по половинному уровню.

для диффузного покрытия



для зеркального покрытия

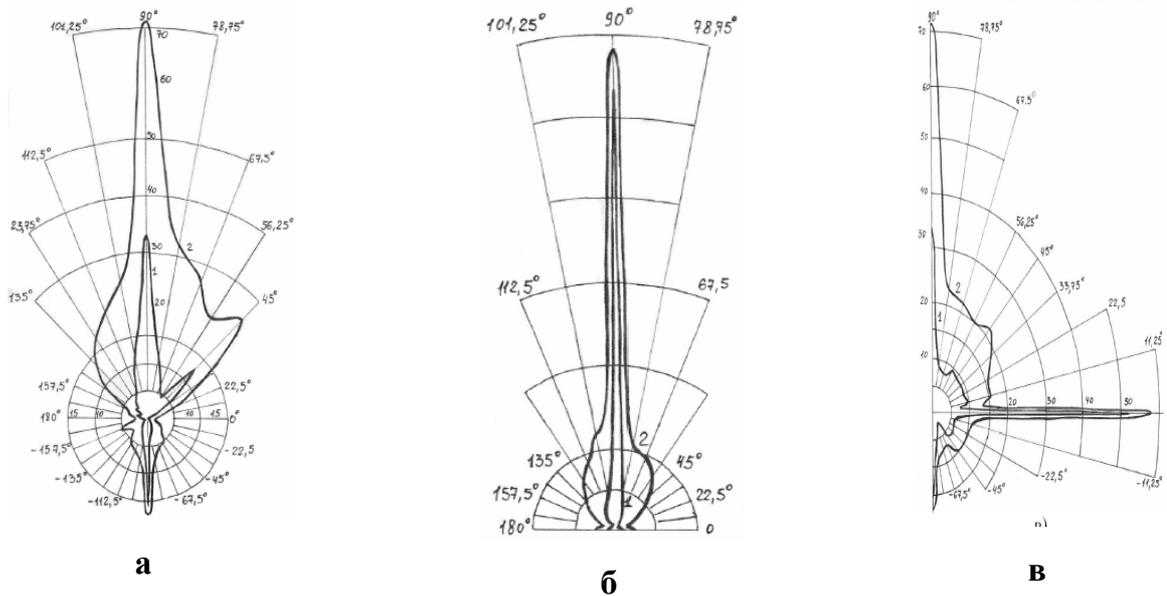


Рисунок 1.15 – ЭПР корабля SpaceShuttle в плоскостях тангажа (а), курса (б) и крена (в)

Оптическая схема сканирующей установки представлена на рисунке 1.16. Луч лазера, пройдя телескопическую насадку 2, служащую для формирования необходимых пространственных характеристик излучения, направляется

зеркалом 3 на плоскопараллельную стеклянную пластину 4. Излучение, прошедшее светоделитель, попадает на фотометрическую модель цели. Часть излучения, рассеянного объектом исследования в направлении "назад", отражается от поверхности светоделителя и попадает на приемный объектив 6, в фокусе которого расположена диафрагма 7.

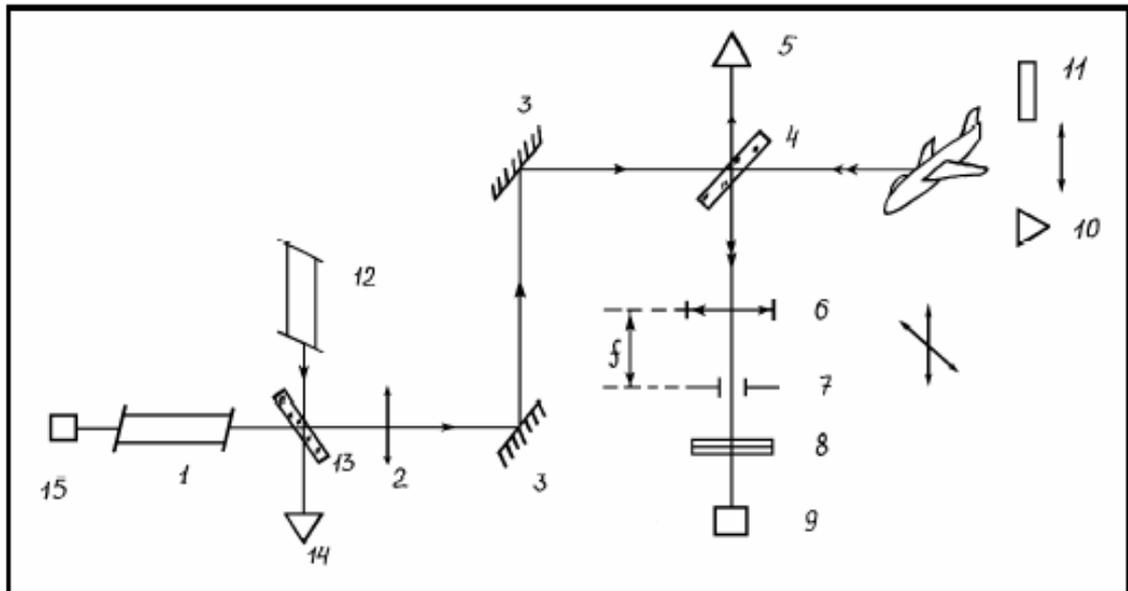


Рисунок 1.16 – Оптическая схема экспериментальной установки

Приемником излучения 9 основного канала служит фотоумножитель, перед которым установлен интерференционный фильтр 8.

Лазер оснащен опорным каналом. Последний обеспечивает возможность текущего контроля нестабильности мощности зондирующего излучения. В состав опорного канала входят фотодиод и усилитель переменного тока.

Для визуализации пучка подсвета использовался лазерный дальномер 12, оптическая ось которого с помощью плоскопараллельной пластины 13 совмещалась с оптической осью основного излучателя. В качестве фотометрической модели цели исследовалась копия аэрокосмического корабля Space Shuttle, выполненная в масштабе 1:100 ( $m=100$ ) [69]. Общий вид модели корабля представлен на рисунке 1.17. Угломерное устройство обеспечивало

возможность поворота модели относительно направления подсвета на углы тангажа, курса и крена. Штатные теплозащитные покрытия (ТЗП) корабля имитировались лакокрасочными покрытиями (ЛКП) с оптическими свойствами на длине волны 1,06 мкм, подобными реальным.

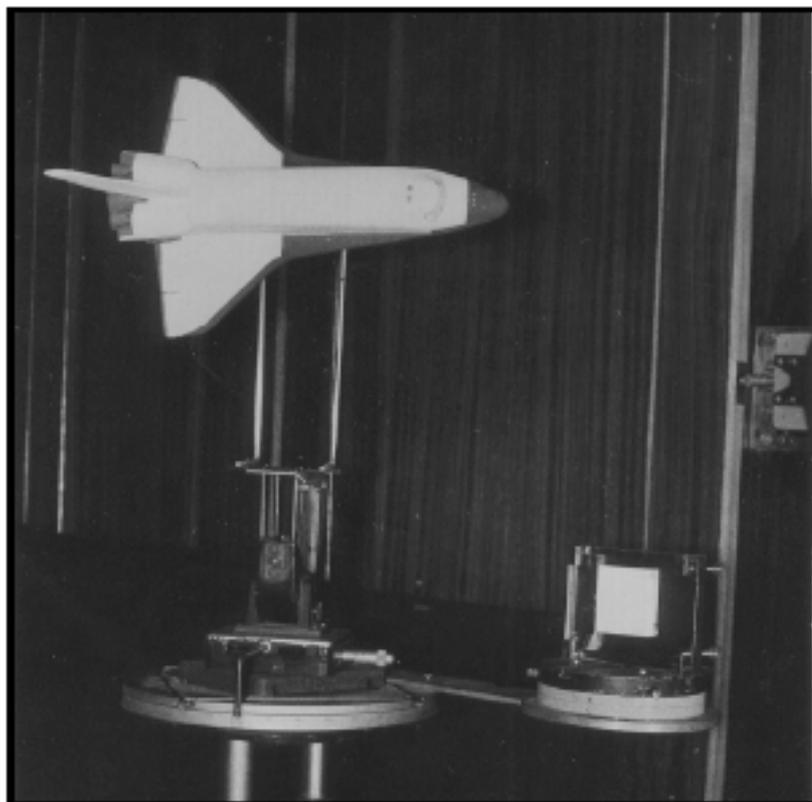


Рисунок 1.17 – Фотометрическая модель корабля SpaceShuttle в масштабе 1:100

Измерения проводились методом сравнения с эталоном, в качестве которого применялось молочное стекло МС-20 с направленно-полусферическим коэффициентом отражения на длине волны 1,06 мкм. Эталон располагался перпендикулярно направлению подсвета.

Выявлено, что основным безразмерным параметром для диффузной составляющей отраженного сигнала является показатель индикатрисы рассеяния. Показаны возможности определения ЭПР в плоскостях тангажа, курса и крена для определения ориентации ЛА и определения характеристик материалов внешней

компоновки. Здесь не учитывается влияние параметров зондирующего лазерного излучения на вероятность обнаружения и распознавания объектов.

Анализ перечисленных работ показал, что для повышения метрологических характеристик систем и вероятности обнаружения и распознавания элементов поверхности требуется прежде всего увеличить соотношение сигнал/шум за счет выбора источников излучения и управления параметрами лазерного излучения.

Не исследовано: влияние вида источника и параметров излучения на вероятность обнаружения и распознавания объектов и элементов их поверхности; возможность оценки отдельно зеркальной и диффузной составляющих для достоверного обнаружения и распознавания, не создана методика выбора параметров систем для обеспечения требуемых метрологических характеристик. Не исследованы возможности применения полупроводниковых лазеров в измерительных системах и пути повышения точности измерений.

#### **1.4 Постановка задач исследования**

В диссертационной работе сформулированы ряд задач исследований, решение которых направлено на достижение цели, а именно: на повышение точности измерений комплекса геометрических и отражательных характеристик поверхностей элементов конструкции летательных аппаратов и двигателей и за счет управления параметрами лазерного излучения.

**Первая задача** связана с анализом характеристик поверхностного слоя элементов конструкций летательных аппаратов и двигателей, с выполнением обзора и критического анализа известных технических решений в рассматриваемой области и определением наиболее перспективных тенденций в развитии и задач измерений при оценке состояния поверхностей с помощью лазерных информационно-измерительных систем.

**Вторая задача** связана с построением обобщенной математической модели, описывающей величину отраженного сигнала в зависимости от параметров

зондирующего лазерного излучения элементов поверхности, и анализ факторов, ограничивающих точность измерений. Данная модель позволяет определить зависимости величины зеркальной и диффузной составляющих отраженного сигнала от параметров измерительной системы и состояния поверхности элементов конструкций.

Необходимо определить основные безразмерные параметры процесса измерения отраженного от поверхности сигнала, которые позволяют установить энергетическое соответствие зондирующего сигнала параметрам состояния поверхностного слоя конструкционных материалов и определить возможность измерения зеркальной и диффузной составляющих.

С использованием математической модели будет исследовано влияние основных параметров лазерного излучения на точность определения основных характеристик материала и геометрии поверхности конструкционных материалов. Для проверки адекватности построенной модели необходимо провести физическое моделирование отражения излучения от элементов поверхности.

**Третья задача** связана с исследованием влияния параметров зондирующего лазерного излучения на вероятность обнаружения и распознавания элементов поверхности элементов конструкций. Эта задача решается путем численного моделирования процессов обнаружения и распознавания с использованием построенной математической модели.

**Четвертая задача** связана с разработкой испытательного оборудования для экспериментальной оценки эффективности лазерных информационно-измерительных систем для оценки состояния поверхностей элементов конструкций и определения оптических характеристик конструкционных материалов. Испытательный стенд физического моделирования необходим для решения следующих задач: проведение анализа уровня освещённости участков элемента конструкции, исследование оптических свойств поверхностей и распределение освещённости в зондирующем пучке освещения, определение

координат энергетического центра освещенности (ЭЦО) изделия при заданном уровне фона, определение вектора перемещения ЭЦО при изменении положения изделия в пространстве. Второй стенд предназначен для определения оптических свойств материалов (коэффициент отражения и индикатриса отражения) при заданных температурах, длинах волн, углах падения излучения и длительностях импульса.

**Пятая задача** связана с теоретическим анализом и экспериментальным исследованием процессов, ограничивающих достижение высокой стабильности параметров лазерного излучения, исследованием их влияния на точность проводимых измерений, а также с экспериментальным исследованием зависимостей отражательных характеристик поверхности конструкционных материалов от материала, вида его обработки, температуры поверхностного слоя с учетом пространственно-временных характеристик зондирующего излучения. Необходимо провести выбор наиболее целесообразных типов излучателей с уровнем нестабильности мощности излучения в пределах 10%.

**Шестая задача** связана с созданием обобщенной методики построения измерительных систем, обеспечивающих требуемую точность измерений параметров элементов поверхностей параметров ЛА и ГТД, и экспериментальная оценка возможностей измерительных систем помощью разработанного испытательного оборудования.

**Седьмая задача** связана с разработкой и внедрением информационно-измерительных систем и методик измерений для проведения дефектоскопии элементов конструкций ЛА и ГТД в производственных условиях и информационно-измерительных систем в составе систем сопровождения и сближения ЛА при использовании лазерного перестраиваемого импульсно-периодического излучения.

В итоге решение всех представленных задач исследований должно быть направлено на достижение сформулированной цели, а получаемые при этом

результаты должны содержать научную новизну и практическую значимость диссертационной работы.

### **Выводы по главе 1**

1. Обзор и критический анализ отечественных и зарубежных работ в области оценки состояния поверхностей элементов конструкций ЛА и ГТД показал, что существующие средства дефектоскопии имеют низкую вероятность обнаружения и распознавания дефектов поверхностного слоя и элементов поверхности (пропуск до 50...60% дефектов, в том числе критических), не имеют возможности определения места расположения и ориентации дефектов. Данные системы предназначены для выявления ограниченного числа 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.

2. Проведенный анализ элементов поверхности ЛА и ГТД показал, что основными причинами дефектов являются: износ элементов конструкции, конструктивные недостатки и производственные дефекты, нарушения правил эксплуатации. До настоящего времени не существует обобщенно классификации дефектов с точки зрения их оптических свойств, позволяющей предсказать поведение величины оптического сигнала при отражении от поверхности.

3. При проведении измерений 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. Для достоверной оценки состояния поверхностей элементов конструкций необходимо измерять

зависимость зеркальной составляющей для оценки геометрии элементов поверхности и диффузную составляющую для оценки состояния поверхности.

4. При оценке характеристик поверхностей ЛА в воздушном и космическом пространстве основным безразмерным параметром для диффузной составляющей отраженного сигнала является показатель индикатрисы рассеяния. В ряде работ обсуждается перспективность применения импульсных лазерных излучателей, 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.

5. Обобщенный 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 Непогодина И.А., 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.

6. Проведенный анализ показал, что погрешность определения геометрических параметров дефектов определяется флуктуациями мощности источника излучения. Отмечается, что погрешность, связанная с нестабильностью оси диаграммы направленности, может достигать 15%. До настоящего времени не выбраны перспективные виды излучателей, имеющие наименьшую чувствительность к колебаниям температуры, и не исследованы методы стабилизации характеристик полупроводниковых лазеров.

7. 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 существует

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.

8. Существующие системы не обеспечивают измерения требуемого комплекса параметров для оценки состояния поверхностей элементов конструкций. До настоящего времени не исследовано влияния 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 измерительных систем зондирования поверхностей конструкционных материалов.

9. Практическая реализация метода оценки состояния поверхностей элементов конструкций ЛА и ГТД требует проведения комплекса теоретических и экспериментальных исследований, включающего построение математической модели для определения зависимости величины сигнала от параметров лазерного излучения, анализ погрешностей, проведения численного моделирования для оценки влияния параметров лазерного излучения на вероятность обнаружения и распознавания элементов поверхности, разработку экспериментального оборудования для исследования оптических характеристик конструкционных материалов и экспериментальной оценки возможностей измерительных систем.

## **2 Математическая модель отражения лазерного излучения от поверхности**

### **2.1 Преобразование сигнала лазерного излучения при отражении от поверхности. Информационные характеристики поверхности**

Реакция поверхности на воздействие составляющих лучистого потока представляет совокупность взаимозависимых элементарных процессов. Их математическое моделирование создает предпосылки для повышения эффективности проявления отклонений геометрических параметров поверхности и своевременного обнаружения реакции отклонения на элементарные составляющие лучистого потока. Каждый элементарный процесс взаимодействия протекает на поверхности независимо, что позволяет провести декомпозицию многоэлементного процесса – разделить его на более простые составляющие, промоделировать их в отдельности, определить влияние каждой составляющей, а затем синтезировать всю совокупность.

Все нюансы этого процесса учитываются при построении математической модели. На этом этапе осуществляется параметрическая идентификация математических моделей. Эти параметры моделей являются своеобразным отражением отклонений геометрических параметров и неоднородностей поверхности. В дальнейшем такая модель может быть использована для прогноза поведения дефектоскопической системы в широком диапазоне параметрических изменений поверхности и определения оптимальной структуры и состава самой системы.

При этом исходят из следующих предположений [9]: элементарные поверхностные процессы происходят на самой поверхности; элементарная поверхность геометрического тела энергетически однородна; отсутствует взаимодействие между элементами конструкции геометрического тела при дефектоскопии; свойства элементарной поверхности не меняются при воздействии излучением.

Формирование информативного излучения при воздействии падающего потока на элемент поверхности определяется не только самим излучением, но и оптическими свойствами материальной поверхности. При этом информативность излучения, отображаемого отдельным участком поверхности, в большей или в меньшей мере связана с отражением, поглощением и рассеянием.

Для оценки информативного излучения контрастной неоднородности используются параметрические соотношения некоторого параметра излучения и параметра фона (шума). Практически более употребляемыми являются отношения: амплитуды к среднему квадратическому значению шума; мощности излучения к мощности шума; пикового значения к среднему квадратическому значению шума; энергии излучения к энергии шума.

Модуляция амплитуды излучения осуществляется по изменению информативной составляющей излучения (отражение, пропускание, рассеяние и т.д.) как реакции объекта на воздействующее излучение, ослабление в среде преобразования и передачи, нарушение полного внутреннего отражения, изменения излучательной способности и т.д.

Интегральной чувствительностью эффективно оценивается амплитуда выходного электрического сигнала приемника излучений. При этом обнаружительная способность  $D$  приемника информативного излучения определяется соотношением:

$$1/2 D = (S_{\text{п}} \Delta f) / \Phi_{\text{пг}}, \quad (2.1)$$

где  $S_{\text{п}}$  – эффективная площадь приемника излучения;  $\Delta f$  – полоса частот пропускания системой;  $\Phi_{\text{пг}}$  – пороговое значение обнаруживаемого потока излучения.

В ориентированном поиске контрастных зон поверхности и соответствующих информативных источников используются различные способы сканирования. Преимущественное применение находит пространственно-временное сканирование наружных и внутренних поверхностей геометрического

тела. При этом осуществляется пространственная визуализация неподвижной поверхности, а за счет механизма продвижения привод сканера «ощупывает» контур поверхности с соответствующими операциями по формированию информационного контраста, спектрально-энергетической адаптации и трансформации изображений. По результатам спектрально-энергетической обработки на выходе выдаются результаты в оптическом или электрическом виде. Выбор этого вида определяется принятыми устройствами отображения, хранения, документирования и т.д.

В некоторых случаях пространственно-временное сканирование обеспечивается при визуализации движущегося геометрического тела относительно приемника. Поиск и выявление первичных источников изменяющихся свойств поверхности ограничиваются чувствительностью сенсоров, для которых их восприимчивость к спектрально-энергетическим изменениям должна превышать энергетический порог собственных потреблений.

Трансформация проявляющихся отклонений геометрических параметров поверхности на первичном уровне связана с переходом от физических величин к их абстрактным сигналам. Носителем первичной информации является информативное излучение, формируемое при спектрально-энергетическом взаимодействии излучения внешнего излучателя с элементом поверхности. Характер такого взаимодействия и пространственного распределения информативного излучения относительно формирующейся неоднородной поверхности зависит от соотношения размеров элементов поверхности и длины волны. Структурная схема сканирования поверхности представлена на рисунке 2.1.

При взаимодействии излучения  $I$  с элементарной поверхностью  $2$  пространственное распределение информативного излучения в большей мере зависит от рассеяния. Если рассеяние отсутствует, то имеет место направленное отражение (зеркальное). Величина результирующего сигнала будет зависеть от

соотношения геометрических параметров объекта контроля и измерительной системы [9]. Как отмечалось ранее, считывающую апертуру следует выбирать такой величины, чтобы разность площадей ее проекции на поверхность объекта контроля и дефекта была минимальной. Только в этом случае при заданном пороге обнаружения вероятность пропуска дефекта будет минимальной.



Рисунок 2.1 – Структурная схема пространственно-временного сканирования поверхностей конструктивных материалов: 1 – прямая связь, 2 – обратная связь, 3 – поверхность геометрического тела с локальными связями

Для определения информационных характеристик измерительной системы при дистанционном зондировании поверхности необходимо определить основные безразмерные критерии подобия процесса преобразования сигнала при отражении от поверхности. Эти критерии определяют возможности измерительной системы при определении зеркальной и диффузной составляющих и выявлении элементов поверхности, ведущих к переотражению и рассеянию излучения.

## 2.2 Структура информационно-измерительной системы

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 2.2).

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 существующих систем созданы блок управления параметрами лазерного излучения – мощностью, углом падения излучения, частотой повторения и скважностью импульсов, длиной волны излучения и блок источников излучения (выделены на рисунке пунктирной линией).

Для эффективного функционирования информационно-измерительной системы немаловажное значение имеют параметры зондирующего пучка, формируемого лазерными излучателями. В частности, ИИС существенно зависят от мощности излучения, диапазона волн, диаметра пучка частоты генерации, скважности импульсов и т.д. [11]. Вместе с тем большинство подобных задач требует наряду с данными параметрами выполнения специфических условий, как перестройки частоты излучения, высокой стабильности энергии импульсов излучения и других. Это накладывает существенные ограничения на выбор типа лазера. Можно сделать вывод, что невозможно создать лазерную систему, учитывающую все требования, основанные на лазере одного типа. Вместе с тем можно проанализировать возможность создания системы, которая будет

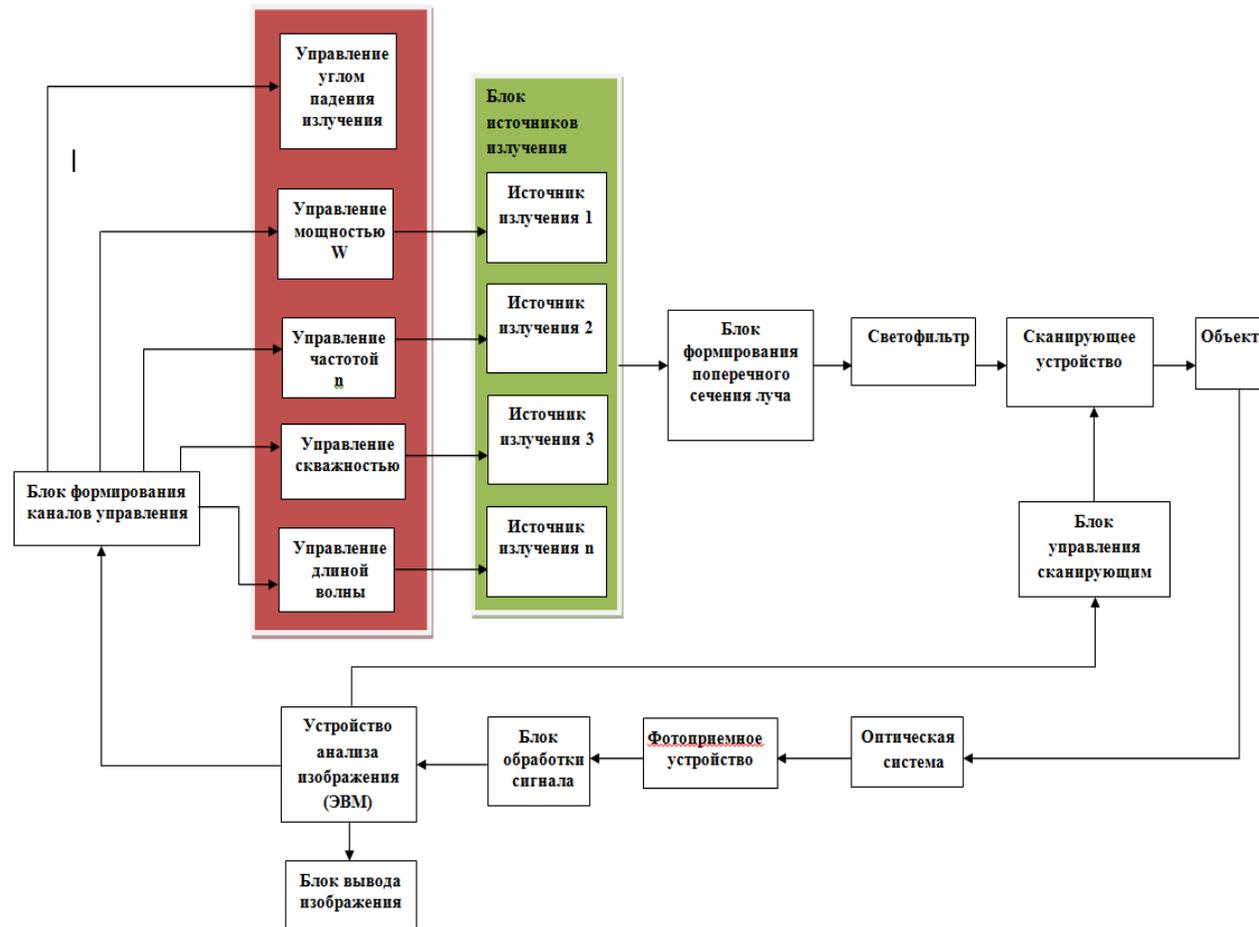


Рисунок 2.2 – Структурная схема информационно-измерительной системы для оценки состояния поверхности

покрывать широкий диапазон спектра излучения при сохранении технических требований. Следует отметить, что по типу применения лазерные системы требуют не только обеспечения работы в различных областях спектра, но и обеспечения различных режимов работы, среди которых можно выделить: режим малой частоты повторения (1-50 Гц), режим высокой частоты повторения (1000-3000 Гц) и непрерывный режим излучения.

### **2.3 Основные критерии подобия процесса отражения излучения от поверхности**

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 [143-145, 153, 157-159]. Зондирующая система описывается следующими параметрами: мощность лазерного излучения, длина волны, степень пространственной когерентности источника излучения, возможность модуляции длины волны и мощности излучения для исследования отражательных характеристик в заданном диапазоне длин волн, длительность импульса и возможность ее модуляции, угол падения излучения источника [74, 137, 139, 140, 149, 181].

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 [149, 180].

Структура детерминированной составляющей отраженного от поверхности оптического сигнала представлена на рисунке 2.3.

Основными критериями подобия при рассмотрении процесса отражения излучения от поверхности и оценке величины отраженного сигнала являются [143–145, 153, 165, 170, 171, 194]:

$K_1 = B_1 / \lambda$  – параметр оптической системы, при  $B_1/\lambda > 1$  измеряется интенсивность переотраженного излучения на всех элементах поверхности с характерным размером  $S/B_1 > 1$  и рассеяние на элементах микротопологии поверхности. При  $B_1/\lambda \sim 1$  измеряется интенсивность переотраженного излучения на микро- и макроэлементах топологии поверхности;

$K_2 = B_1 / S$  – характеризует соотношение диаметра пятна излучения на поверхности и размеров дефектов (элементов поверхности). Этот параметр определяет разрешающую способность оптической системы при выявлении элементов поверхности, ведущих к переотражению излучения;

$K_3 = \frac{K_1}{K_2} = \frac{S}{\lambda}$  – является характеристикой дефекта (элемента поверхности), независимой от параметров оптической системы. Параметр  $K_3$  определяет отношение зеркальной и диффузной составляющих отраженного излучения;

$n$  – 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 [153].

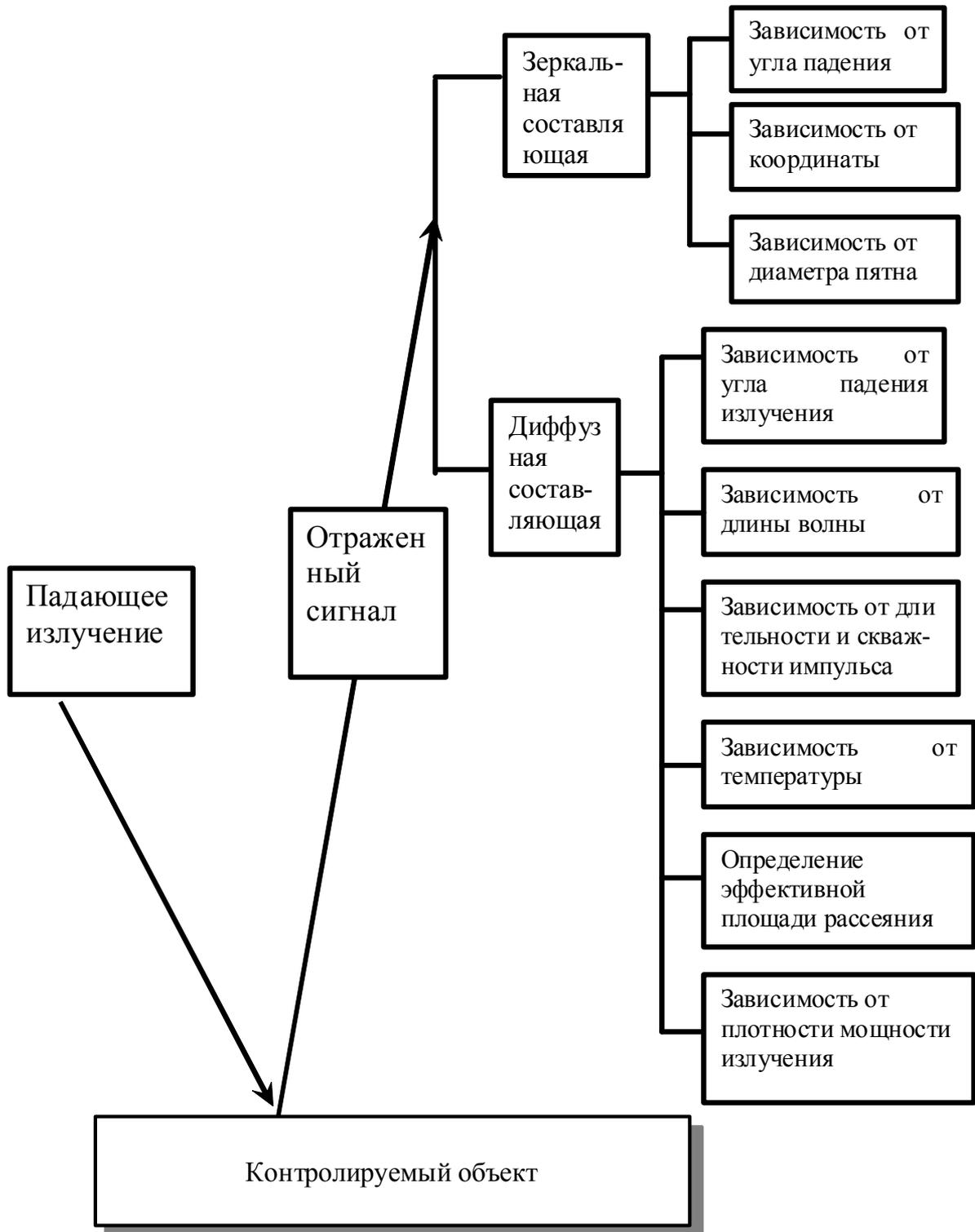


Рисунок 2.3 – Структурная схема определения состояния поверхности

Параметр  $n$  численно равен отношению длины кривой, образованной пересечением плоскости падения излучения с поверхностью трещины к проекции ширины трещины под углом падения излучения на эту кривую. В общем случае для трещины, форма которой описывается аналитической зависимостью  $f(x,y)$  параметр  $n$  определяется соотношениями:

$$\int_L f(x, y)dl = \sum_{i=1}^n l_i, \quad (2.2)$$

$$\int_{l_i} f(x, y)dy = Sctg\alpha_i. \quad (2.3)$$

Как видно из полученных зависимостей,  $n$  определяет не только среднее число переотражений излучения в трещине, но и ширину, и направление распространения выходящих из трещины пучков.

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 Бесселеву источнику излучения [68, 74, 160].

Соотношение высоты наблюдения и длины когерентности источника наблюдения. Данный параметр определяет границы применимости метода определения параметров поверхностного слоя по коэффициенту отражения импульсного излучения.

Для случая выявления повреждений на шероховатой поверхности при измерения интенсивности отраженного излучения параметр оптической системы  $K_1 > 1$ , возможно обнаружение всех элементов поверхности (дефектов), удовлетворяющих условию  $K_2 = B/S \leq 1$ , параметр  $K_3 > 1$  для повреждений и  $K_3 \approx 1$  для микронеровностей поверхности.

Использование пространственного фильтра, формирующего пятно на поверхности, удовлетворяющее условию  $K_1 \approx 1$  позволяет осуществлять переотражение излучения на элементах поверхности при  $K_3 \approx 1$  (т.е. на элементах

шероховатости поверхности). При этом  $K_2=B/S \leq 1$  так же, как и при выявлении поверхностных трещин [149].

Таким образом, отраженный сигнал состоит из двух составляющих: зеркальной составляющей и диффузной составляющей, соотношение которых определяется величиной параметра  $K_3$ . Величина зеркальной составляющей зависит от соотношения углов падения излучения и геометрии элемента поверхности, соотношения диаметра пятна излучения на поверхности и ширины элемента поверхности. Она определяет основную величину отраженного сигнала (30...85%) в зависимости от параметра  $K_3$  и направление распространения отраженного излучения. Величина диффузной составляющей зависит от микрогеометрии поверхности (шероховатость, рассеивающие частицы на поверхности и т.п.) и составляет 5...30% от зеркальной составляющей в зависимости от параметра  $K_3$ .

Для обеспечения возможности измерения требуемого комплекса параметров поверхности элементов конструкций необходимо определить условия измерения зеркальной и диффузной составляющих в зависимости от безразмерных параметров процесса отражения

В случае выявления повреждений на шероховатой поверхности при измерения интенсивности отраженного излучения параметр оптической системы  $K_1 > 1$ , возможно обнаружение всех элементов поверхности (дефектов), удовлетворяющих условию  $K_2=B/S \leq 1$ , параметр  $K_3 > 1$  для повреждений и  $K_3$ , стремящемся к 1 для микронеровностей поверхности (рисунок 2.4) (указанные значения параметра  $K_3$  справедливы для всех измерительных систем и являются собственными свойствами элементов поверхности) [155].

Соотношение зеркальной и диффузно отраженной составляющих определяется соотношением длины волны излучения и характерным размером элемента поверхности.

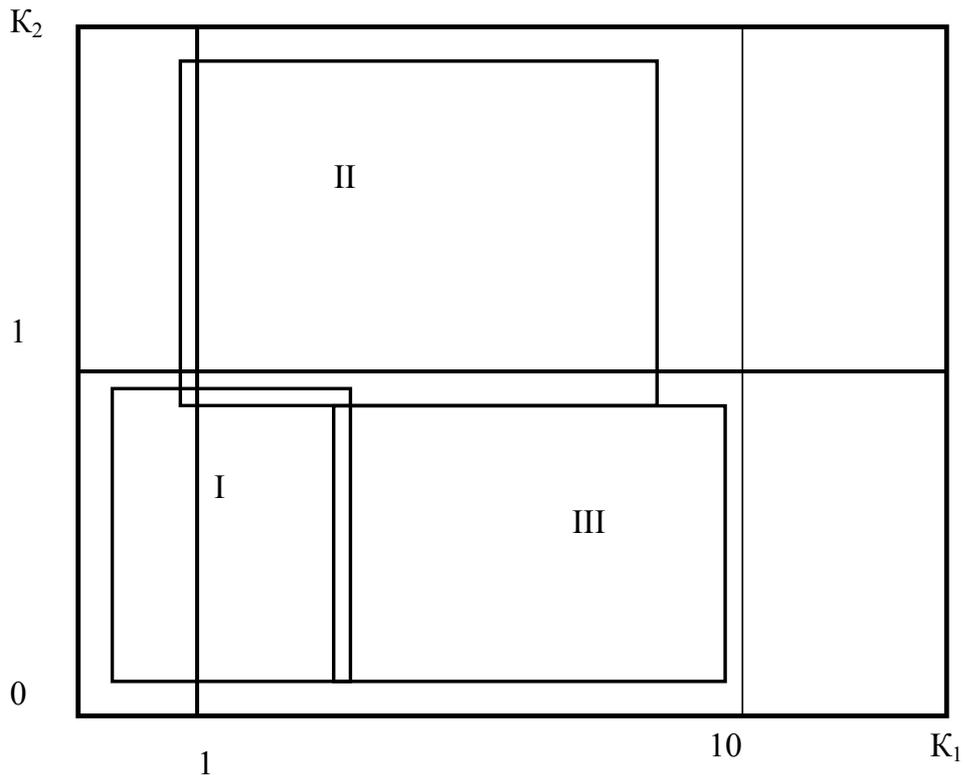


Рисунок 2.4 – Возможности системы наблюдения в зависимости от значения параметров  $K_1$  и  $K_2$ : I – выявление элементов шероховатости и неровностей поверхности по измерению интенсивности отраженного излучения; II – определение характеристик элементов поверхности по измерению параметров рассеяния непрерывного и импульсно-периодического излучения; III – измерение интенсивности зеркально отраженного излучения для макроэлементов поверхности ( $S/\lambda > 1$ ) и рассеяние на микроэлементах топологии поверхности)

Структура отраженного сигнала и величина отдельных его составляющих зависит от соотношения характеристик зондирующего пучка и исследуемого поверхностного слоя. При этом каждая измеряемая величина соответствует отдельному информационному каналу.

Соотношение зеркальной и диффузно отраженной составляющих определяется соотношением длины волны излучения и характерным размером элемента поверхности.

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 [33]

$$\Psi_{кр} = \arccos \lambda / 3 Rz . \quad (2.4)$$

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  $\Psi < \Psi_{кр}$ .

#### **2.4 Зависимость зеркальной составляющей отраженного излучения от параметров зондирующего излучения и характеристик поверхностного слоя**

В данном разделе будет описана зависимость величины зеркальной составляющей отраженного от поверхности излучения от параметров геометрии поверхностного слоя и параметров зондирующего лазерного луча. Используемые другими авторами оптические системы для дефектоскопии поверхностного слоя изделий предназначены, в основном, для выявления трещин [11-13, 14, 15, 19, 20, 53-55]. Наличие повреждений такого рода определяется по изменению интенсивности зеркально отраженного света или диффузно рассеянного трещиной. Возможно одновременное измерение этих двух составляющих. При измерении зеркальной составляющей наличие трещин, царапин и неровностей поверхности определяется по резкому снижению интенсивности отраженного излучения. Размеры дефекта определяются по временному интервалу, соответствующему изменению сигнала фотоприемника [11-13]. Для повышения точности измерений между источником излучения и контролируемой поверхностью, а также в ходе лучей зеркально отраженного поверхностью

излучения располагают собирающие линзы. Для исключения влияния флуктуаций интенсивности источника излучения используется опорный сигнал, формируемый с помощью устройства расщепления зондирующего луча на две составляющих и дополнительного фотоприемника.

Оптимальным вариантом является оптическая дефектоскопическая система, в которой наличие повреждений определяется по изменению интенсивности зеркально отраженного излучения, размеры дефекта определяются разницей координат, соответствующих изменению величины сигнала (рисунок 2.5). Использование дополнительного фотоприемника для формирования опорного сигнала позволяет учитывать флуктуации

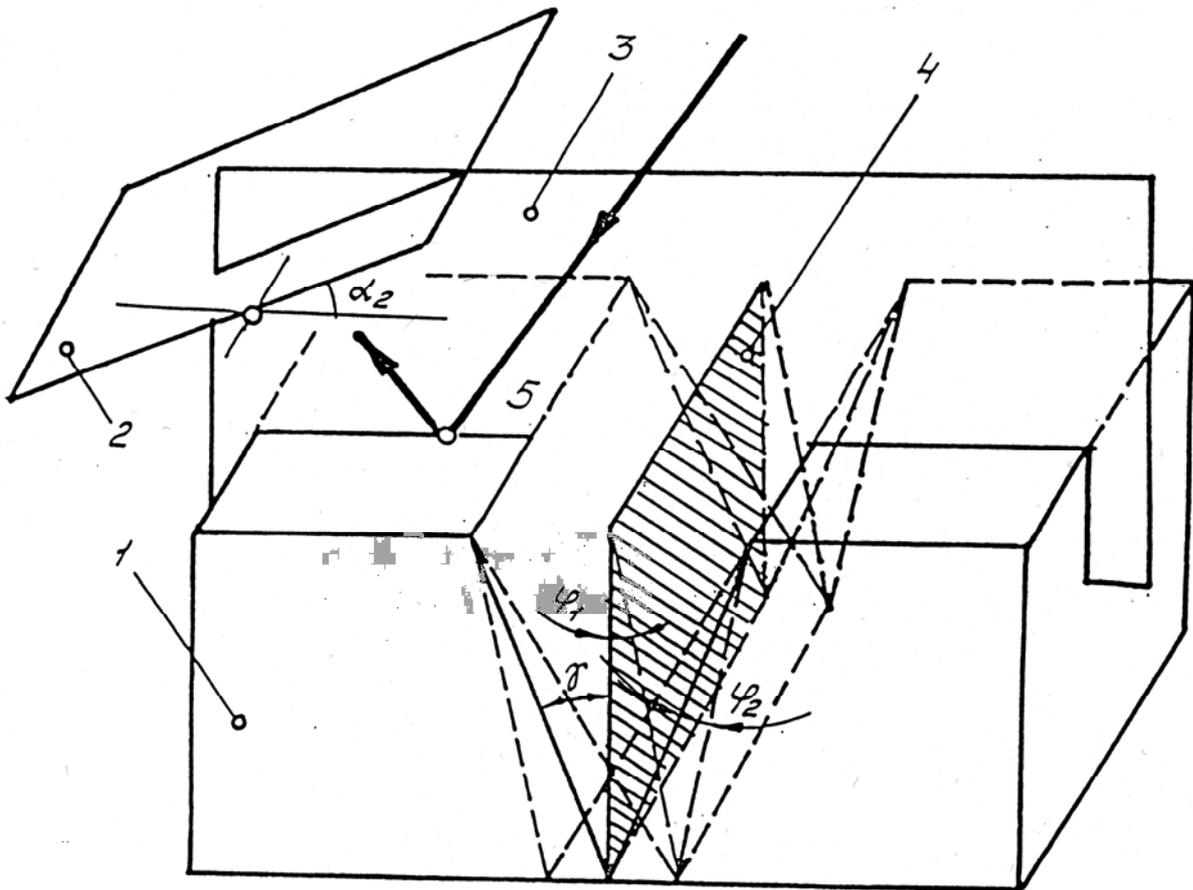


Рисунок 2.5 – Схема определения интенсивности излучения в отраженном сигнале при наличии поверхностного дефекта: 1 – деталь, 2 – плоскость наблюдения, 3 – плоскость измерения интенсивности излучения в отраженном потоке, 4 – плоскость симметрии трещины, 5 – излучение, отраженное от поверхности

интенсивности источника излучения. Определение повреждений целесообразно проводить по изменению относительной величины сигнала  $W/W_0$ , где  $W_0$  – среднее значение сигнала для поверхности исследуемого изделия.

В этом случае нет необходимости регулировать в зависимости от материала детали величину светового потока, и падающего на исследуемую поверхность. Введение безразмерных параметров, определяемых по зависимости изменения относительной величины сигнала  $W/W_0$  от безразмерной координаты  $x/x_0$  ( $x_0$  – шаг сканирования по поверхности) позволяет определить наличие повреждений и их характер (царапина, трещина, увеличение шероховатости поверхности в результате абразивного износа, наличие окисленного слоя или одновременное наличие двух видов повреждений) [141, 142, 149, 180, 191].

Рассмотрим изменение интенсивности зеркально отраженного излучения при сканировании по поверхности с наличием трещины. Для этого сначала определим направление распространения излучения точечного источника после переотражения в трещине с произвольной величиной угла раскрытия трещины  $2\gamma$  (рисунок 2.6). При построении математической модели коэффициент отражения принят постоянным по поверхности и независимым от температуры.

Пусть  $\alpha$  – угол падения излучения на исходную поверхность,  $\varphi_1$  – угол падения излучения на поверхность трещины,  $\beta_1$  – угол между отраженным поверхностью трещины излучением и вертикалью при первом отражении,  $\varphi_2, \beta_2$  – угол падения излучения и угол между отраженным лучом и вертикалью при втором отражении от поверхности трещины,  $\varphi_n, \beta_n$  – угол падения излучения и угол между отраженным лучом и вертикалью при выходе из трещины,  $\gamma$  – половина угла раскрытия трещины.

Тогда можно записать:

$$\varphi_1 = \pi/2 - \alpha - \gamma, \quad (2.5)$$

$$\beta_1 = 2\varphi_1 + \alpha = \pi - \alpha - 2\gamma. \quad (2.6)$$

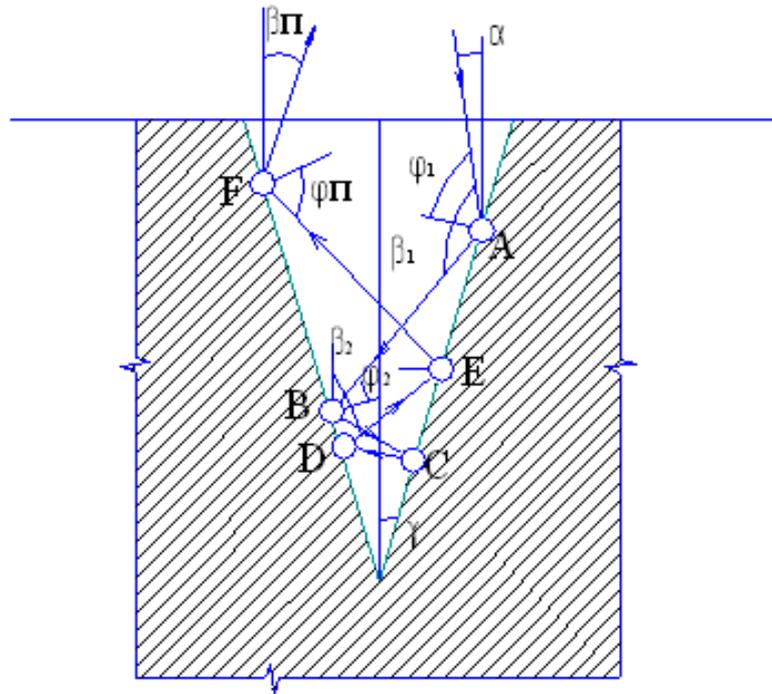


Рисунок 2.6 – Распространение излучения точечного источника в трещине

Из треугольника АВО (рисунка 2.6):

$$\pi/2 - \varphi_1 + \pi/2 + \varphi_2 + 2\gamma = \pi,$$

$$\varphi_2 = -2\gamma + \varphi_1 = -\alpha - 3\gamma + \pi/2, \quad (2.7)$$

$$\beta_2 = \pi/2 - \gamma + \varphi_2 = \pi - \alpha - 4\gamma. \quad (2.8)$$

Для произвольного значения  $n$ :

$$\beta_n = \pi - \alpha - 2n\gamma,$$

$$\varphi_n = \pi/2 - \alpha - (2n-1)\gamma. \quad (2.9)$$

После отражения от поверхности трещины излучение идет вниз, если  $\varphi_n > 0$ , вверх, если  $\varphi_n < 0$ .

Определим соотношение углов  $\alpha$  и  $\gamma$ , для которых направление распространения излучения на выходе из трещины соответствует  $\beta_n = \pi - \alpha - 2n\gamma$ ,

направлению зеркально отраженного от исходной поверхности излучения, т.е.  $\beta_n = \alpha$ .

$$\begin{aligned}\beta_n &= \alpha, \\ \alpha &= \pi - \alpha - 2n\gamma, \\ \gamma &= (\pi/2 - \alpha)/n.\end{aligned}\quad (2.10)$$

Рассмотрим случай падения излучения источника с равномерным распределением интенсивности излучения на поверхность с наличием трещины. Источник имеет квадратное сечение со стороной  $B_1$ , приемный объектив также имеет квадратное сечение со стороной  $B_2$  и расположен под углом  $\beta$  (рисунок 2.7).

Пусть  $\alpha = \beta$ ,  $B_1 = B_2$ . Для трещин, у которых число переотражений  $n=2$ ,  $\beta_2 = \alpha$ , глубина трещины  $H_2 = B_1$  в соответствии с (2.6)

$$\gamma = (\pi/2 - \alpha)/2. \quad (2.11)$$

Для  $\alpha = \pi/6$ :

$$\begin{aligned}\beta_1 &= \pi/2, \quad \varphi_1 = \varphi_2 = \pi/6, \\ \gamma &= \pi/6.\end{aligned}$$

Ширина трещины  $S = 2H_2 \operatorname{tg}\gamma$ ,  $S/B_1 = 2\operatorname{tg}\gamma = 1,155$ .

Пусть  $x$  – смещение пятна относительно края трещины (рисунок 2.7). Тогда смещение правого края пятна на выходе из трещины

$$x_1 = 2H_2 \operatorname{tg}\gamma - x. \quad (2.12)$$

Координата второй границы пучка, выходящего из трещины –  $x_2$  (рисунок 2.8) зависит от координаты  $x$ .

Для всех  $x \leq B_1/2\cos\alpha$ , при  $H_2 = B_1$  для  $x \leq 2H_2\operatorname{tg}\gamma$

$$x_2 = 2H_2\operatorname{tg}\gamma \quad (\text{рисунок 2.8, а}).$$

При  $x > B_1/2\cos\alpha$ ,  $H_2 = B_1$  для  $x > 2H_2\operatorname{tg}\gamma$

$$x_2 = 2H_2\operatorname{tg}\gamma - (x - B_1/\cos\alpha). \quad (2.13)$$

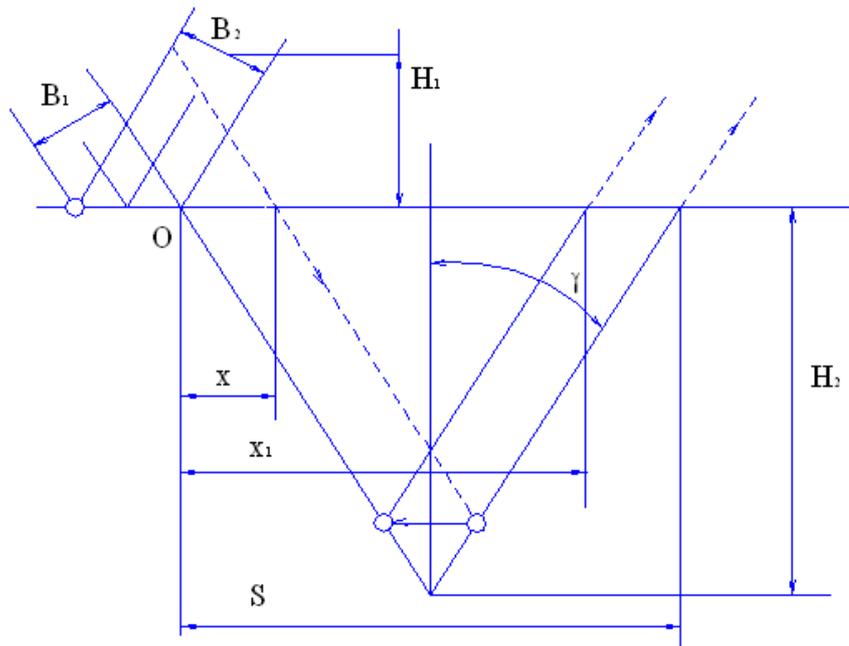


Рисунок 2.7 – Распространение излучения источника с равномерным распределением интенсивности при  $\alpha = \gamma$

Излучение, выходящее из трещины, попадает на приемный объектив при значениях  $x$ , удовлетворяющих неравенству (рисунок 2.8,б):

$$H_2 \operatorname{tg} \gamma < x < H_2 \operatorname{tg} \gamma + B_1 / \cos \alpha, \quad (2.14)$$

т.е. отраженное трещиной излучение начинает попадать на объектив при  $x_1 = x$ , максимальное значение отраженного трещиной излучения попадает на приемный объектив при  $x_2 = 2H_2 \operatorname{tg} \gamma$ , затем значение этой величины снижается и становится равным нулю при

$$\begin{aligned} x_2 &= x - B_1 / \cos \alpha = H_2 \operatorname{tg} \gamma, \\ x &= H_2 \operatorname{tg} \gamma + B_1 / \cos \alpha. \end{aligned} \quad (2.15)$$

При отсутствии трещин на поверхности величина сигнала равна  $W_0$  и представляет собой произведение мощности источника излучения на коэффициент отображения поверхности. Относительная величина сигнала

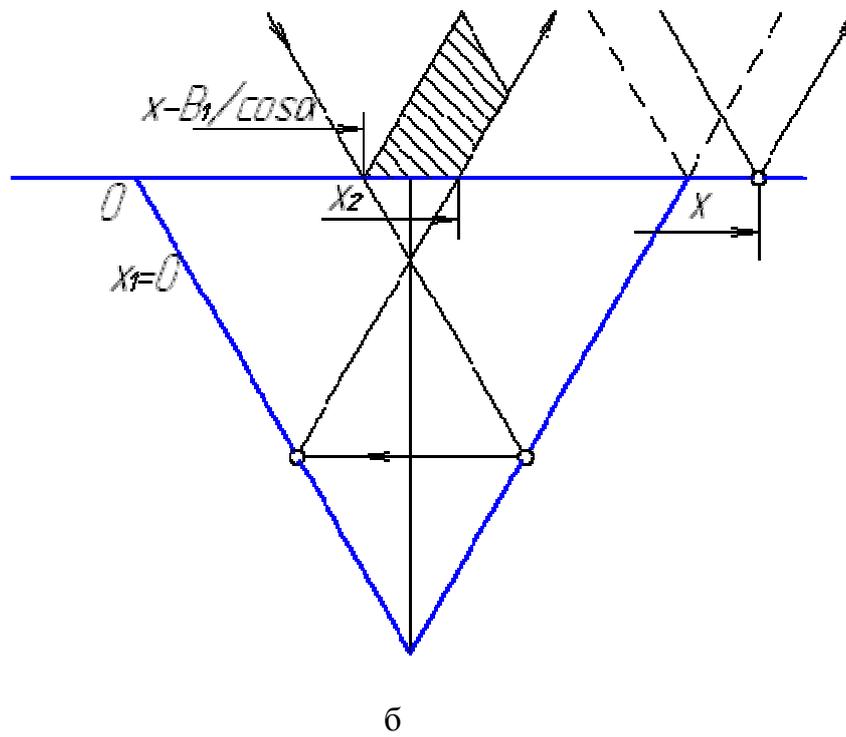
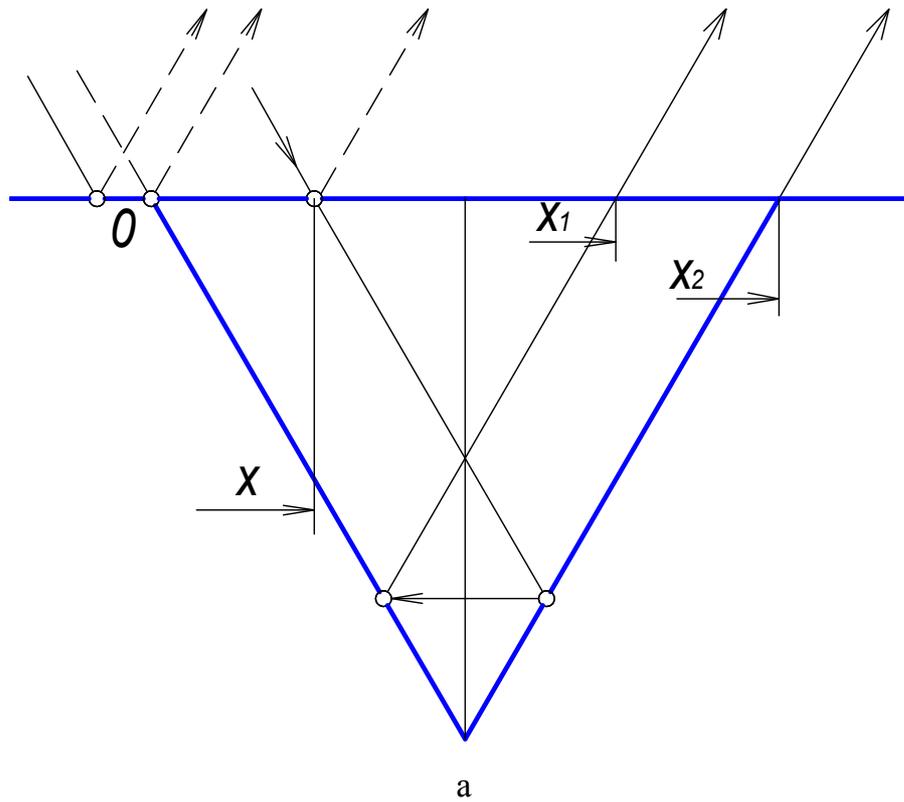


Рисунок 2.8 – Распространение излучения с равномерным распределением интенсивности в трещине при различных значениях координаты  $x$ : а –  $x < H_2 \operatorname{tg} \gamma$ , б –  $x > 2H_2 \operatorname{tg} \gamma$

(отношение величины сигнала  $W$  при наличии трещины к величине сигнала на бездефектной поверхности  $W_0$ ) определяется выражением (для  $n = 2$ ) [143-145]:

для  $H_2 \operatorname{tg} \gamma < x < 2H_2 \operatorname{tg} \gamma$

$$\frac{W}{W_0} = \frac{B_1 / \cos \alpha - x}{B_1 / \cos \alpha} + \frac{A_2^2}{A_1} \frac{(x - x_1)}{B_1 / \cos \alpha}. \quad (2.16)$$

Для  $2H_2 \operatorname{tg} \gamma < x < H_2 \operatorname{tg} \gamma + B_1 / \cos \alpha$

$$\frac{W}{W_0} = \frac{x - 2H_2 \operatorname{tg} \gamma}{B_1 / \cos \alpha} + \frac{A_2^2}{A_1} \frac{(x_2 - (x - B_1 / \cos \alpha))}{B_1 / \cos \alpha}. \quad (2.17)$$

где  $A_2$  – коэффициент отражения поверхности трещины,  $A_1$  – коэффициент отражения бездефектной поверхности.

Доля излучения, попавшего на объектив после переотражения в трещине для углов  $\alpha$  и  $\gamma$ , удовлетворяющих условию (2.10), определяется координатой пятна  $x$  при сканировании и не зависит от высоты расположения объектива над поверхностью  $H_1$ .

Аналогичная картина распространения излучения в трещине наблюдается при всех четных значениях  $n$  и неизменном значении ширины трещины. С ростом значений  $n$  величина угла раскрытия трещины уменьшается согласно выражению (2.6). В этом случае  $x_1$  и  $x_2$  имеют те же значения, что и для  $n = 2$ , угол выхода излучения из трещины  $\beta_n$  соответствует углу  $\beta_2$  при  $n = 2$  (рисунок 2.9,а). Значения  $W/W_0$  определяются в соответствии с выражениями (2.16) и (2.17), во второе слагаемое вместо  $A_2$  входит  $A_n$ .

Для нечетных значений  $n$  излучение выходит из трещины в направлении источника (рисунок 2.9,б).

На рисунке 2.10 показаны зависимости измерения относительной величины сигнала  $W/W_0$  от безразмерной координаты  $x/B_1$  при  $\alpha = 30^\circ$  для тех случаев:

1 –  $n = 2$ ,  $H_2/B_1 = 1$ ,  $\gamma = 30^\circ$ , 2 –  $n = 10$ ,  $H_2/B_1 = 5.5$ ,  $\gamma = 6^\circ$ , 3 –  $n \rightarrow \infty$ ,  $\gamma \rightarrow 0$  ( $n$  – четное). При расчетах принято  $A_1 = A_2 = 0,85$  (полированная алюминиевая поверхность).

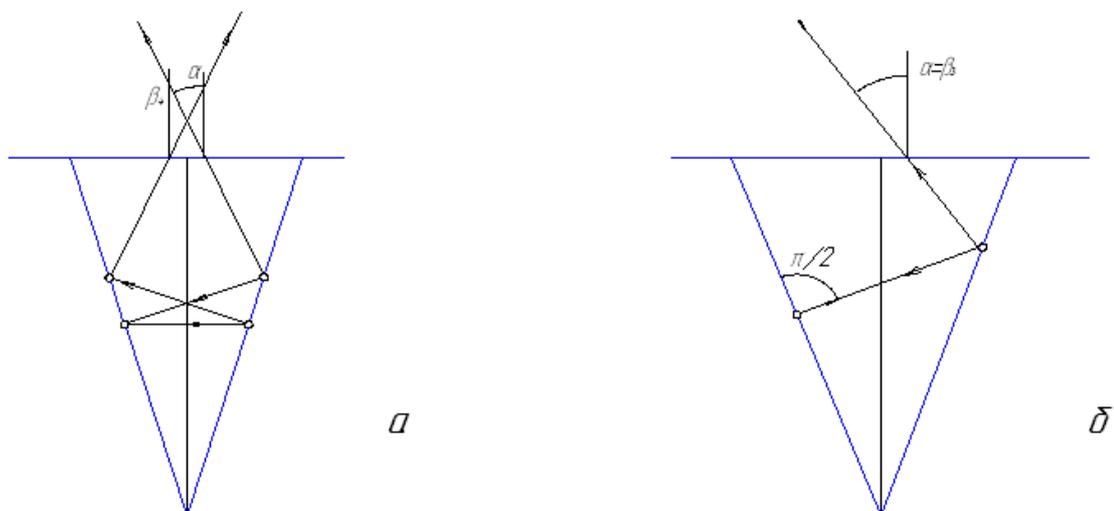


Рисунок 2.9 – Распространение излучения источника с равномерным распределением интенсивности в трещине при различных значениях числа переотражений в трещине:  
 а –  $n = 4$ ,  $\gamma = 15^\circ$ ,  $\alpha = 30^\circ$ , б –  $n = 3$ ,  $\gamma = 20^\circ$ ,  $\alpha = 30^\circ$

Пусть половина угла раскрытия трещины увеличивается на  $\Delta\gamma$  (рисунок 2.11,а). Определим для этого случая характеристики пучка, выходящего после переотражения из трещины при прежнем значении угла падения излучения  $n = 30^\circ$  и глубины трещины ( $H_2 = B_1$ ).

В соответствии с (2.5), излучение выходит из трещины под углом

$$\beta_2' = \pi - \alpha - 4(\gamma + \Delta\gamma) = \pi - \alpha - 4\gamma - 4\Delta\gamma = \beta_2 - 4\Delta\gamma, \quad (2.18)$$

$$\beta_1' = \beta_1 - 2\Delta\gamma,$$

$$\beta_1' = \pi/2 - 2\Delta\gamma. \quad (2.19)$$

На рисунке 2.11,б показано направление распространения переотраженного излучения для трещин с углами  $\gamma$  и  $\gamma + \Delta\gamma$  при одинаковых значениях координаты. Ширина выходящих из трещины пучков с углом  $\gamma$

$$\Delta x = x_2 - x_1,$$

Для трещин с углом  $\gamma + \Delta\gamma$  ширина пучка составляет

$$\Delta x' = x_2' - x_1'.$$

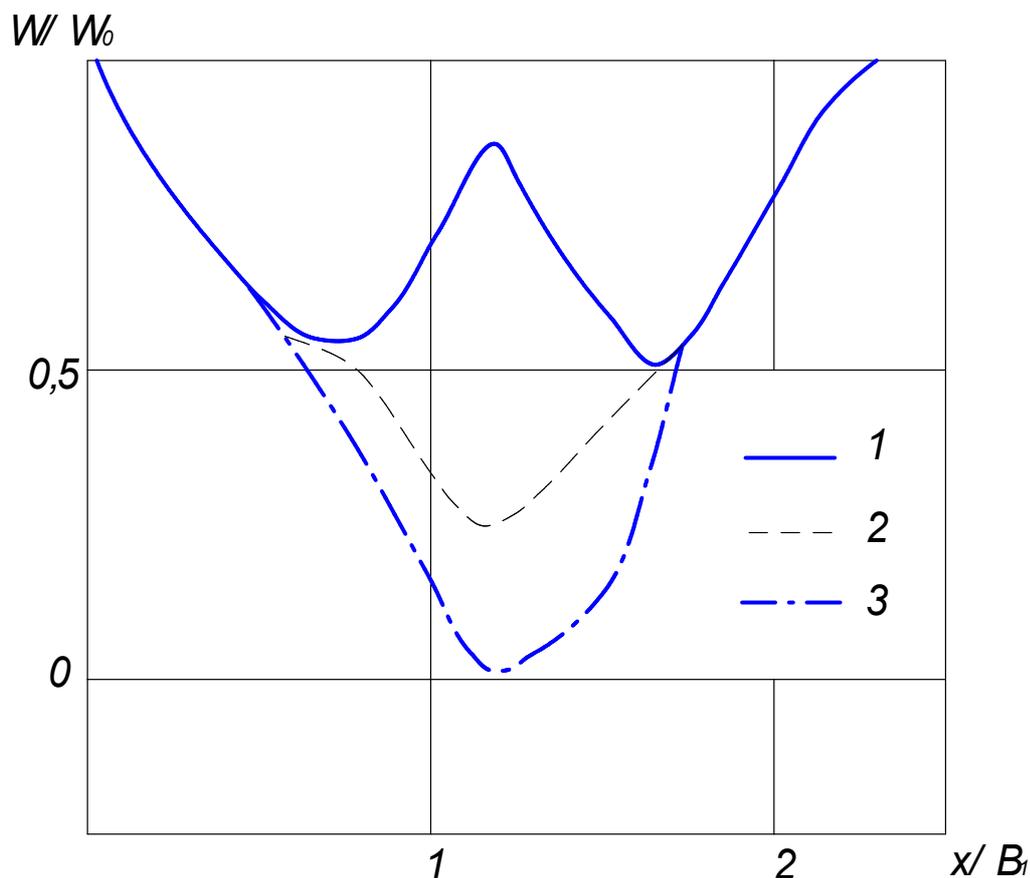


Рисунок 2.10 – Зависимость изменения относительной величины сигнала  $W/W_0$  от безразмерной координаты  $x/B_1$  для  $\alpha = \gamma = 30^\circ$ : 1 –  $n = 2$ ,  $H_2/B_1 = 1$ ; 2 –  $n = 10$ ,  $H_2/B_1 = 5,49$ ,  $\gamma = 6^\circ$ , 3 –  $n \rightarrow \infty$ ,  $\gamma \rightarrow 0$

Если для трещины с углом  $\gamma$  все излучение, попадающее в трещину, выходит из нее под углом  $\beta_2$ , то для трещины с углом  $\gamma + \Delta\gamma$  под углом  $\beta'_2 = \beta_2 - 4\Delta\gamma$  распространяется излучение, попадающее в трещину при  $x_n < x < x_{обр}$  (рисунок 2.11,а):

$$x_n = H_2 (\operatorname{tg}(\gamma + \Delta\gamma) - \operatorname{tg}\gamma), \quad (2.20)$$

$$S = 2H_2 \operatorname{tg}(\gamma + \Delta\gamma),$$

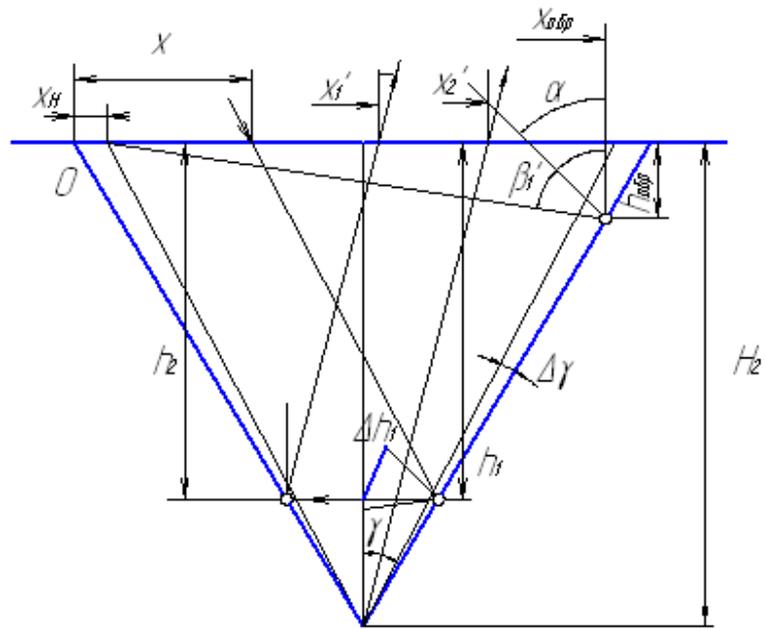
$$S/B_1 = 2 \operatorname{tg}(\gamma + \Delta\gamma).$$

Для  $\Delta\gamma = 3^\circ$   $S/B_1 = 1,3$ .

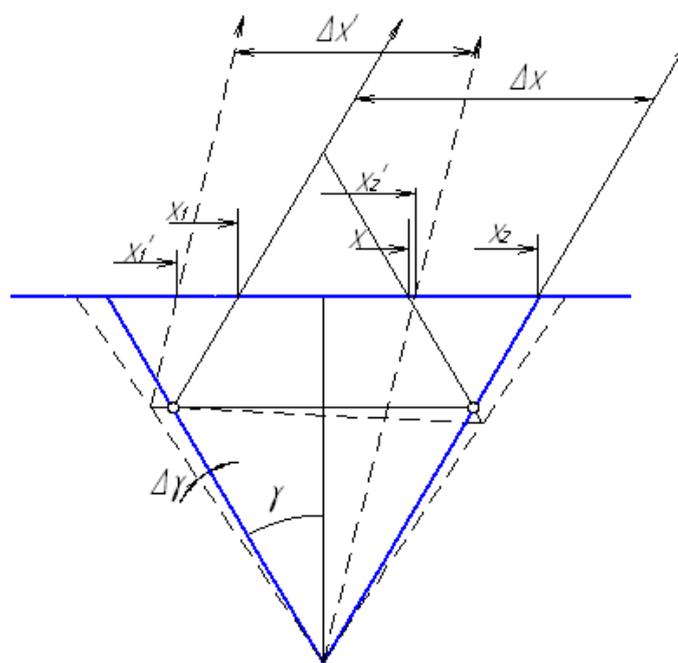
Определим  $x_{обр}$ . В соответствии с обозначениями рисунок 2.11,а запишем:

$$x_{обр} + h_{обр} \operatorname{tg}\alpha + h_{обр} \operatorname{tg}(\gamma + \Delta\gamma) = 2H_2 \operatorname{tg}(\gamma + \Delta\gamma),$$

$$h_{обр} = (x_{обр} + h_{обр} \operatorname{tg}\alpha) \operatorname{ctg}\beta_1. \quad (2.21)$$



а



б

Рисунок 2.11 – Распространение излучения в трещине при увеличении угла раскрытия трещины на  $2\Delta\gamma$  (а) и распространение излучения в трещинах с углами  $2\gamma$  и  $2(\gamma + \Delta\gamma)$  (б)

В результате преобразований выражений (2.21) получим:

$$x_{\text{обп}} = \frac{2H_2 \operatorname{tg}(\gamma + \Delta\gamma)}{\left(1 + \frac{\operatorname{tg}\alpha + \operatorname{tg}(\gamma + \Delta\gamma)}{\operatorname{tg}\beta_1 - \operatorname{tg}\alpha}\right)}. \quad (2.22)$$

Определим смещение излучения на выходе из трещины  $x_1'$ :

$$x_1' = h_2(\operatorname{tg}(\gamma + \Delta\gamma) + \operatorname{tg}\beta_2'), \quad (2.23)$$

$$h_1(\operatorname{tg}\alpha + \operatorname{tg}(\gamma + \Delta\gamma)) = 2H_2 \operatorname{tg}(\gamma + \Delta\gamma) - x,$$

$$h_1' = \frac{2H_2 \operatorname{tg}(\gamma + \Delta\gamma) - x}{\operatorname{tg}\alpha + \operatorname{tg}(\gamma + \Delta\gamma)}, \quad (2.24)$$

$$\Delta h_1 = (H_2 - h_1) \operatorname{tg}(\gamma + \Delta\gamma) \operatorname{tg}(2\Delta\gamma).$$

Для малых значений углов  $\Delta\gamma$  можно записать:

$$h_2 \approx h_1 - 2\Delta h_1. \quad (2.25)$$

$$\text{Для } x \leq B_1/\cos\alpha \quad x_2' = H_2(\operatorname{tg}(\gamma + \Delta\gamma) + \operatorname{tg}\beta_2'). \quad (2.26)$$

При  $x > B_1/\cos\alpha$   $x_2'$  определяется аналогично  $x_1'$  (в выражения (2.23) – (2.26) вместо  $x - B_1/\cos\alpha$ ). Излучение, выходящее из трещины, начинает попадать на приемный объектив при условии (рисунок 2.12,а)

$$\Delta_1' < 0,$$

$$\Delta_1' = x_1' - x - (\operatorname{tg}\alpha - \operatorname{tg}\beta_2')(H_1 - 0,5B_1 \sin\alpha), \quad (2.27)$$

или

$$x_1' - x < (\operatorname{tg}\alpha - \operatorname{tg}\beta_2')(H_1 - 0,5B_1 \sin\alpha).$$

Излучение, выходящее из трещины, полностью попадает на приемный объектив при условии:

$$\Delta_2' < 0, \Delta_1'' > 0,$$

$$\Delta_1'' = x_1' - x + B_1/\cos\alpha - (\operatorname{tg}\alpha - \operatorname{tg}\beta_2')(H_1 - 0,5B_1 \sin\alpha), \quad (2.28)$$

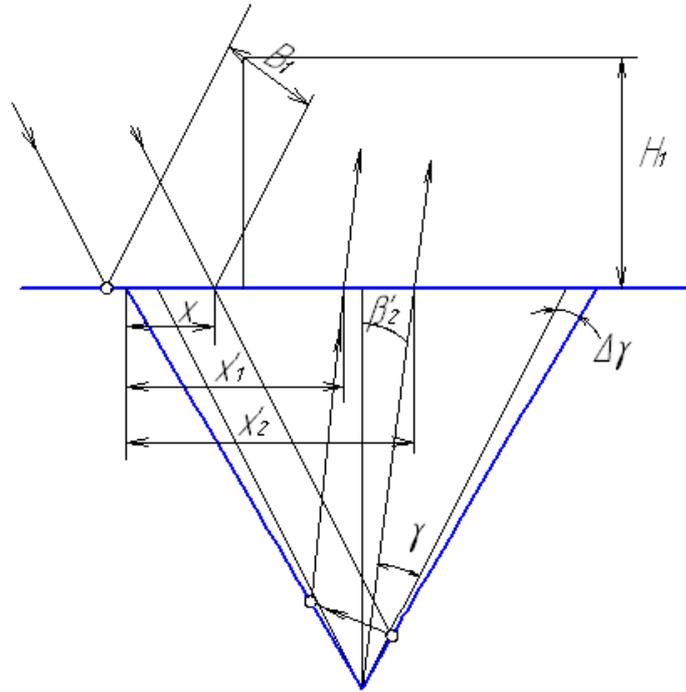
или

$$x_1' - (x - B_1/\cos\alpha) < (\operatorname{tg}\alpha - \operatorname{tg}\beta_2')(H_1 - 0,5B_1 \sin\alpha),$$

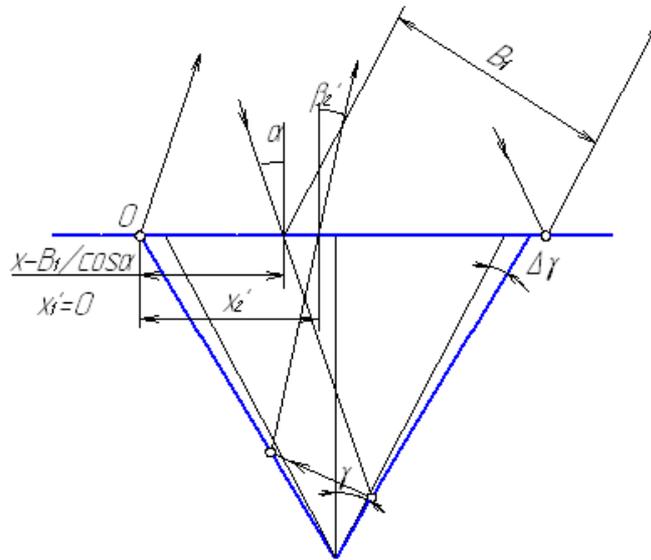
$$\Delta_2' = x_2' - x - (\operatorname{tg}\alpha - \operatorname{tg}\beta_2')(H_1 - 0,5B_1 \sin\alpha),$$

$$(2.29)$$

$$x_2' - x < (\operatorname{tg}\alpha - \operatorname{tg}\beta_2')(H_1 - 0,5B_1 \sin\alpha).$$



а



б

Рисунок 2.12 – Положение пучка излучения, выходящего из трещины, относительно приемного объектива: а –  $\Delta_1' > 0$ , б –  $\Delta_2'' < 0$

Излучение выйдет за границы приемного объектива (рисунок. 2.12,б):

$$\Delta_2'' < 0,$$

$$\Delta_2'' = x_2' - x + B_1 / \cos \alpha - (tg \alpha - tg \beta_2')(H_1 - 0,5B_1 \sin \alpha), \quad (2.30)$$

или

$$x_2' - (x - B_1 / \cos \alpha) < (tg \alpha - tg \beta_2')(H_1 - 0,5B_1 \sin \alpha).$$

Относительная величина сигнала  $W/W_0$  будет определяться в зависимости от значения координаты  $x$  [153, 194]:

$$1) x < x_{обп}, \Delta_1' > 0$$

$$\frac{W}{W_0} = \frac{B_1 / \cos \alpha - x}{B_1 / \cos \alpha}, \quad (2.31)$$

$$2) x < x_{обп}, \Delta_1' < 0$$

$$\frac{W}{W_0} = \frac{B_1 / \cos \alpha - x}{W_0 B_1 / \cos \alpha} + \frac{A_2^2 (x - x_H) (-\Delta_1')}{A_1 B_1 / \cos \alpha (x_2' - x_1')}; \quad (2.32)$$

$$3) x < x_{обп}, \Delta_2' < 0$$

$$\frac{W}{W_0} = \frac{B_1 / \cos \alpha - x}{B_1 / \cos \alpha} + \frac{A_2^2 (x - x_H)}{A_1 B_1 / \cos \alpha}, \quad (2.33)$$

$$4) x > x_{обп}, X > B_1 / \cos \alpha, x < 2H_2 tg(\gamma + \Delta\gamma), \Delta_1'' < 0, \Delta_2'' > 0;$$

$$x_1' = 0$$

$$\frac{W}{W_0} = \frac{A_2^2 (x_{обп} - x_{нач}) (x_2' - x_1' + \Delta_1'')}{A_1 B_1 / \cos \alpha (x_2' - x_1')}; \quad (2.34)$$

$$5) x > 2H_2 tg(\gamma + \Delta\gamma), \Delta_2'' > 0, x_1' = 0$$

$$\frac{W}{W_0} = \frac{x - 2H_2 tg(\gamma + \Delta\gamma)}{B_1 / \cos \alpha} + \frac{A_2^2 (x_{обп} - (x - B_1 / \cos \alpha)) (x_2' - x_1' + \Delta_1'')}{A_1 B_1 / \cos \alpha}; \quad (2.35)$$

$$6) x > 2H_2 tg(\gamma + \Delta\gamma), \Delta_2'' < 0, x < 2H_2 tg(\gamma + \Delta\gamma) + B_1 / \cos \alpha$$

$$\frac{W}{W_0} = \frac{x - 2H_2 tg(\gamma + \Delta\gamma)}{B_1 / \cos \alpha}. \quad (2.36)$$

На рисунке 2.13 показано изменение относительной величины сигнала  $W/W_0$  от безразмерной координаты  $x/B_1$  для  $\gamma = 30^\circ$ ,  $\Delta\gamma = 0$  (кривая 1),  $\Delta\gamma = 3^\circ$ ,  $S/B_1 = 1,3$ ,  $n = 2$ ,  $B_1/H_1 = 1$  (кривая 2) и  $S/B_1 = 1,3$ ,  $n \rightarrow \infty$ ,  $B_1/H_1 = 1$  (кривая 4), для  $(\gamma - \Delta\gamma) = 27^\circ$  ( $\Delta\gamma = -3^\circ$ ),  $B_1/H_2 = 1$ ,  $n = 2$  (кривая 3),  $S/B_1 = 1,019$ ,  $n \rightarrow \infty$  (кривая 5).

Наиболее важной характеристикой, определяющей направление выхода излучения из трещины  $\beta_n$ , координату изменения направления распространения излучения  $(x_n, x_{обр})$  и интенсивность отраженного излучения является  $n$  – число переотражений излучения в трещине.

При повороте плоскости симметрии трещины ( $\varphi_1 \neq 0$ )

$$n = (\pi / 2 - (\alpha \pm \varphi_1)) / \gamma, \quad (2.37)$$

где "+" соответствует повороту плоскости симметрии трещины в сторону источника, "-" – в сторону приемного объектива.

Заметим, что значения  $n$ , определяемые по зависимостям (2.5, 2.6), (2.37), могут иметь как целые, так и дробные значения в зависимости от значений  $\alpha$  и  $\gamma$ , и представляют собой интегральную характеристику трещины.

Целым значениям  $n$  соответствует  $x_n = x_{обр} = 0$ , т.е. все излучение, выходящее из трещины, распространяется в одном направлении. Для дробных значений  $n$ , например  $n=2,2$ , при  $x < x_n$  число переотражений в трещине равно 3 (данная часть излучения распространяется в направлении источника), а для  $x > x_n$  число переотражений в трещине равно 2 (данная часть излучения распространяется в направлении приемного объектива).

Значение  $n$  определяет вид зависимости  $W/W_0 = f(x/B_1)$  [144, 153]. При четных значениях  $n$  ( $n=2,4,\dots,2n$ ) и  $S/(B_1/\cos\alpha) > 1$  зависимость  $W/W_0 = f(x/B_1)$  представляет собой симметричную кривую с максимумом или минимумом в центре, значение величины сигнала в центре трещины определяется величиной  $n$ . Для  $n=0\dots 1, 2\dots 3,\dots, 2n\dots 2n+1$  зависимость будет иметь вид кривой 3 на рисунке 2.13, значения  $W/W_0$  в максимуме и центре трещины определяются величиной  $n$ .

Для  $n=1...2, 3...4, \dots, 2n-1...2n$  максимум на кривой  $W/W_0=f(x/B_1)$  смещен влево (зависимость 2 на рисунке 2.13), максимальное значение  $W/W_0$  и  $W/W_0$  в центре трещины также определяются величиной  $n$ . При любых нечетных значениях  $n$  зависимость  $W/W_0=f(x/B_1)$  имеет минимум в точке  $x/B_1=H_2 \operatorname{tg} \gamma + B_1/2 \cos \alpha$  (аналогично кривой 4 на рисунке 2.13). Для  $n \rightarrow \infty$  (для четных и нечетных значений  $n$ ) зависимость  $W/W_0=f(x/B_1)$  имеет вид кривой 4 на рисунке 2.13.

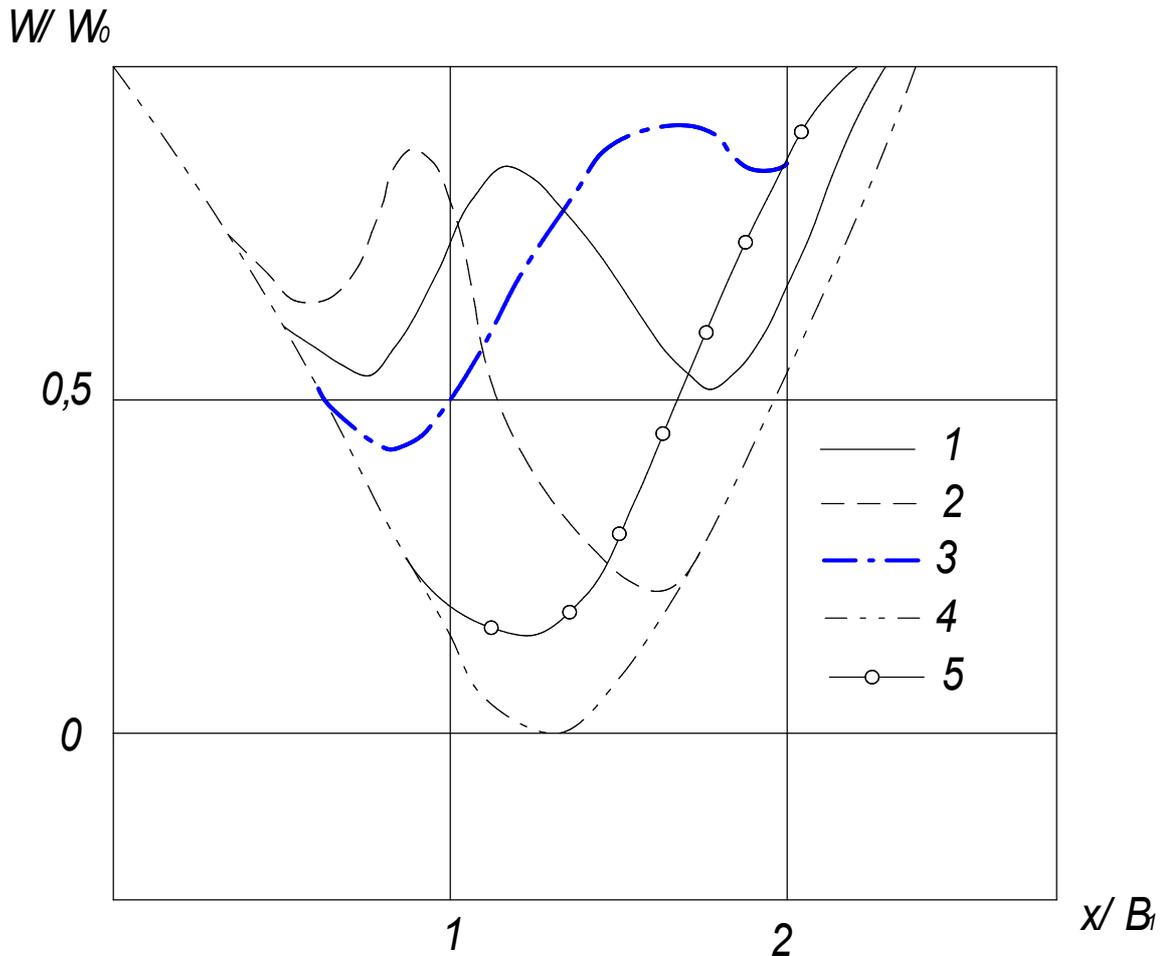


Рисунок 2.13 – Изменение относительной величины сигнала  $W/W_0$  для  $\alpha = 30^\circ$  и различных значений угла раскрытия трещины: 1 –  $\gamma = 30^\circ, n = 2, S/B_1 = 1,15$   
 2 –  $\Delta\gamma = 3^\circ, n = 1,8, S/B_1 = 1,3, 3 - \Delta\gamma = -3^\circ, n = 2,2, S/B_1 = 1,019, 4 - n \rightarrow \infty, B_1/H_1 = 1, S/B_1 = 1,019$

Таким образом, зависимость относительной величины сигнала  $W/W_0$  в центре трещины от  $n$  будет иметь периодический характер [153] (рисунок 2.14).

Основные формулы для определения относительной величины сигнала от безразмерной координаты представлены в таблице 2.1.

Расстояние от исследуемой поверхности до приемного объектива  $H_1$  оказывает существенное влияние на форму зависимостей  $W/W_0=f(x/B_1)$  и  $W_{\text{цт}}/W_0=f(n)$ . Только при  $\beta_n=6\alpha$  при любых значениях  $H_1$  вид зависимости  $W/W_0=f(x/B_1)$  остается неизменным, значение  $W_{\text{цт}}/W_0$  не зависит от соотношения  $H_1/B_1$ . В остальных случаях в соответствии с зависимостями (2.6)-(2.12) с увеличением расстояния от исследуемой поверхности до приемного объектива происходит снижение относительной величины сигнала. При  $H_1/B_1 > 0$  функция  $W_{\text{цт}}/W_0=f(n)$  не является непрерывной и имеет вид зависимости 2 на рисунке 2.14.

При  $H_1/B_1 = 1$  значение относительной величины сигнала в центре трещины при четных значениях  $n$  равно  $W_{\text{цт}}/W_0 = A^{n-1}$ . Для других значений  $n$   $W_{\text{цт}}/W_0$  равно нулю.

Описанная в математической модели область изменения значений угла раскрытия трещины соответствует  $20^\circ < \gamma < 60^\circ$  ( $1 < n < 3$ ). Область изменения угла  $\gamma$ , соответствующая различным видам повреждений (окисная пленка, износ поверхности, царапины, глубокие и неглубокие трещины) охватывает  $0 \leq \gamma \leq 90^\circ$ .

Рассмотренную область изменения значений угла  $\gamma$  можно условно разбить на несколько областей, каждая из которых соответствует определенному виду повреждений [153-155]:

1. Глубокие трещины ( $n > 6$ ). Для этого вида повреждений на кривой изменения относительной величины сигнала  $W/W_0$  от координаты  $x/B_1$  имеется минимум в точке, соответствующей середине трещины при любых значениях  $H_1$  и  $\gamma = (\pi/2 - \alpha)/n$ .

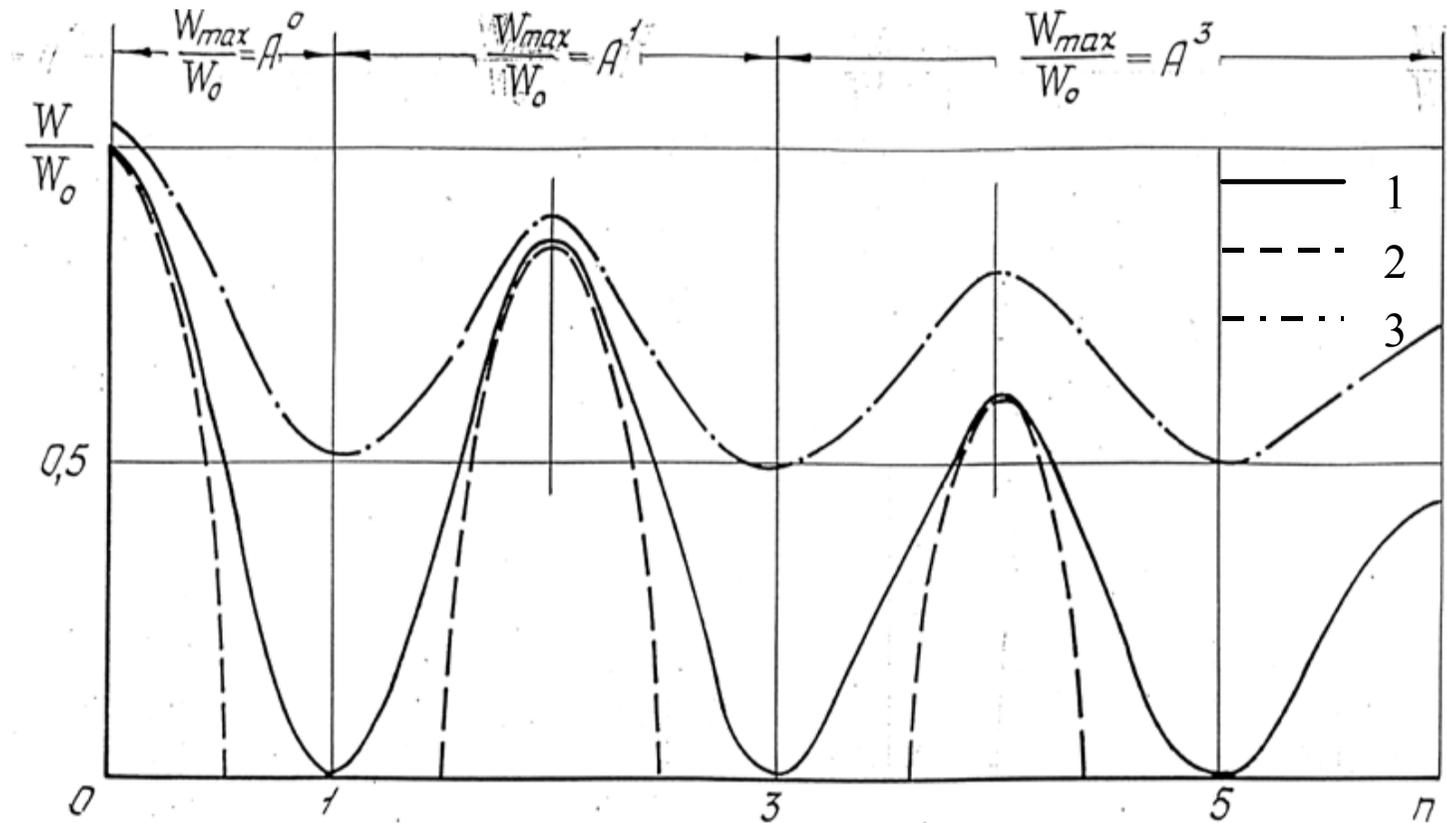


Рисунок 2.14 – Зависимость изменения относительной величины сигналов в центре трещины  $W_{ц.т.}/W_0$  от безразмерного параметра  $n$  при различных значениях высоты расположения приемного объектива над поверхностью  $H_1$  и различных соотношениях размеров пятна и ширины трещины  $(B_1/\cos\alpha)/S$ : 1 –  $H_1=0$ ,  $(B_1/\cos\alpha)/S=1$ , 2 –  $H_1=B_1$ ,  $(B_1/\cos\alpha)/S<1$ , 3 –  $H_1=0$ ,  $(B_1/\cos\alpha)/S=2$

Таблица 2.1 – Математическая модель зеркальной составляющей величины отраженного сигнала

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

2. Неглубокие трещины ( $2 < n < 6$ ). Для таких повреждений на кривой изменения  $W/W_0$  от координаты  $x/B_1$  имеется максимум в точке  $x/B_1 = H_2 \operatorname{tg} \gamma + B_1/2 \cos \alpha$ . При  $H_1/B_1 = 1$ .

3. Царапины ( $n < 2$ ). Для этого вида повреждений характерно  $H_2/S < 1$  и  $S/B_1 > 0$ ,  $W/W_0 > 0$  при всех значениях  $x/B_1$  для любых значений  $\gamma$ .

4. Износ поверхности ( $0 < n < 1$ ). По сравнению с перечисленными повреждениями поверхности, этот дефект характеризуется большей протяженностью и более высокими значениями  $W/W_0$  в центре дефекта. Здесь  $n=1$  соответствует отражению излучения от поверхности повреждения и распространению отраженного излучения в направлении источника ( $\gamma < 90^\circ$ ),  $n=0$  соответствует однократному отражению излучения от поверхности и его распространению в направлении приемного объектива,  $\gamma = 90^\circ$ .

5. Окисная пленка на поверхности ( $n \approx 0$ ). Данное повреждение характеризуется изменением цветности и шероховатости поверхности при  $H_2 = 0$  ( $n=0$ ,  $\gamma = 90^\circ$ ). Для выявления такого дефекта значения  $H_1$  не оказывает существенного влияния. В отличие от других дефектов окисная пленка характеризуется увеличением разброса величины  $W/W_0$ , а не снижением или увеличением относительной величины сигнала.

Для оценки эффективности выявления дефектов на фоне шероховатости вводится характеристика сигнал/шум. Под отношением сигнал/шум в данном случае понимается отношение изменения интенсивности от дефекта  $\Delta I_d$  в точке регистрации к изменению интенсивности от шероховатости или дисперсии интенсивности спекл-шума  $\Delta I_{сп}$ . Для линейного участка поверхности  $a$  дефекта размером  $\Delta a$  изменение интенсивности:

$$\Delta I_d \approx 2\gamma a \Delta a. \quad (2.38)$$

Наличие шероховатости с дисперсией высот  $\sigma$  и средним поперечным размером  $r$  приводит к изменению интенсивности в зеркальной составляющей:

$$\Delta I_{cn} \approx \sigma ar. \quad (2.39)$$

Тогда для отношения сигнал/шум получим следующую оценку:

$$c / ш \approx 2\gamma\Delta a / (\sigma r). \quad (2.40)$$

Последнее выражение справедливо при  $r/a \ll 1$ .

Для слабо диффузных поверхностей с классом обработки 8-10,  $\sigma=0,1$ ,  $r=10\text{мкм}$  и  $\gamma=0,5$  с отношением  $c/ш$  будут выявляться дефекты  $\Delta a \geq 10\text{мкм}$ . Следует отметить, что наряду с мультипликативным спекл-шумом в реальных системах большую роль могут играть шумы, обусловленные вибрацией контролируемой поверхности. Малые смещения поверхности с ненулевой кривизной могут привести к изменениям интенсивности, сравнимым с сигналом от дефекта. Для ослабления этого эффекта оптическая система формирования зоны регистрации рассеянного излучения должна обладать глубиной резкости  $\lambda/\varepsilon^2 \geq \delta$ , где  $\varepsilon$  – относительное отверстие оптической системы,  $\delta$  – амплитуда вибраций. Таким образом, анализ отношения сигнал/шум показывает, что размер минимально обнаруживаемых дефектов зависит от уровня шероховатости поверхности, амплитуды её вибраций и глубины резкости оптической системы.

## 2.5 Зависимость диффузной составляющей от параметров лазерного излучения и характеристик поверхностного слоя конструкционных материалов

Структура отраженного сигнала и величина отдельных его составляющих зависят от соотношения характеристик зондирующего пучка и исследуемого поверхностного слоя. При этом каждая измеряемая величина соответствует отдельному информационному каналу.

Соотношение зеркальной и диффузно отраженной составляющих определяется параметром  $K_3$ .

Форма индикатрисы рассеивания в полярных координатах для источника с бесселевской корреляцией описывается выражением [68, 74]

$$\chi = A \frac{k+2}{2} \cos^k \varphi, \quad (2.41)$$

где  $A$  – отражательная способность поверхности,  $k$  – показатель индикатрисы,  $k=\infty$  – соответствует зеркальной поверхности,  $k=0$  – равномерному рассеиванию в пределах угла  $\pi$ .

Конфигурации для индикатрисы рассеяния в соответствии с зависимостью (2.41) представлены на рисунке 2.15.

При этом полная величина мощности (энергии) лазерного излучения определяется площадью, ограниченной кривой индикатрисы в полярных координатах в диапазоне от 0 до  $\pi$ . Величина мощности или энергии, попадающей на приемный объектив, определяется площадью, заключенной в угле, соответствующем числовой апертуре приемного объектива.

Величина числовой апертуры приемного объектива определяется выражением

$$\theta/2 = \arctg\left(\frac{D}{2H} \sin \beta\right), \quad (2.42)$$

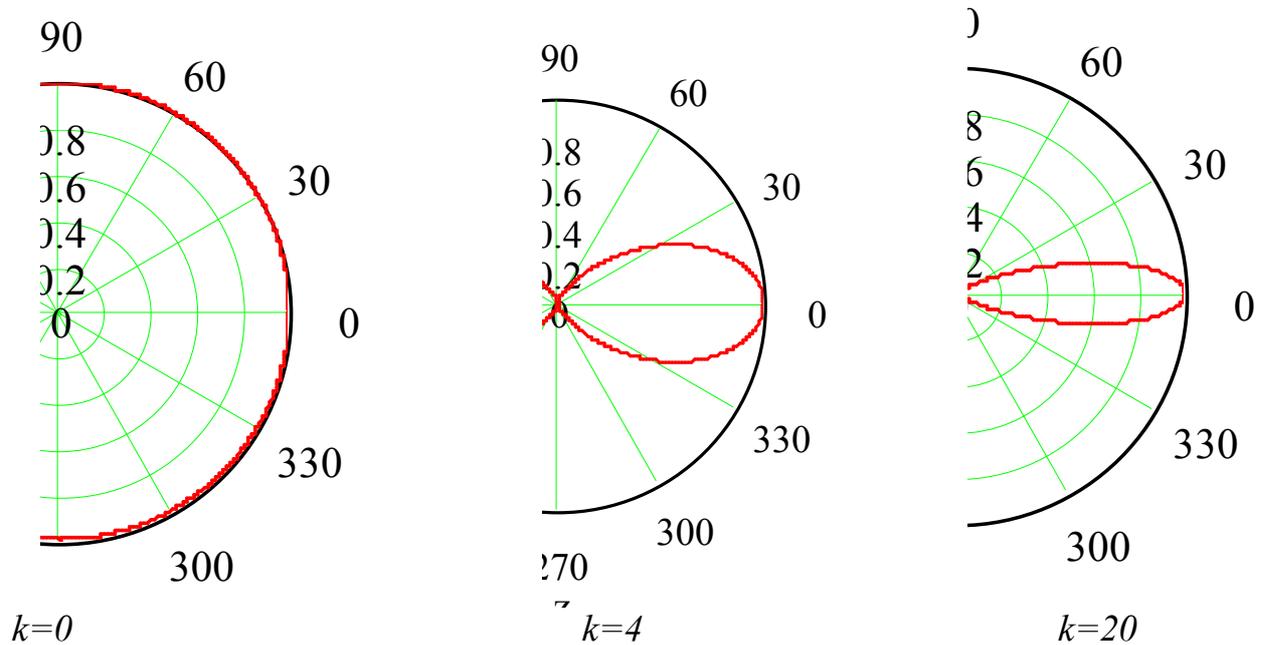


Рисунок 2.15 – Зависимость конфигурации индикатрисы рассеяния от безразмерного параметра  $k$

где  $\beta$  – угол установки приемного объектива,  $H$  – высота расположения приемного объектива,  $D$  – его диаметр.

Площадь, ограниченная кривой в полярных координатах, вычисляется на основе интеграла Симпсона [93] и равна

$$S = \frac{1}{2} \int_{\alpha}^{\beta} r^2(\varphi) d\varphi. \quad (2.43)$$

Функция  $r(\varphi) = \chi$  определяется выражением (2.41).

Так, при  $k=2$  величина мощности излучения, заключенная в интервале углов  $\alpha$  и  $\beta$ , составляет

$$S = \left( \frac{1}{4} \cos^3 \varphi \sin \varphi + \frac{3}{8} (\varphi + \sin \varphi \cos \varphi) \right) \Big|_{\alpha}^{\beta}. \quad (2.44)$$

При  $k=10$

$$\begin{aligned}
S = & \left( 18 \frac{\cos^{19} \varphi \sin \varphi}{20} + \frac{19}{18 \cdot 20} \cos^{17} \varphi \sin \varphi + \right. \\
& \frac{17}{18 \cdot 16} \cos^{15} \varphi \sin \varphi + \frac{15}{16 \cdot 14} \cos^{13} \varphi \sin \varphi + \\
& \frac{13}{14 \cdot 12} \cos^{11} \varphi \sin \varphi + \frac{11}{12 \cdot 10} \cos^9 \varphi \sin \varphi + \\
& \frac{9}{10 \cdot 8} \cos^7 \varphi \sin \varphi + \frac{7}{8 \cdot 6} \cos^5 \varphi \sin \varphi + \\
& \left. + \frac{5}{6 \cdot 4} \cos^3 \varphi \sin \varphi + \frac{3}{4 \cdot 2} (\varphi + \sin \varphi \cos \varphi) \right) \frac{\beta}{\alpha}
\end{aligned} \quad (2.45)$$

Построены зависимости изменения величины сигнала от показателя индикатрисы рассеивания при различных значениях параметра индикатрисы (рисунок 2.16). Увеличение высоты приемного объектива в 2 раза или снижение его диаметра в 2 раза приводят к снижению величины зарегистрированного сигнала на 40...50%. Поворот приемного объектива на 12° оказывает существенное влияние при значениях показателя индикатрисы  $k > 3$  и приводит к снижению величины сигнала на 20% при  $k = 8 \dots 10$  [160, 161].

Зависимость величины зеркальной составляющей сигнала от геометрических характеристик элемента поверхности определена ранее [195-197] и приведена на рисунке 2.13.

Как видно из рисунков 2.13 и 2.16, наибольший вклад в изменение величины сигнала вносит зеркальная составляющая излучения. При этом для наиболее достоверного распознавания объектов и элементов их поверхности необходимо сканирование поверхности при двух различных углах падения излучения. При этом вероятность распознавания увеличивается на 30%.

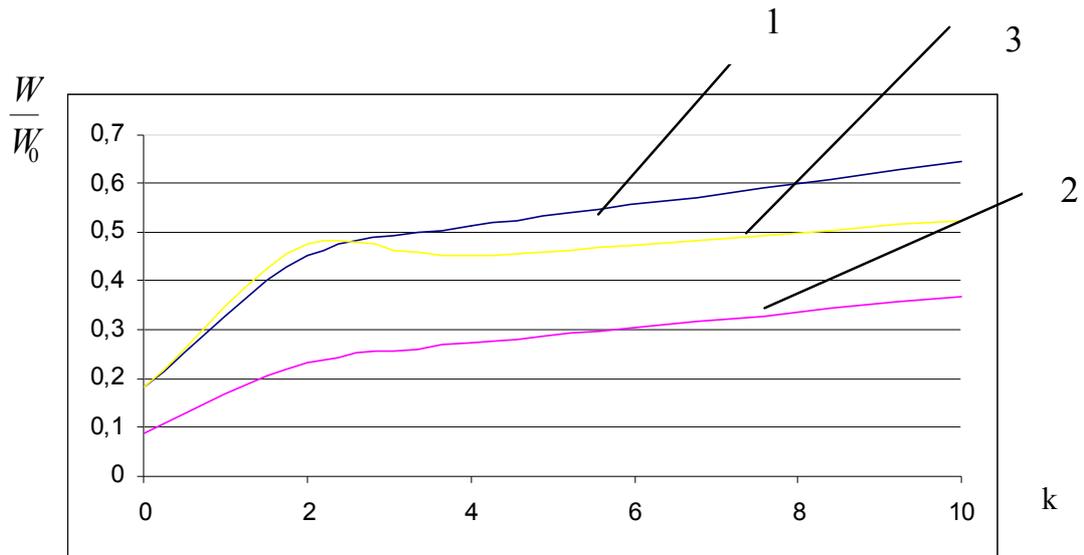


Рисунок 2.16 – Зависимость величины сигнала на фотоприемном устройстве от показателя индикатрисы и расположения приемного объектива  
 1 –  $D/H=1$ ; 2 –  $D/H=1/2$ ; 3 –  $\beta_2\beta_2'=12^\circ$ ;  $D$  – диаметр фотоприемного объектива,  $H$  – высота расположения приемного объектива,  $\beta_2$  – угол расположения фотоприемного объектива относительно вертикали,  $\beta_2'$  – угол отражения излучения от поверхности

Увеличение показателя индикатрисы рассеяния 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  $k=8...10$ .

## 2.6 Установление величины погрешности измерений параметров поверхностного слоя конструкционных материалов и обеспечения заданной точности

Одним из основных требований, предъявляемых к информационно-измерительным системам, является обеспечение заданной точности измерения параметров физической величины. С точки зрения влияния погрешностей на выбор

параметров информационно-измерительных систем (ИИС) в целом и их элементов, а также по методике учета при проектировании и конструировании этих систем целесообразно воспользоваться классификацией погрешностей, несколько отличающейся от установившейся в настоящее время. По физической природе их происхождения все погрешности можно разделить на методические, конструкторско-технологические, динамические и шумовые [147, 148].

Методические погрешности обусловлены неточностью знания параметров физических процессов, на основе использования которых основывается функционирование информационно-измерительных систем в составе систем обнаружения объектов. Например, погрешности измерения физических констант, включая и скорость света, влияние турбулентности атмосферы на направление распространения и скорость распространения излучения и т.п. Методические погрешности принципиально неустранимы никакими мерами при проектировании и производстве, но по мере совершенствования методов и техники измерения параметров физических процессов, на основе которых базируется функционирование информационно-измерительных систем в составе систем обнаружения объектов, а также по мере улучшения точностных характеристик международных и государственных эталонов и мер, величина методических погрешностей уменьшается.

Для информационно-измерительной системы основным физическим ограничением на угловое разрешение является случайный и нестационарный характер атмосферных фазовых неоднородностей. Угловое разрешение информационно-измерительной системы составляет 1"-2". В наземных условиях наблюдения адаптация позволяет рассчитывать на достижение в видимом и ближнем ИК диапазонах углового разрешения на порядок меньше – 0,1"-0,2". Последнее значение выступает в качестве физического ограничения на методическую погрешность.

Конструкторско-технологические погрешности обусловлены следующими причинами: невозможностью изготовить детали и узлы системы без технологических допусков, ограниченной точностью применяемой в производстве контрольно-измерительной техники, деформацией деталей и узлов под действием статических и динамических нагрузок и нестационарных тепловых потоков и т.д. По своим характеристикам конструкторско-технологические погрешности можно классифицировать на систематические и случайные. Случайные конструкторско-технологические погрешности обусловлены многими причинами и поэтому, часто можно принять их распределение по нормальному закону.

Как следует из приведенной классификации погрешностей, все они, кроме систематической конструкторско-технологической погрешности, носят случайный характер. Так как они имеют различную природу, в чем и состоит смысл предложенной классификации, то в большинстве случаев их можно считать независимыми. Потому суммарная дисперсия погрешности функционирования ИИС с достаточно хорошей степенью приближения может быть представлена суммой:

$$\sigma_{\text{сум}}^2 = \sigma_{\text{м}}^2 + \sigma_{\text{кт}}^2 + \sigma_{\text{дин}}^2 + \sigma_{\text{ш}}^2, \quad (2.46)$$

где  $\sigma_{\text{сум}}^2$ ,  $\sigma_{\text{м}}^2$ ,  $\sigma_{\text{кт}}^2$ ,  $\sigma_{\text{дин}}^2$ ,  $\sigma_{\text{ш}}^2$  – дисперсии суммарной, методической, конструкторско-технологической, динамической и шумовой погрешностей соответственно.

Методические погрешности не зависят от конструкции и параметров ИИС и могут быть оценены после выбора принципа и физических основ построения и функционирования системы. Случайные конструкторско-технологические погрешности, наоборот, на начальной стадии проектирования неизвестны. Однако эти погрешности могут быть спрогнозированы на основании опыта разработки систем-аналогов, а на стадии производства должны быть приняты меры, чтобы эти погрешности не превзошли их предварительной оценки.

Проведен анализ погрешностей определения величины отраженного сигнала при определении отражательных характеристик конструкционных материалов (рисунок 2.17).

Инструментальные погрешности обусловлены типом источника излучения, нестабильностью оси диаграммы направленности и мощности источника излучения, разогревом материала активной среды, погрешностью расположения элементов измерительной системы.

Методические погрешности определяются допущениями в методе функционирования измерительной системы, в отношении объекта диагностики (форма и шероховатость поверхности, температура); дискретность измерений (шаг сканирования); погрешности регистрации (наведения, считывания, настройки и выверки, обработки результатов).

Методические погрешности связаны с предположением о постоянстве отражательной способности поверхности контролируемых объектов, о равенстве отражательных способностей бездефектной поверхности и поверхности трещины, о простой геометрической форме элементов поверхности.

В ранее известных измерительных системах [11-16, 22-24, 28, 29] не учитывалось явление переотражения излучения в элементах поверхности. Учет этого явления позволяет распознавать элементы поверхности при определении их глубины в зависимости от безразмерного параметра  $n$ .

Измерение относительной величины сигнала  $W/W_0$  позволяет снизить влияния флуктуаций отражательной способности поверхности на результаты измерений при выявлении дефектов на величину, соответствующую среднеквадратическому разбросу отражательной способности поверхности. Это позволяет также исключить по сравнению с другими известными измерительными системами необходимость регулирования мощности падающего потока излучения.

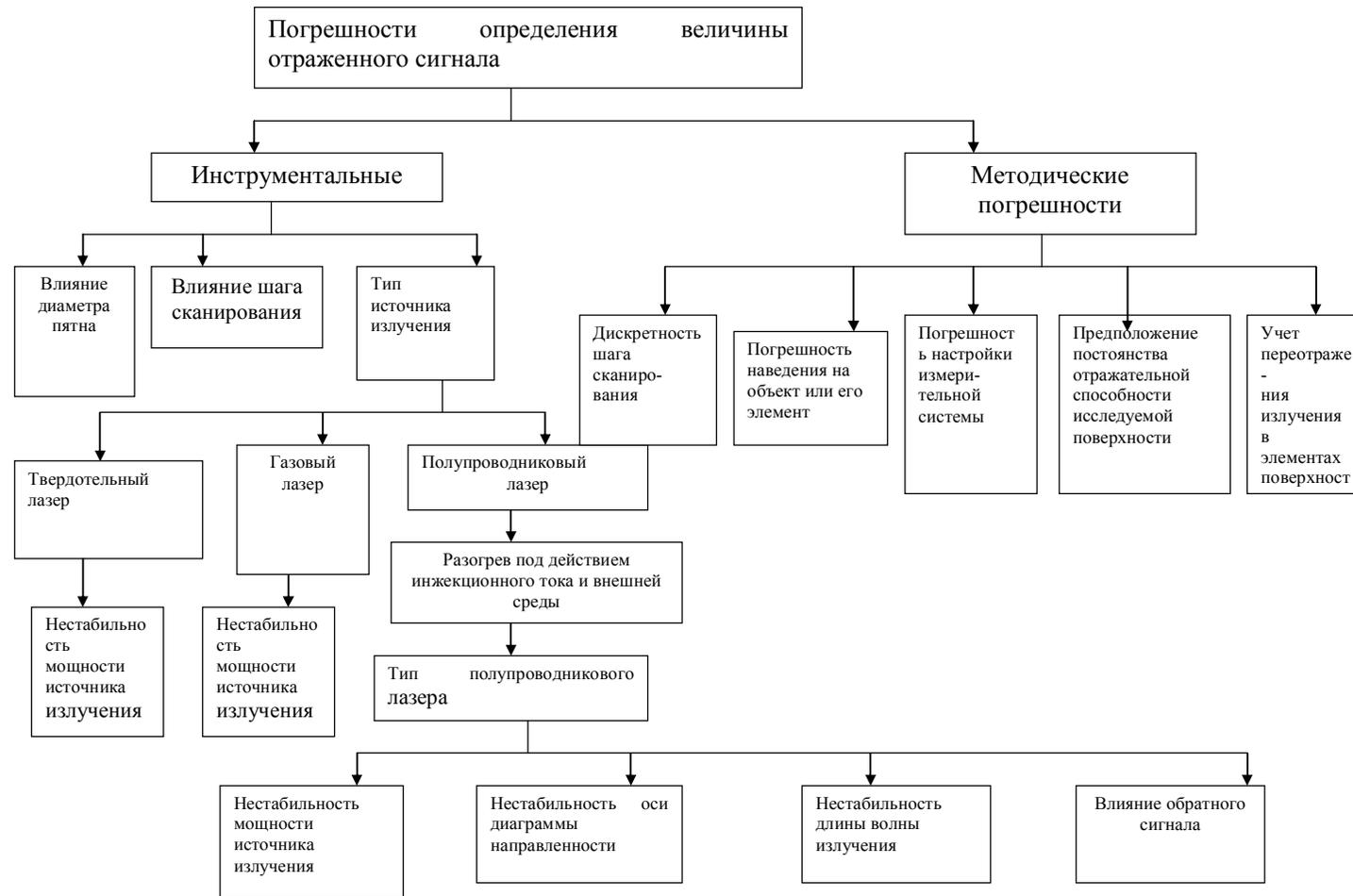


Рисунок 2.17 – Структура погрешностей определения величины отраженного сигнала в лазерных информационно-измерительных системах оценки состояния поверхностей конструкционных материалов

Для установления погрешности определения геометрических параметров дефектов поверхностного слоя рассмотрим факторы, ограничивающие чувствительность измерительной системы. К ним относятся: 1) высота расположения приемного объектива над поверхностью; 2) соотношение диаметра пятна и поперечных размеров дефекта; 3) точность установки угла падения излучения.

Влияние соотношения диаметра пятна и ширины трещины было рассмотрено ранее (раздел 2.2). При заданной величине  $B_1$  могут быть выявлены повреждения, для которых выполняется соотношение  $K_2 = B_1/S \leq 2$ . Влияние элементов поверхности с меньшими размерами ( $K_2 \leq 2$ ) усредняется в пределах пятна и не приводит к значительному изменению величины отраженного сигнала. Ширина трещины наиболее точно может быть определена при  $K_2 = B_1/S \leq 1$ , в этом случае наблюдается наибольшее снижение величины сигнала при наличии трещин.

Для выявления погрешности определения глубины и угла раскрытия трещины рассмотрим влияние угла падения излучения  $\alpha$  и высоты расположения приемного объектива  $H_1$  на интенсивность излучения, переотраженного трещиной (второе слагаемое в выражении (2.32)):

$$\frac{W_2}{W_0} = A^{n-1} \frac{(S - x_n)}{B_1 / \cos \alpha} \frac{(-\Delta'_1)}{(x'_1 - x'_2)}, \quad (2.47)$$

где 
$$\Delta'_1 = x'_1 - x - (tg \alpha - tg \beta'_n) (H_1 - 0,5 B_1 \sin \alpha), \quad (2.48)$$

$$\beta'_n = \pi - \alpha - 2n\gamma. \quad (2.49)$$

При малых значениях  $\Delta\gamma \Delta h_1 = 0$  (3.39).

Тогда в соответствии с (2.23) можно записать:

$$x_1' = \frac{S-x}{\operatorname{tg}\alpha + \operatorname{tg}\gamma} (\operatorname{tg}\gamma + \operatorname{tg}\beta_n'). \quad (2.50)$$

Будем рассматривать относительную величину сигнала в точке с координатой  $x_{ц.пр.} = 0,5S + 0,5B_1/\cos\alpha$ . В этом случае

$$x_2' = S. \quad (2.51)$$

Подставим (2.48), (2.49), (2.50) в (2.47). Получим:

$$\frac{W_2}{W_0} = A^{n-1} \frac{ST}{B_1/\cos\alpha} \frac{0,5\left(\frac{1}{T}(S-B_1/\cos\alpha) - S - B_1/\cos\alpha\right) - (\operatorname{tg}\alpha - \operatorname{tg}\beta_n')(H_1 - 0,5B_1 \sin\alpha)}{S - 0,5(S-B_1/\cos\alpha)\frac{1}{T}}, \quad (2.52)$$

или

$$\frac{W_2}{W_0} = A^{n-1} \frac{T_1(T_2 - T_3 T_4)}{T_5}, \quad (2.53)$$

где

$$T = \frac{\operatorname{tg}\alpha + \operatorname{tg}\gamma}{\operatorname{tg}\gamma + \operatorname{tg}\beta_n'}, \quad (2.54)$$

– параметр, зависящий от угла падения излучения и геометрии элемента поверхности и определяющий геометрию пучка на выходе из трещины (элемента поверхности),

$$T_1 = \frac{ST}{B_1/\cos\alpha} \quad (2.55)$$

– параметр, характеризующий долю излучения, распространяющегося в направлении приемного объектива,

$$T_2 = 0,5B_1 \left( \frac{1}{T} \left( 1 - \frac{1}{\cos\alpha} \right) - \left( 1 + \frac{1}{\cos\alpha} \right) \right) \quad (2.56)$$

– параметр, характеризующий смещение переотраженного пучка относительно падающего,

$$T_3 = \operatorname{tg} \alpha - \operatorname{tg} \beta'_n \quad (2.57)$$

– параметр, характеризующий отклонение пучка на выходе из трещины (элемента поверхности),

$$T_4 = H_1 - 0,5B_1 \sin \alpha \quad (2.58)$$

– параметр, характеризующий геометрию объектива,

$$T_5 = S - 0,5(S - B_1/\cos \alpha) \frac{1}{T} \quad (2.59)$$

– параметр, определяющий ширину пучка на выходе из трещины.

Для определения погрешности определения геометрических размеров повреждений и установления критериев подобия при отражении излучения от поверхности материала запишем уравнение для относительной величины сигнала (2.28) в виде:

$$\frac{W}{W_0} = \frac{B_2}{B_1} \left[ \frac{A_1}{A_0} \frac{B_1/\cos \alpha - x}{B_1/\cos \alpha} + \frac{A_2^n}{A_0} \frac{(x - x_n)}{B_1/\cos \alpha} \frac{(-\Delta'_1)}{(x'_2 - x'_1)} \right], \quad (2.60)$$

$$\text{где} \quad \Delta'_1 = x'_1 - x - (\operatorname{tg} \alpha - \operatorname{tg} \beta'_n)(H_1 - 0,5B_2 \sin \alpha). \quad (2.61)$$

Упростив выражение (2.60) при  $A_1=A_2$ , получим:

$$\frac{W}{W_0} = \frac{A}{A_0} \frac{B_2}{B_1} \left( \frac{1/\cos \alpha - \Delta}{1/\cos \alpha} + A^{n-1} P_1 \cos \alpha (1 - P_2) \frac{\Delta + \frac{P_1}{P_2} \left( \frac{H_1 - 0,5 \frac{B_2}{B_1} \sin \alpha}{\frac{S}{B_1} + \frac{P_1}{P_2}} \right)}{\frac{S}{B_1} + \frac{P_1}{P_2}} \right), \quad (2.62)$$

где  $\Delta=x/B_1$  при  $B_1/S \leq 1$  и  $\Delta=S/B_1$  при  $B_1/S > 1$ ,

$$P_1 = \Delta - S/B_1, \quad P_2 = \frac{\operatorname{tg} \alpha + \operatorname{tg} \gamma}{\operatorname{tg} \gamma + \operatorname{tg} \beta'_n}.$$

Запишем уравнение (2.60) в виде:

$$\frac{W}{W_0} = \frac{E_1 E_2}{A_0} \frac{B_2}{B_1} E_3, \quad (2.63)$$

$$\text{где} \quad E_1 = \frac{16\pi^2 (n^2 - 1)}{\lambda^4 (n^2 + 1)} \frac{a^6}{\cos\theta_s \cos\alpha} \frac{N}{A_a} F 4 \sin\alpha \sin\theta_s \quad (2.64)$$

характеризует изменение интенсивности отражения в плоскости падения излучения, связанное с наличием рассеивающих частиц (частицы композиционного материала),  $\lambda$  – длина волны излучения,  $n$  – показатель преломления рассеивающих частиц,  $a$  – средний размер рассеивающих частиц,  $\alpha$  – угол падения излучения,  $\theta_s$  – угол отражения излучения,  $N/A_a$  – фактор заполнения (концентрация рассеивающих частиц),  $F$  – структурный фактор (структура с объединением или разделением компонентов композиционного материала);

$$E_2 = \exp(-\pi^2 h_{\text{ск}}^2 \cos^2\alpha / \lambda^2) \quad (2.65)$$

характеризует долю зеркально отраженного излучения от поверхности со среднеквадратической высотой микронеровностей  $h_{\text{ск}}$ ;

$$E_3 = \frac{1/\cos\alpha - \Delta}{1/\cos\alpha} + A^{n-1} P_1 \cos\alpha (1 - P_2) \frac{\Delta + \frac{P_1}{P_2} \left( \frac{H_1}{B_1} - 0,5 \frac{B_2}{B_1} \sin\alpha \right)}{\frac{S}{B_1} + \frac{P_1}{P_2}} \quad (2.66)$$

характеризует изменение интенсивности отраженного излучения, связанное с изменением направления распространения отраженного излучения (наличие трещин, выбоин и других элементов топологии поверхности, ведущих к переотражению излучения).

$A_0$  – среднее значение коэффициента отражения бездефектной поверхности,  $B_2/B_1$  характеризует соотношение размеров приемного объектива и пятна излучения на поверхности (оптическая система с высокой или низкой числовой апертурой). При выявлении трещин (определение величины  $E_3$ ) наиболее приемлемым является значение  $B_2/B_1=1$ . При определении характеристик композиционных материалов в соответствии с теорией скалярной дифракции оптическая система с высокой числовой апертурой ( $B_2/B_1>1$ ) несет больше

информации о структуре материала, чем оптическая система с низкой числовой апертурой [143-145, 158-159].

Построены зависимости  $E_3=f(K_1)$  при  $K_3 \leq 1$ ,  $E_3=f(K_3)$  при  $K_1 \gg 1$ ,  $E_3=f(K_3)$  и  $E_2=f(K_3)$  (рисунки 2.18, 2.19, 2.20). При  $n > 2$  наибольшее влияние на значение относительной величины сигнала оказывает величина  $E_3$ , при  $0 < n < 2$  переотражение (величина  $E_3$ ) и рассеяние на микронеровностях поверхности (величина  $E_2$ ) имеют одинаковый порядок.

Зависимость величины отраженного сигнала от угла падения излучения носит сложный характер, наибольшее влияние он оказывает на величину параметра  $n$ , позволяющего вычислить глубину и угол поворота плоскости симметрии трещины. Следует отметить, что геометрические характеристики пучка на выходе из трещины (ширина, направление) однозначно определяются параметром  $n$ , их зависимость от  $n$  имеет периодический характер.

В соответствии с построенной математической моделью при равенстве поперечных размеров источника излучения и приемного объектива оптимальное значение высоты расположения приемного объектива над поверхностью  $H_1/B_1 \leq 1$ . Только при выполнении этого условия излучение, переотраженное трещиной, попадает на приемный объектив.

Расходимость пучка также ограничивает высоту расположения приемного объектива, и площадь пятна отраженного от поверхности пучка на высоте  $H_1$  не должна превышать площадь приемного объектива. Следовательно, для повышения точности определения геометрических размеров дефектов поверхностного слоя необходимо установить собирающую линзу в ходе лучей отраженного поверхностью излучения, обеспечивающую соотношение  $H_1/B_1 \leq 1$ . Ее фокусное расстояние и числовая апертура определяются в зависимости от расходимости излучения источника, шероховатости и структуры поверхности [27, 42].

Погрешность определения геометрических параметров поверхностных дефектов также зависит от параметров оптической системы. Угол падения

излучения  $\alpha$  следует выбирать таким, чтобы число переотражений не превышало 6. При  $n > 6$  погрешность определения глубины трещины  $H_2$ , угла раскрытия трещины  $\gamma$ , угла поворота плоскости симметрии трещины  $\omega_1$  превышает 50%. Точность определения поперечных размеров дефектов определяется размерами пятна излучения на поверхности  $B_1$ .

Соотношение  $B_2/B_1$  характеризует соотношение размеров приемного объектива и пятна излучения на поверхности (оптическая система с высокой или низкой числовой апертурой). При выявлении трещин наиболее приемлемым является значение  $B_2/B_1=1$ , так как при  $B_2/B_1 < 1$  в соответствии с выражением (2.60) снижается точность определения геометрических параметров трещины (второе слагаемое в выражении (2.60) стремится к 0). При определении характеристик композиционных материалов в соответствии с теорией скалярной дифракции оптическая система с высокой числовой апертурой ( $B_2/B_1 > 1$ ) несет больше информации о структуре материала, чем оптическая система с низкой числовой апертурой [153-155, 158-159].

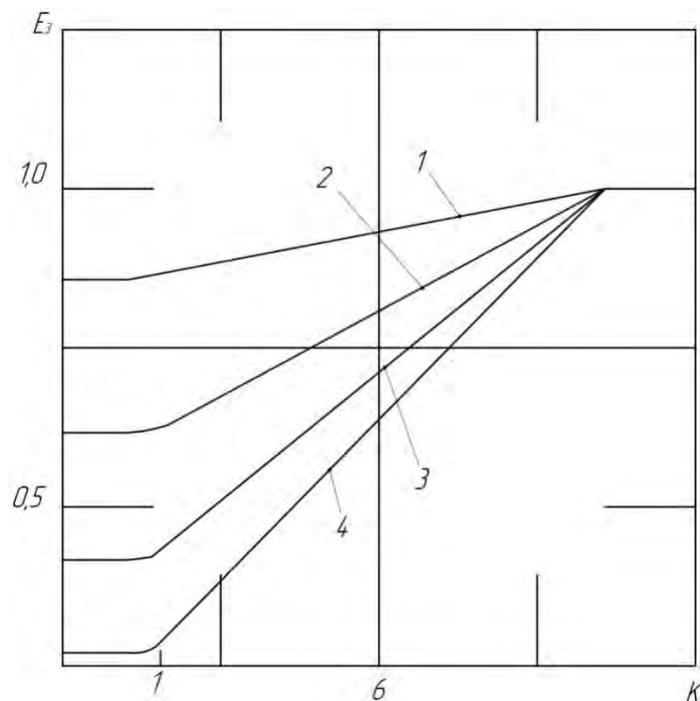


Рисунок 2.18 – Зависимость величины отраженного сигнала  $E_3$  от параметра оптической системы  $K_1$  при  $K_3 > 1:1$  – 1 –  $n=2$ , 2 –  $n=4$ , 3 –  $n=6$ , 4 –  $n=8$

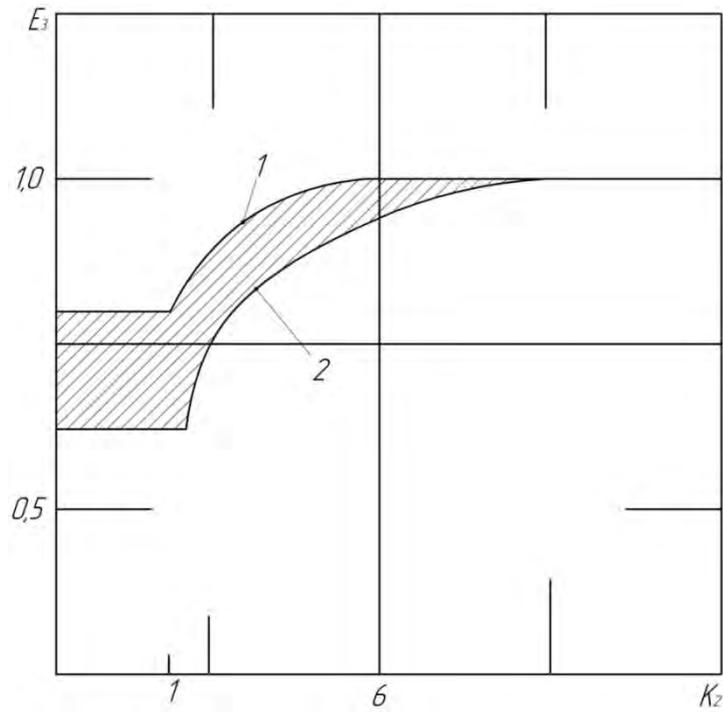


Рисунок 2.19 – Влияние параметра  $K_2$  на величину переотраженного сигнала:  
 1 –  $W_{\max}/W_0$  для  $n=2$ , 2 –  $W_{d.t.}/W_0$  для  $\alpha=30^\circ$  и  $Y=27$

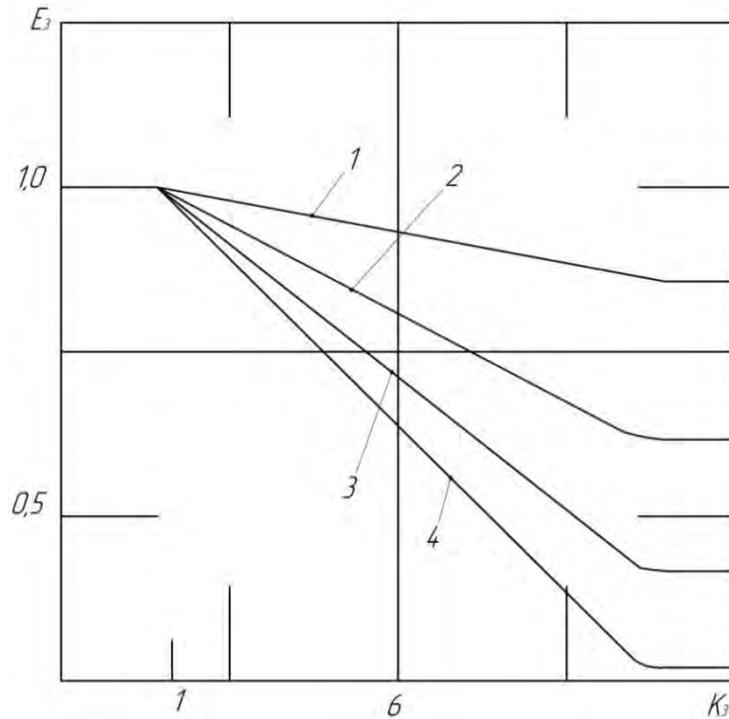


Рисунок 2.20 – Зависимость относительной величины переотраженного сигнала в центре дефекта  $E_3$  от параметра геометрии  $K_3$  при  $K_1 > 1$ : 1 –  $n=2$ , 2 –  $n=4$ , 3 –  $n=6$ , 4 –  $n=8$

Погрешность определения геометрических параметров дефектов зависит также от соотношения размеров пятна излучения на поверхности и шага сканирования [9].

Для трещин треугольной формы с произвольным положением плоскость симметрии параметр  $n$  определяется зависимостью:

$$n = \frac{\pi/2 - (\alpha \pm \varphi_1)}{\gamma} \quad (2.67)$$

Тогда

$$\frac{\partial n}{\partial \alpha} = -\frac{1}{\gamma} \quad (2.68)$$

Погрешность определения  $n$  в зависимости от погрешности задания угла падения излучения  $\Delta\alpha$  вычисляется в соответствии с зависимостью:

$$\Delta n = \sqrt{\frac{1}{\gamma^2} \Delta\alpha} = \frac{1}{\gamma} \sqrt{\Delta\alpha} \quad (2.69)$$

Результаты расчета погрешности  $\Delta n$  от  $\Delta\alpha$  показаны на рисунке 2.21.

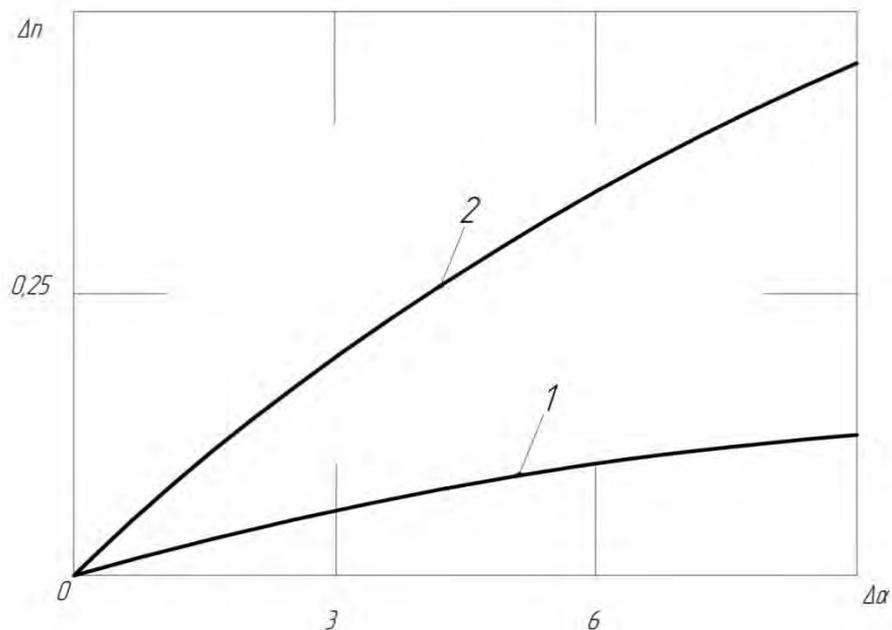


Рисунок 2.21 – Погрешность определения  $n$  в зависимости от погрешности заданного угла падения излучения  $\Delta\alpha$ : 1 –  $\gamma=30^\circ$ , 2 –  $\gamma=7,5^\circ$

Из полученной зависимости видно, что погрешность задания угла падения излучения наиболее существенно влияет на точность определения параметра  $n$  для глубоких трещин (трещин с малым углом раскрытия). Для таких элементов поверхности погрешность определения геометрических параметров максимальна. Так, при  $\alpha=30^\circ$  и  $\Delta\alpha=6^\circ$  для трещины с углом раскрытия  $\gamma=30^\circ$  погрешность определения параметра  $n$  составляет  $\Delta n=0,2$ , погрешность определения угла раскрытия трещины составляет  $\Delta\gamma=2,8^\circ$ , погрешность определения глубины трещины составляет  $\Delta(H/S)=0,22$ . Для  $\gamma=7,5^\circ$  при  $\Delta\alpha=30^\circ$  и  $\Delta\alpha=6^\circ$ ,  $\Delta n=0,8^\circ$ ,  $\Delta\gamma=0,85^\circ$ ,  $\Delta(H/S)=1,65$ .

Рассмотрим влияние погрешности задания высоты расположения приемного объектива на точность определения относительной величины отраженного сигнала. При  $S/B_1=1$  производная  $\frac{\partial(W_2/W_0)}{\partial(H_1/B_1)}$  в соответствии с (2.60) будет иметь вид:

$$\frac{\partial(W_2/W_0)}{\partial(H_1/B_1)} = -A^{n-1}T \cos\alpha \frac{(tg\alpha - tg\beta_n)}{\left(1 - 0,5(1 - 1/\cos\alpha)\frac{1}{T}\right)}. \quad (2.70)$$

Тогда погрешность определения интенсивности излучения переотраженного трещиной описывается выражением:

$$\Delta\left(\frac{W_2}{W_0}\right) = -A^{n-1}T \cos\alpha \frac{(tg\alpha - tg\beta_n)}{\left(1 - 0,5(1 - 1/\cos\alpha)\frac{1}{T}\right)} \sqrt{\Delta\frac{H_1}{B_1}}. \quad (2.71)$$

Результаты расчета погрешности  $\Delta(W_2/W_0)$  от  $\Delta(H_1/B_1)$  показаны на рисунке 2.22.

Как следует из рисунка 2.22, погрешность задания высоты расположения приемного объектива  $\Delta(H_1/B_1)$  наиболее существенно влияет на интенсивность переотраженного излучения для неглубоких трещин ( $n < 3$ ). Так,  $\Delta(H_1/B_1)=1$  при  $n=2,2$  ( $\alpha=30^\circ$ ,  $\gamma=27^\circ$ ) приводит к снижению относительной величины отраженного сигнала ( $W_2/W_0$ ) на 0,16. При  $n=8,8$  ( $\alpha=30^\circ$ ,  $\gamma=6,8^\circ$ ,  $\Delta(H_1/B_1)=1$ ) приводит к снижению относительной величины отраженного сигнала ( $W_2/W_0$ ) на 0,05.

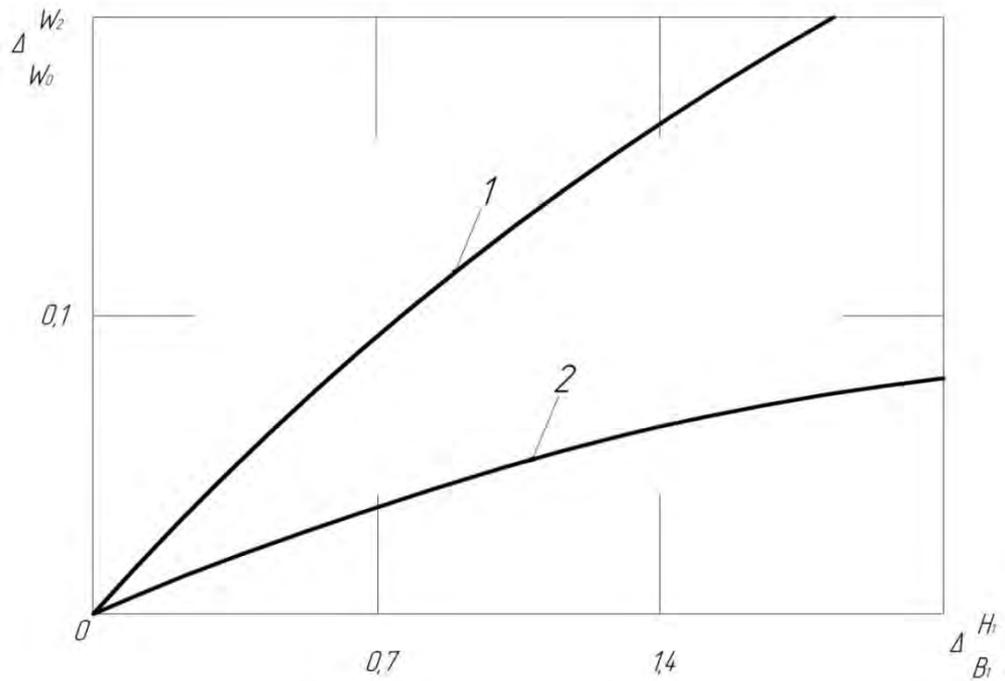


Рисунок 2.22 – Погрешность определения  $\Delta(W_2/W_0)$  и зависимости от погрешности задания  $\Delta(H_1/B_1)$ : 1 –  $n=2,2$ ; 2 –  $n=8,8$

Таким образом, на точность определения геометрических характеристик элементов поверхности, ведущих к переотражению излучения, наибольшее влияние оказывают точность задания угла падения излучения (а также угла установки приемного объектива)  $\Delta\alpha$  и точность задания высоты расположения приемного объектива  $\Delta(H_1/B_1)$ .

Источниками шумов являются также флуктуации мощности и оси диаграммы направленности источника излучения, электронные шумы детектора и усилителя, механические шумы, связанные с точностью установки оптических элементов и механическими вибрациями. Для учета флуктуаций интенсивности источника излучения необходимо формирование опорного канала [144, 145, 153, 154].

Другие факторы могут быть учтены при экспериментальном определении уровня шумов в системе. Для этого регистрируется в течение нескольких часов сигнал, отраженный от поверхности с известной шероховатостью. Обычно сигнал имеет Гауссово распределение. Определение величины разброса сигнала при известной чувствительности фотодетектора позволяет определить

неопределенность в величине сигнала, соответствующую уровню шумов в системе.

В соответствие с формулой (2.18) среднеквадратическое отклонение величины сигнала определяется как

$$\sigma_w^2 = \left(\frac{\partial W}{\partial B_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial W}{\partial \alpha}\right)^2 + \left(\frac{\partial W}{\partial x}\right)^2; \quad (2.72)$$

$B_1$  – диаметр пятна на поверхности конструкционного материала,  $\alpha$  – угол падения излучения на поверхность,  $x$  – координата перемещения по поверхности.

Величины, входящие в формулу (2.72)

$$\begin{aligned} \frac{\partial W}{\partial B_1} &= -B_1^2(x - 2A_1x + 2A_1tg\gamma) \cos \alpha, \\ \frac{\partial W}{\partial \alpha} &= -\sin \alpha \frac{1}{B_1}(x - 2A_1x + 2A_1H_2tg\gamma), \\ \frac{\partial W}{\partial x} &= \frac{\cos \alpha}{B_1}(-1 + 2A_1). \end{aligned} \quad (2.73)$$

Построены зависимости среднеквадратического отклонения от параметров зондирующего пучка (рисунки 2.23 – 2.31).

Влияние диаметра пятна  $B_1$  оказывается наиболее значительным при  $B_1/S < 1$  при  $n > 2$  и  $\Delta n > 0,3$  в диапазоне углов раскрытия трещины  $27...45^\circ$ , что соответствует изменению расходимости излучения в диапазоне  $2...3^\circ$  и диаметра пятна на уровне  $10...15\%$ . Влияние угла падения излучения становится существенным при  $\Delta n > 0,5$ , что соответствует отклонению угла падения излучения в диапазоне  $3...5^\circ$  при  $\alpha = 30...45^\circ$  и  $\gamma = 27...45^\circ$ .

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  $5^\circ$ , расходимость не более  $2\dots3^\circ$ , диаметра – не более 10%, отклонения мощности излучения не более 5%.

Для учета неоднородности отражательной способности обработку результатов измерений целесообразно проводить сопоставлению со средним уровнем сигнала. Резкое снижение сигнала на величину свыше 10% говорит о наличии дефекта или иного элемента геометрии поверхности.

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  $5\dots10\%$ .

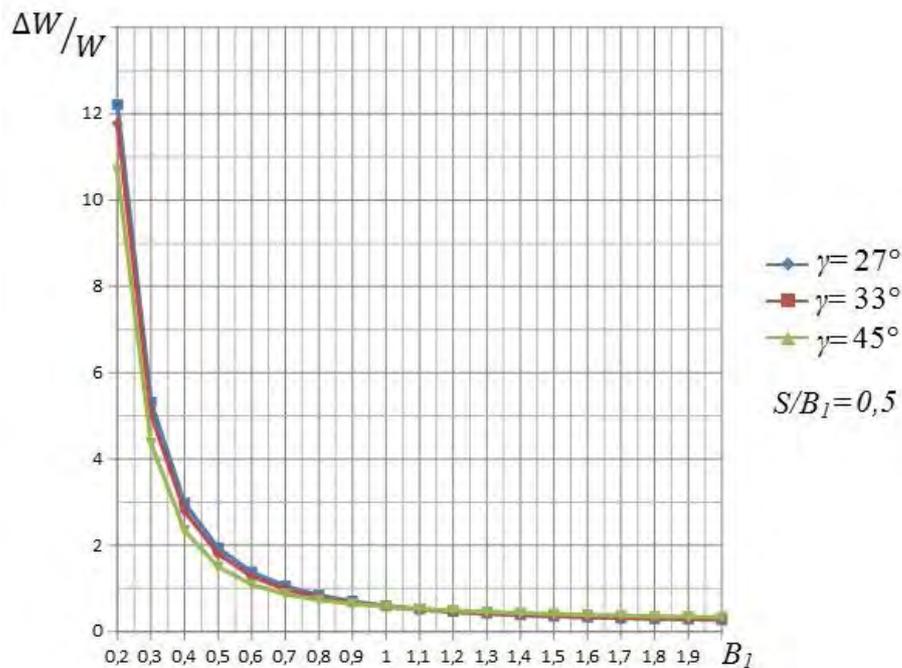


Рисунок 2.23 – Зависимость относительной погрешности определения величины отраженного сигнала от точности задания диаметра пятна  $B_1$  при  $S/B_1=0,5$

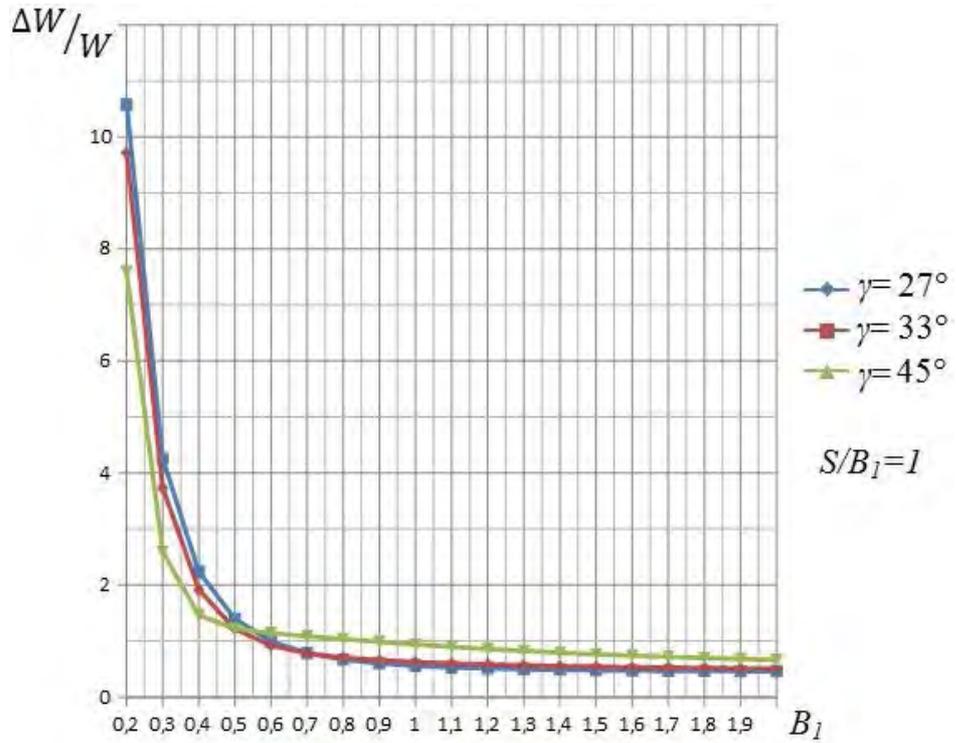


Рисунок 2.24 – Зависимость относительной погрешности определения величины отраженного сигнала от точности задания диаметра пятна  $B_1$  при  $S/B_1=1,0$

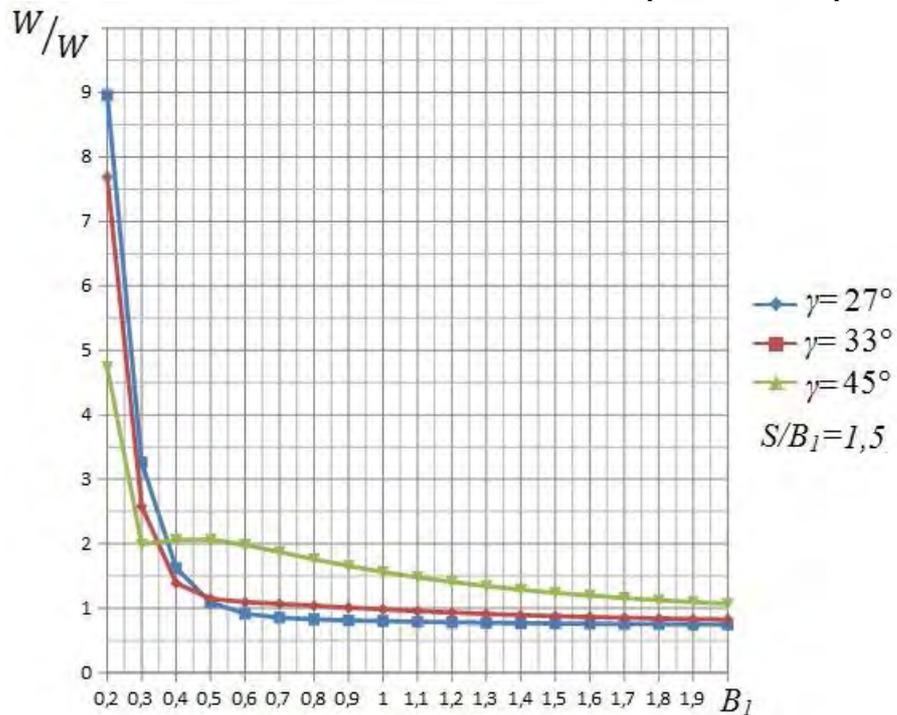


Рисунок 2.25 – Зависимость относительной погрешности определения величины отраженного сигнала от точности задания диаметра пятна  $B_1$  при  $S/B_1=1,5$

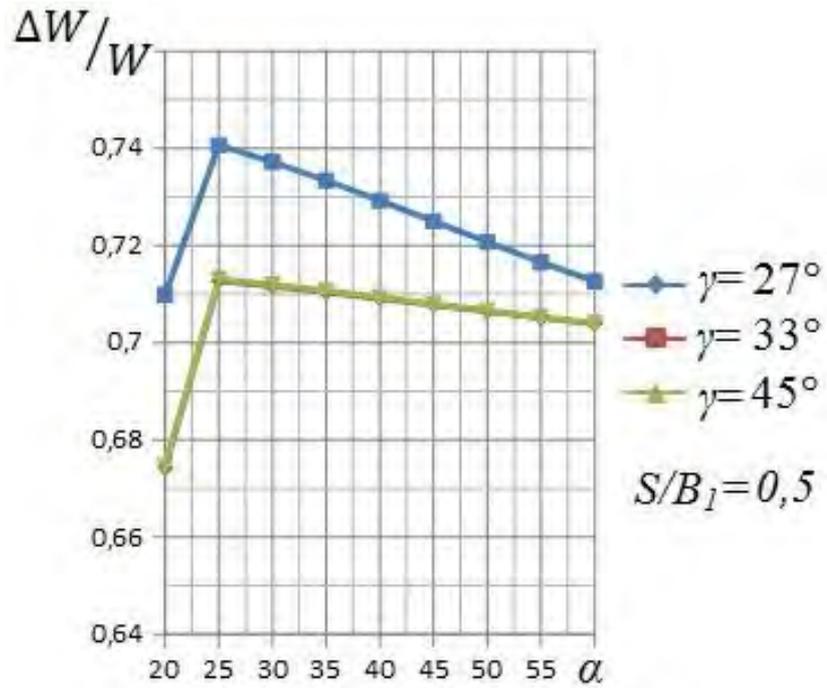


Рисунок 2.26 – Зависимость относительной погрешности определения величины отраженного сигнала от точности задания угла падения излучения на поверхность  $\alpha$  при  $S/B_1=0,5$

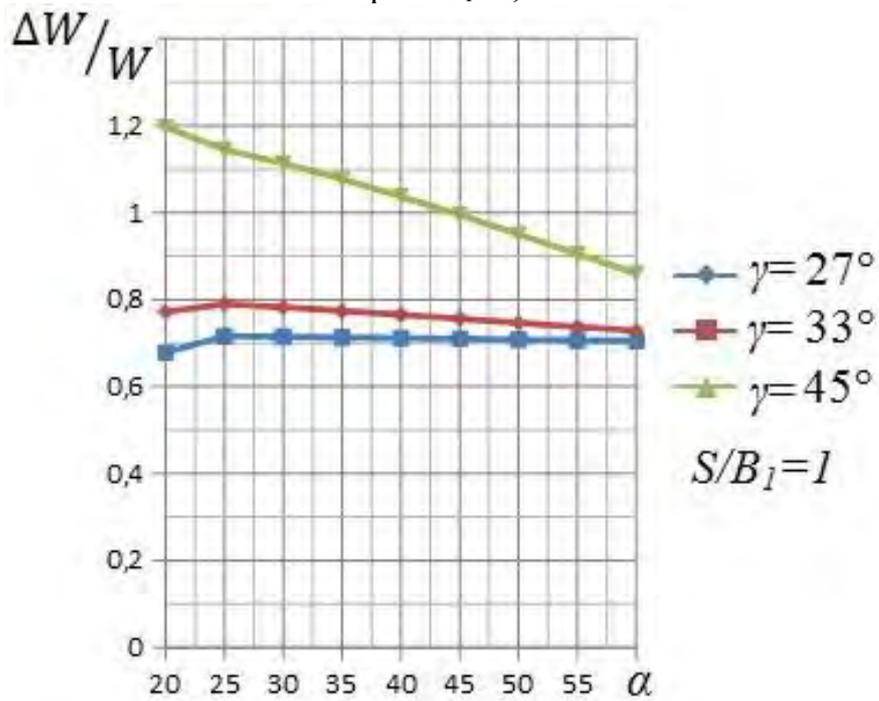


Рисунок 2.27 – Зависимость относительной погрешности определения величины отраженного сигнала от точности задания угла падения излучения на поверхность  $\alpha_1$  при  $S/B_1=1,0$

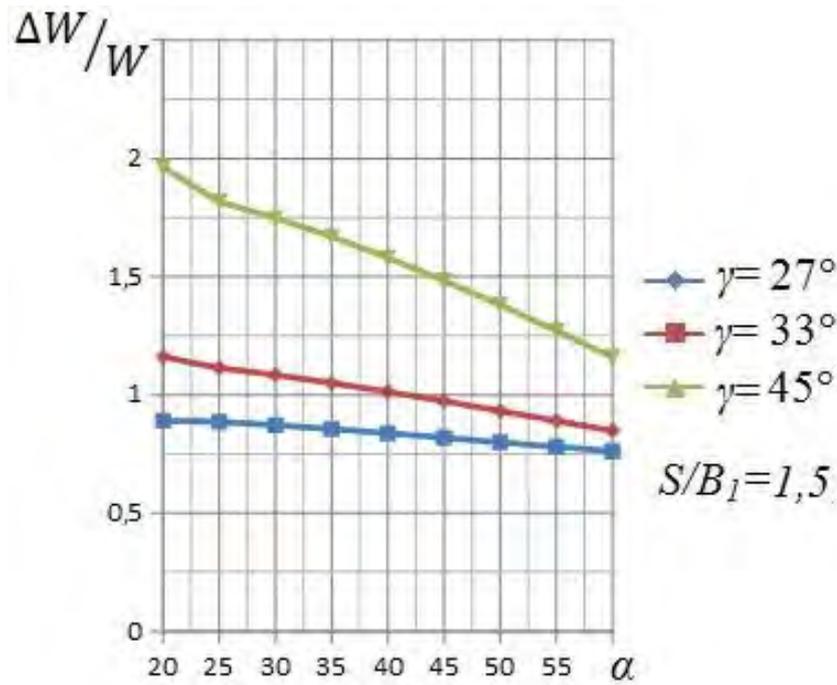


Рисунок 2.28 – Зависимость относительной погрешности определения величины отраженного сигнала от точности задания угла падения излучения на поверхность  $\alpha_1$  при  $S/B_1=1,5$

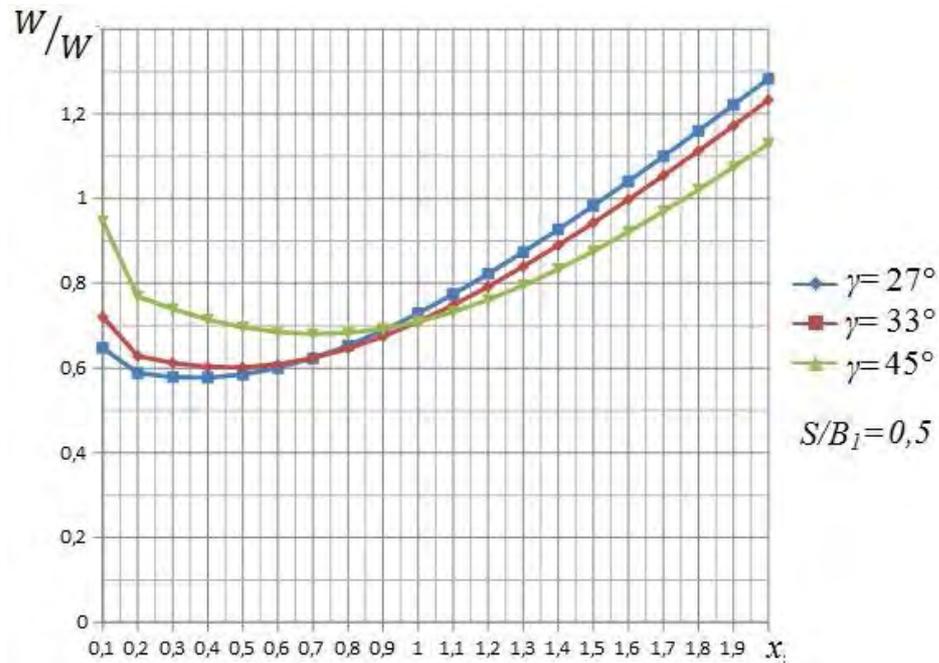


Рисунок 2.29 – Зависимость относительной погрешности определения величины отраженного сигнала от точности задания координаты перемещения  $x_1$  при  $S/B_1=0,5$

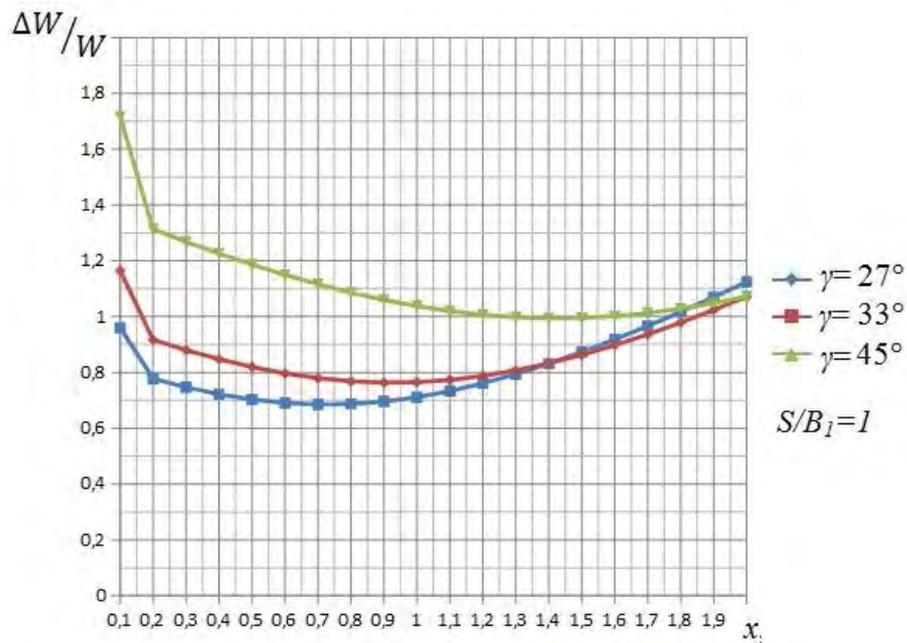


Рисунок 2.30 – Зависимость относительной погрешности определения величины отраженного сигнала от точности задания координаты перемещения  $x_1$  при  $S/B_1=1,0$

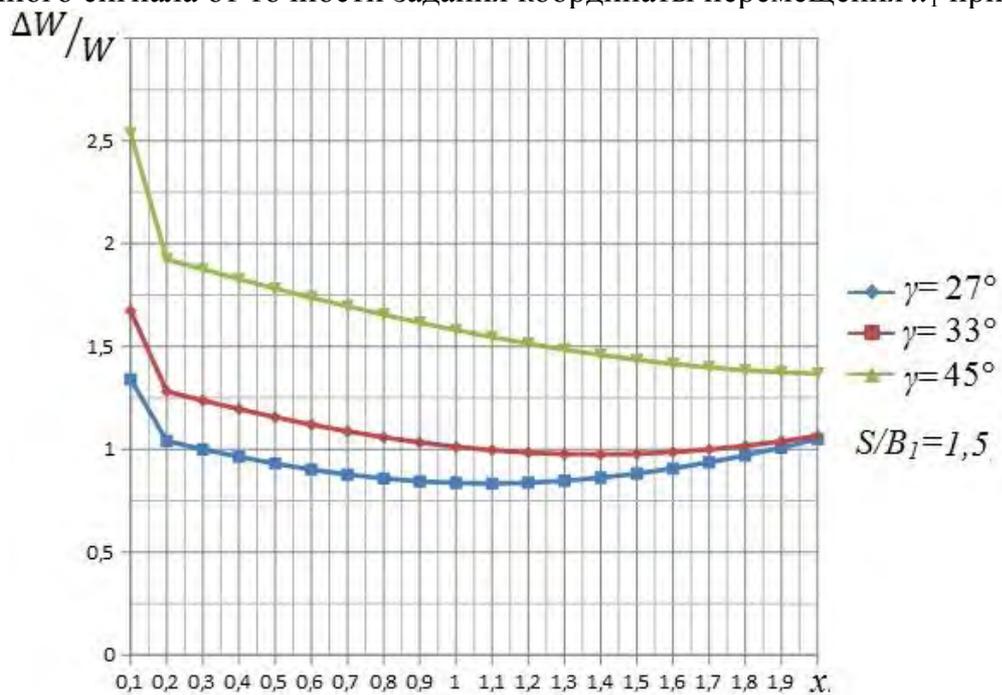


Рисунок 2.31 – Зависимость относительной погрешности определения величины отраженного сигнала от точности задания координаты перемещения  $x_1$  при  $S/B_1=1,5$

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  $0,5S$ . При измерении диффузной составляющей излучения флуктуации расходимость излучения не должны 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 главе 4.

## Выводы по главе 2

1. Построены структурная и обобщенная математическая модель сигнала для лазерно-электронной системы дистанционного зондирования поверхности, описывающая величину отраженного сигнала в зависимости от параметров подсветки.

2. Выявлены безразмерные критерии, определяющие характер процесса отражения излучения и влияние параметров лазерного излучения на величину сигнала. Они позволяют установить энергетическое соответствие зондирующих сигналов геометрическим параметрам элементов поверхности и однозначно определить геометрию поверхности:  $K_1$  – параметр оптической системы,  $K_2$  – определяет разрешающую способность оптической системы,  $K_3$  – параметр элемента поверхности.

3. Наибольшее изменение величины сигнала ( $30...85\%$ ) определяется зеркальной составляющей (в зависимости от значения числа переотражений).

Изменение диффузной составляющей составляет 5...30% в зависимости от показателя индикатрисы и параметра  $K_3$ .

4. Основной характеристикой элемента поверхности является параметр  $n$ , который численно равен числу переотражений. Его характерные значения: глубокие трещины –  $n > 6$ , неглубокие трещины –  $2 < n < 6$ , царапины –  $n < 2$ , износ поверхности –  $0 < n < 1$ , окисная пленка на поверхности –  $n \approx 0$ .

5. Построены зависимости зеркальной и диффузной составляющей отраженного излучения в зависимости от выявленных безразмерных параметров исследуемой поверхности и лазерного излучения. Выявлена периодическая зависимость амплитуды отраженного сигнала от параметра  $n$ . При этом измерение  $n_1$  и  $n_2$  при двух различных углах падения излучения однозначно определяет геометрию элементов поверхности.

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  $5^\circ$ , расходимость не более  $2...3^\circ$ , диаметра – не более 10%, отклонения мощности излучения не более 5%.

7. 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  $0,5S$ . При измерении диффузной составляющей излучения флуктуации расходимость излучения не должны превышать  $2...3^\circ$ , что соответствует изменению относительной величины сигнала на уровне 10...15%.

### **3 Численное моделирование процессов обнаружения и распознавания элементов поверхности при отражении лазерного излучения**

#### **3.1 Основные типы измерительных систем и их характерные признаки**

Для определения требуемого комплекса измеряемых величин рассмотрены основные типы измерительных систем, используемые для решения задач оценки состояния поверхности в авиакосмической отрасли их характерные признаки [158, 194, 196]:

- Дефектоскопические системы. Известна априорная вероятность наличия дефектов того или иного вида. Удаление поверхности от источника излучения значительно меньше длины когерентности. Наиболее информативные признаки – измерение зеркальной составляющей для оценки геометрических характеристик, определение индикатрисы рассеяния для определения шероховатости;

- Ботовой анализатор системы посадки. Априорная вероятность наличия объектов мало известна или неизвестна. Удаление зондируемой поверхности от источника излучение соизмеримо с длиной когерентности. Снижена вероятность распознавания по зависимости отражательной способности от длительности и скважности импульсов. Одновременное измерение зеркальной и диффузной составляющих;

- Обнаружение объектов в космическом пространстве. В этом случае не удается исследовать зависимость отражательной способности и индикатрисы рассеяния от длительности и скважности импульсов. Измерение проводится в дальней зоне, размеры диаметра пучка превышают размеры объекта и его элементов. Преимущественно проводится измерение диффузной составляющей при нескольких длинах волн и углах падения излучения.

Таблица 3.1 – Основные типы лазерных измерительных систем оценки состояния поверхности [164]:

Характерные признаки	Измерительные системы		
	1	2	3
Априорная вероятность наличия сигнала	Известна, % брака 15...40%	2...25%	Неизвестна
Удаление от поверхности/Длина когерентности	<1	>>1	≤1
$K_1$	>1 (<1)	>1	>1
$K_2$	<1	>1	>1 (<1)
Параметр	Возможность измерения		
Зависимость зеркальной составляющей от угла падения и координаты	Да	Нет	Да
Зависимость зеркальной составляющей от диаметра пятна	Да	Нет	Да
Зависимость диффузной составляющей от угла падения	Да	Нет	Да
Зависимость диффузной составляющей от длины волны излучения	Да	Да	Да
Зависимость диффузной составляющей от длительности и скважности импульса	Да	Нет	Да
Зависимость диффузной составляющей от температуры	Да	Да	Да
ЭПР	Да	Да	Да
Зависимость диффузной составляющей от плотности мощности	Да	Да	Да
Область применения	Дефектоскопия	Обнаружение спутника с Земли	Бортовой анализатор системы посадки ЛА

Задача ОЭС в режиме обнаружения – выдача решения о наличии или отсутствии объекта поиска в ее поле зрения. Источником информации, которая может быть использована для принятия решения, является яркостное поле пространства предметов. В общем случае это поле имеет полихроматический

спектр излучения и случайное пространственное распределение яркости, зависящее от времени.

За счет сканирования (в сканирующих ОЭС) или с помощью модулятора анализатора изображения (в следящих ОЭС) излучение элементов предметного пространства, находящихся в поле зрения системы, преобразуется в одномерную реализацию случайного процесса (рисунок 3.1).

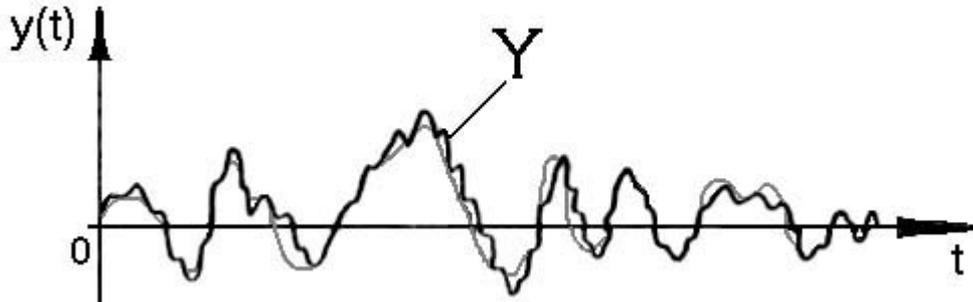


Рисунок 3.1 – Пример преобразования излучения элементов предметного пространства в одномерную реализацию случайного процесса

Такая реализация  $Y=y(t)$  – либо комбинация полезного сигнала  $s(t)$  с фоновой помехой  $n(t)$  (если объект поиска находится в пределах поля зрения ОЭС), либо результат действия одной помехи  $n(t)$ , если объекта в поле зрения нет). В общем случае сигнал  $s(t)$  и помеха  $n(t)$  – случайные функции времени (случайные процессы).

На практике часто смесь сигнала с шумом представляет собой их алгебраическую сумму

$$y(t)=s(t)+n(t) , \quad (3.1)$$

то есть сигнал и шум аддитивны. При мультипликативном характере полезного сигнала и помехи их смесь можно представить функцией

$$y(t)=[s(t),n(t)]. \quad (3.2)$$

Для анализа реализации можно сделать выборку значений  $y_i=y(t_i)$  через определенные интервалы времени в течении периода  $T$ . Выборку значений  $y(t_i)$ , то есть совокупность отчетов  $y_i$  за время от 0 до  $T$ , обозначим  $Y$ . При аддитивности сигнала и шума  $y_i=s_i+n_i$ , где  $s_i$  и  $n_i$  – значения сигнала и шума в момент времени  $t_i$ .

Сущность решения задачи обнаружения в ОЭС состоит в такой обработке уже полученной в результате опыта реализации  $Y=y(t)$  (или апостериорной выборки значений  $y_i=y(t_i)$ ), описывающей последовательность значений напряжения или тока на входе в электронный тракт обработки сигнала, которая дала бы ответ – присутствует или нет в этой выборке полезный сигнал  $s(t)$ .

Сигнал и помеха в общем случае являются случайными функциями, поэтому такими отличительными априорными признаками могут быть их среднестатистические характеристики и параметры: функции плотности вероятности, моменты первого, второго и более высоких порядков, корреляционные функции и так далее. Их определяют в результате исследования полезных сигналов и помех.

Например, в результате статистической обработки сигналов на входе в электронный тракт ОЭС аналогичного назначения и работающих в сходных ситуациях и режимах, либо путем разработки математических моделей сигнальной обстановки, созданных на основании подобных математических и физических моделей и гипотез.

Однако, даже зная эти характеристики и параметры полезных сигналов  $s(t)$  и помех  $n(t)$ , в силу их случайной природы нельзя предусмотреть или воссоздать при моделировании все конкретные выборки  $Y=y(t_i)$ , которые могут быть получены в опытах по обнаружению. Кроме того, при ограниченном времени наблюдения и при недостаточно достоверной априорной информации о сигналах  $S(t)$  и помехах  $n(t)$ , статистические характеристики и параметры реально полученной апостериорной выборки  $y(t_i)$  могут существенно отличаться от их априорно разработанной математической модели.

Поэтому задача обнаружения, как говорилось выше, может быть решена лишь в вероятностном плане: судить о наличии полезного сигнала  $s(t)$  в конкретной выборке  $Y$  можно только с некоторой степенью достоверности.

Если априорные статистические характеристики полезного сигнала и помех известны, процедура обнаружения может быть разделена на два этапа.

На первом этапе производится оптимальная (по некоторому выбранному критерию) обработка полученной апостериорной выборки  $Y$ , позволяющая наиболее эффективно пропустить в последующие устройства сигнал  $s(t)$  и максимально подавить помеху  $n(t)$ . На втором этапе тоже по некоторому критерию принимается решение о наличии или нет полезного сигнала в конкретно полученной выборке.

Для рассмотренных типов измерительных систем построены зависимости вероятности обнаружения и вероятности ложной тревоги от соотношения сигнал/шум и разных значений порогового отношения правдоподобия, которые определялись в соответствии с данными таблицы 3.1 (1 – локация с борта летательного аппарата; 4 – локация в космическом пространстве; 9, 19 – поверхностная дефектоскопия) для детерминированного сигнала (рисунок 3.2) [158, 177, 194].

В соответствии с построенными зависимостями, увеличение соотношения сигнал/шум в интервале 2...5 приводит к росту вероятности обнаружения на 20...50% в зависимости от типа измерительной системы (20 – для локации с борта летательного аппарата, 50 – промышленная дефектоскопия).

Величина порогового сигнала определяется зависимостью [127]:

$$y_{\pi} = (1 / s_{\max}) [s^2 (S_{\max}/N) \ln L_{\pi} + (s^2_{\max}/2)] = S_{\max} \ln L_{\pi} + 0,5 S_{\max}, \quad (3.3)$$

где  $L_{\pi}$  – пороговое отношение правдоподобия, зависит от назначения измерительной системы:  $L_{\pi}=q/p$ ,  $p$  – априорная вероятность наличия сигнала,  $q$  – априорная вероятность отсутствия сигнала.

Для рассмотренных типов измерительных систем характерны следующие значения порогового отношения правдоподобия: для локации с борта летательного аппарата  $L_{\pi}=q/p=0,5/0,5=1$ , для обнаружения используется критерий максимума правдоподобия; для дефектоскопии  $L_{\pi}=q/p=0,95/0,05=19$ ; для локации в космическом пространстве  $L_{\pi}=q/p=0,9/0,1=9$ .

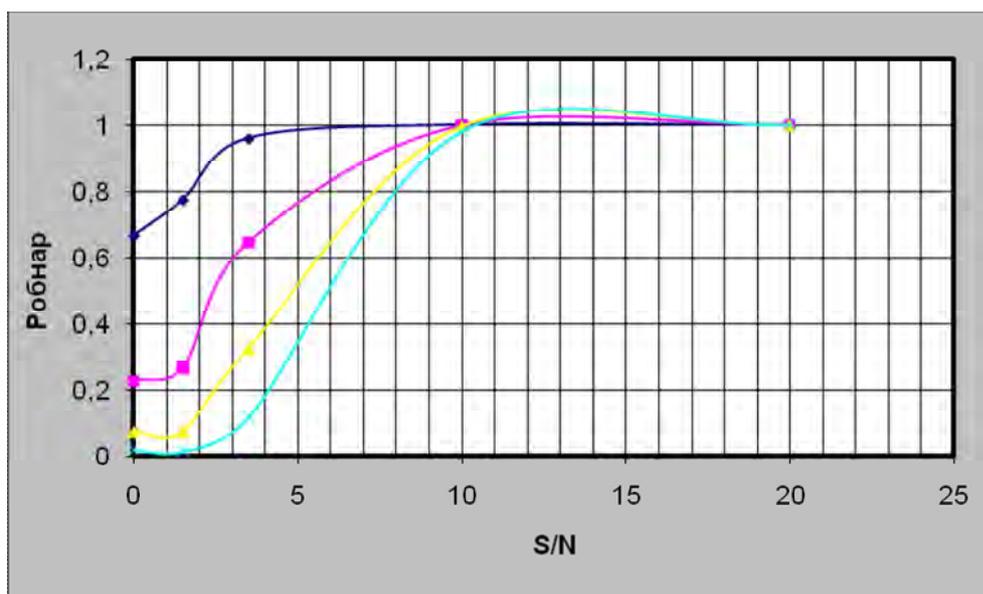


Рисунок 3.2 – Зависимость вероятности обнаружения от соотношения сигнал/шум для различных типов измерительных систем: 1 – локация с борта летательного аппарата, 2 – локация в космическом пространстве, 3, 4 – поверхностная дефектоскопия

### 3.2 Определение необходимого числа и длительности прогонов при проведении численного моделирования

Имитационное моделирование – наиболее мощный и универсальный метод исследования и оценки эффективности систем, поведение которых зависит от воздействия случайных факторов. К таким системам можно отнести и летательный аппарат, и популяцию животных, и предприятие, работающее в условиях слабо регулируемых рыночных отношений.

В основе имитационного моделирования лежит статистический эксперимент (метод Монте-Карло), реализация которого практически невозможна без применения средств вычислительной техники. Поэтому любая имитационная модель представляет собой в конечном счете более или менее сложный программный продукт.

На разработку специфических процедур обеспечения статистического эксперимента (генерация случайных воздействий, планирование эксперимента, обработка результатов) может уйти времени и сил не меньше, чем на разработку собственно модели системы.

Во многих практических задачах интерес представляет не только (и не столько) количественная оценка эффективности системы, сколько ее поведение в той или иной ситуации. Для такого наблюдения исследователь должен располагать соответствующими «смотровыми окнами», которые можно было бы при необходимости закрыть, перенести на другое место, изменить масштаб и форму представления наблюдаемых характеристик и т.д., причем не дожидаясь окончания текущего модельного эксперимента.

Вместе с тем в настоящее время на российском рынке компьютерных технологий есть продукт, позволяющий весьма эффективно решать указанные проблемы — пакет MATLAB (версии 6 или 7), содержащий в своем составе инструмент визуального моделирования SIMULINK.

Проведено статистическое моделирование процессов обнаружения и распознавания с помощью MATLAB 7.5 (Statistic tool box) [198].

Цель исследования – численное моделирование процессов дистанционного зондирования поверхностей ЛА и ГТД с целью определения вероятности обнаружения и распознавания объектов и погрешности данных измерительных систем от параметров измерительной системы (диаметр пятна, угол падения излучения, высота расположения приемного объектива, диаметр приемного устройства и др.).

Структурная схема процесса численного моделирования представлена на рисунке 3.3.

В соответствии с имеющимися аналитическими зависимостями определяется относительная величина составляющей сигнала для диффузной или зеркальной составляющей [153, 159, 195, 198].

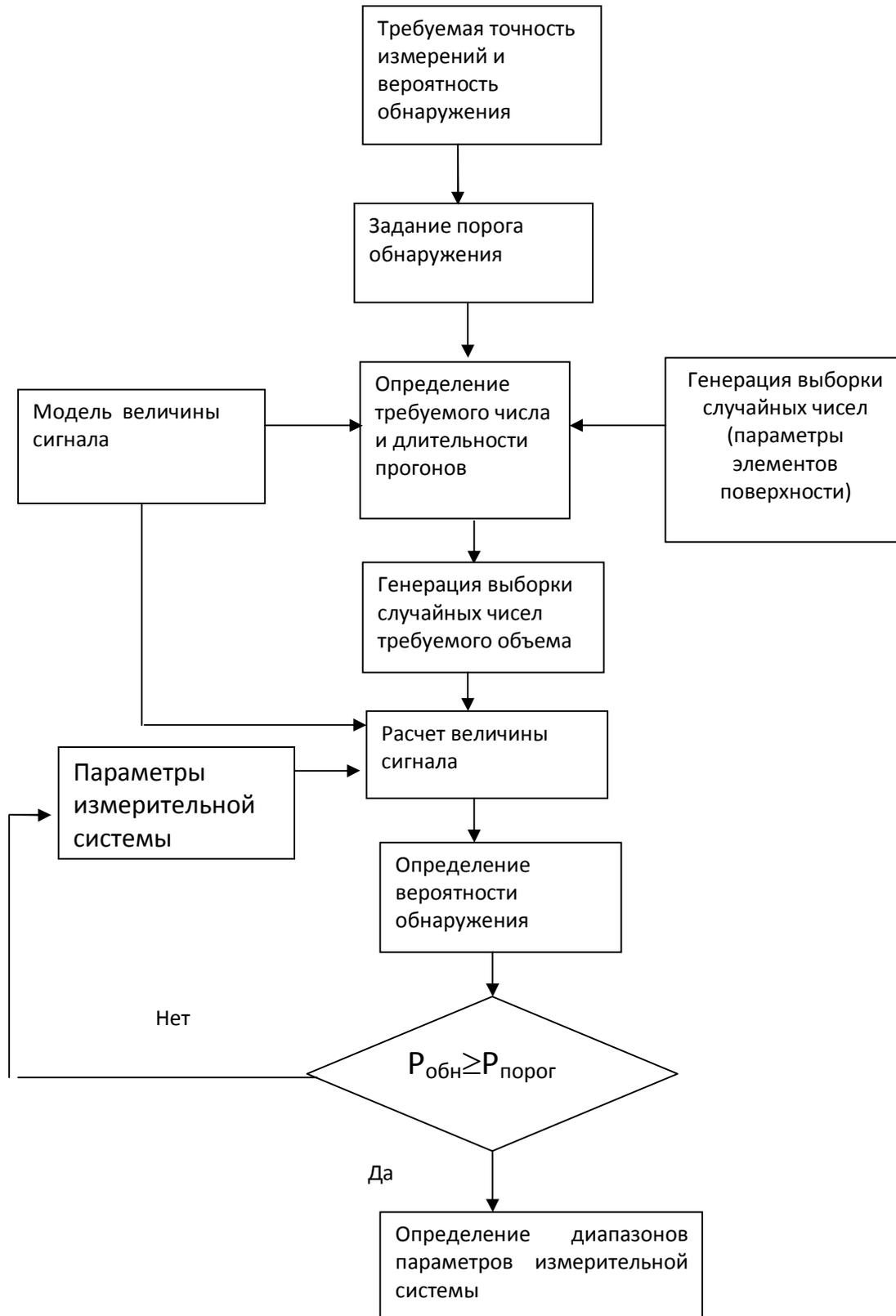


Рисунок 3.3 – Структурная схема процесса численного моделирования

Рассчитанная величина сравнивается с величиной порога обнаружения. Величина порога обнаружения задается исходя из уровня априорной информации. Для определения порога обнаружения также необходимо знать шумовую составляющую сигнала, которая определяется экспериментально и включает в себя величину нестабильности мощности источника излучения, его длины волны излучения, влияние формы пятна излучения на поверхности, стабильность оси диаграммы направленности, шумы приемника излучения, вариации отражательной способности зондируемой поверхности, влияние внешних возмущений (вибрации и др.).

На первом этапе определяются аналитические зависимости составляющих сигнала (зеркальной и диффузной) от параметров системы измерения и характеристик поверхности с учетом выявленных безразмерных параметров (аналитическое моделирование). Определяется требуемый объем выборки для достижения требуемой вероятности обнаружения при изменении диаметра пятна на поверхности [198].

Для проведения численного моделирования статистическими методами (метод Монте-Карло) берутся выборки случайных чисел, соответствующие параметрам зондируемой поверхности с нормальным распределением по каждому из определяемых признаков.

Далее задается условия принятия решения при сравнении полученной величины с пороговой. Определяется вероятность обнаружения по данному признаку. Определяется область наилучших значений параметров измерительной системы, при которых достигается требуемая вероятность обнаружения по данному признаку. Вероятность распознавания по совокупности параметров определяется как вероятность сложного события.

Задаются диапазоны изменения параметров системы измерения и при неизменных выборках из случайных чисел для каждого набора значений параметров измерительной системы.

Строятся зависимости вероятностей обнаружения и распознавания (погрешностей) измерительной системы от значений параметров измерительной системы.

Затем строятся зависимости вероятности распознавания от числа измеряемых параметров и определяется для каждой локационной ситуации оптимальное число признаков, при котором достигается требуемое значение вероятности распознавания. Данное число измеряемых признаков соответствует оптимальному разбиению пространства признаков. Целью данного исследования является достижение требуемых значения вероятности распознавания при оптимальном разбиении пространства признаков.

Строятся зависимости выявленных критериев эффективности системы зондирования от параметров измерительной системы.

На первом этапе статистического моделирования определялись необходимые длительность и число прогонов. Для этого были выбраны элементы поверхности с шириной  $S/B_1=0,1 \dots 1,9$ ,  $\gamma=30^\circ$ ,  $\alpha=30^\circ$ ,  $A_1=A_2=0,85$ ,  $B_1/H_1=0,75 \dots 1,5$ ,  $n=2, 4, 6$ , где  $S$  – ширина элемента поверхности,  $B_1$  – диаметр пятна излучения на поверхности,  $A_1$  – отражательная способность исходной поверхности,  $A_2$  – отражательная способность элемента поверхности,  $H_1$  – глубина элемента поверхности,  $n$  – число переотражений излучения в элементе поверхности,  $\gamma$  – угол раскрытия элемента поверхности,  $\alpha$  – угол падения излучения на поверхность, относительная величина порогового сигнала  $(W/W_0)_{\text{lim}}=0,15$  [158, 159, 193-194].

Для оценки необходимого числа и длительности прогонов использованы зависимости для  $n=2$ .

Были использованы зависимости, полученные при математическим моделировании процесса отражения излучения от поверхности (глава 2).

Использовался следующий порядок расчетов:

Случайная величина – ширина трещины  $S$ ,  $S = 2H_2 \text{tg} \gamma$ .

Были взяты выборки случайных чисел с нормальным распределением с объемом  $N$ .

Значение относительной ширины пятна принято равным  $B_1/H_1=1$ . Для каждого  $S$  определялось значение  $K_2 = B_1/S$ . С заданным шагом по  $x$  ( $\Delta x$ ) просчитать зависимости  $\frac{W}{W_0} = f(x)$ . Определялось значение  $\Delta \frac{W}{W_0} = 1 - \frac{W}{W_{0 \max}}$ .

Затем оно сравнивалось с пороговым значением, которое зависит от вида конструкционного материала и типа излучателя.

Было определено количество чисел из общего объема выборки со значением сигнала, выше порогового  $\Delta \frac{W}{W_{0 \text{ пор}}}$ . Полученная величина является вероятностью обнаружения для текущего значения  $K_2$ .

Далее осуществлялось определение необходимой длительности прогона, т.е. минимального значения объема выборки  $N$ , при котором дисперсия воспроизводимости численного эксперимента приближается к некоторой достаточно малой величине (почти перестает убывать). Затем определялось необходимое число прогонов (число прогонов, т.е. повторений при всех одинаковых условиях), при котором математическое ожидание величины вероятности стабилизируется.

Описанный порядок расчетов повторялся для различных значений  $B_1$ , т.е. разных значений  $K_2$ . Далее были построены зависимости  $P_{\text{обн}} = f(K_2)$ .

На данном этапе моделирования величина порогового сигнала составляла  $W_{\text{lim}}=0,15$ . Использовались аналитические зависимости, полученные в математической модели. Построены зависимости вероятности обнаружения от длительности прогонов и числа  $n$  (рисунки 3.3, 3.4) [158, 159, 193, 195].

Необходимая длительность прогона в зависимости от соотношения  $B_1/H_1$  показана в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Определение необходимой длительности прогонов

<i>n</i>			
$B_1/H_1$	2	4	6
0,75	20	25	30
1,0	40	60	80
1,5	180	140	100

На рисунках 3.4 и 3.5 показаны зависимости вероятностей обнаружения и распознавания от длительности прогона.

Необходимая длительность прогонов составляет для  $B_1=0,75$ ;  $N=30$ ; для  $B_1=1$ ;  $N=80$ ; для  $B_1=1,5$ ;  $N=100$ . Оптимальное число прогонов равно 5. В этом случае погрешность моделирования не превышает 5%.

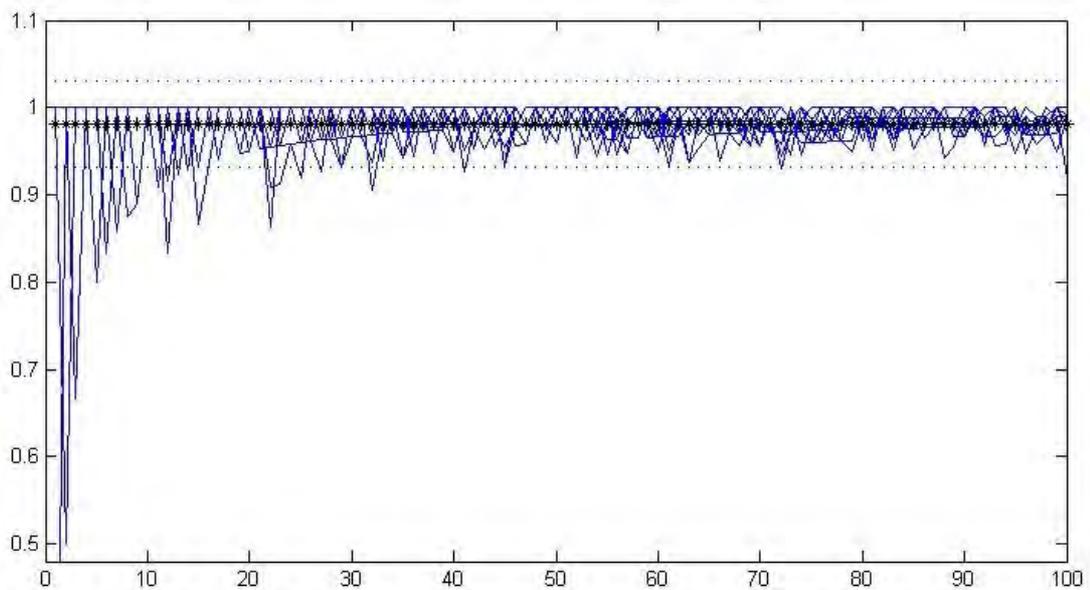


Рисунок 3.4 – Зависимость вероятности обнаружения от длительности прогонов при  $B_1/H_1=1$  и  $n=2$

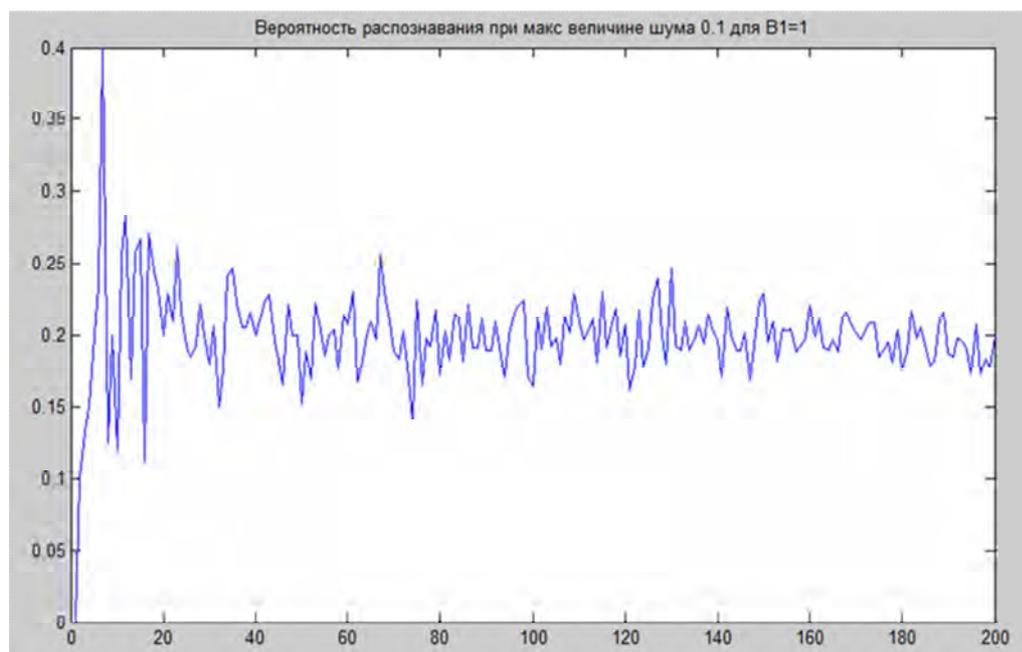


Рисунок 3.5 – Вероятность распознавания при максимальной величине шума 0,1 для  $B_1=1$  и  $n=2$

### 3.3 Определение зависимостей вероятностей обнаружения и распознавания от параметров измерительной системы и характеристик поверхностного слоя

После определения необходимого числа и длительности прогонов проводилось моделирование обнаружения и распознавания при различных значениях уровня шума, оцененных экспериментально.

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 (глава 5) и определяется стабильностью мощности излучения, оси диаграммы направленности, длины волны для выбранных типов излучателей с учетом режимов эксплуатации [152, 155, 163, 195].

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...0,25 – полупроводниковый лазер без стабилизации мощности излучения.

Расчеты проводились для случая  $\gamma=30^\circ$ ,  $\alpha=30^\circ$ ,  $A_1=A_2=0,85$ ,  $B_1=1$ ,  $H_1=1$ ,  $W_{lim}=0,15$ ,  $n=2$ . Изменялась ширина трещины, нормально распределенную в диапазоне от 0,1 до 1,9. Проводились 10 прогонов для всех графиков. Получена следующая зависимость (рисунок 3.6).

Жирной черной линией обозначено среднее значение вероятности, в данном случае оно равно 0,9811, черными пунктирами обозначена зона  $\pm 5\%$  от этого значения. Из рисунка 3.6 видно, что примерно уже с 40 погрешность моделирования не выходит из этой зоны.

Далее проведены расчеты для  $B_1=0,75$ , остальные параметры измерительной системы имеют прежние значения. Здесь уже математическое ожидание вероятности обнаружения равно 0,9927 (рисунок 3.7)

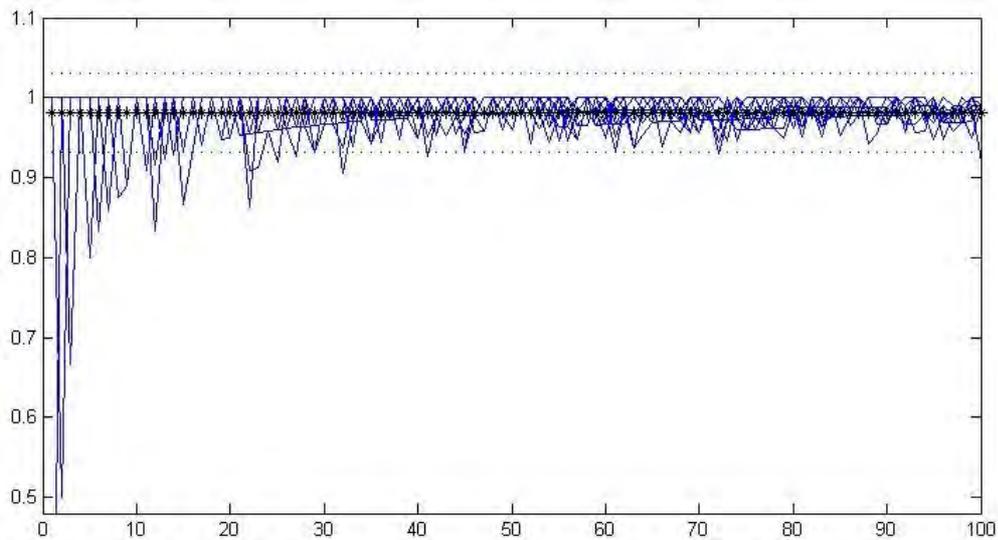


Рисунок 3.6 – Зависимость вероятности обнаружения от объема выборки при  $B_1=1$

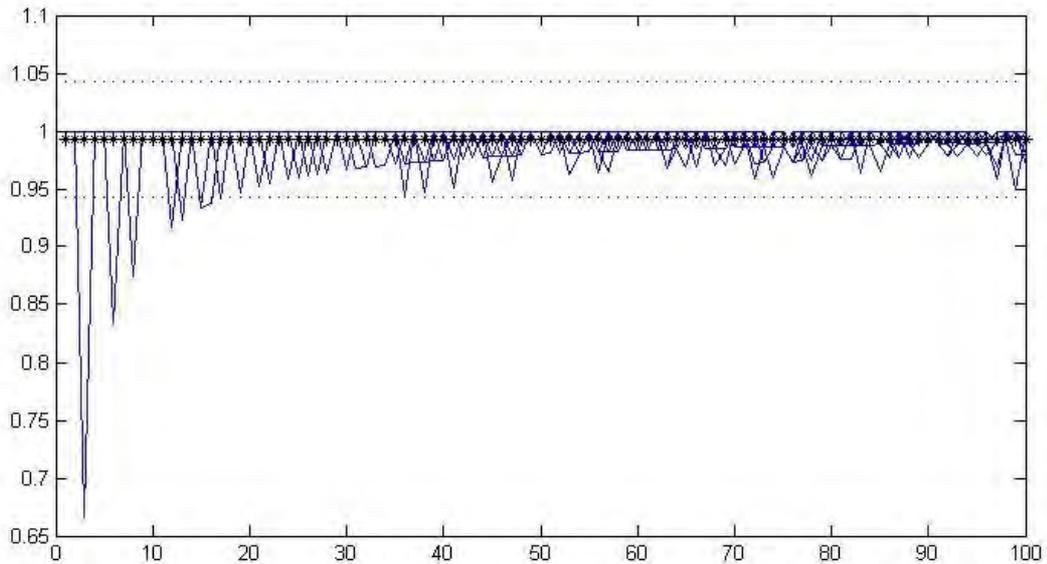


Рисунок 3.7 – Зависимость вероятности обнаружения от объема выборки при  $B_1=0,75$

Из рисунка 3.7 видно, что при данном значении  $B_1$  уже при выборке в 20 членов вероятность обнаружения не выходит из зоны  $\pm 5\%$  от 0,9927.

Значения всех параметров измерительной системы такие же, кроме  $B_1=1,5$ . Здесь уже мат. ожидание вероятности обнаружения равно 0,9332 (рисунок 3.8).

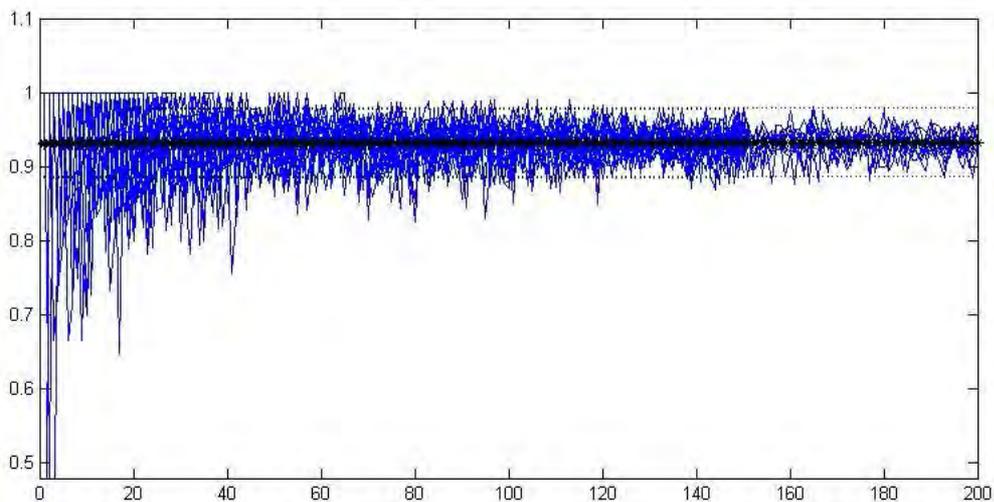


Рисунок 3.8 – Зависимость вероятности обнаружения от объема выборки при  $B_1=1,5$

Из рисунка 3.8 видно, что после 180 членов в выборке вероятность входит и больше не выходит из зоны.

Для случая  $\gamma=30^\circ$ ,  $\alpha=30^\circ$ ,  $A_1=A_2=0,85$ ,  $B_1=1$ ,  $H_1=1$ ,  $W_{\text{lim}}=0,15$ ,  $n=4$  математическое ожидание вероятности обнаружения равно 0,9332 (рисунок 3.9).

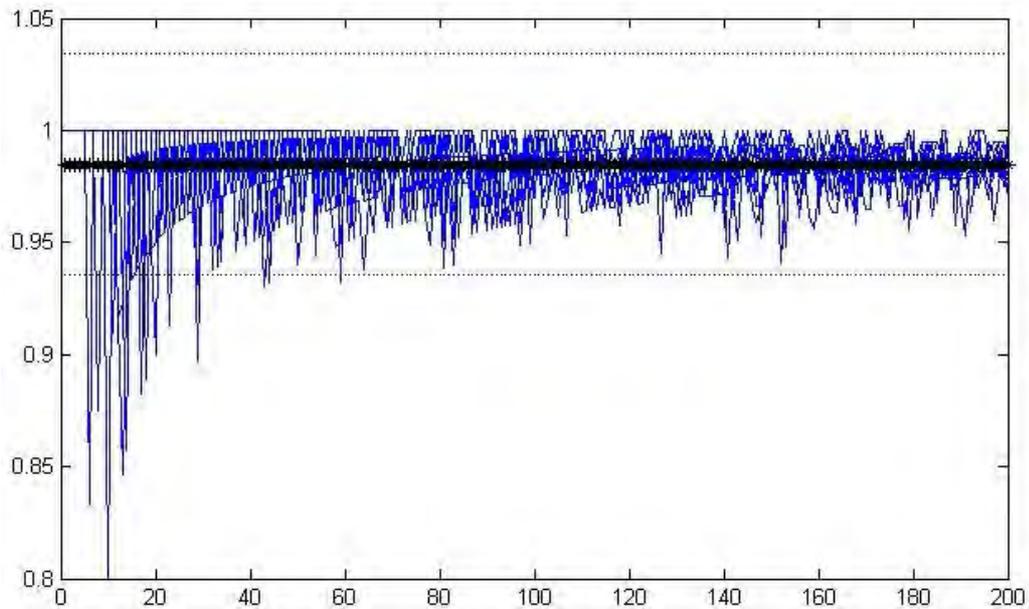


Рисунок 3.9 – Зависимость вероятности обнаружения от объема выборки при  $\gamma=30^\circ$ ,  $\alpha=30^\circ$ ,  $A_1=A_2=0,85$ ,  $B_1=1$ ,  $H_1=1$ ,  $W_{\text{lim}}=0,15$ ,  $N=4$

Изменим  $B_1$  на 0,75. Мат. ожидание вероятности 0,9928 (рисунок 3.10).

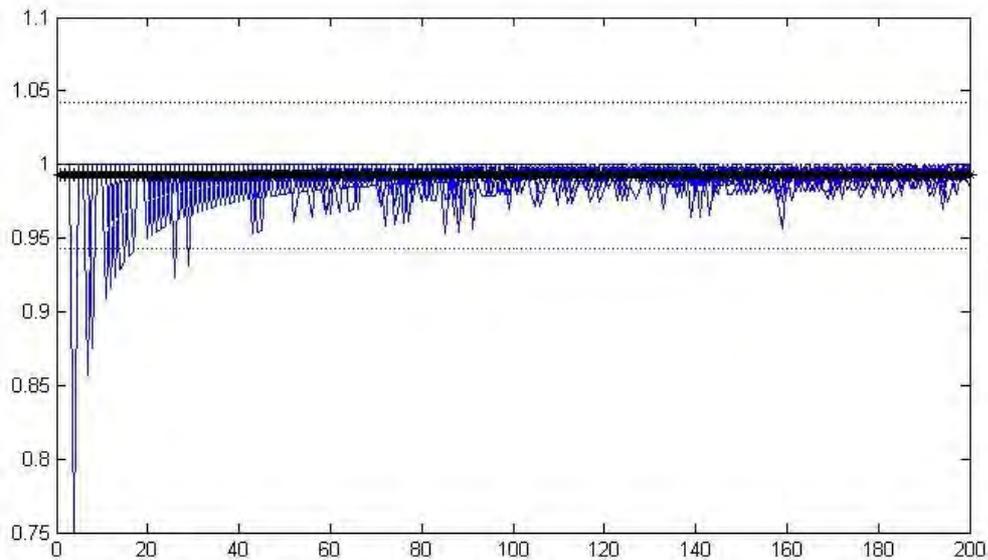


Рисунок 3.10 – Зависимость вероятности обнаружения от объема выборки при  $\gamma=30^\circ$ ,  $\alpha=30^\circ$ ,  $A_1=A_2=0,85$ ,  $B_1=0,75$ ,  $H_1=1$ ,  $W_{\text{lim}}=0,15$ ,  $N=4$

Все параметры такие же, кроме  $B_1=1,5$ . Здесь уже мат. ожидание вероятности обнаружения равно 0,9409.

Изменим  $B_1$  на 0,75. Математическое ожидание вероятности составляет 0,9954 при длительности прогона 30 (рисунок 3.11).

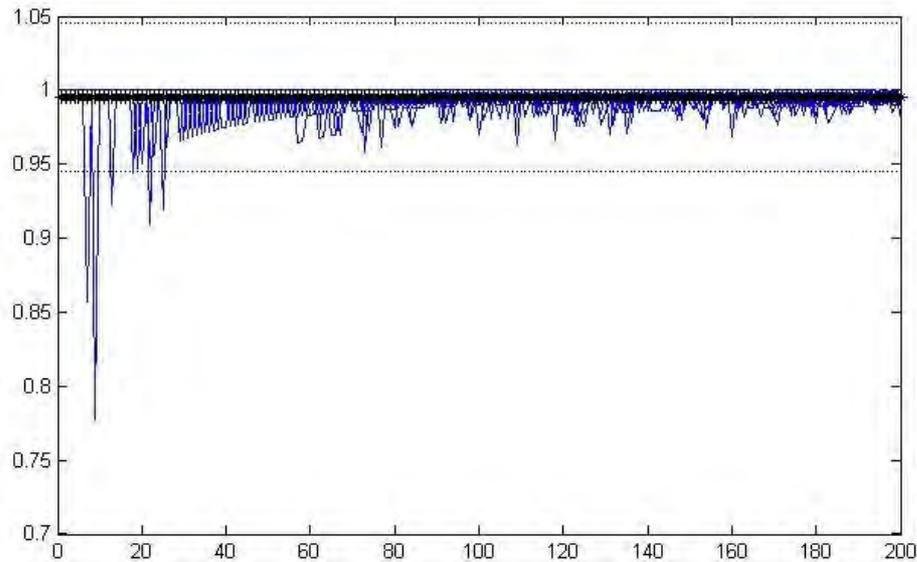


Рисунок 3.11 – Зависимость вероятности обнаружения от объема выборки при  $\gamma=30^\circ$ ,  $\alpha=30^\circ$ ,  $A_1=A_2=0,85$ ,  $B_1=0,75$ ,  $H_1=1$ ,  $W_{\text{lim}}=0,15$ ,  $n=6$

Для случая  $\gamma=30^\circ$ ,  $\alpha=30^\circ$ ,  $A_1=A_2=0,85$ ,  $B_1=1$ ,  $H_1=1$ ,  $W_{\text{lim}}=0,15$ ,  $n=8$ . Здесь уже мат. ожидание вероятности обнаружения равно 0,9933 (рисунок 3.12).

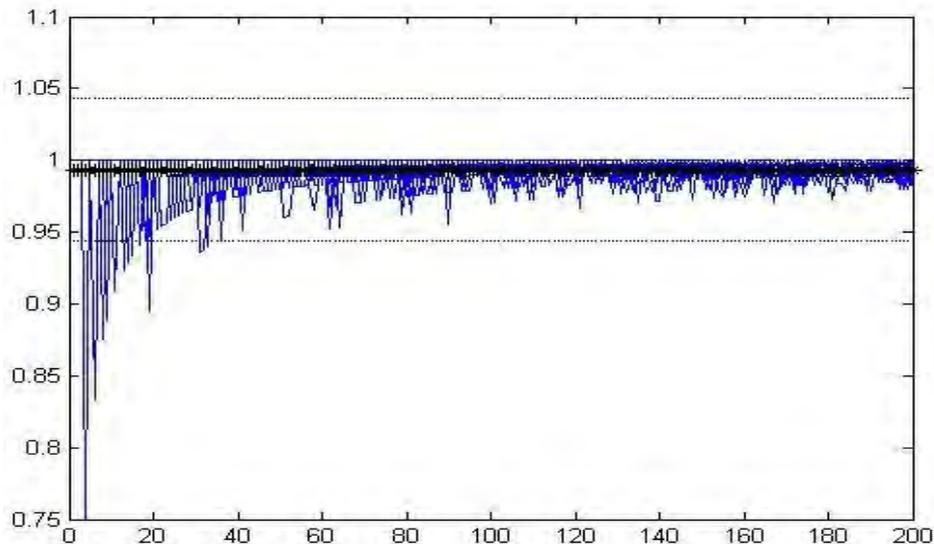


Рисунок 3.12 – Зависимость вероятности обнаружения от объема выборки при  $\gamma=30^\circ$ ,  $\alpha=30^\circ$ ,  $A_1=A_2=0,85$ ,  $B_1=1$ ,  $H_1=1$ ,  $W_{\text{lim}}=0,15$ ,  $n=8$

Необходимая длительность прогона равна 40.

При  $B_1$ , равном 0,75, математическое ожидание вероятности обнаружения составляет 0,9965.

Получены зависимости вероятности обнаружения от уровня шумов в измерительной системе (рисунки 3.13 – 3.15).

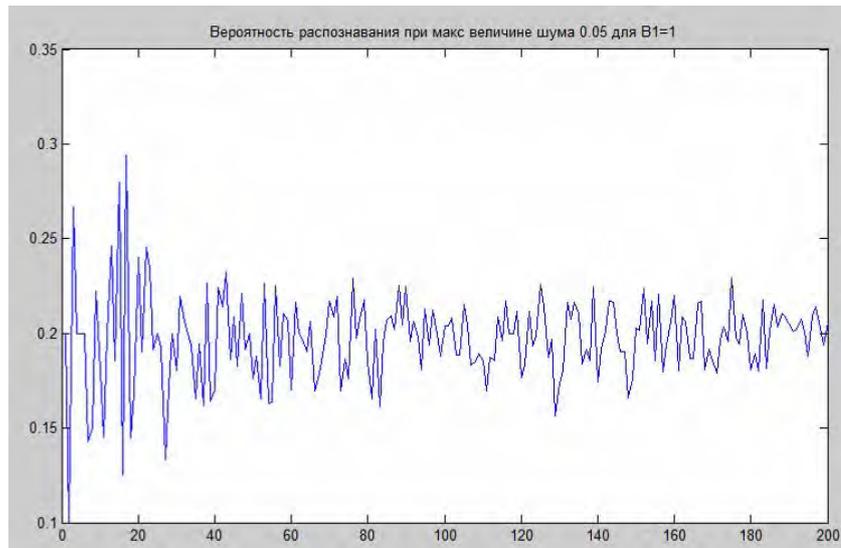


Рисунок 3.13 – Зависимость вероятности распознавания от числа прогонов  $n$  при  $B_1=1$  и уровне шумов 0,05

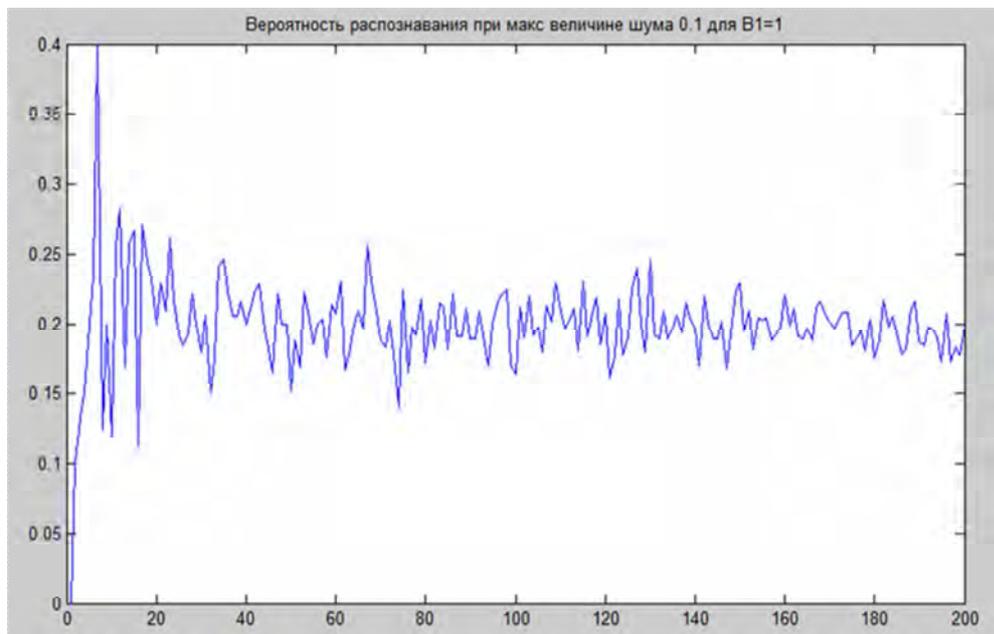


Рисунок 3.14 – Зависимость вероятности распознавания от числа прогонов  $n$  при  $B_1=1$  и уровне шумов 0,1

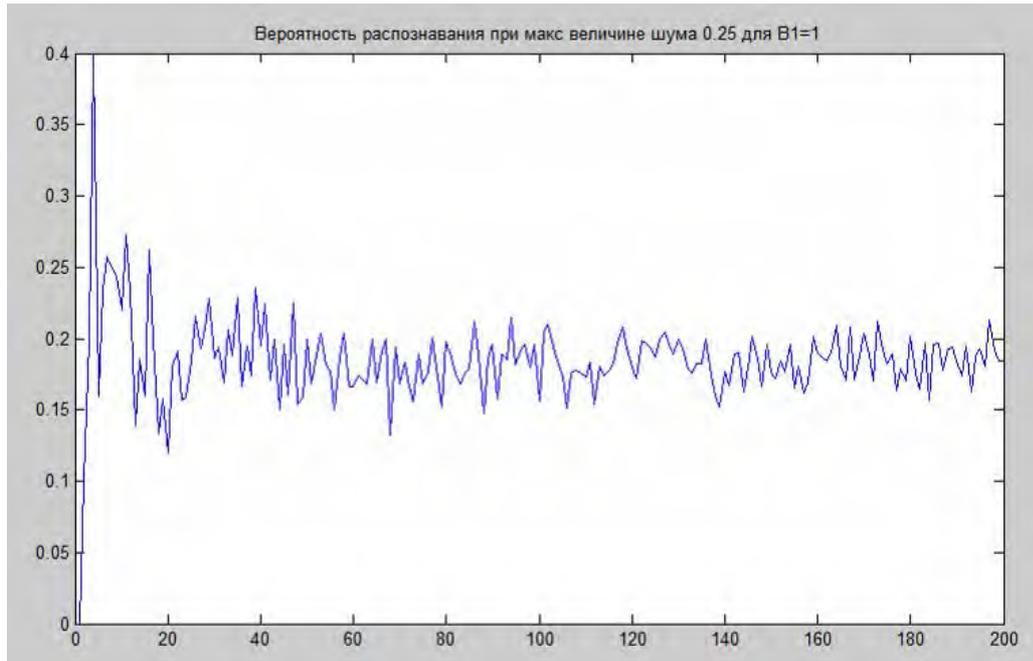


Рисунок 3.15 – Зависимость вероятности распознавания от числа прогонов  $n$  при  $V_1=1$  и уровне шумов 0,25

Определены зависимости вероятности обнаружения от значения относительного диаметра пятна на поверхности, уровня шумов, числа переотражений в элементах поверхности (рисунки 3.16 – 3.20) [158, 194, 195].

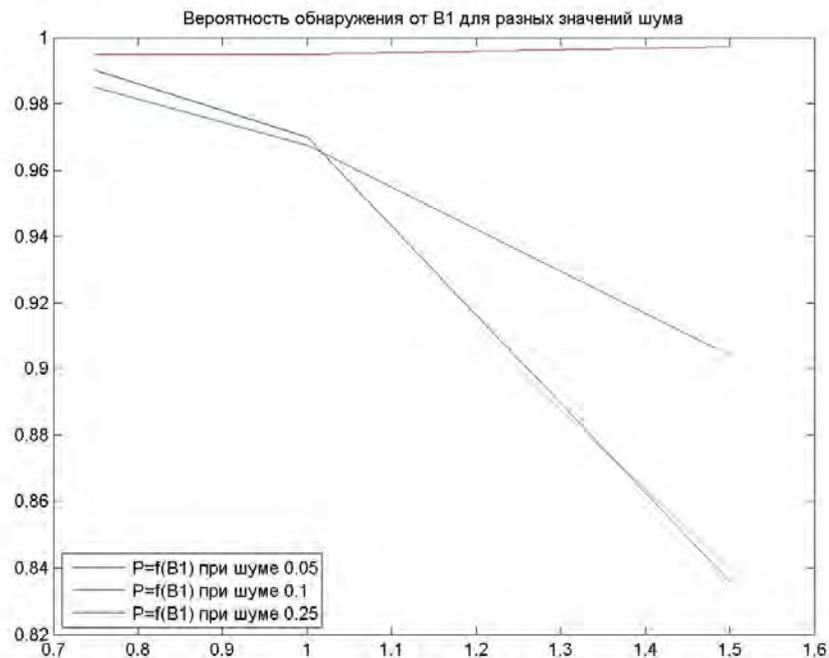


Рисунок 3.16 – Зависимость вероятности обнаружения от уровня шума и диаметра пятна

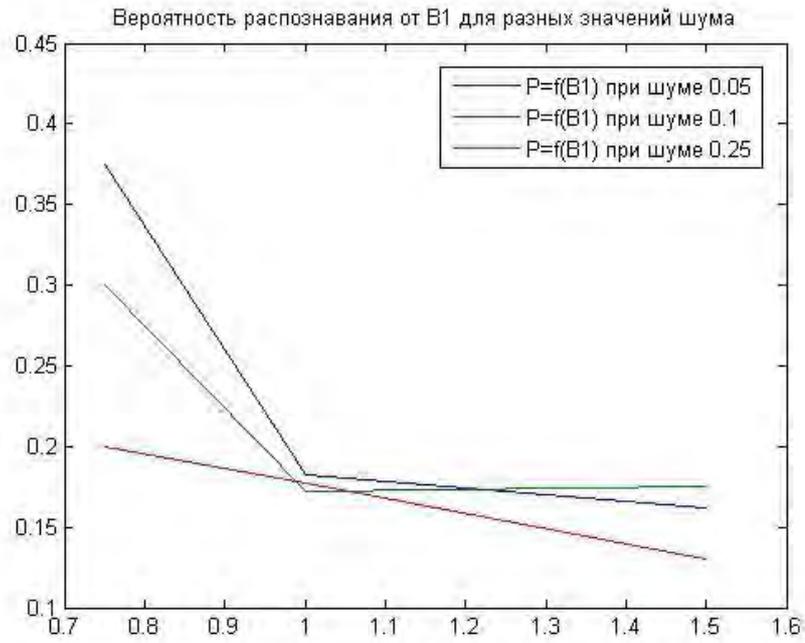


Рисунок 3.17 – Зависимость вероятности распознавания геометрии элементов от диаметра пятна и уровня шума при  $L_{пор}=19$

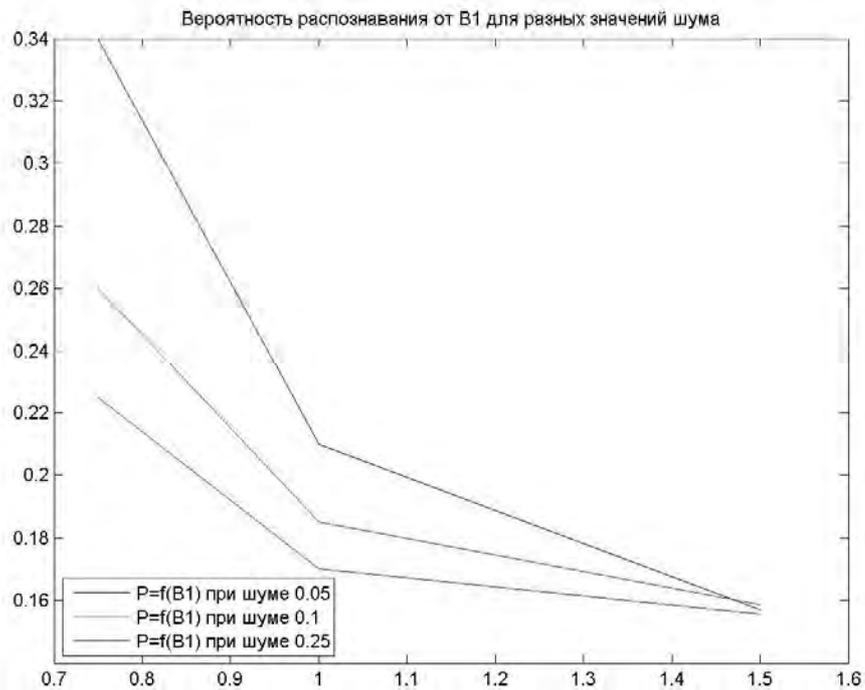


Рисунок 3.18 – Зависимость вероятности распознавания геометрии элементов от диаметра пятна и уровня шума при  $L_{пор}=4$

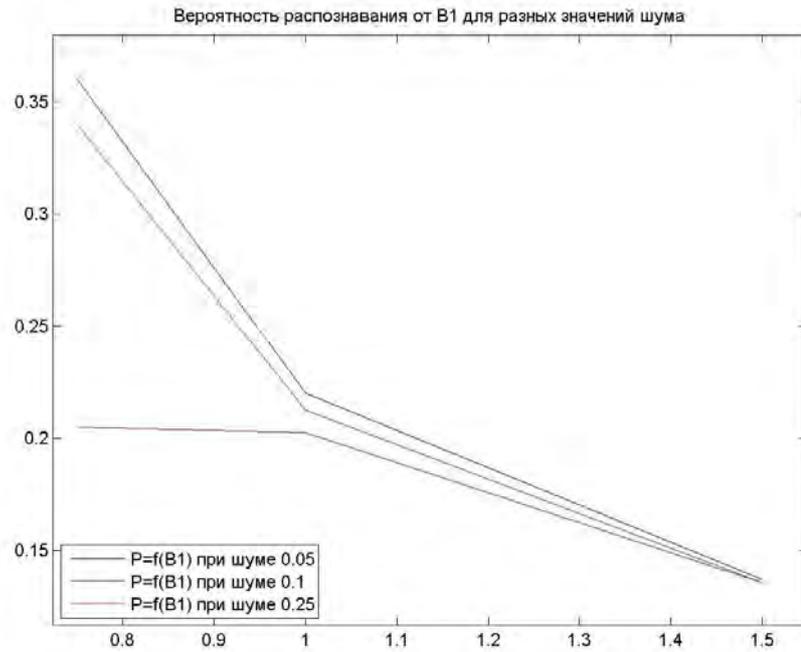


Рисунок 3.19 – Зависимость вероятности распознавания геометрии элементов от диаметра пятна и уровня шума при  $L_{пор}=1$

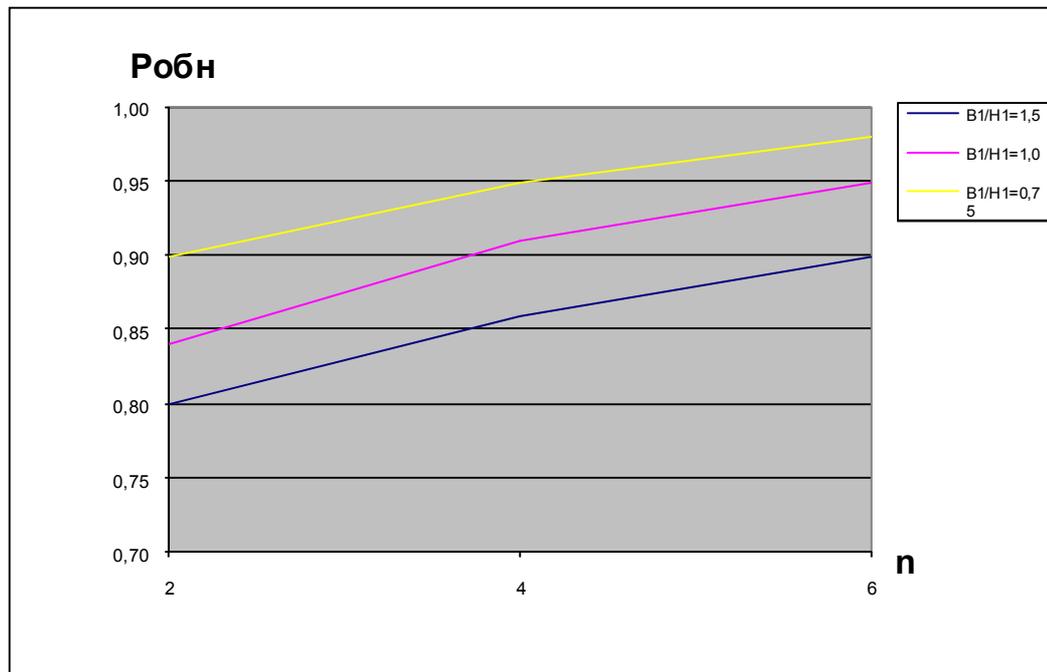


Рисунок 3.20 – Зависимость вероятности обнаружения от параметра  $n$  и диаметра пятна  $B_1$

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. Аналогичное изменение диаметра пятна приводит к увеличению вероятности распознавания на 20...25%. Снижение уровня шумов, обусловленного источником излучения в диапазоне 0,25...0,1, приводит к повышению вероятности распознавания на 13...18%.

Для повышения вероятности распознавания на 20% требуется изменение показателя индикатрисы в диапазоне 4...20 за счет изменения длины волны или скважности импульса. Определение показателя индикатрисы при трех различных измерениях (модуляция длины волны, скважности импульса) позволяет увеличить вероятность распознавания на 20...25%.

Изменение параметра  $n$  в диапазон 2...6 (т.е. изменение угла геометрии элемента поверхности в диапазоне 30...10°) 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%.

Снижение относительного диаметра пятна в диапазоне 1,5...0,75 приводит к увеличению вероятности обнаружения на 15...20% при отношении шум/сигнал 0,1. При относительном уровне шумов 0,05 влияние диаметра пятна соизмеримо с погрешностью моделирования. Аналогичное изменение диаметра пятна приводит к увеличению вероятности распознавания на 20...25%. Снижение уровня шумов, обусловленного источником излучения в диапазоне.

### **Выводы по главе 3**

1. Проведено статистическое моделирование процессов обнаружения и распознавания с использованием лазерно-электронной системы дистанционного зондирования поверхности для оценки погрешностей измерительной системы и определения вероятностей обнаружения и распознавания с помощью *Матлаб 7.5* (пакет *Statistic tool box*). Построены зависимости вероятности обнаружения от длительности прогонов  $N$  и числа переотражений  $n$ .

2. Необходимая длительность прогонов при проведении статистического моделирования составляет для  $B_1=0,75$   $N=40$ ; 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%.

3. Показано, что сканирование поверхности при двух углах падения излучения позволяет повысить вероятность распознавания объектов и элементов их поверхности на 25...30%.

4. Изменение параметра  $n$  в диапазон 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%.

5. Для повышения вероятности распознавания на 20% требуется изменение показателя индикатрисы в диапазоне 4...20 за счет изменения длины волны или скважности импульса. Определение показателя индикатрисы при трех различных измерениях (модуляция длины волны, скважности импульса) позволяет увеличить вероятность распознавания на 20...25%.

6. Определены зависимости вероятности обнаружения от значения отношения диаметра пятна к характерному размеру элемента поверхности на исследуемой поверхности, уровня шумов, числа переотражений в элементах поверхности. Снижение относительного диаметра пятна в диапазоне 1,5...0,75 приводит к увеличению вероятности обнаружения на 15...20% при отношении шум/сигнал 0,1. При относительном уровне шумов 0,05 влияние диаметра пятна соизмеримо с погрешностью моделирования. Аналогичное изменение диаметра пятна приводит к увеличению вероятности распознавания на 20...25%.

## 4 Разработка испытательного оборудования для исследования процессов отражения лазерного излучения от поверхности

### 4.1 Стенд для определения оптических характеристик конструкционных материалов

Стенд для определения коэффициента отражения конструкционных материалов создан с использованием научного и практического опыта НИИ и промышленных предприятий специализированного профиля [129,138, 164, 165]. При разработке этого оборудования учитывались следующие обстоятельства:

- применение в оптико-электронных системах излучателей с длинами волн  $\lambda=1,06\cdot 10^{-6}$ ;  $2,7\cdot 10^{-6}$ ;  $10,6\cdot 10^{-6}$  м, что связано с окнами прозрачности атмосферы;

- использование в конструкциях объектов материалов с высокой удельной плотностью, что при практически реализуемых плотностях излучения в большинстве случаев приводит к обычному поверхностному нагреву элементов конструкций без эффектов физико-химических изменений вещества, т.е. в процессах нагрева основную роль играет коэффициент отражения [26].

Это позволило использовать в разработанном стенде генераторы излучения 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 [129, 138, 164]. Данные излучатели выбраны с учетом окон прозрачности атмосферы для формирования банка данных оптических характеристик материалов, соответствующих реальным условиям зондирования поверхностей материалов в атмосфере и с борта летательных аппаратов.

Стенд в основном предназначен для определения отражательных характеристик лазерного излучения большинства применяемых и рекомендуемых материалов внешней компоновки в соответствии с рисунком 4.1.

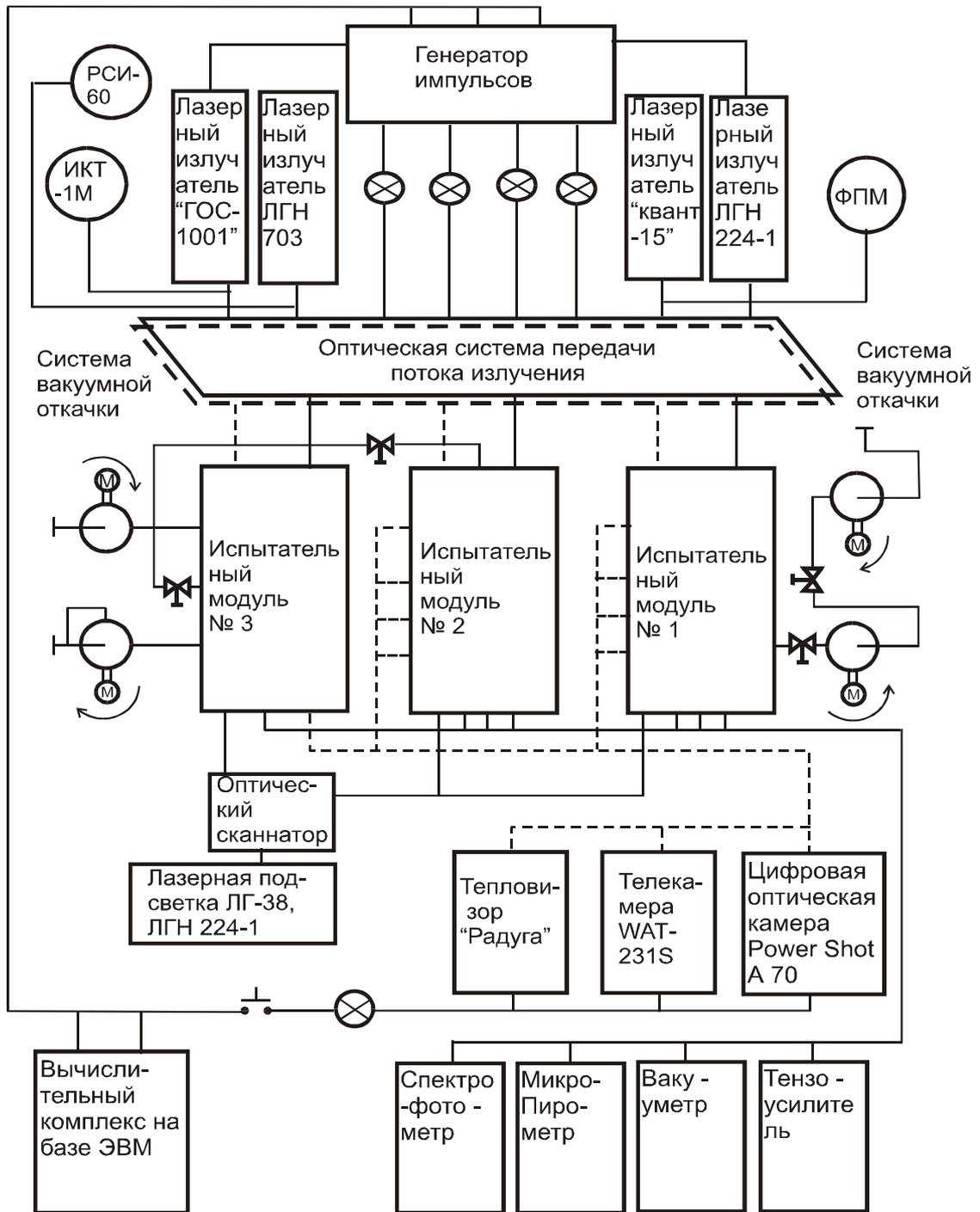


Рисунок 4.1 – Структурная схема испытательного стенда

Для непрерывного излучения  $\lambda=10,6 \cdot 10^{-6}$  м используется измерительный датчик мощности РСИ-60-5 и цифровой вольтметр В2-34 (погрешность измерений  $\pm 5\%$ ), давление в вакуумной камере с системой откачки установки

ВУП-5 измеряется с точностью  $\pm 10\%$ , размер пятна на образцах составляет  $d=0,035$  м (точность  $\pm 5\%$ ).

Схема установки для определения коэффициента диффузного отражения конструкционных материалов показана на рисунке 4.2.

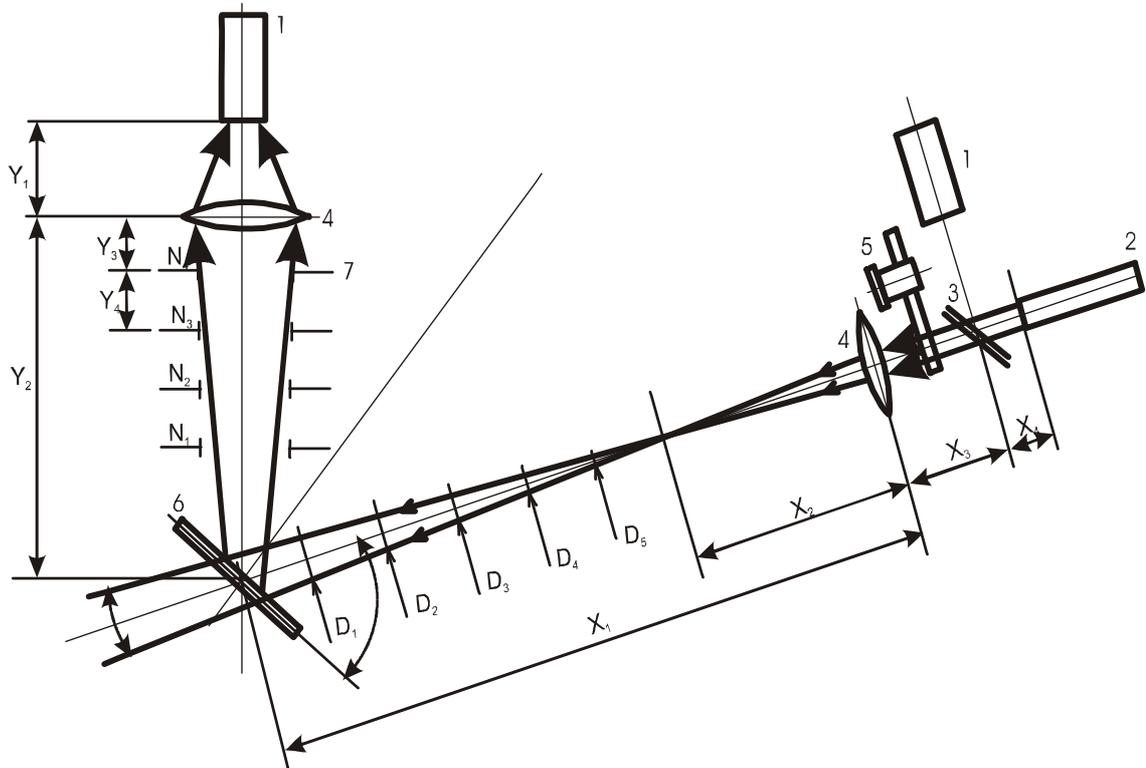


Рисунок 4.2 – Схема установки для определения коэффициента диффузного отражения поверхности конструкционных материалов: 1 – измеритель мощности, 2 – источник излучения, 3 – разделительная пластина, 4 – фокусирующая линза, 5 – прерыватель мощности, 6 – образец, 7 – диафрагма

В качестве средств по измерению температурных полей применялись хромо-копелевые термопары и тепловизор «Радуга-4» (погрешность измерений  $\pm 5\%$ ), а для оптической визуализации – цифровая оптическая камера Power Shot A 70, телекамера WAT-231S (разрешение – 811x508 пикселей; выдержка 1/60-1/10<sup>4</sup> с; считывающая поверхность 768x494) с обрабатывающим вычислительным комплексом на базе ЭВМ.

При этом следует отметить, что, несмотря на высокий уровень технического исполнения как генераторы излучения «Квант-15», ЛГН-703 и ГОС 1001, так и измерительная техника при вводе их в состав испытательных стендов требовали

существенных доработок, необходимых для успешного проведения экспериментальных работ по физическому моделированию процессов отражения лазерного излучения от поверхности конструкционных материалов и элементов конструкций.

Твердотельный излучатель ГОС-1001 представляет собой генератор оптический на стекле с добавками неодима, работающий в режиме свободной генерации. Основные характеристики излучателя приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Основные характеристики излучателя ГОС 1001

Показатели	Фактические данные	Погр. измерения
Режим работы	Импульсный	–
Длина волны излучения, м	$1,06 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-8}$
Энергия в импульсе, Дж	$2 \cdot 10 \cdot 10^2$	$0,25 \cdot 10^2$
Макс. энергия в импульсе, Дж	$12 \cdot 10^2$	$0,4 \cdot 10^2$
Длительность импульса в режиме свободной модуляции, с	$3 \cdot 10^{-3}$	$0,75 \cdot 10^{-3}$
Диаметр выходного пучка, м	$4,5 \cdot 10^{-2}$	$1,1 \cdot 10^{-2}$
Расходимость луча, рад	$3 \cdot 10^{-3}$	$0,75 \cdot 10^{-3}$
Длительность между импульсами, с	$1,8 \cdot 10^2$	$0,75 \cdot 10^2$
Макс. потребляемая мощность, Вт	5000	100

Проведена синхронизация работы излучателей посредством включения в электрическую схему генератора задержки импульсов. Это позволило проводить эксперименты по синхронному или выполненному с любой временной задержкой воздействию двух импульсов излучения. Для создания на образце необходимого распределения плотности энергии излучения используется набор объективов, диафрагм и масок. Предварительное ориентирование светового пятна производится с помощью юстировочного He-Ne-лазера, установленного на оптической оси излучателя ГОС 1001. Измерение распределения плотности

энергии излучения по диаметру пучка проводилось с помощью калориметра ИКТ-1М. При этом поток излучения, принимаемый головкой прибора, ограничивается калиброванной диафрагмой. Результаты измерений представлены на рисунке 4.3.

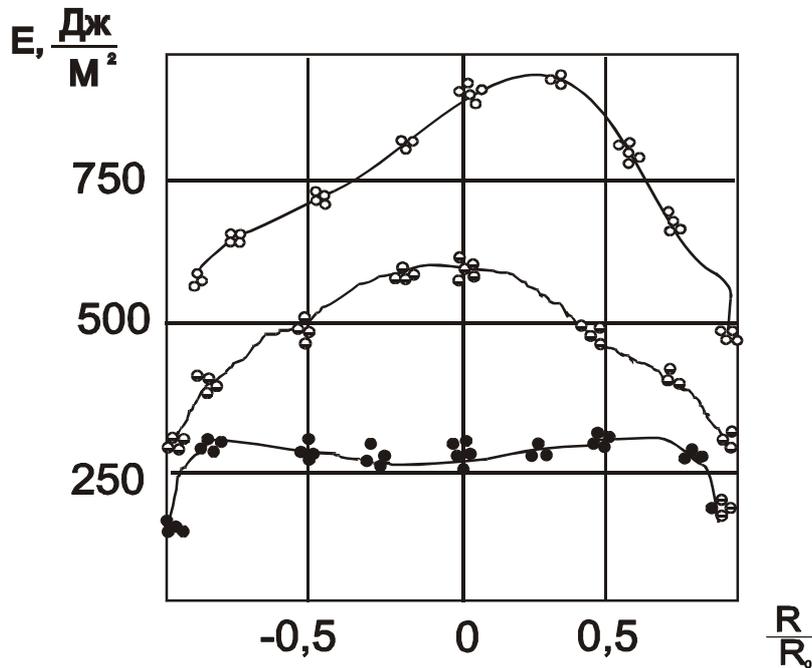


Рисунок 4.3 – Распределение удельной энергии по сечению пучка в зависимости от величины энергии накачки

Анализ распределения плотности энергии для различных уровней накачки излучателя ГОС 1001 показал, что распределение энергии по сечению пучка носит случайный характер. Так, повторные измерения показывают расхождение результатов на 10-30%. Зависимости могут иметь характерные максимумы, как на оси сечения пучка, так и в периферийной области. При энергии накачки, превышающей  $25 \cdot 10^3$  Дж, возникает сильная неравномерность распределения плотности энергии излучения по сечению пучка.

Газовый  $\text{CO}_2$  – излучатель представляет собой резонатор сложного типа с продольной прокачкой газовой смеси, состоящей из  $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He} = 2:20:10$ . Основные характеристики излучателя приведены в таблице 4.2.

Распределение плотности излучения определялось по отпечатку (следу), который образовывался на мишени после подачи высокого напряжения на электроды в течение  $\tau=0,2-0,3$  с. После соответствующей настройки и генерации в

течение  $\tau=60$  с делался первый отпечаток. Затем через  $\tau=480$  с работы установки в режиме генерации делался второй отпечаток.

Таблица 4.2 – Основные характеристики CO<sub>2</sub>-излучателя

Показатели	Фактические данные	Погрешность измерения
Режим работы:		
- импульсный, длительность импульса, с	0,025-100	0,05
- импульсно-периодический, частота, Гц	20-0,005	0,1
- непрерывный		
Режим генерации	- многомодовый - одномодовый	
Длина волны излучения, м	$10,6 \cdot 10^{-6}$	
Мощность непрерывного излучения, Вт		
- многомодовый	$1,5 \cdot 10^3$	$10^2$
- одномодовый	$1 \cdot 10^3$	$0,5 \cdot 10^2$
Диаметр выходного пучка, м		
- многомодовый	0,044	$2 \cdot 10^{-3}$
- одномодовый	0,015-0,025	$2 \cdot 10^{-3}$
Расходимость луча, рад	$3 \cdot 10^{-3}$	$0,22 \cdot 10^{-3}$
Макс. потребляемая мощность, Вт	$25 \cdot 10^3$	$2,5 \cdot 10^2$

Измерение диаметра пучка производится с экрана видеоконтрольного устройства с использованием координатной сетки. Чтобы учесть влияние расходимости  $\Theta$ , расстояния от заслонки мишени  $l_1$  и от заслонки до экрана визуализатора равны. При этом погрешность в измерении диаметра  $d_1$  определится

$$\Delta d_1 = \Delta d_2 + \Delta \Theta (l_1 - l_2) + 2\Theta \Delta l, \quad (4.1)$$

где  $\Delta d_2$  – погрешность измерения расходимости;

$\Delta l$  – погрешность измерения расстояний.

Из выражения (4.1) видно, что при расстояниях ( $l_1 = l_2$ ) второе слагаемое, содержащее расходимость  $\Theta$ , равно нулю. Расходимость не вносит при измерении диаметра  $d_1$  существенных поправок. С другой стороны, расходимость используемой в стенде технологической  $\text{CO}_2$ -установки не превышает  $\Theta=10^{-2}$  рад. Разница между  $d_1$  и  $d_2$  для  $\Theta=10^{-2}$  в зависимости от разности ( $l_1 - l_2$ ) приведена в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Погрешность измерения диаметра

$\Theta = 10^{-2}$ рад	$\Delta l = (l_1 - l_2), \text{ м}$						
	1	2	5	10	20	50	100
$(d_1 - d_2)$ м	$10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-5}$	$10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$10^{-3}$

На основании данных таблицы 4.3 можно сделать вывод, что вполне допустима разница оптических путей  $l_1$  и  $l_2$  приблизительно на 1 см. В этом случае размер пучка на мишени  $d_1$  и на люминесцентном экране визуализатора будет различаться менее  $10^{-4}$  м и даже при явно завышенном значении расходимости более чем  $\Theta = 10^{-2}$  рад.

Среднеквадратическая погрешность при измерении плотности энергии излучения определится

$$\frac{\Delta e}{e} = \sqrt{\left(\frac{\Delta T}{T}\right)^2 + \left(\frac{\Delta W}{W}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \tau}{\tau}\right)^2 + \left(\frac{2\Delta d_1}{d_1}\right)^2}, \quad (4.2)$$

где  $e$  – плотность энергии излучения на мишени;

$T$  – величина пропускания окна вакуумной камеры;

$W$  – мощность излучения;

$\tau$  – время экспозиции;

$\Delta T, \Delta W, \Delta \tau, \Delta d_1, \Delta e$  – средние квадратичные погрешности соответствующих величин.

Поскольку на стенде непосредственно измеряется  $d_2$ , то подстановка  $d_1$  и  $\Delta d_1$  в (4.1) осуществляется с использованием выражения (4.2). Учет величины  $\Delta\Theta(l_1 - l_2) + 2\Theta\Delta l$  вносит погрешность  $\Delta d_2$  при  $\Delta\Theta \approx \Theta=10^{-2}$  рад,  $l_1-l_2=10\cdot 10^{-2}$  м,  $\Delta l_1=10^{-3}$  м может составить  $0,12\cdot 10^{-3}$  м. При этом погрешность измерения диаметра пятна на экране люминесцентного визуализатора с помощью телекамеры и видеомонитора  $\Delta d_2$ , будет, в свою очередь, складываться из погрешности градуировки экрана видеомонитора  $\Delta d_2'$  и погрешности определения положения края пятна  $\Delta d_2''$ , где  $\Delta d_2 = \Delta d_2' + \Delta d_2''$ .

Оценить минимальную погрешность можно из следующих условий. Разрешение промышленной телевизионной установки ПТУ-40-1 составляет не менее 400 линий и 7 градаций яркости. Минимальный размер изображения 300 мм, следовательно, минимальная относительная погрешность градуировки  $\Delta d_2' / d_2 = 2,5\cdot 10^{-3}$ , что при диаметре пятна  $d_2 = 3\cdot 10^{-3}$  м дает

$$\Delta d_2' = 0,075\cdot 10^{-3} \text{ м} \approx 0,1\cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Из-за дифракционных явлений на краях калиброванной диафрагмы граница пятна теряет контраст. Для диаметра диафрагмы  $(15-30)\cdot 10^{-3}$  м при длине волны лазерного излучения  $\lambda=10,6\cdot 10^{-6}$  м граница пятна представляет собой дифракционную картину, сходную с дифракцией Френеля на прямолинейном крае экрана. Тогда расстояние от края геометрической тени до первого светового кольца, которое можно трактовать как погрешность определения края пятна, составит

$$\Delta d_2'' = \sqrt{\frac{3\lambda(l_2 + l_3)}{4}} = \sqrt{\frac{3\cdot 10,6\cdot 10^{-3}\cdot 10^3}{4}} \approx 2,82\cdot 10^{-2} \text{ м,} \quad (4.3)$$

где  $l_3$  – расстояние от калиброванной диафрагмы до заслонки.

Таким образом, дифракционная составляющая погрешности будет определяющей в диаметре пятна. Представляются следующие пути снижения дифракционного вклада в погрешность измерения диаметра пучка: аподизирующие диафрагмы, многоградационная обработка изображения пучка на ПЭВМ.

#### **4.2 Стенд для физического моделирования процессов обнаружения и распознавания летательных аппаратов**

Испытательный стенд для физического моделирования (рисунок 4.4) включает механическую систему углового сопровождения и устройства оптической визуализации и необходим для решения следующих задач [164, 165, 175, 194, 195]: проведение анализа уровня освещённости участков элемента конструкции, исследование оптических свойств поверхностей и распределение освещённости в зондирующем пучке. При проведении подобных экспериментальных исследований на испытательном стенде в соответствии с рисунком 4.4 изучаемая модель объекта 6 с помощью двух механизмов поворота 5 может вращаться вокруг двух взаимно перпендикулярных осей  $x, y$ . При этом угол поворота модели вокруг каждой оси отслеживается с помощью датчиков, каждый из которых представляет собой фотодиод и фотоприёмник, разделённые вращающимся диском с отверстиями, насаженным на вал электродвигателя механизма поворота 2.

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 лазер 14 с рабочей длиной волны излучения  $0,63 \cdot 10^{-6}$  м. Оптический стенд имеет измерительную систему параметров выходного излучения и формирователь зондирующего пучка 15. Отражённое от модели излучение регистрируется фотоприёмником 10, а результаты исследуются блоком обработки информации 12. Для создания фоновой обстановки служат имитаторы 7 и 13. Стыковка исполнительных механизмов оптического стенда с ПЭВМ 1 и блоком для обработки изображений 12 позволяет автоматизировать процесс обработки результатов исследований при проведении физического моделирования.

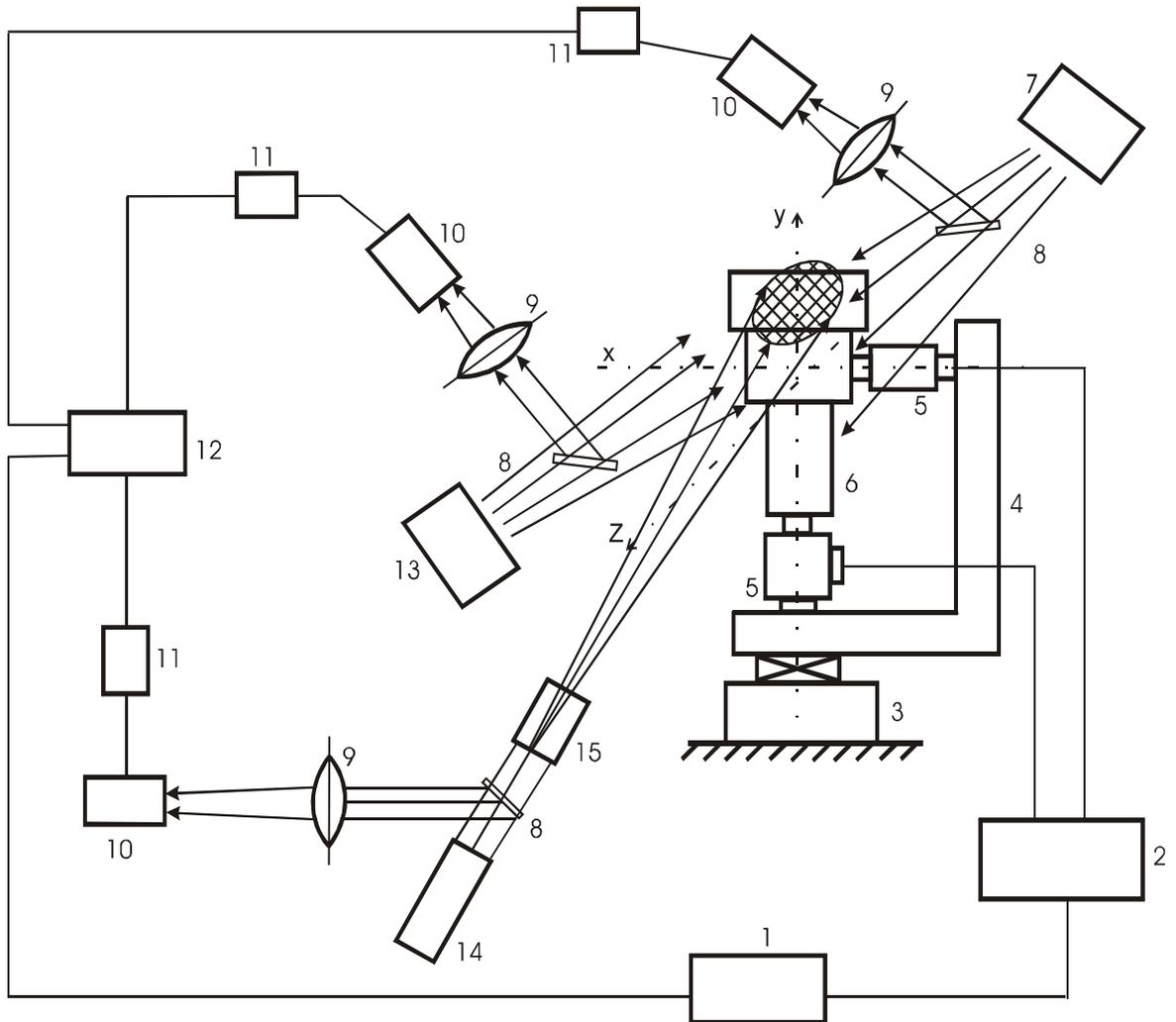


Рисунок 4.4 – Схема испытательного стенда: 1 – ПЭВМ, 2 – блок управления приводами модели, 3 – узел крепления стенда, 4 – рама крепления приводов, 5 – привод с датчиками углового поворота, 6 – модель цели, 7 – имитатор излучения, 8 – полупрозрачное зеркало, 9 – линза, 10 – фотоприемник, 11 – фоторегистратор, 12 – блок обработки информации, 13 – имитатор излучения, 14 – лазер

Данный стенд разработан для простой фоновой обстановки, когда сигнал от летящей цели существенно превышает сигнал от фона при отсутствии двух контрастных объектов. С целью имитации температурного портрета модели типового изделия снабжены встроенными нагревателями. Механизмы поворота ориентируют модель объекта относительно земли, луны, солнца в соответствии с реальными условиями.

В качестве модели объекта используются модели космических аппаратов ALOS (Advanced Land Observation Satellite) и Ikonos.

Космический аппарат ALOS предназначен для продолжения глобальной съемки поверхности Земли, начатой КА JERS и ADEOS-1 в интересах решения задач картографии, поиска полезных ископаемых, слежения за экологией, развитием регионов и отработки перспективных технологий съемки Земли [137, 139, 140, 176, 177]. Масштаб модели 1:22. Одна из особых задач спутника – отработка съемочной аппаратуры для создания перспективных разведывательных КА. В состав полезной нагрузки входят три основные системы, которые являются усовершенствованными вариантами комплексов, установленных на борту КА JERS-1 и ADEOS-1. Важнейшими из них являются РСА PALSAR, панхроматическая оптоэлектронная стереокамера PRISM и усовершенствованный радиометр видимого и ближнего ИК диапазона AVNIR-2. Как и в случае с КА JERS-1, радиолокационный и оптический комплексы на новом спутнике имеют одинаковые значения разрешения – 10 м (на КА JERS-1 – 18 м) и ширины полосы съемки ( $70 \cdot 10^3$  м) для оптимальных условий совместного дешифрирования и обработки снимков.

Космический аппарат Ikonos предназначен для получения видовой информации с высоким разрешением и качеством в интересах частных компаний, государственных и военных органов. Масштаб модели 1:22 (рисунок 4.5).

В данных КА в качестве материалов внешней компоновки используются: для экрана агрегатного отсека А1, химполирование ( $A_S \leq 0,2$ ); для радиатора-охладителя агрегатного отсека АД1, покрытие ТР-СО-ЦМ ( $A_S \leq 0,15-0,22$ ); для приборного отсека ЭВТИ-ВВ ( $A_S \leq 0,13$ ); для радиатора-охладителя приборного отсека АД1, покрытие ТР-СО-ЦМ ( $A_S \leq 0,15-0,22$ ); для навесного радиатора-охладителя АД1, покрытие ТР-СО-ЦМ ( $A_S \leq 0,15-0,22$ ); для внутренней поверхности солнечных батарей Si, напыление алюминиевое зеркало ( $A_S = 0,152$ ). У моделей КА материалы внешней компоновки соответствуют реальным изделиям.

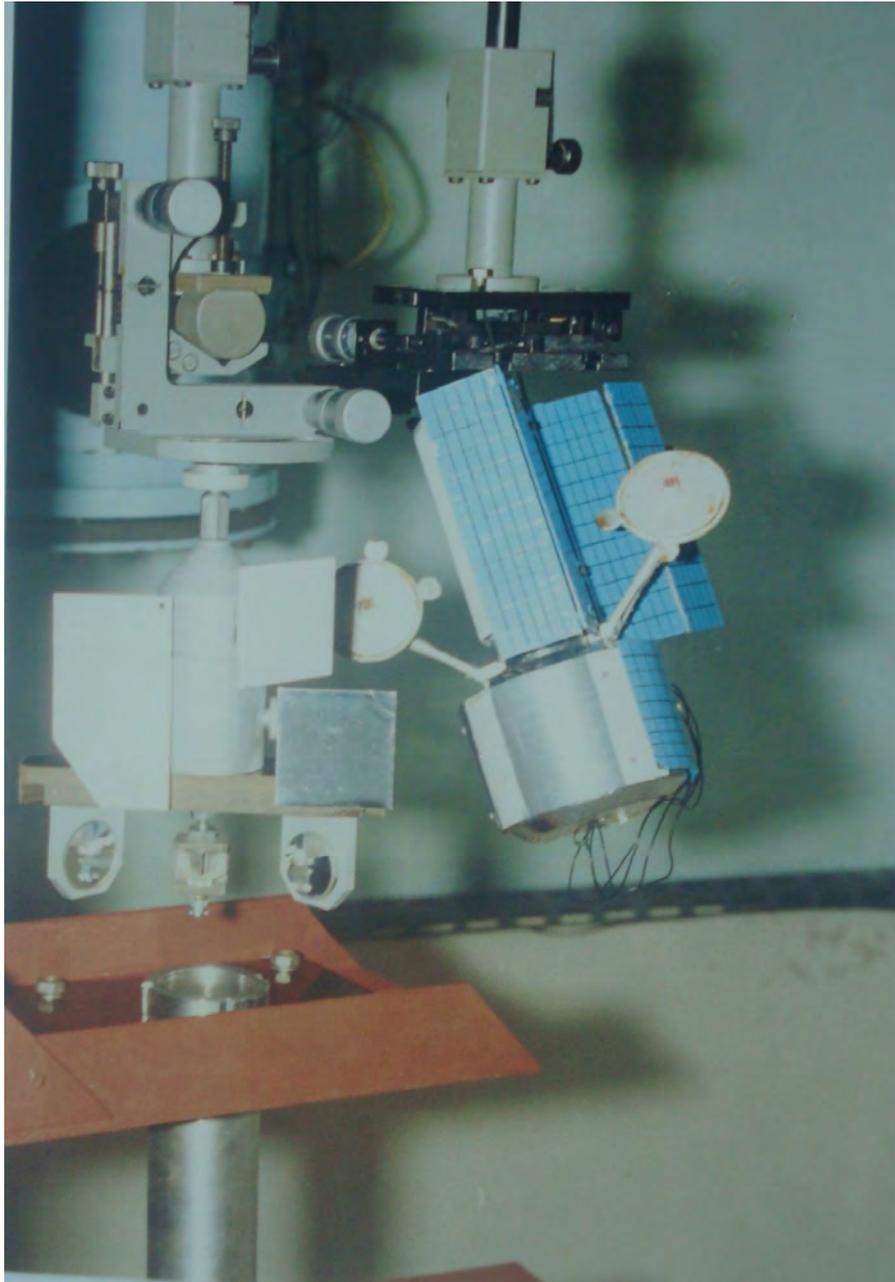


Рисунок 4.5 – Модели космических аппаратов ALOS и Ikonos на испытательном стенде

При проведении физического моделирования процесса лазерной локации использовались принципы подобия, рассмотренные в работах Лабунца Л.В. [133].

Испытательный стенд предназначен для моделирования процессов обнаружения и распознавания ЛА при зондировании импульсным лазерным излучением при обеспечении возможности адаптивной подстройки к априорно поставленным задачам путем повышения чувствительности системы при

фиксированной площади выходного зрачка измерительной системы расширения ее возможностей за счет сочетания сканирования пространства с управлением расходимостью индикатрис лазерного излучения в зависимости от дальности и закона движения отслеживаемого объекта [164,194].

Сканирующее устройство в соответствии с рисунком 4.6 содержит корпус 1, линзу 2 для формирования излучения и приема энергии и установленную в сходящихся оптических лучах подпружиненную плоскопараллельную пластинку 3, закрепленную в роторе 4 двигателя 5.

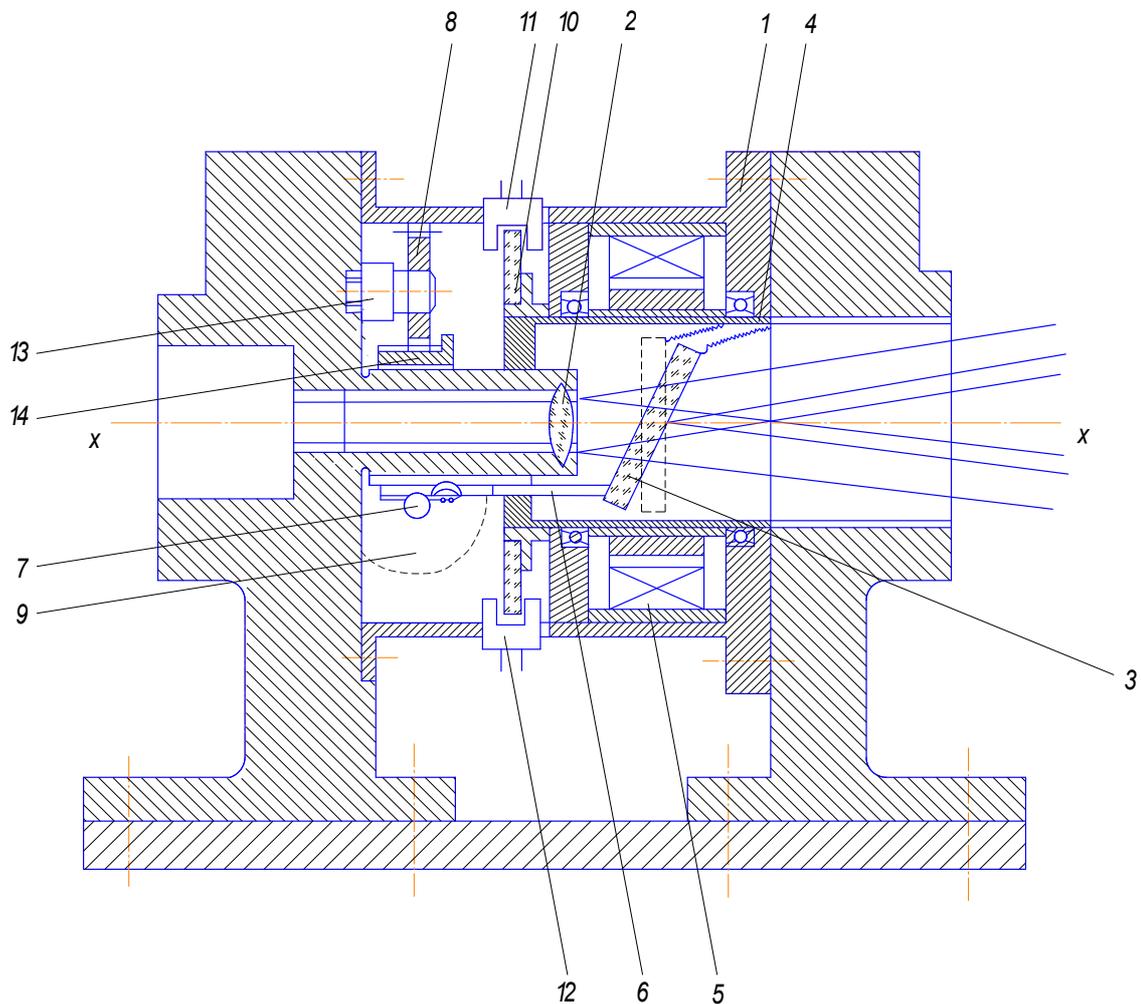


Рисунок 4.6 – Общий вид сканирующего устройства: 1 – корпус, 2 – линза, 3 – подпружиненная плоскопараллельная пластина, 4 – ротор, 5, 9 – двигатель, 6 – шток, 7 – червяк, 8 – шестерня, 10 – лимб, 11, 12 – оптроны, 13 – датчик, 14 – зубчатая гайка

С пластинкой 3 контактирует подающий шток 6, связанный с зубчатой гайкой 14, управляемой червяком 7 от двигателя 9. Сканирующее устройство

имеет оптический кодовый лимб 10 и оптроны 11 и 12 для регулирования скорости вращения двигателя 5 и контроля угла поворота плоскопараллельной пластинки 3 вокруг центральной оси сканирующего устройства. Датчик 13 с шестерней 8 служит для контроля положения подающего штока 6 и контроля угла наклона пластинки 3 относительно оси  $x-x$ .

Управление изменением угла в сканирующем устройстве осуществляется в функциональной зависимости от отношений  $U/U_{ш}$  (амплитуда сигнала/амплитуда шума) в эхо-сигнале, а также в зависимости от углового рассогласования зондируемого объекта и центральной оси.

При зондировании лазерным пучком конструкции КА США «Ikonos» на участке приборного отсека интенсивность отраженного сигнала неравномерна в зависимости от расположения граней конструкции. Последнее позволяет достоверно описать геометрию изделия.

#### **4.3 Исследование инструментальной составляющей погрешности, обусловленной источником излучения**

При решении задач метрологического характера на стенде оптической локации, связанных с получением количественных результатов с помощью оптико-электронных приборов, для уменьшения погрешности измерений требуется исследование временных характеристик используемых приборов. При измерении используются лазеры, которые различаются по метрологическому рангу: рабочие и эталонные. Эталонные лазеры обладают высокой стабильностью выходных параметров и высокой надежностью, но в силу своей уникальности чрезвычайно дороги и дефицитны. Рабочие лазеры, напротив, просты и надежны в эксплуатации и получили широкое распространение, т.к. выпускаются серийно. В то же время требования к стабильности выходного параметра здесь сравнительно невысоки. Кроме того, в силу особенностей изготовления они могут иметь значительные расхождения даже для лазеров одной модели. В силу этого при

использовании лазеров рабочей группы для проведения измерений возникает необходимость точного знания нормируемых параметров и их изменения с течением времени, чтобы иметь возможность вносить соответствующие поправки в результаты измерений [149, 150, 151, 152, 155, 163].

В экспериментах применяются газовые непрерывные лазеры, которые имеют метрологические преимущества перед другими типами благодаря малой угловой расходимости излучения, широкого диапазона генерируемых длин волн, легко реализуемому одномодовому и частотному режиму генерации. Эти особенности позволяют нормировать следующие характеристики излучения: длину волн, среднюю мощность, спектральную плотность мощности, определенное положение пучка в пространстве. Излучение газовых лазеров эффективно поддается внешним преобразованиям с помощью управляющих и формирующих устройств.

Временная флуктуация измерялась у лазеров ЛГН 224-1, ЛГН-703, ЛГН-702, которые можно отнести к рабочей группе метрологических лазеров. (Лазер ЛГН-702 можно применять в метрологических целях с ослабителем ввиду его значительной мощности излучения,  $W=30$  Вт).

Для измерения энергетических параметров лазеров применяются фотоэлектрический и калориметрический методы, которые получили наиболее широкое применение. Измеритель мощности фотоэлектрического типа ОМЗ-65 откалиброван в диапазоне длин волн  $\lambda=(0,8-1)\cdot 10^{-6}$  м. Наибольшую точность измерений обеспечивает ваттметр ОСИСМ-А, поэтому по нему были откалиброваны другие два измерителя.

Измеритель мощности ОСИСМ-А состоит из ослабителя, приемника излучения и цифрового вольтметра, имеет следующие характеристики: спектральный диапазон  $\lambda=(0,4-12)\cdot 10^{-6}$  м; диапазон измерений мощности  $W= 0,002-1$  Вт (с основной погрешностью 2%); диапазон измерений мощности  $W=1-100$  Вт (с основной погрешностью 2,5%); погрешность ослабителя мощности 1,5%; постоянная времени  $\tau = 40$  сек.

Ваттметр ИМО-2Н, предназначен для измерения средней мощности лазерного излучения  $W = 3 \cdot 10^{-4} - 100$  Вт в диапазоне длин волн  $\lambda = (0,4 - 10,6) \cdot 10^{-6}$  м с пределом основной погрешности 5% при измерении мощности  $W = 3 \cdot 10^{-4} - 1$  Вт, был откалиброван следующим образом. По оси лазерного излучения последовательно устанавливались ослабитель и приемник мощности измерителя СИСМ-А. Произведенный замер мощности излучения при этом показывал флуктуацию мощности, не превышающую 3%. Затем та же мощность лазерного излучения, прошедшая через ослабитель ваттметра ОСИСМ-А, была измерена с помощью ИМО-2Н. Поскольку в обоих замерах был использован один и тот же ослабитель, то можно считать, что его погрешность не влияет на результат измерений. Калибровка произведена на длинах волн  $\lambda = (0,63; 1,15; 3,39$  и  $10,6) \cdot 10^{-6}$  м, причем ослабитель был использован только на длине волны  $\lambda = 10,6 \cdot 10^{-6}$  м. Результаты измерений приведены в таблице 4.4. С увеличением длины волны излучения расхождение измерений растет, причем при  $\lambda = 0,63 \cdot 10^{-6}$  м оно находится в пределах погрешностей измерения приборов. Конструкция измерителя мощности ИМО-2Н позволяет внести соответствующую поправку при проведении его внутренней калибровки.

Таблица 4.4 – Результаты измерения мощности

Длина волны, м $\cdot 10^{-6}$	Измеренная мощность, Вт ОСИСМ-А	Измеренная мощность, Вт ИМО-2Н	Расхождение, %
0,63	$6,42 \cdot 10^{-3}$	$6,00 \cdot 10^{-3}$	6,5
1,15	$11,64 \cdot 10^{-3}$	$9,90 \cdot 10^{-3}$	14,9
3,9	$9,70 \cdot 10^{-3}$	$8,23 \cdot 10^{-3}$	15,2
10,6	32,56	26,40	18,9

Проведено измерение флуктуаций мощности лазерного излучения. Спектр флуктуаций мощности излучения непрерывных газовых лазеров довольно широк и перекрывает диапазон  $\nu = 0 - 10^4$  Гц. Этот диапазон можно разбить условно на

четыре поддиапазона (таблица 4.5) в зависимости от причин, вызывающих флуктуации [149, 150, 151, 152].

Таблица 4.5 – Диапазон флуктуаций мощности

Частотный диапазон, Гц	Возмущающие факторы
0-0,5	Тепловые изменения геометрии резонатора, старение зеркал и активного элемента, загрязнение и запыление оптических поверхностей.
0,5-50	Внешние вибро- и акустические воздействия (область резонансных частот механических конструкций лазеров).
50-10000	Технологические шумы, связанные с пульсациями источников питания.
Свыше 10000	Разрядные шумы.

Наибольшая относительная нестабильность имеет место в диапазоне 0-0,5 Гц. Это происходит, во-первых, из-за увеличения эффективного размера поля и роста дифракционных потерь вследствие угловой разъюстировки зеркал резонатора, и, во-вторых, тепловые изменения базы резонатора могут стать причиной смещения частоты генерации относительно контура усиления активной среды.

Т.к. излучение лазера ЛГН-702 невидимое, установка ослабителя и приемника по оси лазерного излучения проводилась с помощью вспомогательного юстировочного лазера, излучение которого направлялось на переднее зеркало ЛГН-702 нормально к его поверхности. Момент запуска лазера соответствовал началу отсчета времени  $\tau = 0$ , затем показания прибора снимались через  $\tau=300$  с. Аналогично произведены замеры флуктуаций мощности для лазеров ЛГН 224-1 и ЛГН-703.

Проведенный анализ результатов показывает, что измеренные значения максимальной мощности не ниже паспортных, составляющих  $W=10^{-3}$  Вт и

$W=5\cdot 10^{-3}$  Вт на длинах волн  $\lambda = (0,63; 1,15; 3,39)\cdot 10^{-6}$  м соответственно. Значение максимальной мощности лазера ЛГН 224-1, измеренное ваттметром ОСИСМ-А, составило  $W = 7,67\cdot 10^{-3}$  Вт, что ниже паспортной величины  $W = 10^{-3}$  Вт. Также видно, что в течение первых тридцати минут после включения лазера ЛГН-702 его мощность плавно возрастает, затем стабилизируется, при этом флуктуации мощности не превышают 2% от среднего значения. Мощность излучения лазера ЛГН 224-1 монотонно падает в первые  $\tau = 1,8\cdot 10^3$  с после включения, затем стабилизируется и после  $\tau = (3-3,6)\cdot 10^3$  с работы вновь падает. С помощью кремниевого фотодиода ФД-24К и осциллографа С1-55 была произведена оценка высокочастотных флуктуаций мощности лазера ЛГН-703 на длине волны  $\lambda = 0,63\cdot 10^{-6}$  м. Средний уровень сигнала составил  $V = 0,3$  В, максимальная амплитуда флуктуаций находится в пределах  $5\cdot 10^{-6}$  В, что составляет менее 2% от среднего уровня сигнала.

Из экспериментов следует, что наибольшие флуктуации мощности наблюдаются у лазера ЛГН-703, не имеющего каких-либо устройств стабилизации мощности. Лазер ЛГН 224-1 со стабилизированным блоком питания и ЛГН-702 с водяным охлаждением имеют существенно меньшие флуктуации мощности. Для эффективного улучшения стабильности мощности следует оптимизировать конструкцию резонатора и термостабилизировать отдельные его узлы (для уменьшения долговременной нестабильности), обеспечить вибро- и акустозащиту, стабилизировать источники питания (для устранения технологических пульсаций), а также оптимизировать режим возбуждения, провести подбор или разработку высококачественных активных элементов (для подавления разрядных шумов).

#### **4.4 Повышение стабильности излучательных характеристик полупроводниковых лазеров**

Значения рабочих параметров полупроводниковых лазеров (рабочего тока, порогового тока, выходной мощности, дифференциальной эффективности,

расходимости излучения, положения оси диаграммы направленности) и их стабильность в значительной степени определяются материалом и структурой лазерного кристалла.

В сопроводительной документации на большинство полупроводниковых лазеров указано недостаточное количество информации для использования их в измерительных системах для оценки состояния поверхностей конструкционных материалов. Поэтому для оценки возможности их использования в составе измерительных систем необходимо исследовать следующие характеристики: вольт-амперную характеристику, ватт-амперную характеристику, диаграмму направленности, зависимость излучательных характеристик от температуры активной области и окружающей среды, от величины инжекционного тока, влияние обратного света на стабильность излучательных характеристик, ширину спектра.

В современных полупроводниковых лазерах встроены фотодиоды, измеряющие мощность излучения с заднего зеркала лазерного диода. Следует отметить, что ватт-амперные характеристики, полученные с переднего и заднего зеркал, не всегда совпадают, что объясняется наличием неоднородностей в материале по длине лазерного диода и влиянием покрытий, наносимых на зеркала [70, 72, 86]. Это характерно для полосковых ДГС-гетеролазеров при мощности излучения менее 3 мВт с одного зеркала [72]. Мощность излучения с одного из зеркал может увеличиваться с током, в то время как с другого она будет уменьшаться. Отсутствие симметрии препятствует использованию стабилизации при помощи обратной связи, регулирующей световой выход с противоположного зеркала.

Распределение мощности излучения в сечении светового потока характеризуется конфигурациями поля в ближней и дальней зонах. В ближней зоне увеличенная с помощью микрообъектива картина распределения мощности излучения может наблюдаться с помощью телекамеры [70]. Конфигурация поля в дальней зоне может быть зарегистрирована по стандартной методике с

использованием фотодиода и щелевой диафрагмы, с помощью телекамеры или линейки фотоприемников, при использовании сканирующего по дуге окружности точечного фотоприемника.

Конфигурация диаграммы направленности (расходимость излучения, положение максимумов) тесно связана с видом ватт-амперной характеристики. Это объясняется влиянием неоднородностей распределения показателя преломления на положение и форму поперечного профиля лазерной моды. Нелинейное изменение оптических свойств лазерной среды в условиях увеличения интенсивности излучения приводит к деформации лазерной моды. Изменение конфигурации лазерной моды может вести к значительному изменению уровня оптических потерь и эффективности накачки. Например, выталкивание канала генерации на периферию активной области ведет к повышению уровня пороговых потерь. Одновременно происходит насыщение мощности лазерного излучения, и на ватт-амперной характеристике образуется ступенька. В силу роста оптического усиления вне лазерного канала начинают выполняться условия генерации в другой конфигурации. В результате эффективный порог снижается, и мощность излучения вновь возрастает до следующей ступеньки ватт-амперной характеристики.

Наиболее распространенными материалами активной среды являются кристаллы, полученные на основе GaAs и InP с активной областью на основе материалов тройных и четверных систем. Примерами таких лазеров являются GaAlAs/GaAl и AlGaInP/InP лазерные диоды. Преимуществами лазеров с четверной системой являются [70, 74]:

- изопериодичность гетероструктуры и отсутствие температурных деформаций, связанных с несоответствием параметров решеток подложки и активной области;
- высокая оптическая прочность зеркал, отсутствие "дефектов темных линий", слабое участие дислокаций в процессе деградации, и, вследствие этого, более высокая долговечность и выходная мощность;

– отсутствие изгибов на ватт-амперной характеристике и большая стабильность оси диаграммы направленности.

Наиболее распространенными структурами лазерных диодов являются [70-76]: двойные гетероструктуры с широким, планарным полосковым, мезаполосковым контактом, с зарощенной мезаполосковой структурой, с квантоворазмерными структурами, поверхностно-излучающие лазеры с планарной полосковой и мезаполосковой структурой при ширине контакта менее 15 мкм имеют одномодовый режим генерации и более низкие значения порогового тока по сравнению с лазерами с широким контактом. Лазерные диоды с зарощенной мезаполосковой структурой имеют распределение мощности в световом пятне, близкое к осесимметричному. Поверхностно-излучающие полупроводниковые лазеры также характеризуются круговой симметрией излучения, но имеют более высокие значения порогового тока.

По сравнению с указанными типами лазерных диодов лазеры с квантоворазмерными структурами имеют в 3 раза меньшее значение порогового тока и более высокое значение характеристической температуры (200 К) и, следовательно, более слабую зависимость порогового тока и выходной мощности от температуры активной области и окружающей среды. Они также характеризуются отсутствием изгибов на ватт-амперной характеристике и более высокой дифференциальной эффективностью. В отличие от других лазеры с квантоворазмерными структурами сохраняют одномодовый режим и длину волны генерации при накачке импульсным током высокой частоты [75].

Наибольшая нестабильность диаграммы направленности наблюдается у GaAlAs-гетеролазеров. Для них отклонение оси диаграммы направленности в плоскости р-п-перехода может достигать  $7^\circ$  при изменении значений рабочего тока от  $1,2I_{\text{пор}}$  до  $2I_{\text{пор}}$  [76]. Диаграммы направленности таких лазеров характеризуются наличием двух внеосевых максимумов и изменением конфигурации с ростом тока накачки. Для GaAlAs-лазеров характерны нелинейные ватт-амперные характеристики. Отклонение оси диаграммы

направленности происходит при тех значениях инжекционного тока, которым соответствуют изгибы на ватт-амперной характеристике. Эти режимы работы могут сопровождаться уширением спектра излучения. Как показывают проведенные исследования, для AlGaInP/InP лазеров с квантоворазмерными структурами в диапазоне  $1,2I_{\text{пор}}$  до  $1,5I_{\text{пор}}$  характерно отсутствие изгибов на ватт-амперной характеристике и более стабильное положение оси диаграммы направленности.

Расходимость излучения различных типов полупроводниковых лазеров в плоскости р-n-перехода уменьшается с  $12^\circ$  до  $5^\circ$  при изменении тока накачки от  $1,2I_{\text{пор}}$  до  $(1,4-1,6)I_{\text{пор}}$  [76]. В плоскости, перпендикулярной р-n-переходу, влияние изменения инжекционного тока на расходимость более слабое. Долговечность полупроводниковых лазеров составляет в настоящее время  $10^5$  ч (10 лет). Спектральная долговечность определяется сдвигом частоты генерации лазера в процессе эксплуатации, который составляет 26 МГц/ч в условиях стабильной температуры [78]. При постоянном токе накачке с ростом температуры происходит увеличение длины резонатора и рост показателя преломления активной среды, что приводит к сдвигу длины волны излучения. Его величина составляет 0,2 нм/К для AlGaInP-лазеров [78].

Причинами флуктуации мощности лазерного излучения являются шумы, обусловленные спонтанным излучением, колебания температуры окружающей среды и обратный свет. Изменения мощности спонтанного излучения вызывают колебания плотности носителей и, следовательно, колебания тока и температуры активной среды, что приводит к дрейфу световой мощности. Изменения температуры окружающей среды приводят к колебаниям значений порогового тока (0,2-0,4 мА/К для лазеров с квантоворазмерными структурами) и дифференциальной эффективности. Температурный дрейф мощности составляет в среднем – 50 мкВт/к [75, 78].

Шумы тока накачки оказывают существенное влияние на флуктуации мощности излучения. При этом уровень шума тем ниже, чем шире спектр

излучения. Для сравнения стабильности спектров генерации целесообразно исследовать поведение продольных мод лазера с многослойной квантоворазмерной структурой и обычного лазера с двойной гетероструктурой в режиме высокоскоростной модуляции, вызывающей значительные колебания концентрации инжектируемых носителей заряда. При накачке постоянным током оба лазера генерируют одну продольную моду. Сравнение спектров генерации в режиме высокоскоростной модуляции показывает, что в лазере с двойной гетероструктурой возникает режим многомодовой генерации, сопровождающийся значительным уширением спектра генерации, спектр квантоворазмерного лазера не претерпевает существенных изменений, длина волны генерации незначительно смещается по сравнению со случаем накачки постоянным током.

Причиной флуктуаций мощности излучения является также обратный свет, возникающий при отражении излучения лазера от различных поверхностей и проникающий внутрь резонатора. Полупроводниковые лазеры являются наиболее чувствительными к шумам от обратного света, его влияние сказывается при интенсивности 0,003%, а при интенсивности обратного света выше 5% возникает генерация импульсного типа. Шумы от обратного света приводят к следующим изменениям характеристик генерации: сдвигу частоты генерации, изменению числа генерируемых продольных мод, изменению значений порогового тока и дифференциальной эффективности, расширению спектра генерации. Для защиты от влияния обратного света применяются оптические изоляторы [156, 166].

Конфигурация диаграммы направленности (основной моды), расходимость и положение экстремумов распределения интенсивности излучения зависят от структуры активной области полупроводниковых лазеров. Характеристикой структуры является профиль распределения диэлектрической проницаемости. В плоскости, перпендикулярной р-n-переходу толщина активного слоя мала, границы между узко- и широкозонными слоями гетероструктуры достаточно резкие, и на распределение поля излучения в основном влияет перепад показателя преломления между слоями, который составляет около 10%. Отклонение оси

диаграммы направленности в указанной плоскости связано с деформацией лазерного кристалла при нагреве, которая имеет две составляющих: изгиб лазерного кристалла из-за разности температур теплоотвода и активной области и изгиб, связанный с различием параметров решетки подложки и активной области кристалла [79]. По результатам расчетов изгиб GaAlAs лазерного кристалла вследствие разности температур теплоотвода и активной области в установившемся режиме генерации приводит к отклонению оси диаграммы направленности на  $27''$  (это отклонение соответствует увеличению температуры на  $6,6\text{ К}$  при значении тока накачки  $0,2\text{ А}$  и напряжения  $1,6\text{ В}$  [72]). Деформация лазерного кристалла, связанная с различием параметров решеток GaAs и AlAs приводит к отклонению оси диаграммы направленности на величину от  $2''$  до  $15''$  в зависимости от толщины подложки и активной области. При монтаже лазерного кристалла на теплоотвод подложкой вверх происходит взаимная компенсация указанных деформаций.

Более сложные изменения диаграммы направленности наблюдаются в плоскости p-n-перехода. Волновод в этой плоскости образуется за счет профиля усиления, а распределение диэлектрической проницаемости является средним между предельно симметричным и асимметричным и обусловлено наличием неоднородностей, которые невозможно проконтролировать в процессе изготовления лазерного кристалла. Об асимметричном профиле мнимой части диэлектрической проницаемости свидетельствует отклонение от оси главного лепестка диаграммы направленности [74]. Диаграмма направленности в плоскости p-n-перехода (рисунок 4.7) в зависимости от профиля диэлектрической проницаемости может иметь различную конфигурацию: с осевым максимумом, полочкой, двумя внеосевыми симметричными максимумами одинаковой интенсивности, двумя несимметричными внеосевыми максимумами различной интенсивности, положение которых сильно зависит от величины инжекционного тока [102, 104].

Появление изгибов на ватт-амперной характеристике и отклонение оси диаграммы направленности имеют единую природу и связаны с нелинейностью оптических потерь с ростом тока накачки при наличии неоднородностей в активной среде.

Изменения температуры активной области и окружающей среды оказывают существенное влияние на излучательные характеристики полупроводниковых лазеров. Можно выделить две области по влиянию температуры на надежность и долговечность лазерных диодов [87, 122, 125]. Первая область ( $t = 20...80^{\circ}\text{C}$ )

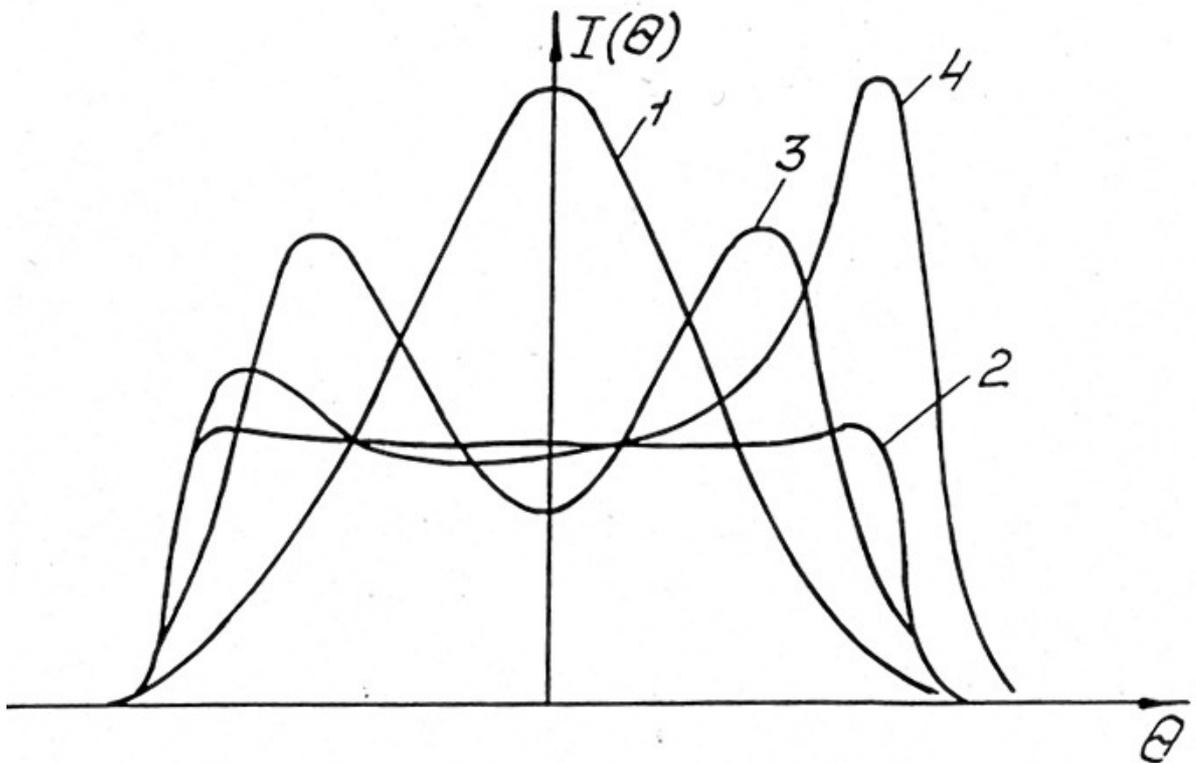


Рисунок 4.7 – Различные конфигурации диаграммы направленности в плоскости р-п-перехода планарного полоскового GaAs-гетеролазера без бокового оптического ограничения: 1, 2, 3 – различные варианты симметричного распределения диэлектрической проницаемости вдоль плоскости р-п-перехода и различные значения инжекционного тока, 4 – ассиметричное распределение диэлектрической проницаемости вдоль плоскости р-п-перехода

характерна для эксплуатации лазерных диодов при комнатной температуре, рост температуры активной области связан с разогревом под действием тока накачки, что приводит к снижению дифференциальной эффективности и выходной мощности, а также оказывает влияние на длину волны генерации стабильность

положения оси диаграммы направленности. Вторая область ( $t > 80^\circ\text{C}$ ) характерна для эксплуатации полупроводниковых лазеров в условиях повышенной температуры (например, в геофизических исследованиях при использовании полупроводниковых лазеров в передатчиках для волоконно-оптических систем в сверхглубоких скважинах). Эта область характеризуется увеличением скорости деградации, максимальная скорость деградации наблюдается в условиях повышенной нагрузки (при значениях инжекционного тока более 100 мА). Как и в области низких температур, наиболее сильное влияние разогрев оказывает на рост порогового тока и изменение наклона ватт-амперной характеристики, что связано с ростом тока утечки.

Следует отметить, что пороговый ток растет с увеличением температуры. Это явление обусловлено температурной зависимостью коэффициента усиления:

$$I_{\text{th}} = I_0 \exp(T/T_0), \quad (4.4)$$

где  $I_0$  – пороговый ток при стандартной температуре,  $T_0$  – характеристическая температура. Для материалов системы AlGaAs эта температура равна 120...150 К, для InGaAsP – 50...70 К. С ростом  $T_0$  температурная зависимость порогового тока ослабевает. Для лазеров с квантоворазмерной структурой характеристическая температура составляет примерно 200 К.

Излучательные характеристики лазерных диодов при повышенной температуре в существенной степени зависят от материала и структуры активной области. Наиболее интенсивно деградационные процессы протекают в GaAlAs-гетеролазерах. Это объясняется наличием "дефектов темных линий", миграцией точечных дефектов, низкой оптической прочностью зеркал, влиянием дислокаций кристаллических решеток и остаточных напряжений, связанных с несоответствием параметров решетки подложки и активной области. Указанный тип лазерных диодов характеризуется сильным изменением крутизны ватт-амперной характеристики при повышенной температуре вплоть до срыва генерации, а также наибольшей склонностью к появлению изгибов, разрывов и гистерезисных петель на ватт-амперной характеристике и наибольшим

отклонением оси диаграммы направленности. InGaAsP-гетеролазеры имеют более высокие ресурсные характеристики и обеспечивают приемлемую безотказную работу при повышенной температуре. Недостатком лазерных диодов с четверной системой является быстрый рост порогового тока и дрейф частоты генерации с ростом температуры, поэтому в области  $t > 100^\circ\text{C}$  могут успешно эксплуатироваться InGaAsP-лазеры, имеющие значения порогового тока при комнатной температуре не выше 15-20 мА. По сравнению с GaAlAs-гетеролазерами лазерные диоды на основе материалов четверных систем менее чувствительны к влиянию остаточных напряжений. InGaAsP-лазеры обеспечивают непрерывную работу в течение 100 ч при температуре  $100^\circ\text{C}$ . Наибольшей стабильностью излучательных характеристик к влиянию температуры обладают лазеры с квантоворазмерной структурой на основе материалов четверных систем. Это связано со снижением влияния остаточных напряжений на процессы деградации при малой толщине рассогласованного слоя активной области (менее  $10^{-6}$  см), а также со слабым влиянием температуры на порог генерации, так как пик плотности состояний хорошо заполнен носителями при любой температуре и выполняется критерий сильного вырождения [167, 170, 176, 182]. Лазерные диоды с квантоворазмерными структурами сочетают в себе преимущества полупроводникового лазера (простая малоинерционная и низковольтная электрическая накачка, высокий КПД, большой коэффициент усиления) с преимуществами лазеров на активных средах с дискретными уровнями – нечувствительностью к температуре.

Изменения характеристик полупроводникового лазера из-за обратной связи могут быть велики даже в том случае, когда относительная доля возвращающегося излучения мала – порядка  $10^{-6}$ . Картина этих изменений сложным образом зависит от расстояния между лазером и внешним отражателем, от амплитуды отраженного света, от уровня возбуждения полупроводникового лазера и др. Внешняя обратная связь влияет как на статические характеристики (усредненная по времени выходная оптическая мощность, число генерируемых

продольных мод и др.), так и на динамические характеристики (амплитуда шумов, переходные процессы и др.).

При работе в непрерывном режиме медленные изменения тока сопровождаются изменениями температуры активной области. Следовательно, показатель преломления и частота  $\omega$  также будут изменяться, из-за чего на обычную зависимость выходной мощности от тока будут накладываться периодические осцилляции, которые сопровождаются гистерезисными эффектами. На рисунке 4.8 показаны зависимости выходной оптической мощности от величины постоянного тока для полупроводникового лазера на GaAs/AlGaAs при наличии и отсутствии обратной связи. Отчетливо выражены периодические осцилляции, обусловленные интерференцией.

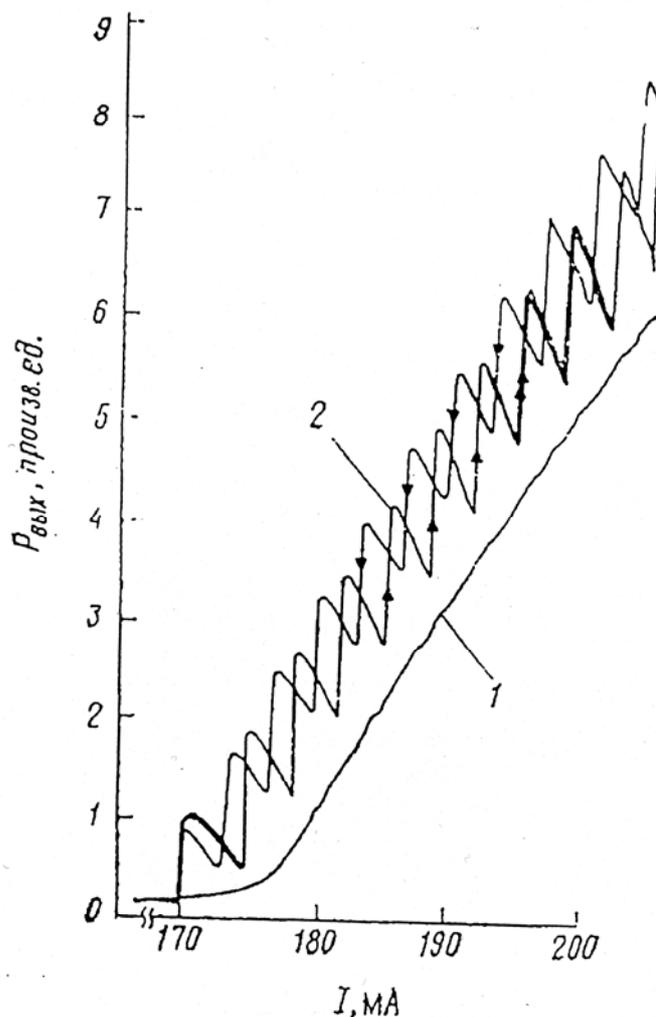


Рисунок 4.8 – Пример зависимости выходной мощности от величины постоянного тока (теоретический расчет): 1 – без внешней оптической обратной связи, 2 – с обратной связью

По совокупности рассмотренных параметров наиболее приемлемыми для использования в контрольно-измерительных системах являются лазерные диоды с квантоворазмерными структурами с активной областью на основе материалов четверных систем. Их преимуществами являются: стабильность оси и конфигурации диаграммы направленности, более высокая стабильность по сравнению с другими типами полупроводниковых лазеров порогового тока, дифференциальной эффективности и частоты генерации вследствие слабого температурного дрейфа параметров и отсутствия "дефектов темных линий", низкие значения порогового тока, а также высокая стабильность спектра генерации к флуктуациям тока накачки [122, 125, 152, 155, 163, 166]. Несмотря на наименьшую чувствительность лазерных диодов с квантоворазмерными структурами на основе материалов четверных систем к влиянию тока накачки на стабильность излучательных характеристик, их применение в контрольно-измерительных системах требует предварительных экспериментальных исследования из-за ограниченности информации в сопроводительной документации для серийно выпускаемых лазерных диодов и излучательных модулей на их основе.

При использовании полупроводниковых лазеров в измерительных системах для оценки поверхности по результатам измерения интенсивности зеркально отраженного излучения наиболее важными являются следующие излучательные характеристики: ватт-амперная характеристика, вольт-амперная характеристика, конфигурация диаграммы направленности и положение оси диаграммы направленности, а также влияние разогрева под действием тока накачки на указанные характеристики.

Были проведены исследования влияния тока инжекции на характеристики лазерного диода SLD1122VS с квантоворазмерной структурой на основе материала четверной системы (AlGaInP) [122, 125, 152, 155, 163, 166, 167, 181, 182]. Основные характеристики, указанные в сопроводительной документации, приведены в таблице 4.6.

Таблица 4.6 – Характеристики лазерного диода SLD1122VS

Параметр		Обозн.	Условия	Мин.	Номин	Макс.	Единица изм.
Пороговый ток		$I_{th}$			40	60	мА
Рабочий ток		$I_{op}$	$P_0=3\text{мВт}$		50	70	мА
Рабочее напряжение		$V_{op}$	$P_0=3\text{мВт}$		2,2	2,5	В
Длина волны		$\lambda$	$P_0=3\text{мВт}$	660	670	680	Нм
Расходимость излучения	⊥ p-n- переходу	$\nu_{\perp}$	$P_0=3\text{мВт}$	24	32	40	Градусы
	. p-n- переходу	$\nu_{\parallel}$	$P_0=3\text{мВт}$	7	11	15	Градусы
Точность позициони- рования	Координата	$\Delta x, \Delta y,$ $\Delta z$	$P_0=3\text{мВт}$			680	мкм
	Угол	$\Delta\varphi_{\parallel}$	$P_0=3\text{мВт}$			63	Градусы
		$\Delta\varphi_{\perp}$	$P_0=3\text{мВт}$			64	Градусы
Дифференциальная эффективность		$\eta D$	$P_0=3\text{мВт}$	0,15	0,45	0,7	мВт/ мА
Астигматизм		$A_s$	$ z_{\parallel}-z_{\perp} $		32		мкм
Ток фотодиода		$I_{mon}$	$P_0=3\text{мВт}$ $V_{op}=5\text{В}$	0,08	0,20	0,60	мА

Схема экспериментальной установки для определения вольт-амперной и ватт-амперной характеристик включает в свой состав источники питания, прибор комбинированный цифровой Щ4313, вольтметр В7-38, вольтметр В7-22А. Выходная мощность излучения лазерного диода определялась по показаниям встроенного фотодиода. Ватт-амперная и вольт-амперная характеристики лазерного диода SLD1122VS показаны на рисунке 4.9.

Диаграммы направленности определялись в плоскости p-n-перехода и в плоскости, перпендикулярной p-n-переходу. Угловое распределение мощности излучения регистрировалось с помощью оптического ваттметра ОМЗ-65. Точность отсчета угла по шкале составляла  $\pm 5^\circ$ . Влияние фонового излучения компенсировалось электрическим током. Диаграммы направленности лазерного диода SLD1122VS показаны на рисунке 4.10,а (в плоскости p-n-перехода) и рисунке 4.10,б (в плоскости, перпендикулярной p-n-переходу).

Исследования показали отсутствие изгибов, разрывов и гистерезисных петель на ватт-амперной характеристике при изменении тока накачки от  $I_{\text{пор}}$  до  $1,6I_{\text{пор}}$ . Вольт-амперная и ватт-амперная характеристики лазерного диода с квантоворазмерной структурой на основе материала четверной системы близки к характеристикам идеализированной модели инжекционного лазера. Отклонение оси диаграммы направленности в указанном диапазоне величин инжекционного тока не отмечалось (ось диаграммы направленности в плоскости р-п-перехода совпадает с геометрической осью лазерного диода с точностью  $\pm 1,6^\circ$ ). С ростом тока накачки влияние шумов спонтанного излучения уменьшается, поэтому расходимость излучения лазерного диода в плоскости р-п-перехода по уровню половины мощности снижается с  $12,5^\circ$  до  $8,5^\circ$  при изменении инжекционного тока от  $I_{\text{пор}}$  до  $1,6I_{\text{пор}}$ . В плоскости, перпендикулярной р-п-переходу, влияния тока на расходимость излучения более слабое. Разогрев лазерного диода под действием тока накачки в течение 30 мин приводит к снижению выходной мощности на 9%, далее в течение 4 часов происходит снижение выходной мощности еще на 3%, при этом положение оси диаграммы направленности и величине порогового тока остаются прежними, конфигурация ватт-амперной характеристики под действием разогрева не изменялась.

Проведенные исследования подтверждают, что лазерные диоды с квантоворазмерными структурами по сравнению с ДГС-полосковыми и зарощенными мезаполосковыми лазерами на основе материалов четверных систем сохраняют значения порогового тока при нагреве под действием тока накачки.

Ослабление влияния температуры на порог генерации объясняется изменением энергетического спектра уровней в квантоворазмерных структурах по сравнению с ДГС-структурами и выполнением критерия сильного вырождения (пик плотности состояний хорошо заполнен носителями при любых значениях температуры) [122, 152, 155, 163, 166, 167].

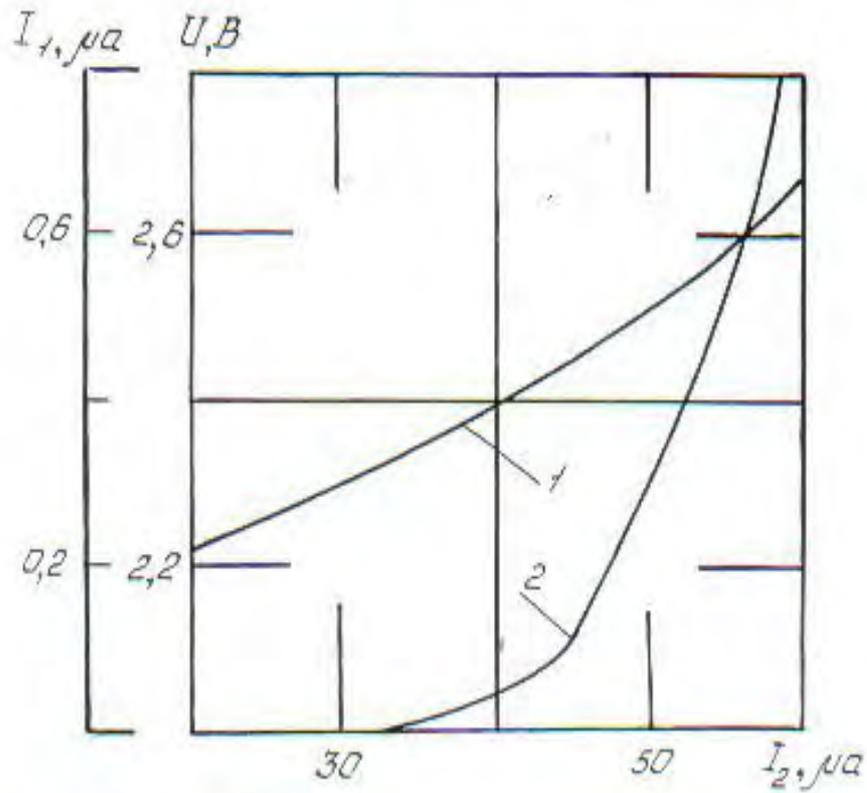


Рисунок 4.9 – Вольт-амперная (1) и ватт-амперная (2) характеристики лазерного диода SLD1122VS

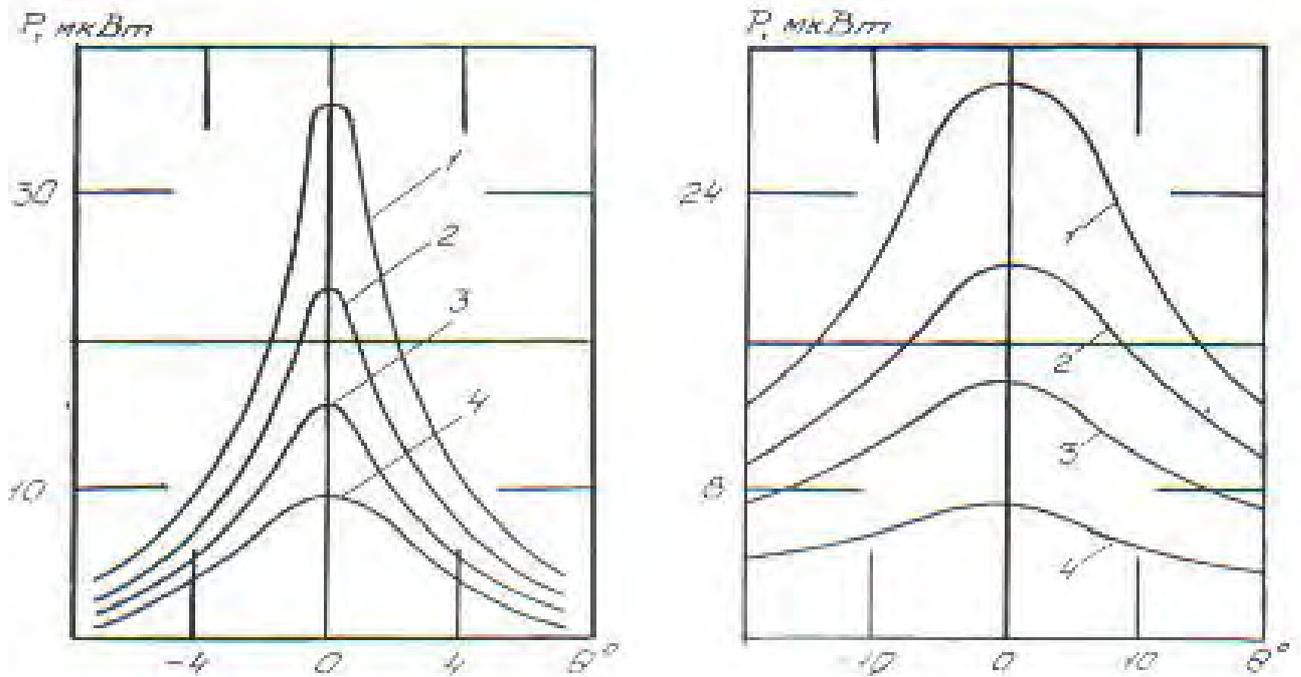


Рисунок 4.10 – Диаграммы направленности лазерного диода SLD1122VS в плоскости р-п-перехода (а) и в плоскости, перпендикулярной р-п-переходу (б): 1 –  $I_{LD} = 48\text{mA}$ , 2 –  $I_{LD} = 52\text{mA}$ , 3 –  $I_{LD} = 56\text{mA}$ , 4 –  $I_{LD} = 60\text{mA}$

Проведены экспериментальные исследования лазерного диода IDL 1000 M 808 С, серийно выпускаемого НПО «Полюс» (г. Москва), с целью определения его основных режимов эксплуатации и излучательных характеристик.

Указанный лазерный диод имеет квантоворазмерную структуру на основе тройной системы AlGaAs, что позволяет обеспечить высокую стабильность диаграммы направленности (рисунок 4.11).

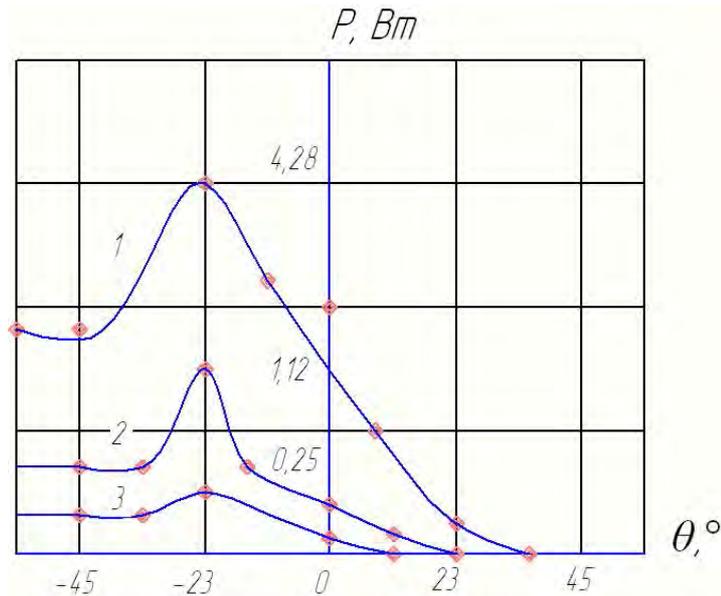


Рисунок 4.11 – Диаграмма направленности лазерного диода IDL-1000M 808 С при различных значениях напряжения источника питания: 1 –  $U = 1,7$  В, 2 –  $U = 1,9$  В, 3 –  $U = 2,1$  В

Установлено, что отличительными особенностями лазерного диода IDL 1000 M 808 С являются узкие диапазоны рабочих значений тока и напряжения на р-п-переходе, что связано с высоким значением дифференциальной эффективности (угла наклона ватт-амперной характеристики). Это обеспечивает высокую стабильность заданной величины выходной мощности лазерного излучения [155, 163].

Недостатками данного лазерного диода являются отсутствие возможности регулирования мощности, степени когерентности и модового состав излучения, которые определяют уровень потерь при распространении излучения в оптическом волокне и ограничивают область применения лазерного диода [160,161,167].

На рисунке 4.12 показана зависимость изменения диаметра пятна для лазерного диода IDL-1000M 808 С от величины инжекционного тока. С ростом тока в диапазоне 1,1А до 1,4 А размер пятна в плоскости, перпендикулярной р-п-переходу, размер пятна уменьшается с 94 до 60 мкм.

Исследована инструментальная составляющая погрешности величины сигнала в измерительных системах для оценки состояния поверхности конструкционных материалов, вызванная нестабильность излучательных характеристик полупроводниковых лазеров. Проведено сравнение стабильности излучательных характеристик полупроводниковых лазеров IDL-1000M 808 С (НИИ «Полюс») и JDSU 2400 Series (США). Результаты экспериментальных исследований приведены на рисунке 4.13.

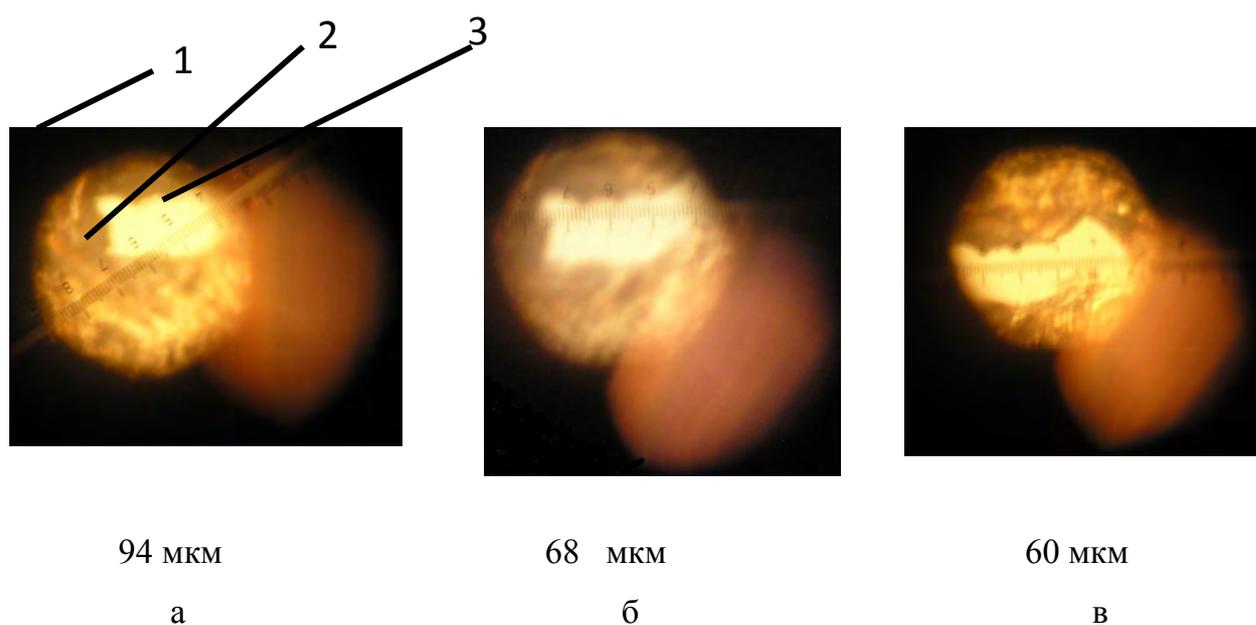
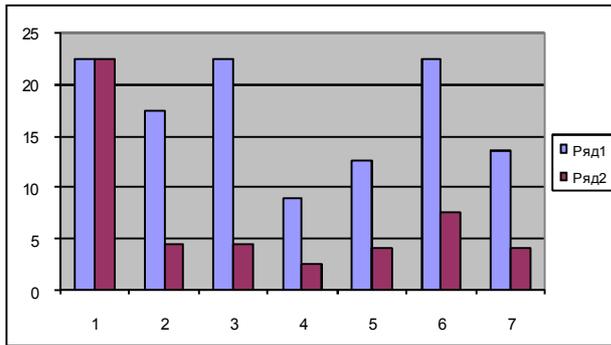
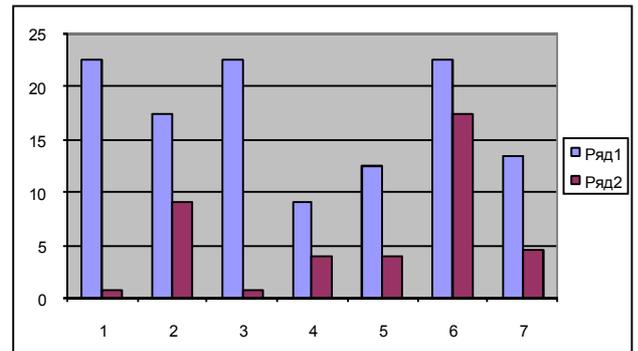


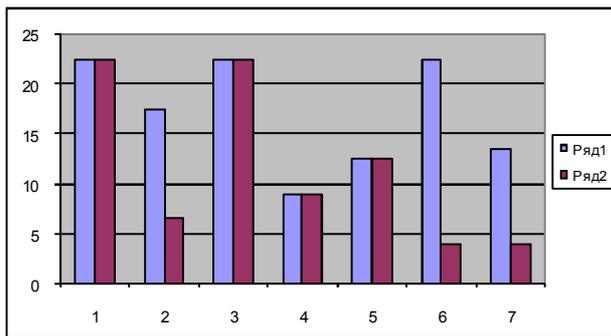
Рисунок 4.12 – Изменение размеров светового пятна излучения в зависимости от величины инжекционного тока: 1 – пластина из органического материала с угольным покрытием, 2 – область подсветки измерительного микроскопа, 3 – след светового пятна на поверхности; а –  $I=1,4$  А, б –  $I=1,25$  А, в –  $I=1,1$  А



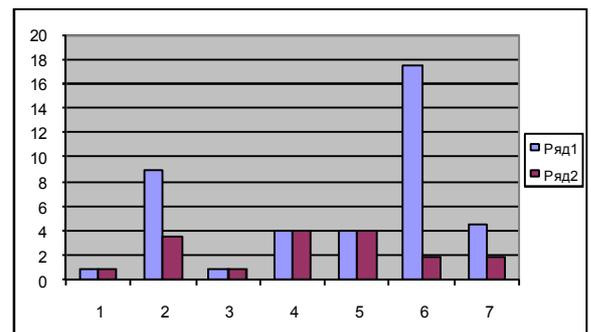
а



б



в



г

Рисунок 4.13 – Сравнительные характеристики полупроводниковых лазеров: полупроводниковый лазер IDL1000M-808C на основе тройной структуры без стабилизации параметров (1) и с использованием термоконтроллера (2)(а), полупроводниковые лазеры IDL1000M-808C (1) и JDSU 2400 Series (2)(б), полупроводниковый лазер IDL1000M-808C без стабилизации параметров (1) и с использованием системы с обратной связью по току (2)(в), полупроводниковый лазер JDSU 2400 Series без стабилизации параметров (1) и с использованием системы с обратной связью по току (2)(г)

1 – нестабильность мощность за счет нелинейности ватт-амперной характеристики, 2 – снижение дифференциальной эффективности при нагреве, 3 – нестабильность оси диаграммы направленности в плоскости р-п-перехода, 4 – нестабильность оси диаграммы направленности в плоскости,  $\perp$  р-п-переходу, 5 – нестабильность диаметра пятна, 6 – изменение расходимости, 7 – нестабильность длины волны излучения при нагреве

Были рассмотрены следующие факторы: нестабильность мощность за счет нелинейности ватт-амперной характеристики, снижение дифференциальной эффективности при нагреве, нестабильность оси диаграммы направленности в плоскости р-п-перехода, нестабильность оси диаграммы направленности в плоскости, перпендикулярной р-п-переходу, нестабильность диаметра пятна, изменение расходимости при нагреве на 10 °С, нестабильность длины волны

излучения при нагреве. Выявлено, что величина порога обнаружения зависит от типа излучателя. [176, 177, 185, 185, 193]. Наименьшая величина порогового сигнала (на уровне 8...10%) достигается при использовании газовых и твердотельных лазеров.

С целью компенсации флуктуаций мощности излучателя вводится опорный измерительный канал. Это позволяет снизить уровень порогового сигнала до 3...5%. Для полупроводниковых лазеров характерны флуктуации оси диаграммы направленности, нестабильность формы пятна излучения, зависимость порогового тока, излучаемой мощности и длины волны излучения от температуры. Для компенсации влияния указанных факторов необходим правильный выбор типа полупроводникового лазера, использование схемы стабилизации мощности излучения лазерного диода с использованием обратной связи по току, а также использованием термостабилизаторов. Использование указанных мер позволяет снизить величину порогового сигнала при использовании полупроводниковых лазеров до 5% [176, 177, 185, 186, 193].

При использовании полупроводниковых лазеров наличие встроенного фотодиода и использовании системы стабилизации мощности излучения с обратной связью по току позволяет снизить величину порога обнаружения на 30%. Выбор порога обнаружения производится в соответствии с вероятностными характеристиками, определенными при теоретических исследованиях [129, 138] (см. главу 3).

Как указано выше, стабильность параметров генерации лазерных диодов (мощности излучения, частоты излучения) обусловлена изменением температуры тока. и влиянием обратного света.

Из-за наличия внешней оптической обратной связи амплитудные шумы в полупроводниковых лазерах достигают уровня 110 дБ/Гц и выше [161, 170]. В качестве мер по уменьшению шумов используют: 1) повышение устойчивости продольных мод лазерного резонатора для подавления переключения мод; 2) предотвращение интерференции поля, отраженного от внешнего зеркала, и поля в

резонаторе полупроводникового лазера; 3) уменьшение интенсивности света, попадающего извне в резонатор (применение оптических развязок).

Стабилизация мощности и частоты излучения может быть достигнута выбором структуры лазерного диода, а также применением внешних схем стабилизации параметров излучения. К первой группе методов относится использование динамически одночастотных лазеров (с распределенной обратной связью, с распределенным брэгговским рефлектором), нанесение покрытия на зеркала резонатора с целью повышения коэффициента отражения. Ко второй группе методов относится использование термоконтроллеров для стабилизации теплового режима работы лазерного диода, система стабилизации выходной мощности с использованием обратной связи по току, сужение спектра излучения с использованием внешнего резонатора [72, 78].

Сканирующая система с изменяемым размером пятна лазерного диода включает в свой состав цилиндрическую линзу, фокусирующую излучение лазерного диода на поверхность вращающегося шестигранного зеркала, сканирующего луч лазерного диода по образующей цилиндра и две цилиндрические линзы, фокусирующие отраженное зеркалом излучение на поверхность цилиндра. Наличие дополнительного электрода в структуре лазерного диода с квантоворазмерной структурой позволяет изменять размер пятна излучения в ближней зоне в плоскости р-п-перехода в соотношении 1:2 путем модуляции тока накачки [60].

Наиболее распространенным способом стабилизации мощности излучения лазерного диода является система обратной связи по току [78, 170, 171], введение подобной схемы может снизить колебания мощности до  $1 \cdot 10^{-6}$ . Однако, этот метод неприемлем при использовании частотной модуляции, так как возможно отклонение выходного сигнала или нелинейный отклик. Амплитудная стабилизация частотно модулируемого лазерного диода может быть достигнута в системе обратной связи при использовании суперлюминисцентного диода в качестве усилителя. 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. Структура системы стабилизации выходной мощности излучения лазерного диода показана на рисунке 4.14.

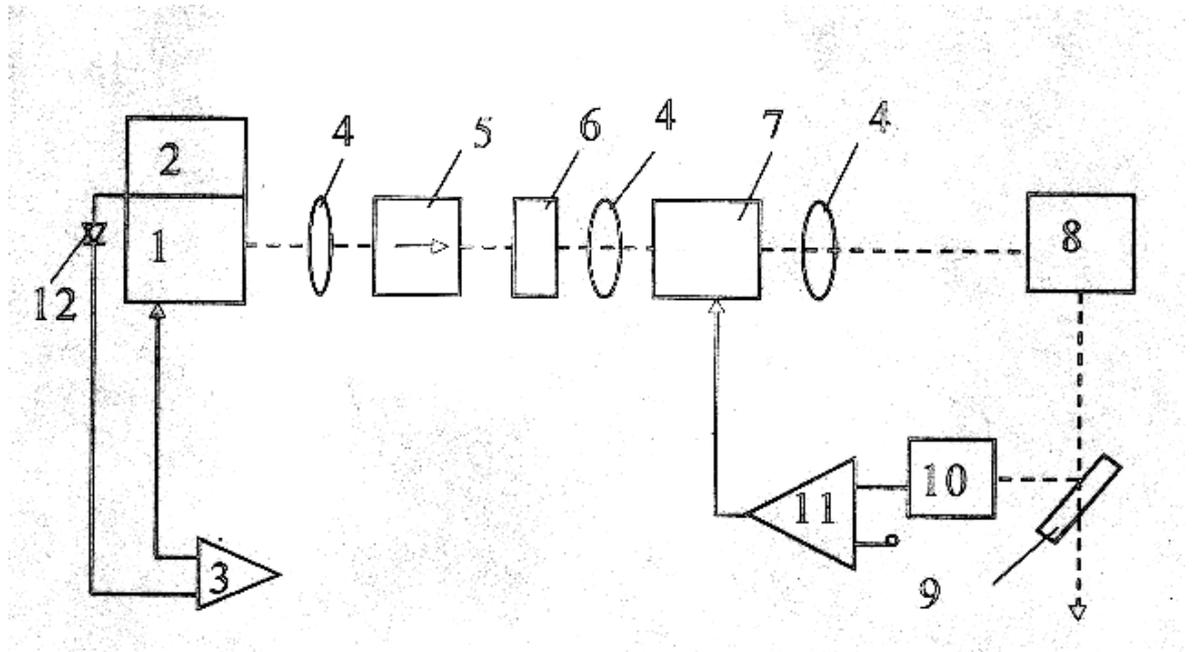


Рисунок 4.14 – Схема стабилизации мощности излучения лазерного диода: 1 – лазерный диод; 2 – термоконтроллер; 3, 11 – устройство сравнения измеренного сигнала с опорным сигналом; 4 – линзы; 5 – оптический изолятор; 6 – фазовая пластина; 7 – усилитель (суперлюминисцентный светодиод); 8 – монохроматор; 9 – расщепитель пучка; 10 – фотодиод; 12 – встроенный фотодиод

Часть излучения одномодового лазерного диода со встроенным термоконтроллером после прохождения через оптический изолятор,  $\lambda/2$  пластину, усилитель и полосный фильтр (монохроматор или интерференционный фильтр) регистрируется фотодиодом системы обратной связи и сравнивается с опорным напряжением усилителя, результирующий сигнал подается на суперлюминисцентный диод. В этой схеме реализованы стандартные методы снижения шумов интенсивности, вызванных влиянием температуры и обратного света: термоконтроллер и оптический изолятор.

## Выводы по главе 4

1. Создан стенд для оценки отражательных характеристик поверхностей конструкционных материалов. Проведена синхронизация работы излучателей посредством включения в электрическую схему генератора задержки импульсов. Это позволило проводить эксперименты по синхронному или выполненному с любой временной задержкой воздействию двух импульсов излучения. Для создания на образце необходимого распределения плотности энергии излучения используется набор объективов, диафрагм и масок.

2. Исследована стабильность излучательных характеристик используемых в стенде лазеров в зависимости от режимов генерации для оценки ее влияния на погрешность измерений. Из экспериментов следует, что наибольшие флуктуации мощности наблюдаются у лазера ЛГН-703, не имеющего каких-либо устройств стабилизации мощности. Лазер ЛГН 224-1 со стабилизированным блоком питания и ЛГН-702 с водяным охлаждением имеют существенно меньшие флуктуации мощности. Для эффективного улучшения стабильности мощности следует оптимизировать конструкцию резонатора и термостабилизировать отдельные его узлы (для уменьшения долговременной нестабильности), обеспечить вибро- и акустозащиту, стабилизировать источники питания (для устранения технологических пульсаций), а также оптимизировать режим возбуждения, провести подбор или разработку высококачественных активных элементов (для подавления разрядных шумов). Временная флуктуация мощности используемых излучателей не превышала 2...3%.

3. Создан стенд для физического моделирования процессов обнаружения и распознавания объектов при дистанционном зондировании поверхностей конструкционных материалов лазерным излучением с учетом принципов дифракционного подобия полей, рассеянных объектом и его масштабной моделью, обеспечивающий перестройки длины волны в диапазоне  $0,63 \leq \lambda \leq 10,6 \cdot 10^{-6}$  м, частота следования импульсов  $1 \leq f \leq 300$  с<sup>-1</sup>, скважность импульса  $1 \leq S \leq 5$ . Используемые фотометрические модели обеспечивают подобие

оптических характеристик поверхностей моделей и реальных объектов. Испытательный стенд использован для проведения анализа уровня освещённости участков элемента конструкции, исследования оптических свойств поверхностей и распределения освещённости.

4. Наиболее приемлемыми для использования в измерительных системах являются лазерные диоды с квантоворазмерными структурами с активной областью на основе материалов четверных систем. Их преимуществами являются: стабильность оси и конфигурации диаграммы направленности (для полосковых ДГС-лазеров возможно появление внеосевых максимумов и отклонение оси диаграммы направленности на величину до  $7^\circ$  в диапазоне тока накачки  $(1,2-2)I_{\text{пор}}$ ), более высокая стабильность порогового тока, дифференциальной эффективности и частоты генерации вследствие слабого температурного дрейфа параметров (для порогового тока – 0,2-0,4 мА/К) и отсутствия "дефектов темных линий", низкие значения порогового тока (в 3 раза меньше, чем для полосковых гетеролазеров), а также высокая стабильность спектра генерации к флуктуациям тока накачки по сравнению с другими типами полупроводниковых лазеров.

5. При использовании лазерных диодов в измерительных системах целесообразно использование стандартных методов стабилизации излучательных характеристик – встроенного теплоотвода для стабилизации теплового режима, использование системы обратной связи по току для управления выходной мощностью, оптического изолятора для защиты от влияния обратного света. Использование указанных мер позволяет снизить величину порогового сигнала при использовании полупроводниковых лазеров до 5%.

## 5 Экспериментальные исследования процессов отражения лазерного излучения от поверхности

### 5.1 Определение зависимостей оптических характеристик конструкционных материалов от параметров лазерного излучения

Отражение теплового потока от цели представляет собой случайный процесс, зависящий от многих факторов: свойств поверхности цели, ее ориентации, длины волны зондирующего излучения, температуры и т.п. При проектировании данных систем необходимо знание средних энергетических статистических характеристик отраженного сигнала, причем первые определяются эффективной поверхностью рассеяния цели, а вторые описываются плотностью вероятности или аналогичной интегральной характеристикой – функцией распределения интенсивности отраженного сигнала [69-72].

Энергетические отражательные свойства объекта определяют долю энергии (или мощности) зондирующего сигнала, излученного через коллиматор по направлению к объекту, которая отразится в обратную сторону и поступит на приемное устройство локационной системы. Эти свойства определяются размерами, геометрией и характером поверхности объекта. Чрезмерно шероховатые поверхности рассеивают падающее излучение по закону Ламберта, согласно которому мощность излучения, отраженного в направлении, составляющем угол  $\varphi$  с нормалью к поверхности (угол наблюдения), равна [18, 33]

$$P = P_0 \cos \varphi, \quad (5.1)$$

где  $P_0$  – мощность излучения, отраженного перпендикулярно к поверхности;  $\varphi$  – угол наблюдения.

Поверхности, отражающие по закону Ламберта, называют диффузно отражающими, причем их яркость не зависит от угла наблюдения  $\varphi$ . В реальных условиях поверхность целей рассеивает тепловое излучение не по закону Ламберта из-за наличия участков с зеркальным характером излучения. Это

свойственно аэродинамическим целям, имеющим хорошо полированную поверхность. Наличие зеркальных участков придает большую направленность отраженному излучению, чем в случае диффузно отражающей поверхности. Так, специальные оптические уголковые отражатели практически полностью возвращают падающее на них излучение в обратном направлении.

Таким образом, геометрические размеры объекта еще не определяют мощность отраженного локационного сигнала. Для ее количественной оценки вводят понятие эффективной поверхности рассеяния (ЭПР), численно равной площади такой плоской поверхности, которая при равномерном рассеянии зондирующего излучения во все стороны (изотропно) создает на приемной апертуре лазерной системы интенсивность излучения, равную фактической.

В таблице 5.1 приведены значения коэффициентов диффузного отражения для различных материалов, температур, углов падения и длин волн зондирующего излучения  $\lambda$  в случае, когда при воздействии лазерного излучения не происходит поверхностного разрушения [146-148].

Пространственное распределение коэффициента диффузного отражения теплового излучения (индикатриса рассеивания) определялось при различных температурах испытуемых образцов  $T_0$  и длинах волн излучения  $\lambda$ , падающего на поверхность конструкционных материалов. Измерение коэффициента диффузного отражения  $A$  в зависимости от угла падения  $\theta$  проводилось с помощью оптической системы, установленной на стенде оптических испытаний.

Анализ характера поведения коэффициента  $A$  показывает, что терморегулирующее покрытие и экранно-вакуумная теплоизоляция имеют диффузное отражение излучения, а фоточувствительный слой солнечных батарей и алюминиевый сплав после химполирования – зеркальное. Так, при отражении от поверхности химполированного алюминиевого сплава ширина телесного угла

Таблица 5.1 – Коэффициент диффузного отражения для различных материалов

Наименование материала	Температура, К	$\lambda = 10,6 \cdot 10^{-6}$ м				
		$\varphi=90^\circ$	$87^\circ$	$85^\circ$	$60^\circ$	$30^\circ$
Теплоизоляционная капроновая ткань	373	0,74	0,32	0,30	0,1	0,04
	323	0,74	0,32	0,30	0,1	0,04
	273	0,74	0,32	0,30	0,1	0,04
	223	0,74	0,32	0,30	0,1	0,04
	173	0,75	0,33	0,31	0,1	0,04
Покрытия на основе диоксида циркония	373	0,95	0,91	0,53	0,52	0,34
	323	0,97	0,93	0,54	0,53	0,36
	273	0,99	0,95	0,55	0,54	0,37
	223	0,99	0,95	0,55	0,54	0,37
	173	0,99	0,95	0,55	0,54	0,37
Пластины радиационных элементов из арсенида галия	373	0,20	0,12	0,03	$0,06 \times 10^{-3}$	$0,03 \times 10^{-3}$
	323	0,26	0,16	0,04	$0,07 \times 10^{-3}$	$0,04 \times 10^{-3}$
	273	0,33	0,20	0,06	$0,09 \times 10^{-3}$	$0,05 \times 10^{-3}$
	223	0,60	0,36	0,10	$0,17 \times 10^{-3}$	$0,09 \times 10^{-3}$
	173	0,70	0,42	0,12	$0,20 \times 10^{-3}$	$0,10 \times 10^{-3}$
Алюминиевый сплав после химполирования	373	0,976	0,589	0,170	$0,279 \times 10^3$	$0,140 \times 10^{-3}$
	323	0,978	0,589	0,170	$0,279 \times 10^3$	$0,140 \times 10^{-3}$
	273	0,980	0,590	0,170	$0,260 \times 10^3$	$0,140 \times 10^{-3}$
	223	0,981	0,592	0,172	$0,281 \times 10^3$	$0,135 \times 10^{-3}$
	173	0,985	0,595	0,173	$0,282 \times 10^3$	$0,136 \times 10^{-3}$
Полилавсановая пленка с алюминиевым покрытием	373	0,93	0,40	$32,4 \times 10^{-3}$	$0,51 \times 10^{-3}$	0
	323	0,93	0,40	$32,4 \times 10^{-3}$	$0,51 \times 10^{-3}$	0
	273	0,93	0,40	$32,4 \times 10^{-3}$	$0,51 \times 10^{-3}$	0
	223	0,93	0,41	$33,7 \times 10^{-3}$	$0,52 \times 10^{-3}$	0
	173	0,96	0,42	$35,2 \times 10^{-3}$	$0,54 \times 10^{-3}$	0
		$\lambda = 1,06 \cdot 10^{-6}$ м				
Теплоизоляционная капроновая ткань	373	0,71	0,31	0,29	0,09	0,03
	323	0,71	0,31	0,29	0,09	0,03
	273	0,71	0,31	0,29	0,09	0,03
	223	0,71	0,31	0,29	0,09	0,03
	173	0,72	0,32	0,29	0,09	0,03
Покрытия на основе диоксида циркония	373	0,71	0,43	0,39	0,39	0,27
	323	0,72	0,44	0,40	0,40	0,27
	273	0,78	0,47	0,43	0,43	0,30
	223	0,89	0,54	0,49	0,49	0,33
	173	0,89	0,54	0,49	0,49	0,33
Пластины радиационных элементов из арсенида галия	373	0,19	0,12	0,03	$0,05 \times 10^{-3}$	$0,03 \times 10^{-3}$
	323	0,25	0,15	0,04	$0,07 \times 10^{-3}$	$0,04 \times 10^{-3}$
	273	0,32	0,19	0,06	$0,09 \times 10^{-3}$	$0,05 \times 10^{-3}$
	223	0,50	0,30	0,09	$0,14 \times 10^{-3}$	$0,07 \times 10^{-3}$
	173	0,60	0,36	0,10	$0,17 \times 10^{-3}$	$0,09 \times 10^{-3}$

Продолжение таблицы 5.1

Наименование материала	Температура, К	$\lambda = 0,56 \cdot 10^{-6}$ м				
		$\varphi=90^\circ$	$87^\circ$	$85^\circ$	$60^\circ$	$30^\circ$
Теплоизоляционная капроновая ткань	373	0,70	0,30	0,28	0,09	0,03
	323	0,70	0,30	0,28	0,09	0,03
	273	0,71	0,31	0,29	0,09	0,03
	223	0,71	0,31	0,29	0,09	0,03
	173	0,72	0,32	0,29	0,09	0,03
Алюминиевый сплав после химполирования	373	0,946	0,573	0,165	$0,270 \times 10^{-3}$	$0,136 \times 10^{-3}$
	323	0,947	0,573	0,165	$0,271 \times 10^{-3}$	$0,136 \times 10^{-3}$
	273	0,950	0,573	0,166	$0,272 \times 10^{-3}$	$0,130 \times 10^{-3}$
	223	0,951	0,574	0,167	$0,272 \times 10^{-3}$	$0,131 \times 10^{-3}$
	173	0,955	0,576	0,168	$0,274 \times 10^{-3}$	$0,132 \times 10^{-3}$
Полилавсановая пленка с алюминиевым покрытием	373	0,80	0,37	$2,6 \times 10^{-3}$	$0,50 \times 10^{-3}$	0
	323	0,59	0,32	$2,7 \times 10^{-3}$	$0,41 \times 10^{-3}$	0
	273	0,84	0,39	$3,3 \times 10^{-3}$	$0,50 \times 10^{-3}$	0
	223	0,88	0,41	$3,5 \times 10^{-3}$	$0,52 \times 10^{-3}$	0
	173	0,94	0,44	$3,7 \times 10^{-3}$	$0,56 \times 10^{-3}$	0
Покрытия на основе диоксида циркония	373	0,40	0,24	0,22	0,22	0,15
	323	0,43	0,26	0,24	0,24	0,16
	273	0,50	0,33	0,30	0,30	0,20
	223	0,56	0,34	0,31	0,31	0,21
	173	0,56	0,34	0,31	0,31	0,21
Пластины радиационных элементов из арсенида галлия	373	0,18	0,11	0,02	$0,05 \times 10^{-3}$	$0,03 \times 10^{-3}$
	323	0,24	0,14	0,03	$0,07 \times 10^{-3}$	$0,03 \times 10^{-3}$
	273	0,30	0,18	0,04	$0,08 \times 10^{-3}$	$0,04 \times 10^{-3}$
	223	0,48	0,29	0,06	$0,13 \times 10^{-3}$	$0,07 \times 10^{-3}$
	173	0,58	0,35	0,07	$0,16 \times 10^{-3}$	$0,08 \times 10^{-3}$
Алюминиевый сплав после химполирования	373	0,828	0,50	0,100	$0,237 \times 10^{-3}$	$0,118 \times 10^{-3}$
	323	0,829	0,50	0,100	$0,237 \times 10^{-3}$	$0,118 \times 10^{-3}$
	273	0,830	0,50	0,148	$0,238 \times 10^{-3}$	$0,114 \times 10^{-3}$
	223	0,831	0,50	0,146	$0,238 \times 10^{-3}$	$0,115 \times 10^{-3}$
	173	0,834	0,50	0,147	$0,239 \times 10^{-3}$	$0,115 \times 10^{-3}$
Полилавсановая пленка с алюминиевым покрытием	373	0,84	0,36	$30,1 \times 10^{-3}$	$0,47 \times 10^{-3}$	0
	323	0,84	0,36	$30,1 \times 10^{-3}$	$0,47 \times 10^{-3}$	0
	273	0,90	0,39	$32,3 \times 10^{-3}$	$0,50 \times 10^{-3}$	0
	223	0,87	0,38	$31,2 \times 10^{-3}$	$0,48 \times 10^{-3}$	0
	173	0,92	0,39	$31,9 \times 10^{-3}$	$0,49 \times 10^{-3}$	0

индикатрисы рассеивания составляет  $\theta=3^\circ$ , для экранно-вакуумной теплоизоляции  $\theta=25^\circ$ , а для терморегулирующих покрытий на основе диоксида циркония  $\theta=125^\circ$ .

При определении коэффициента диффузного отражения конструкционных материалов также применялся тепловизионный метод измерения [80, 146-148,

158]. В этом случае выполнялось условие, что при нагреве образца на величину  $\Delta T=10-15$  °С значением рассеянного потока можно пренебречь, если время паузы между моментами прекращения нагрева и регистрации температуры образца не превысит  $\Delta\tau=0-6$  с, а также скорость нагрева образца будет пропорциональна плотности падающего теплового потока. При этом коэффициент  $A$  определялся как отношение  $A=\Delta T/\Delta T_{\text{ачт}}$ , где  $\Delta T$  – прирост температуры образца,  $\Delta T_{\text{ачт}}$  – прирост температуры эталонного образца, имеющего поверхность абсолютно черного тела.

Существенное значение при построении лазерных систем обнаружения имеет потребный спектральный диапазон работы лазерной системы. С точки зрения учета прохождения лазерного излучения в атмосфере необходимо отметить следующие спектральные диапазоны: дальний УФ ( $\lambda < 0,3 \cdot 10^{-6}$  м), ближний УФ ( $0,3 < \lambda < 0,4$ )  $\cdot 10^{-6}$  м, видимый диапазон спектра ( $0,4 < \lambda < 0,8$ )  $\cdot 10^{-6}$  м, ближний ИК ( $0,8 < \lambda < 1,2$ )  $\cdot 10^{-6}$  м, средний ИК ( $3 < \lambda < 5$ )  $\cdot 10^{-6}$  м, дальний ИК ( $8 < \lambda < 12$ )  $\cdot 10^{-6}$  м. В каждом из перечисленных диапазонов имеются свои типы лазерных систем, например, в области дальнего УФ – эксимерные лазеры, в области ближнего УФ и видимого диапазона – твердотельные лазеры с диодной накачкой и различными нелинейными преобразователями излучения и т.п. Рассмотрим подробно типы лазеров применительно к выделенным диапазонам спектра и режимам работы [130, 32, 137].

Для проведения сравнительного анализа в качестве выходных характеристик лазерных систем примем следующее: (ближний УФ, малая частота повторения – 0,05-0,5 Дж) для данного набора параметров наиболее подходящими лазерными источниками являются эксимерные лазеры, твердотельные лазеры с преобразованием в третью и четвертую гармоники излучения; (видимый диапазон, малая частота повторения – 0,5-0,9 Дж) здесь эффективными являются твердотельные лазеры; (видимый диапазон, большая частота повторения – 0,05-0,2 Дж) данным параметрам отвечают лазеры на парах металла и лазеры на красителях; (ближний ИК, большая частота повторения – 0,1-0,2 Дж) возможно

использование полупроводниковых лазеров; (средний ИК, частота повторения импульсов – 0,05-0,3 Дж) применимы электроразрядные HF/DF химические лазеры и CO<sub>2</sub>-лазеры с преобразованием во вторую гармонику; (дальний ИК, большая частота повторения импульсов – 0,1-1 Дж) данной области параметров отвечает CO<sub>2</sub>-лазер.

Оценка влияния длины волны излучения осуществлялась с помощью соотношения

$$E_{\lambda T} = E_n \frac{1 - A_n}{1 - A_{\lambda T}}, \quad (5.2)$$

где  $A_n$ ,  $E_n$  – нормированные величины коэффициента отражения и энерговклада, поглощенного конструкционным материалом, для  $\lambda = 10,6 \cdot 10^{-6}$  м и удельной мощности  $q = 10^6$  Вт/м<sup>2</sup>;

$A_{\lambda T}$  – коэффициент отражения при заданной длине волны (рисунок 5.1).

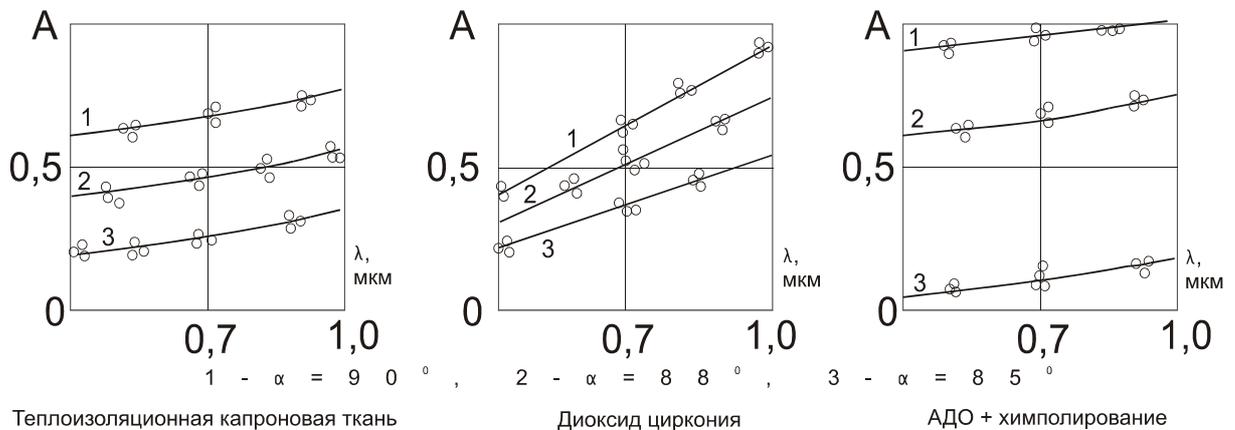


Рисунок 5.1 – Экспериментальные зависимости значения коэффициента отражения от длины волны и угла падения излучения

Из таблицы 5.1 и рисунка 5.1 следует, что в диапазоне длин волн  $\lambda = (0,56 - 10,6) \cdot 10^{-6}$  м для теплоизоляционной капроновой ткани коэффициент диффузного отражения для угла падения  $\varphi = 90^\circ$  изменяется в интервале 0,70-0,74; для угла падения  $\varphi = 85^\circ$  изменяется в интервале 0,28-0,30. Для покрытия на основе диоксида циркония коэффициент диффузного отражения для угла падения  $\varphi = 90^\circ$

изменяется в интервале 0,40-0,99; для угла падения  $\varphi=85^\circ$  изменяется в интервале 0,22-0,55.

Для алюминиевого сплава после химполирования коэффициент диффузного отражения для угла падения  $\varphi=90^\circ$  изменяется в интервале 0,828-0,975; для угла падения  $\varphi=85^\circ$  изменяется в интервале 0,1-0,173. Таким образом, изменение коэффициента диффузного отражения для различных материалов при различных углах падения излучения происходит не более чем на 10%.

Влияния частоты генерации и длительности импульса на отражательные характеристики конструкционных материалов показано в таблице 5.2. Для алюминиевого сплава с химполированием при скважности импульса (отношение периода повторения импульсов к их длительности) 2...4 коэффициент диффузного отражения для угла падения  $\varphi=5^\circ$  изменяется в интервале 0,02-0,15; для угла падения  $\varphi=45^\circ$  изменяется в интервале 0,01-0,12. Для покрытия на основе диоксида циркония коэффициент диффузного отражения для угла падения  $\varphi=85^\circ$  изменяется в интервале 0,77-0,86; для угла падения  $\varphi=45^\circ$  изменяется в интервале 0,39-0,43. Таким образом, изменение коэффициента диффузного отражения для различных материалов при различной скважности импульса происходит не более чем на 15%.

Таблица 5.2 – Зависимость коэффициента диффузного отражения от плотности излучения и от скважности импульса (с использованием в оптической схеме стенда прерывателя излучения)

$\alpha$	Плотность излучения, $q$ , Вт/м <sup>2</sup> , Коэффициент отражения, $A$	Испытания для алюминиевого сплава с химполированием			
		Непрерывное излучение	Импульсное излучение, скважность импульса		
			4	6	2
85°	$q$	0,11	0,03	0,06	0,01
	$A$	0,75	0,62	0,75	0,44
45°	$q$	0,73	0,19	0,36	0,04
	$A$	0,26	0,26	0,25	0,18
30°	$q$	0,81	0,23	0,37	0,09
	$A$	0,16	0,15	0,15	0,10
$\alpha$	Плотность излучения, $q$ , Вт/м <sup>2</sup> , Коэффициент отражения, $A$	Испытания для покрытия из диоксида циркония			
		Непрерывное излучение	Импульсное излучение, скважность импульса		
			4	6	2
85°	$q, 10^{-2}$	3,5	3,1	3,2	2,9
	$A, 10^{-2}$	0,32	0,28	0,32	0,25
45°	$q, 10^{-2}$	1,6	1,3	1,3	1,2
	$A, 10^{-2}$	0,16	0,14	0,11	0,15
30°	$q, 10^{-2}$	2,2	2,0	2,1	2,0
	$A, 10^{-2}$	0,12	0,11	0,10	0,12

## 5.2 Определение допустимого уровня плотности мощности излучения при отсутствии повреждения материалов

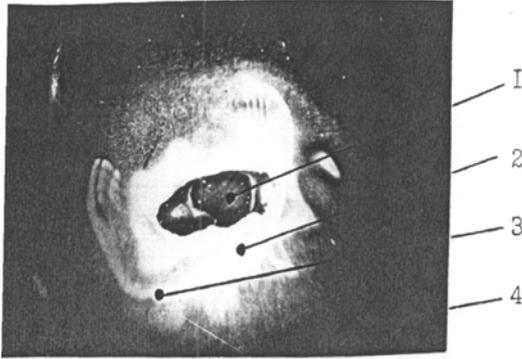
Для оценки допустимых уровней интенсивности лазерного излучения на поверхности конструкционных материалов проведена оценка порога их повреждаемости [80, 146-148].

Рассмотрим изменение терморadiационных характеристик конструкционных материалов летательных аппаратов при воздействии лазерного

излучения:  $A_s$  – коэффициент поглощения солнечного излучения,  $\epsilon$  – степень черноты при воздействии излучения подсветки локационной системы обнаружения и сопровождения объекта в случае, если происходит поверхностное разрушение конструкционного материала. В покрытии на основе силикатной связки с наполнителем ( $ZrO_2$ ,  $MgO$ ,  $ZnO$ ) в зависимости от интенсивности потока излучения  $q$  и длительности воздействия  $\tau$  в наружном слое материала наблюдаются повреждения в виде поверхностных трещин, глубоких трещин, стекловидных образований и участков отслоения покрытий в соответствии с рисунком 5.2. Увеличение толщины наружного слоя приводит к снижению значений интенсивности потока излучения  $q$ , т.к. повышение пористости покрытия, концентрации легкоплавких включений приводит к активизации процессов взаимодействия теплового потока с поверхностью образца [146, 147].

У покрытия на основе высокомодульного жидкого стекла с наполнителем ( $ZrO_2$ ) наблюдаются повреждения в виде поверхностных трещин, глубоких трещин с высокой плотностью распределения, участков отслаивания покрытий в соответствии с рисунком 5.2.

Увеличение числа слоев при изготовлении покрытия конструкционного материала приводит к снижению интенсивности потока излучения, т.к. происходит увеличение концентрации легкоплавких включений и пористости поверхностного слоя, что приводит к активизации процессов образования трещин при нагреве. Наличие подслоя на основе эмалей вызывает интенсивное выделение газообразных включений и вспучивание наружного слоя материала. Присутствие легкоплавких образований в составе наполнителя приводит к появлению участков потемнения поверхности образцов в зоне взаимодействия теплового потока. Замечено, что при длительности выдержки  $\tau > 20$  с и плотности излучения  $q \sim 2 \cdot 10^6$  Вт/м<sup>2</sup> происходит испарение включений и обесцвечивание затемненных участков. С целью улучшения эксплуатационных свойств покрытия данной группы требуют проведения предварительного вакуумного отжига.

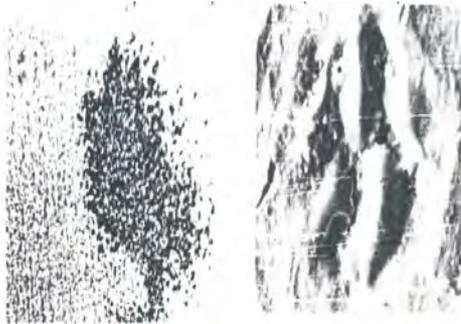


- 1- область оплавления;
- 2- область образования белого конденсированного кварца;
- 3- область изменения оптических свойств просветляющего покрытия;
- 4- область стекловидных образований;

Бесцветный корректор

$$q=(2-9)10^9 \text{ Вт/м}^2 \quad t=5\text{с}$$

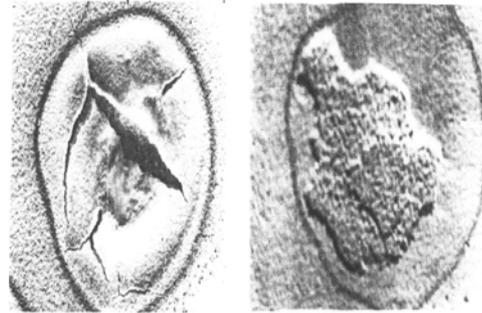
В зоне оплавления уменьшается прозрачность до (0,4-1,7)% и до (0,58-0,60)% в зоне образования белого конденсированного кварца, а в зоне изменения оптических свойств до (74-99)%.



Покрытие на основе силикатной связки с наполнителем ( $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{ZnO}$ )

$$t=20 \text{ с} \quad q=10^6 \text{ Вт/м}^2$$

Увеличение интенсивности приводит к снижению коэффициента поглощения солнечного излучения до 6-7%



Покрытие на основе высокомодульного жидкого стекла с наполнителем ( $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{ZnO}$ )

$$t=20 \text{ с} \quad q=2 \cdot 10^6 \text{ Вт/м}^2$$

Увеличение интенсивности приводит к возрастанию степени черноты до 24%

Рисунок 5.2 – Виды повреждений поверхности конструкционных материалов образца

Оценка абсолютных значений энерговкладов при испытании материалов на стойкость к воздействию лазерного излучения производится с систематической погрешностью 15-20% [80]. Именно она является определяющей в этих экспериментах, т.к. в 5-10 раз превышает случайные погрешности, вызванные неоднородностью оптических, термодинамических свойств и толщины испытуемых материалов и покрытий. Так, характерный диапазон толщин терморегулирующих покрытий составляет  $(100-300) \cdot 10^{-6}$  м и измеряется с погрешностью не хуже  $1 \cdot 10^{-6}$  м. Однородность тканых материалов обусловлена самой технологией их производства.

Измерение коэффициента отражения солнечного излучения  $A_S$  и степени черноты  $\epsilon$  контролировалось в ходе эксперимента с помощью стандартных приборов – фотометра ФМ-59 и терморадиометра ТРМ «И» с систематической погрешностью абсолютных измерений, не превышающей 5%; погрешность же относительных измерений на них еще меньше и не превышает 2%.

Из рассмотренных случаев следует, что увеличение интенсивности теплового излучения приводит к снижению величины коэффициента отражения  $A_S$  до 6-7% и происходит у покрытия в виде силикатной связки с наполнителем ( $ZrO_2$ ,  $MgO$ ,  $ZnO$ ), а возрастание степени черноты  $\epsilon$  до 24% у покрытия на основе диоксида со связкой из высокомолекулярного калиевого жидкого стекла, что превышает допустимые значения, предъявляемые к эксплуатационным характеристикам изделий.

Экспериментальная оценка уровней стойкости при воздействии тепловых потоков лазерного излучения на материалы экранно-вакуумной теплоизоляции в виде тканей ТСОН-Б, ТСОН-3, ТСОН-С и ЛОЛА и их пакетов проводилась для базовой длины непрерывного излучения  $\lambda=10,6 \cdot 10^{-6}$  м. Исследования осуществлялись на испытательном стенде, описанном в главе 4. Так как материалы экранно-вакуумной теплоизоляции широко используются в конструкции подвижных агрегатов, то большое внимание уделялось анализу изменения их механических свойств при испытании на изгиб. Результаты

испытаний сведены в таблицах 5.3, 5.4. Наименьшей стойкостью к тепловому потоку обладает ткань ТСОН-Б. При плотности мощности  $q=3,12 \cdot 10^4$  Вт/м<sup>2</sup> через 3 с материал заметно темнеет и оптический коэффициент  $A_s$  изменяется более чем на 10%, что является недопустимым, хотя разрушения материала не происходит даже и через 360 с. Более стойкие характеристики по сравнению с ТСОН-Б имеет ткань ТСОН-3, повреждение ее наступает лишь при  $10^6$  Дж/м<sup>2</sup> при плотности мощности  $10^5$  Вт/м<sup>2</sup>. Темная ткань ТСОН-С также имеет высокую стойкость. У ткани ЛОЛА при плотности мощности  $10^5$  Вт/м<sup>2</sup> и энерговкладе  $10^6$  Дж/м<sup>2</sup> наблюдается лишь небольшое повреждение ткани, но механические свойства при изгибе сохраняются. Поскольку все рассмотренные ткани используются в качестве наружного слоя пакетов экранно-вакуумной теплоизоляции, то стойкость пакетов определяется стойкостью их наружного слоя [80, 146].

Определение стойкости экспериментальных пакетов экранно-вакуумной теплоизоляции, изготовленных с учетом рекомендаций по повышению их стойкости к воздействию теплового излучения, проводилось следующим образом. Экспериментальные пакеты изготавливались двух типов с наружным покрытием из технических тканей ТСОН-Б, ТСОН-3, ТСОН-С, ЛОЛА и без них. Отличие экспериментальных пакетов от штатных состояло в использовании алюминиевой фольги в качестве наружного слоя покрытия либо в качестве прокладки между наружным слоем прокладки и основного пакета. В испытании участвовали пакеты, как с алюминиевой прокладкой, так и без нее, что позволяло проводить сравнение их стойкости воздействия лазерного излучения. Экспериментальные пакеты, покрытые тканью, имеют значение коэффициента  $\varepsilon$  приблизительно на 10% выше, чем штатные. Пакеты, непокрытые тканью, имели степень черноты в интервале  $\varepsilon=0,01-0,07$ , соответствующую значениям для полированной поверхности алюминия. Величина стойкости, укрывающих тканей ТСОН-Б, ТСОН-3, ТСОН-С, ЛОЛА при воздействии тепловых потоков относительно равна как на контрольных, так и на экспериментальных пакетах, но изменение степени черноты  $\varepsilon$  носит противоположный характер. Величина  $\varepsilon$  контрольных пакетов

под воздействием тепловых потоков увеличивается. Этот факт объясняется обугливанием ткани. На экспериментальных пакетах  $\Delta\epsilon$ , как правило, отрицательно, что объясняется наличием алюминиевой фольги, которая отражает излучение сквозь обгоревшие волокна ткани.

Рассмотрена стойкость к воздействию потоков лазерного излучения конструкционных материалов, применяемых для изготовления защитных устройств [44]. В качестве исследуемых материалов использовались широко применяемые неметаллические полуфабрикаты, а также сплавы X18H10T, OT-4, АМГ-6.

Для прогнозирования возможных разрушений, фазовых и структурных изменений в материалах, кроме количественной оценки скорости нагрева и охлаждения, учитывались также энергетические характеристики, температура сублимации и зависимость от давления внешней среды. Изменение массы образцов после воздействия тепловых потоков определялось на весах марки ВЛР-200 с точностью до  $5 \cdot 10^{-5}$  г. Диаметр пятна и глубина кратера на поверхности материала определялись с помощью микроскопа МБС-9. Изучение структуры материалов проводилось на приборах марок МИМ-8, МБС-9 и электронном микроскопе марки РЭМ-100У. При исследованиях процесса воздействия использовалась базовая длина волны излучения  $\lambda = 10,6 \cdot 10^{-6}$  м. Исследования характера разрушения неметаллических материалов оптическими методами показывают, что у органопласта кратер состоит из обуглившихся остатков наполнителя и окружен зоной термического влияния величиной  $\Delta d = (2-2,5) \cdot 10^{-3}$  м. У углепласта поверхность в зоне воздействия теплового потока является плоской, несколько вспученной. Там угольные волокна более темные, чем у основного материала и между собой разобщены из-за испарения связующего вещества. Зона термического влияния отсутствует. Для материала ТТПС-15 характерен ярко выраженный кратер – обугленный с отдельными каплями «стеклообразного» материала. Значительная глубина кратера указывает на низкую температуру плавления и испарения материала, а отсутствие зоны термического влияния – на

низкую теплопроводность. На образце из материала ТПП-ФС в результате воздействия теплового потока образовался кратер, аналогичный по строению с кратером образца из материала ТПС-15 (рисунок 5.1) . Кратер ограничен плакирующим листом алюминиевого сплава. Зона термического влияния отсутствует. Поверхность кратера состоит из шлаковых включений округлой формы. В листе алюминия изменений в структуре не наблюдается.

Поверхность образца ТИНК в соответствии с рисунком 5.1 покрыта «вспенившейся, стекловидной» массой белого цвета, которая в тонких слоях прозрачна. В зоне термического влияния кратера наблюдаются почерневшие, окислившиеся нитевидные кристаллы  $\text{Si}_3\text{N}_4$ . Протяженность этой зоны составляет  $\Delta d = (2,5-3) \cdot 10^{-3}$  м. В его центральной части обугливание нитевидных кристаллов составляет величину  $\Delta d = (1-1,5) \cdot 10^{-3}$  м. Это указывает на интенсивный выброс компонентов материала в центральной части кратера. ТИНК-Б имеет кратер столбчатого строения. Край кратера шириной  $\Delta d = (2-2,5) \cdot 10^{-3}$  м белого цвета. К центру столбики покрыты капельками шлаковых включений. Столбики разделены туннелями пустот, ширина которых колеблется от  $\Delta d = (0,2-0,5) \cdot 10^{-3}$  м. Такое столбчатое строение кратера указывает на ярко выраженную анизотропию свойств материала.

Проведение исследований на диэлектрике типа органостекла показало, что его стойкость к тепловому потоку существенным образом зависит от коэффициента поглощения. Их коэффициент пропускания излучения составляет  $T=0,9$  при воздействии потоком  $q=10^9$  Вт/м<sup>2</sup>, при длительности  $\tau=10$  с. Поэтому разрушений не наблюдается. У образцов из органопласта и текстолита при потоке мощности  $\tau=0,5$  с возникает полное разрушение. Разрушение органопласта с увеличением времени воздействия теплового потока происходит вглубь равномерно по всей поверхности. На воздухе он имеет реакцию окисления (горения), что приводит к ускорению процессов разрушения в соответствии с рисунком 5.2.

Исследование характера разрушения металлических материалов проводилось с использованием базовой длины излучения  $\lambda=1,06 \cdot 10^{-6}$  м. Режимы воздействия:  $q=(2-9) \cdot 10^9$  Вт/м<sup>2</sup>, длительность  $\tau=5$  с. Для стали X18H10T процесс воздействия протекал по следующей схеме: нагрев, образование кратера, выброс паров из расплавленного металла кратера, последующая рекристаллизация металла после прекращения воздействия лазерного излучения.

Таким образом, увеличение числа слоев при изготовлении покрытия конструкционного материала приводит к снижению  $q$ , т.к. происходит увеличение концентрации легкоплавких включений и пористости поверхностного слоя, что приводит к активизации процессов образования трещин при нагреве образца. Увеличение интенсивности теплового излучения приводит к снижению величины  $A_s$  до 6-7% и происходит у покрытия в виде силикатной связки с наполнителем ( $ZrO_2$ ,  $MgO$ ,  $ZnO$ ), а возрастание  $\varepsilon$  до 24% у покрытия на основе диоксида со связкой из высокомолекулярного калиевого жидкого стекла. Следует отметить, что наибольшую стойкость к воздействию тепловых потоков имеют образцы из углепласта ( $q_{уд}=0,721$  Дж/м<sup>2</sup>·г) и ТИНК-Б ( $q_{уд}=0,467$  Дж/м<sup>2</sup>·г). Проведение исследований на диэлектрике типа органостекла показало, что его стойкость к тепловому потоку существенным образом зависит от коэффициента поглощения. Наиболее стойкими к воздействию лазерного излучения являются оптические материалы с зеркальной поверхностью. Образцы из материала желтого корректора разрушаются при более низких значениях потоков излучения. Кроме того, следует считать легко повреждаемой обратную сторону зеркала, поверхность которого следует также выполнить отражающей. Испытания проводов, кабелей, изоляционных материалов на воздействие тепловых потоков показали их низкий уровень стойкости  $E=(8-10) \cdot 10^5$  Дж/м<sup>2</sup>. Однако имеются провода и кабели, заключенные в оплетку из луженой медной и посеребренной проволоки, у которых уровень стойкости  $E=15 \cdot 10^6$  Дж/м<sup>2</sup>.

### 5.3 Физическое моделирование переотражения лазерного излучения в элементах поверхности

Для экспериментального подтверждения теоретических зависимостей математической модели влияния формы трещины (угла раскрытия трещины и расположения плоскости симметрии трещины) на изменение интенсивности излучения, отраженного от поверхности (глава 2) использовался источник с равномерным распределением интенсивности излучения [144, 145, 153]. Приемный объектив с круглым сечением устанавливался над исследуемой поверхностью на высоте  $H_1$ , диаметр приемного объектива был равен диаметру источника излучения. Угол падения излучения составлял  $\alpha=30^\circ$  и был равен углу зрения приемного объектива. Угол  $\alpha_2$  определял расположение плоскости наблюдения относительно исследуемой поверхности и был равен 0, если плоскость наблюдения перпендикулярна направлению распространения зеркально отраженного излучения от бездефектной поверхности соответствует переднему краю пятна на поверхности. Форма трещины характеризуется углами  $\gamma$ ,  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$ , где  $\gamma$  – угол раскрытия трещины,  $\varphi_1$  – угол поворота плоскости симметрии трещины вокруг линии пересечения плоскости симметрии трещины с исходной поверхностью,  $\varphi_2$  – угол наклона плоскости симметрии трещины к плоскости, перпендикулярной плоскости симметрии трещины. Источник с равномерным распределением интенсивности. Относительная ширина трещины для всех случаев была равна  $S/D_2=1,15$ . Относительная глубина трещины  $S/H_2$  изменялась в диапазоне  $S/H_2=0,65\dots 1,44$ ,  $S/H_2=0,65$  соответствовала  $\gamma=18^\circ$ ,  $S/H_2=1,44$  соответствовала  $\gamma=35,8^\circ$  ( $S$  – ширина трещины,  $H_2$  – глубина трещины).

При  $\alpha_2=0$  и  $\alpha = \gamma$  относительная величина сигнала не зависит от высоты расположения приемного объектива над поверхностью, и при всех значениях  $H_1$  кривая будет иметь один и тот же вид (кривая 1, рисунок 5.3). При  $S/D_2>1$  значения относительной величины сигнала  $W/W_0$  не зависят от соотношения ширины трещины и диаметра пятна, вид кривой определяется конфигурацией

трещины (значениями углов  $\gamma$ ,  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$ ). При  $S/D_2 < 1$  для той же трещины значения относительной величины сигнала  $W/W_0$  возрастают, при  $S/D_2 \rightarrow 0$   $W/W_0 \rightarrow 1$  для всех точек поверхности независимо от наличия дефектов, выявление трещин невозможно. Максимальное значение относительной величины сигнала на поверхности трещины при  $\alpha = \gamma$  соответствует центру трещины ( $x/D_2 = S/2D_2 + 1/2 \cos \alpha$ ) и равно при четном значении числа переотражений в трещине  $W/W_0 = A^{(n-1)}$ , где  $A$  – коэффициент отражения поверхности трещины,  $n$  – число переотражений в трещине. При нечетных значениях  $n$  и  $n \rightarrow \infty$  ( $n > 6$ ,  $S/H_2 < 1$ )  $W/W_0 \rightarrow 0$  для указанного значения  $x/D_2$  при  $S/D_2 > 1$ . При уменьшении угла раскрытия трещины максимум на кривой смещается в сторону приемного объектива. Величина максимума и его смещение зависят от угла раскрытия и глубины трещины, а также расстояния от поверхности до приемного объектива. При  $\gamma = 27^\circ$  и  $H_1/D_2 = 3,4$  максимум смещается на  $0,6D_2$ , значение относительной величины сигнала в максимуме остается неизменным, минимальное значение  $W/W_0 = 0,2$  (кривая 3 на рисунке 5.3). При  $H_1/D_2 = 1$  для той же трещины максимум смещается на  $0,4D_2$ , значение относительной величины сигнала в максимуме возрастает на 10%, минимальное значение  $W/W_0 = 0,4$ . При  $H_1 \geq D_2$  максимум на кривой отсутствует при любых значениях  $n$ , вид кривой определяется шириной трещины  $S$  и соотношением ширины трещины и диаметра пятна. Для  $\gamma = 27^\circ$  при  $S/D_2 > 1$  минимальное значение  $W/W_0 = 0$  (кривая 4 на рисунке 5.3), при  $S/D_2 = 1$  минимальное значение  $W/W_0 = 0,11$ . Для глубокой трещины ( $n > 6$ ,  $S/H_2 < 1$ ) излучение, переотраженное трещиной, не попадает на приемный объектив, кривая имеет минимум  $W/W_0 = 0$  при  $S/D_2 > 1$ , координата  $x/D_2$ , соответствующая минимуму, определяется значениями углов  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  (рисунке 5.4) [143, 144, 153].

Наклон плоскости симметрии трещины на  $\varphi_2 = 2^\circ$  в сторону источника приводит к смещению минимума на  $x/D_2 = 0,3$  в сторону приемного объектива. Поворот плоскости симметрии трещины на угол  $\varphi_1$  приводит к смещению максимумов и минимумов на кривой. Для глубокой трещины ( $S/H_2 < 1$ ) влияние угла  $\varphi_1$  на форму кривой слабое (рисунок 5.4). Для  $\gamma = 18^\circ$  излучение,

переотраженное трещиной, попадает на приемный объектив при  $\varphi_1 = \pm 3^\circ$ , при  $\varphi_1 = 5^\circ$  кривая соответствует  $\varphi_1 = 0^\circ$ . Для неглубоких трещин ( $n=2;4$ ,  $S/H_2 > 1$ ) поворот плоскости симметрии трещины приводит к более сложным изменениям формы кривой (рисунок 5.5). При  $\gamma = 30^\circ$  излучение, переотраженное от поверхности трещины, попадает на приемный объектив при  $-5^\circ \leq \varphi_1 \leq 5^\circ$ . Значение относительной величины сигнала  $W/W_0$  в максимумах ниже, чем при  $\varphi_1 = 0^\circ$ . При увеличении угла раскрытия трещины максимум на кривой смещается в сторону источника излучения, значения  $x/D_2$  и  $W/W_0$  в этой точке зависят от угла раскрытия трещины, глубины трещины, соотношения ширины трещины и диаметра пятна на поверхности, а также от расстояния от поверхности до приемного объектива. Для  $\gamma = 33^\circ$ ,  $S/D_2 = 1,3$  и  $S/H_2 = 1,3$ ,  $H_1/D_2 = 1$  максимум на кривой смещается в сторону источника излучения на величину  $x/D_2 = 0,4$ , значение относительной величины сигнала возрастает до  $W/W_0 = 0,93$ , минимальное значение  $W/W_0 = 0,26$  при  $x/D_2 = 1,55$ .

При  $\gamma = 34^\circ$ ,  $S/D_2 = 1,15$ ,  $H_1/D_2 = 3,4$  (рисунок 5.2), значение  $W/W_0$  снижается до 0,5, минимальное значение  $W/W_0 = 0$  (это объясняется увеличением расстояния от исследуемой поверхности до приемного объектива).

Изменение положения плоскости наблюдений ( $\alpha_2 \neq 0$ ) оказывает существенное влияние на форму кривой  $W/W_0$  (рисунки 5.6, 5.7). Для  $\alpha = \gamma = 30^\circ$  так же, как и при  $\alpha_2 = 0^\circ$ , сохраняется значение относительной величины сигнала в максимуме и расположение максимума при всех значениях  $\alpha_2 \neq 0$ , значение  $W/W_0$  в точках, соответствующих прохождению центра пятна через края трещины ( $x/D_2 = 0,577$  и  $x/D_2 = 1,73$ ) снижается с ростом  $\alpha_2$ .

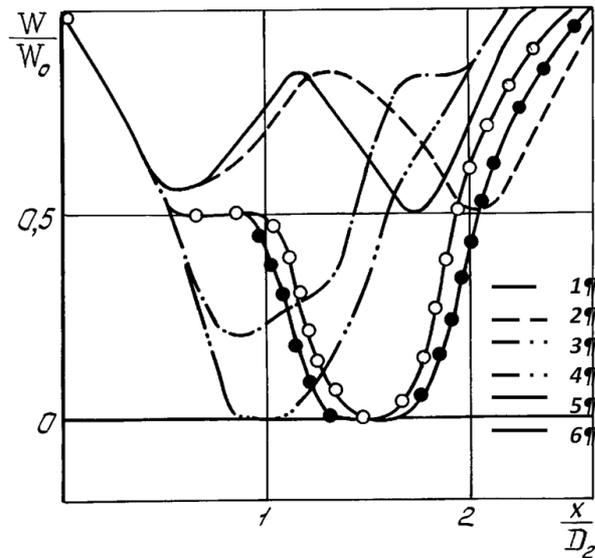


Рисунок 5.3 – Экспериментальные зависимости изменения относительной величины сигнала для  $\alpha=30^\circ$  и различных значений угла раскрытия трещины: 1 –  $\alpha=\gamma=30^\circ$ ,  $S/D_2=1,15$ ,  $H_1/D_2=3,4$ ; 2 –  $\alpha=30^\circ$ ,  $\gamma=30^\circ$ ,  $S/D_2=1,51$ ,  $H_1/D_2=3,4$ ; 3 –  $\alpha=30^\circ$ ,  $\gamma=27^\circ$ ,  $S/D_2=1,15$ ,  $H_1/D_2=3,4$ ; 4 –  $\alpha=30^\circ$ ,  $\gamma=27^\circ$ ,  $S/D_2=1,15$ ,  $H_1/D_2=3,0$ ; 5 –  $\alpha=30^\circ$ ,  $\gamma=34^\circ$ ,  $S/D_2=1,15$ ,  $H_1/D_2=3,4$ ; 6 –  $\alpha=30^\circ$ ,  $\gamma=35,8^\circ$ ,  $S/D_2=1,15$ ,  $H_1/D_2=3,4$

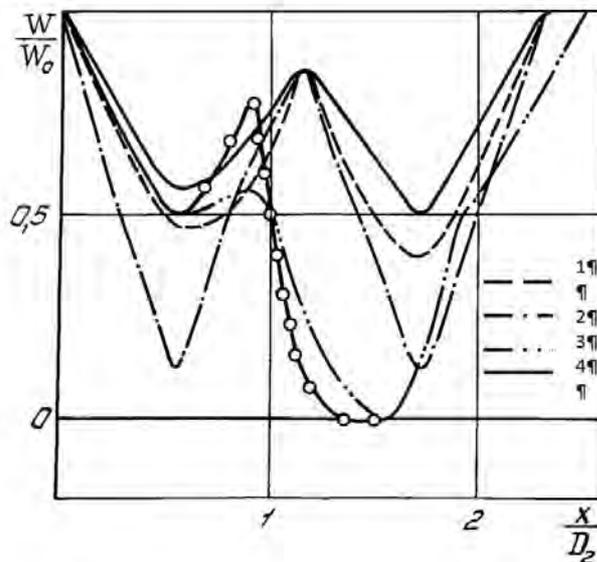


Рисунок 5.4 – Экспериментальные зависимости изменения относительной величины сигнала для  $\alpha=30^\circ$  и различных значений угла установки приемного объектива  $\beta$ : 1 –  $\alpha=\gamma=30^\circ$ ,  $\alpha-\beta=0^\circ$ ; 2 –  $\alpha=\gamma=30^\circ$ ,  $\alpha-\beta=45^\circ$ ; 3 –  $\alpha=\gamma=30^\circ$ ,  $\alpha-\beta=75^\circ$ ; 4 –  $\alpha=30^\circ$ ,  $\gamma=34^\circ$ ,  $\alpha-\beta=45^\circ$ ; 5 –  $\alpha=30^\circ$ ,  $\gamma=34^\circ$ ,  $\alpha-\beta=75^\circ$

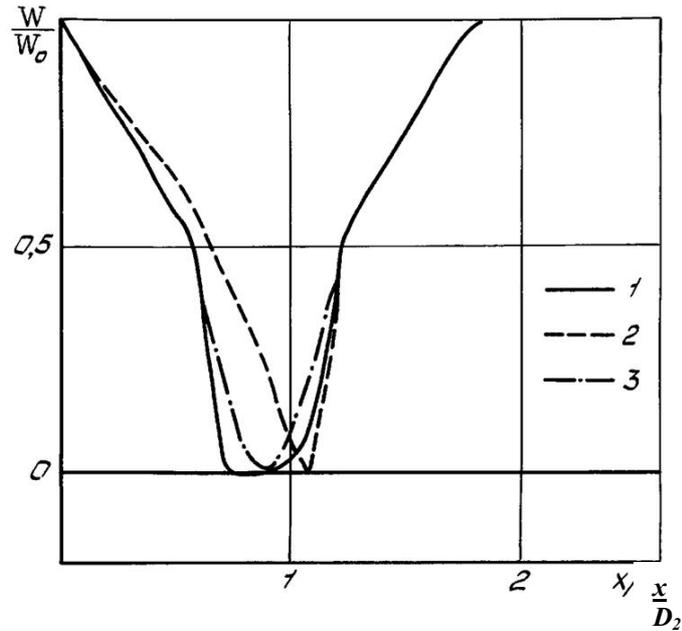


Рисунок 5.5 – Экспериментальные зависимости изменения относительной величины сигнала для  $\alpha=30^\circ$ ,  $\gamma=18^\circ$  и различных положений плоскости симметрии трещины: 1 –  $\varphi_1=0^\circ$ ,  $\varphi_1=\pm 5^\circ$ ; 2 –  $\varphi_1=-0^\circ$ ,  $\varphi_2=2^\circ$ ; 3 –  $\varphi_1=-3^\circ$

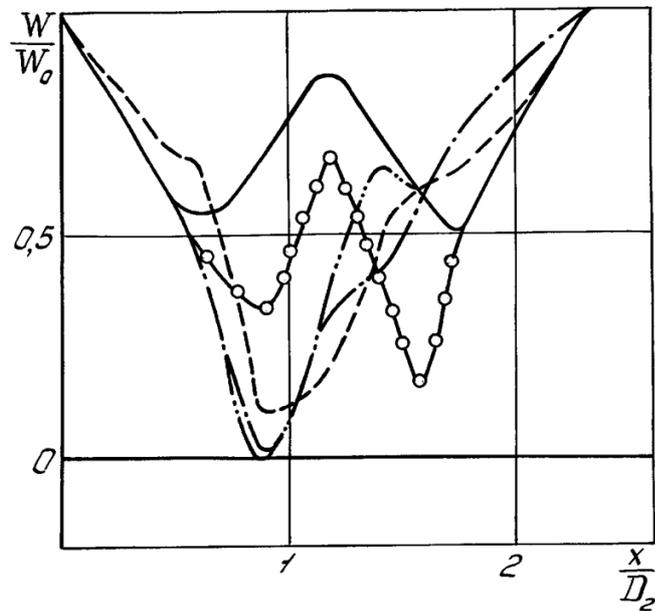


Рисунок 5.6 – Экспериментальные зависимости изменения относительной величины сигнала для  $\alpha=30^\circ$  и различных положений плоскости симметрии трещины: 1 –  $\varphi_1=0^\circ$ , 2 –  $\varphi_1=-3^\circ$ , 3 –  $\varphi_1=3^\circ$ , 4 –  $\varphi_1=-5^\circ$ , 5 –  $\varphi_1=5^\circ$

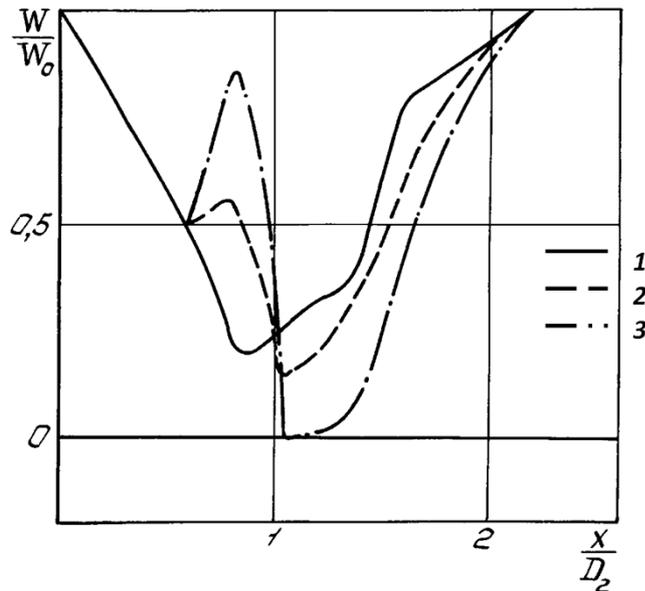


Рисунок 5.7 – Экспериментальные зависимости изменения относительной величины сигнала для  $\alpha=30^\circ$ ,  $\gamma=27^\circ$ , и различных значений угла установки приемного объектива  $\beta$ : 1 –  $\alpha-\beta=0^\circ$ ; 2 –  $\alpha-\beta=45^\circ$ ; 3 –  $\alpha-\beta=75^\circ$

Для трещин с углами  $\alpha \neq \gamma$  характерно появление максимумов при  $x/D_2=0,8...0,9$ , значение  $W/W_0$  в максимуме возрастает с ростом  $\alpha_2$ , при  $x/D_2=1...1,6$  наблюдается минимум, значение  $W/W_0$  в этой точке снижается с ростом  $\alpha_2$ . Для  $\gamma=34^\circ$  максимальное значение  $W/W_0=0,67$  при  $x/D_2=0,9$  и  $W/W_0=0$  при  $x/D_2=1,5$  соответствуют 0,85. Для  $\gamma=27^\circ$  и  $\alpha_2=75^\circ$  максимальное значение  $W/W_0=0,85$  при  $x/D_2=0,83$ ,  $W/W_0=0$  при  $x/D_2=1,04$  [114, 145, 153].

## Выводы по главе 5

1. Проведены исследования зависимостей отражательной способности конструкционных материалов от длины волны, угла падения излучения, длительности импульса, скважности импульса с характерными размерами в диапазоне 0,1...100 мм, с изменением шероховатости в диапазоне Rz 0,005...200 мкм, с размером рассеивающих частиц в диапазоне 0,1...100 мкм с наличием покрытий, имеющих сложную форму поверхности и создан банк данных оптических характеристик поверхностей материалов внешней компоновки ЛА.

2. Анализ характера поведения коэффициента отражения лазерного излучения показывает возможности идентификации объектов, в частности терморегулирующее покрытие и экранновакуумная теплоизоляция имеют диффузное отражение излучения, а фоточувствительный слой солнечных батарей и алюминиевый сплав после химполирования – зеркальное. Так, при отражении от поверхности химполированного алюминиевого сплава ширина телесного угла индикатрисы рассеивания составляет  $\theta = 3^\circ$ , для ЭВТИ  $\theta = 25^\circ$ , а для ТРП на основе диоксида циркония  $\theta = 125^\circ$ .

3. 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 К – 30...35%. Уровень неоднородности отражательной способности конструкционных материалов составляет 5...15%.

4. С использованием физического моделирования переотражения излучения в элементах поверхности подтверждены основные положения математической модели. Расхождения результатов аналитического расчета и физического моделирования не превышало 3...5%.

## **6 Применение лазерных информационно-измерительных систем для обнаружения и распознавания элементов поверхностей ЛА и ГТД и экспериментальная оценка их возможностей**

### **6.1 Экспериментальные исследования возможностей обнаружения и распознавания**

Любая исследуемая поверхность характеризуется одновременным наличием нескольких признаков, поэтому для достоверного распознавания объекта (определения его характерных признаков) и определения его состояния (температуры, уровня напряжений в поверхностном слое) необходимо формирование многоканальной информационной системы с одновременным измерением нескольких параметров.

В силу сложности аналитического расчета зависимости величины регистрируемого сигнала и вероятностей обнаружения и распознавания объектов при дистанционном зондировании с использованием лазерно-электронных систем актуальными являются методы численного и физического моделирования данных процессов.

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

$$\chi = A \frac{k+2}{2} \cos^k \varphi, \quad (6.1)$$

где  $k$  – показатель индикатрисы,  $k=\infty$  – зеркальная поверхность,  $k=0$  – равномерное рассеивание во все стороны [18, 33].

При этом полная величина мощности (энергии) лазерного излучения определяется площадью, ограниченной кривой индикатрисы в полярных координатах в диапазоне от 0 до  $\pi$ . Величина мощности или энергии, попадающей на приемный объектив, определяется площадью, заключенной в угле, соответствующем числовой апертуре приемного объектива:

На разработанном стенде для определения оптических характеристик конструкционных материалов поверхностей проведены экспериментальные исследования по определению отражательных характеристик поверхностей материалов внешней компоновки ЛА [164, 165, 175, 176]. Полученные зависимости представлены на рисунке. 6.1.

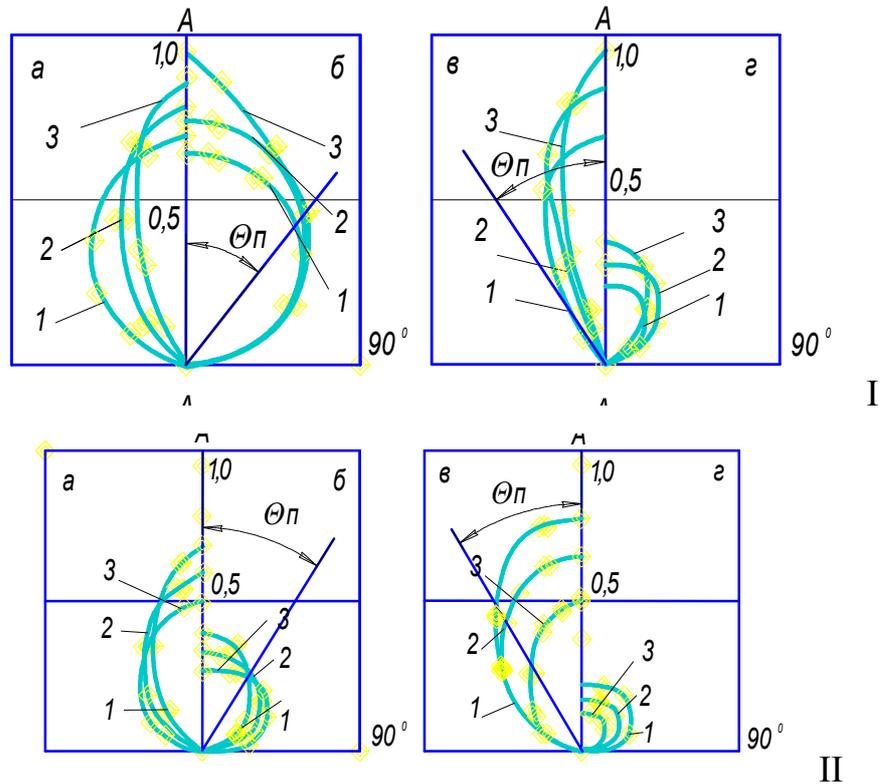


Рисунок 6.1 – Индикатриса рассеивания излучения для различных материалов (в полярных координатах)  
 I: 1 – длина волны  $\lambda = 0,56 \times 10^{-6}$  м, 2 – длина волны  $\lambda = 1,06 \times 10^{-6}$  м, 3 – длина волны  $\lambda = 10,6 \times 10^{-6}$  м  
 II: 1 – частота повторения импульсов 10 Гц, 2 – частота повторения импульсов 20 Гц, 3 – частота повторения импульсов 30 Гц  
 а – теплоизоляционная капроновая ткань; б – пластина с покрытием на основе диоксида циркония; в – алюминиевый сплав после химполирования; г – пластина радиационных элементов из арсенида галлия

Так, для алюминиевого сплава после химполирования при увеличении длины волны излучения с 0,56 мкм до 10,6 мкм происходит изменение показателя индикатрисы рассеивания с 5 до 20, что соответствует увеличению величины принятого сигнала на 35%. Для теплоизоляционной капроновой ткани при

изменении длины волны в том же диапазоне показатель индикатрисы изменяется с 2 до 12, что приводит к увеличению величины принятого сигнала на 45%. Исследован характер поведения коэффициента отражения при импульсно-периодическом воздействии с различной величиной интенсивности. Экспериментально показано, что нитроэмалевое, терморегулирующее покрытия и экранно-вакуумная теплоизоляция имеют диффузный характер отражения излучения, а фоточувствительный слой солнечных батарей и алюминиевый сплав после химполирования – зеркальное. При отражении от поверхности химполированного алюминиевого сплава ширина индикатрисы рассеивания составляет  $\theta = 3^\circ$ , для ЭВТИ  $\theta = 25^\circ$ , а для ТРП на основе диоксида циркония  $\theta = 125^\circ$  [164, 165, 185, 186].

Для осуществления физического моделирования процесса дистанционного зондирования поверхностей ЛА необходимо соблюдать принцип дифракционного подобия полей, рассеянных реальным объектом и его масштабной моделью в дальней зоне [34]. Испытательный стенд физического моделирования процессов обнаружения и распознавания обеспечивает идентичность углов облучения и приема по сравнению с реальной измерительной системой. Используемые модели цели должны подробно воспроизводить в масштабе копии объект локации и имитировать характеристики рассеяния его покрытий. При проведении подобных экспериментальных исследований на испытательном стенде изучаемая модель типового изделия с помощью двух механизмов поворота может вращаться вокруг двух взаимно перпендикулярных осей. При этом 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 преобразуется в угол поворота. Для создания зондирующего пучка освещения модели служат лазеры с рабочими длинами волн излучения в диапазоне  $(0,56-1,06) \cdot 10^{-6}$  м.

В качестве модели объекта используются модели космических аппаратов ALOS (Advanced Land Observation Satellite) и Ikonos. Масштаб моделей 1:22.

В данных КА в качестве материалов внешней компоновки используются: для экрана агрегатного отсека А1, химполирование ( $A_s \leq 0,2$ ); для радиатора-охладителя агрегатного отсека АД1, покрытие ТР-СО-ЦМ ( $A_s \leq 0,15-0,22$ ); для приборного отсека ЭВТИ-ВВ ( $A_s \leq 0,13$ ); для радиатора-охладителя приборного отсека АД1, покрытие ТР-СО-ЦМ ( $A_s \leq 0,15-0,22$ ); для навесного радиатора-охладителя АД1, покрытие ТР-СО-ЦМ ( $A_s \leq 0,15-0,22$ ); для внутренней поверхности солнечных батарей Si, напыление алюминиевое зеркало ( $A_s = 0,152$ ). У моделей КА материалы внешней компоновки соответствуют реальным изделиям.

Стенд физического моделирования 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. Он включает следующее оборудование: привод модели, фотометрическую модель летящей цели, сканирующее устройство, имитаторы фонового излучения. В качестве моделей объектов используются космические аппараты ALOS (Advanced Land Observation Satellite) и КА Ikonos. Плотность мощности зондирующего пучка составляла  $0,6 \frac{Вт}{м^2}$ . Съёмка отраженного сигнала проводилась телекамерой WAT-231S и вводилась для обработки в ПЭВМ. Подсветка имитатором солнца составляла удельную мощность  $1388 \frac{Вт}{м^2}$ . Направление потока излучения имитатора составляло  $\varphi = -45^\circ$  относительно главной плоскости испытательного стенда и  $\beta = 10^\circ$  относительно горизонтальной плоскости. Зондирующий поток лазерного излучения располагался под углами

$\varphi = -30^\circ - 45^\circ$ ,  $\beta = 0-30^\circ$  ( $\varphi$  – угол между вертикальной плоскостью и направлением зондирующего потока лазерного излучения,  $\beta$  – угол между горизонтальной плоскостью и потоком лазерного излучения). Использовалось импульсное лазерное излучение со скважностью в диапазоне 2...4 и длиной волны излучения 0,56...1,06 мкм (Скважность – отношение периода следования (повторения) импульсов одной последовательности к их длительности).

Условия проведения эксперимента представлены в таблице 6.1.

Полученные изображения приведены в приложении 2 и на рисунке 6.2. Номера изображений соответствуют условиям проведения эксперимента. Далее был проведен анализ полученных изображений с помощью пакета программ *MATLAB 7.5*.

Для анализа полученных изображений был применен стандартный пакет программ *MATLAB 7.5* (пакет *ImageProcessingToolbox*). На рисунке 6.3 приведены примеры полученных гистограмм. Номера гистограмм соответствуют зарегистрированным изображениям. Программа для обработки изображений приведена в приложении 1.

По результатам анализа гистограмм распределения интенсивности в изображениях рассчитывалась величина контрастности изображения по зависимости:

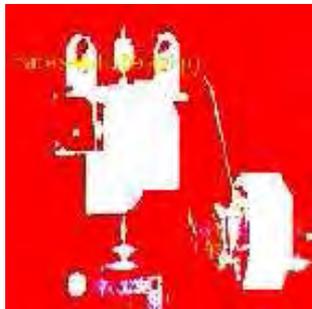
$$K = \frac{I_{\max} N_{\max} - I_{\min} N_{\min}}{I_{\max} - I_{\min}}, \quad (6.2)$$

где  $I_{\max}$  – максимальное значение интенсивности в изображении,  $N_{\max}$  – число пикселей с интенсивностью  $I_{\max}$ ,  $I_{\min}$  – минимальное значение интенсивности в изображении,  $N_{\min}$  – число пикселей с интенсивностью  $I_{\min}$ .

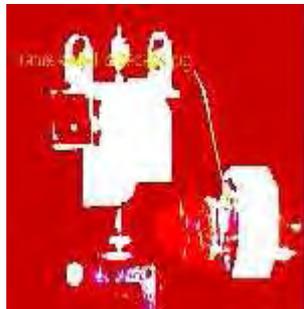
Таблица 6.1 – Значения параметров зондирующего лазерного излучения

Номер	Скважность	Угол падения лазерного излучения	Длина волны излучения
1.1	2	45	1,06
1.2			0,63
1.3			0,56
1.4	2	40	1,06
1.5			0,63
1.6			0,56
1.7	2	30	1,06
1.8			0,63
1.9			0,56
2.1	4	45	1,06
2.2			0,63
2.3			0,56
2.4	4	40	1,06
2.5			0,63
2.6			0,56
2.7	4	30	1,06
2.8			0,63
2.9			0,56
3.1	6	45	1,06
3.2			0,63
3.3			0,56
3.4	6	40	1,06
3.5			0,63
3.6			0,56
3.7	6	30	1,06
3.8			0,63
3.9			0,56

Построены зависимости контрастности изображения от угла падения излучения, длины волны излучения и скважности импульсов (рисунки 6.4, 6.5) [164, 165, 193, 194].



1.1



1.2



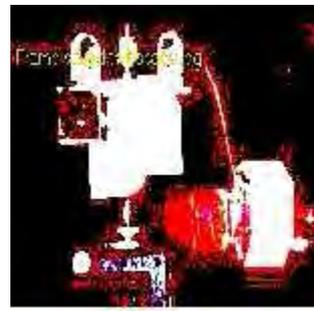
1.3



1.4



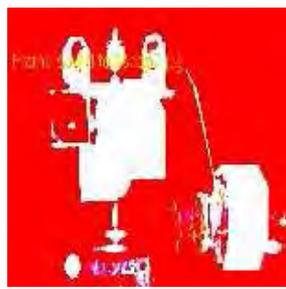
1.5



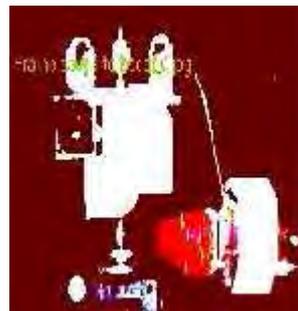
1.6



1.7



1.8



1.9

Рисунок 6.2 – Изображения фотометрических моделей космических аппаратов

Проведена экспериментальная оценка влияния длины волны излучения на вероятность обнаружения объектов при лазерной локации. Коэффициент правдоподобия лазерной локации  $P$  определяется как отношение площади видимого изображения, ограниченной распределением плотности мощности отраженного сигнала, к общей величине площади его изображения. Построена

зависимость коэффициента правдоподобия  $P$  от безразмерного параметра  $K_1 = B_1/\lambda$ , где  $B_1$  – диаметр зондирующего потока лазерного излучения. Зависимость распределения удельной мощности импульсного излучения, отраженной от поверхности модели КА типа Иконос в зависимости от параметров генерации приведена на рисунке 6.6 [164, 165, 192-195].

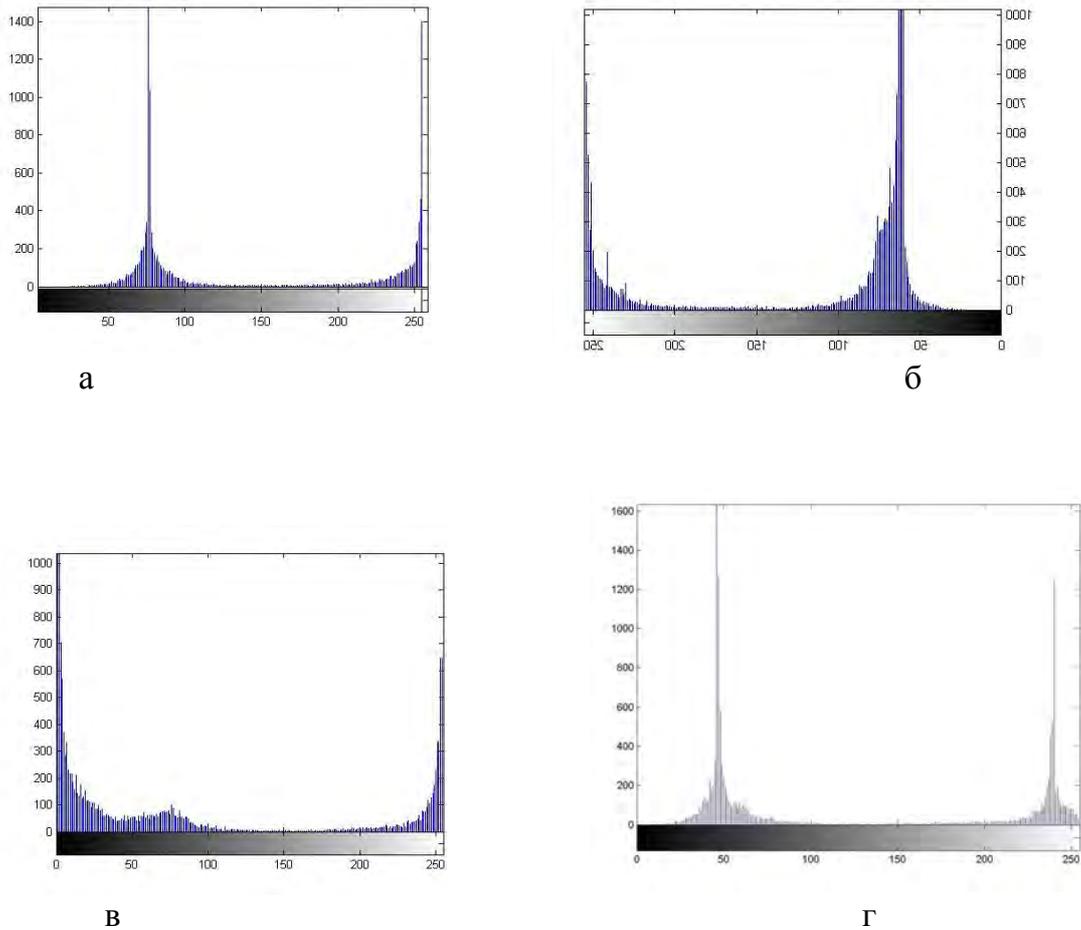


Рисунок. 6.3 – Примеры гистограмм обработки изображений:  
 а – гистограмма для изображения 1.1, б – гистограмма для изображения 1.2,  
 в – гистограмма для изображения 1.3, г – гистограмма для изображения 3.7

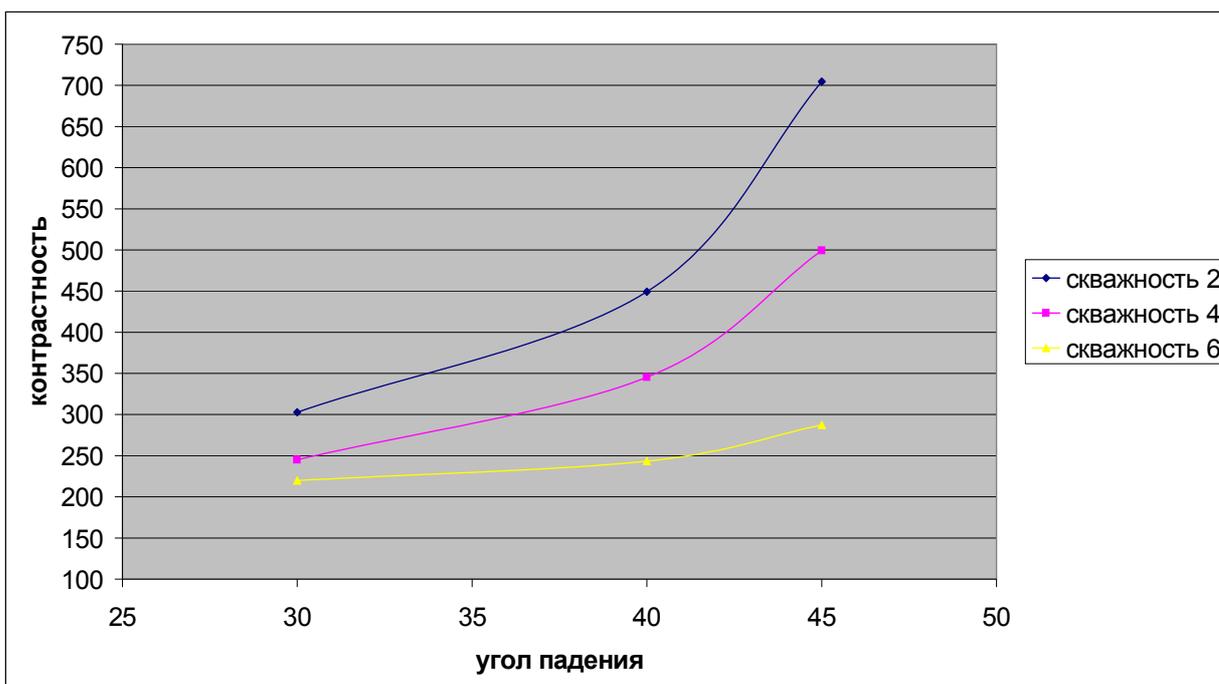


Рисунок 6.4 – Зависимости контрастности изображений от угла падения излучения и скважности импульсов

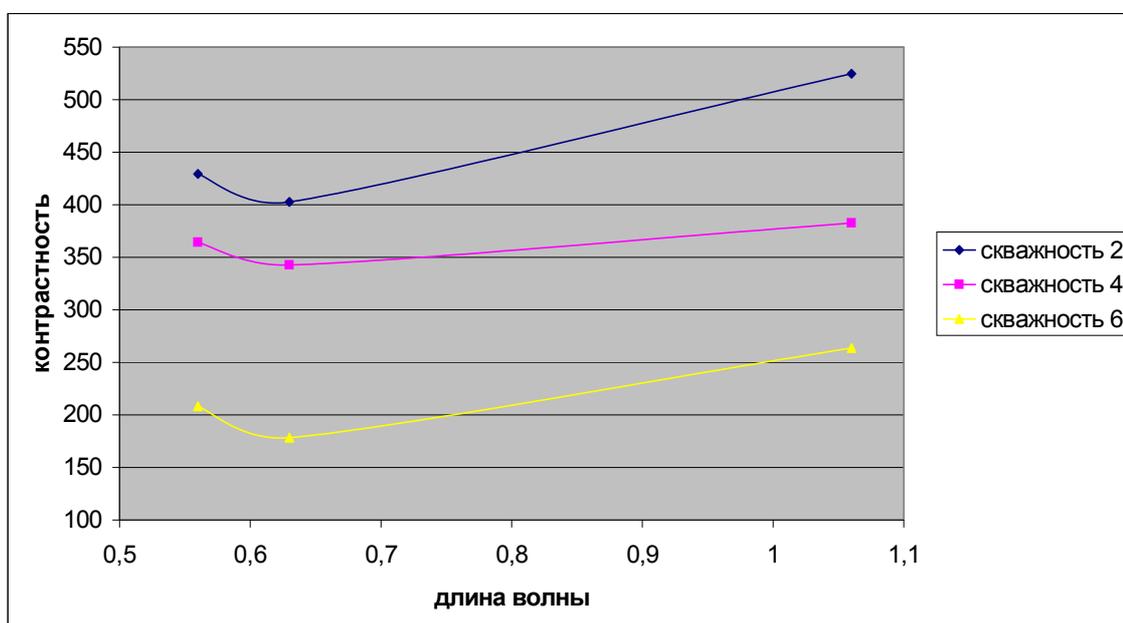


Рисунок 6.5 – Зависимости контрастности изображений от длины волны и скважности импульсов

Процесс обнаружения объекта определялся зондированием пространства лазерным пучком с изменением длины волны излучения  $\lambda$ , частоты генерации  $\nu$ ,

величины скважности импульса  $\Lambda$ . 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  $\lambda = 0,56 \cdot 10^{-6}$  м имеет наибольшую контрастность изображения участков объекта. При переходе эксплуатации 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  $\Lambda = 2$ . Здесь проявляется полная четкость контуров изображения объекта. Заметим, что 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 узко направленной [158, 165, 186, 192-192].

На рисунке 6.7 приводятся сравнительные зависимости величины  $P$  для различных объектов типа КА с учетом изменяемой длины волны  $\lambda$ , частоты генерации  $\nu$  и величины скважности импульса излучения  $\Lambda$ .

Выявлено, что величина коэффициента правдоподобия обнаружения объекта  $P$  зависит от его конструкции при неизменном составе группы материалов внешней компоновки. Состав группы материалов внешней компоновки: теплоизоляционная капроновая ткань; пластины с покрытием на основе диоксида циркония; алюминиевые сплавы после химполирования; пластины радиационных элементов из арсенида галлия.

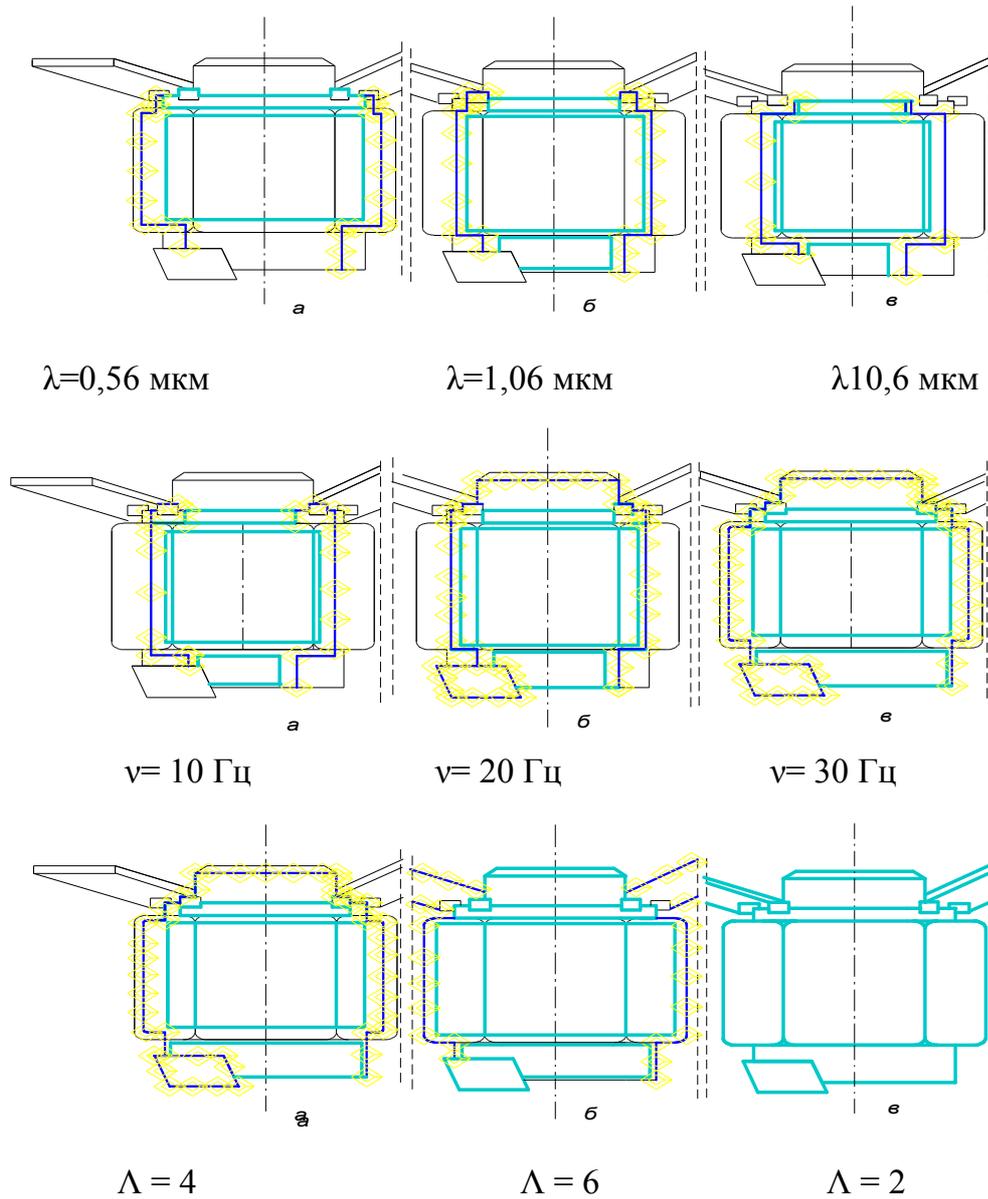


Рисунок 6.6 – Распределение удельной мощности излучения при импульсном режиме генерации

В данных условиях проведения исследований объект типа КА «Ikonos» (США) имеет большую вероятность обнаружения (оптическая ось зондирующего пучка перпендикулярна строительной оси объекта).

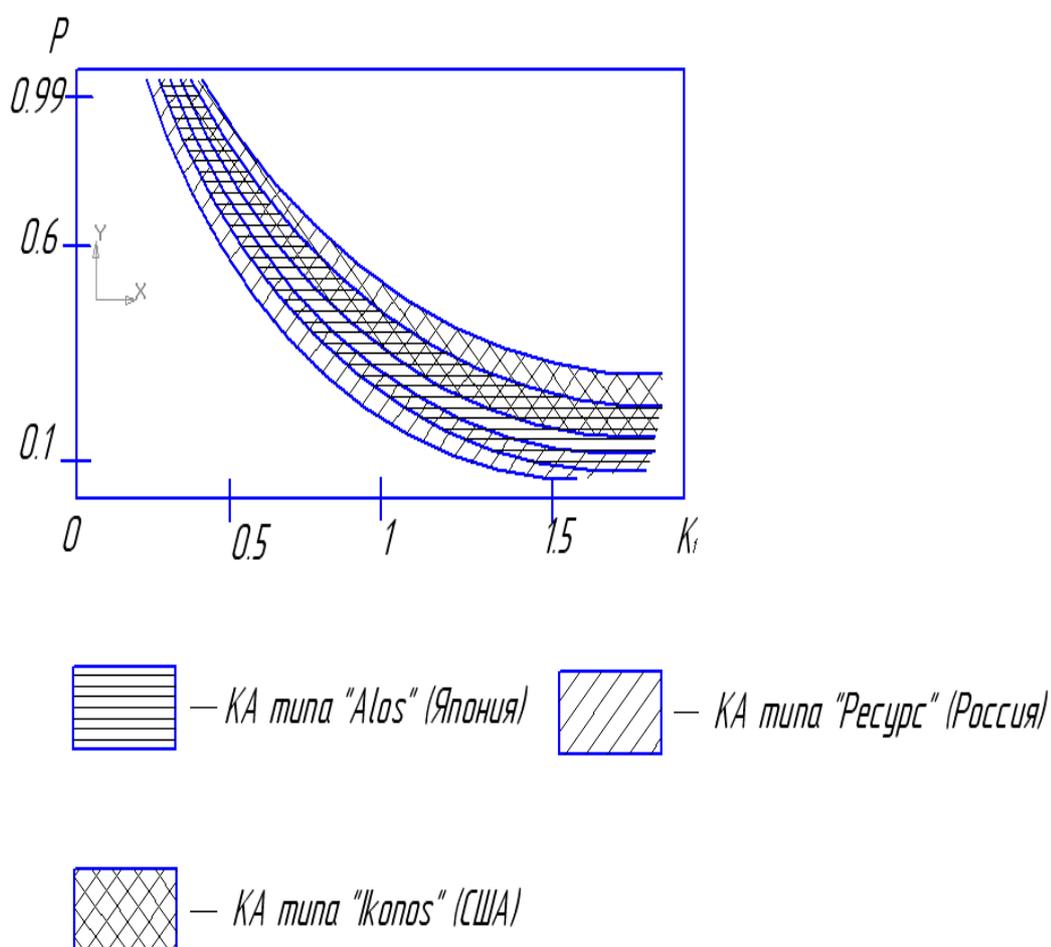


Рисунок 6.7 – Зависимость коэффициента правдоподобия лазерной локации от длины волны излучения для моделей различных КА: 1 – верхняя граница области обнаружения: частота генерации – 30 Гц, скважность импульса 4; 2 – нижняя граница области обнаружения: непрерывный режим генерации

## 6.2 Алгоритм построения и оптимизации лазерно-электронных систем дистанционного зондирования с учетом области их применения

Разработана методика построения и оптимизации лазерно-электронных систем дистанционного зондирования поверхности с учетом области их применения (рисунок 6.8). Первая часть включает сбор априорных данных об объекте контроля – априорной вероятности наличия или отсутствия объекта, предполагаемого диапазона изменения геометрических и механических

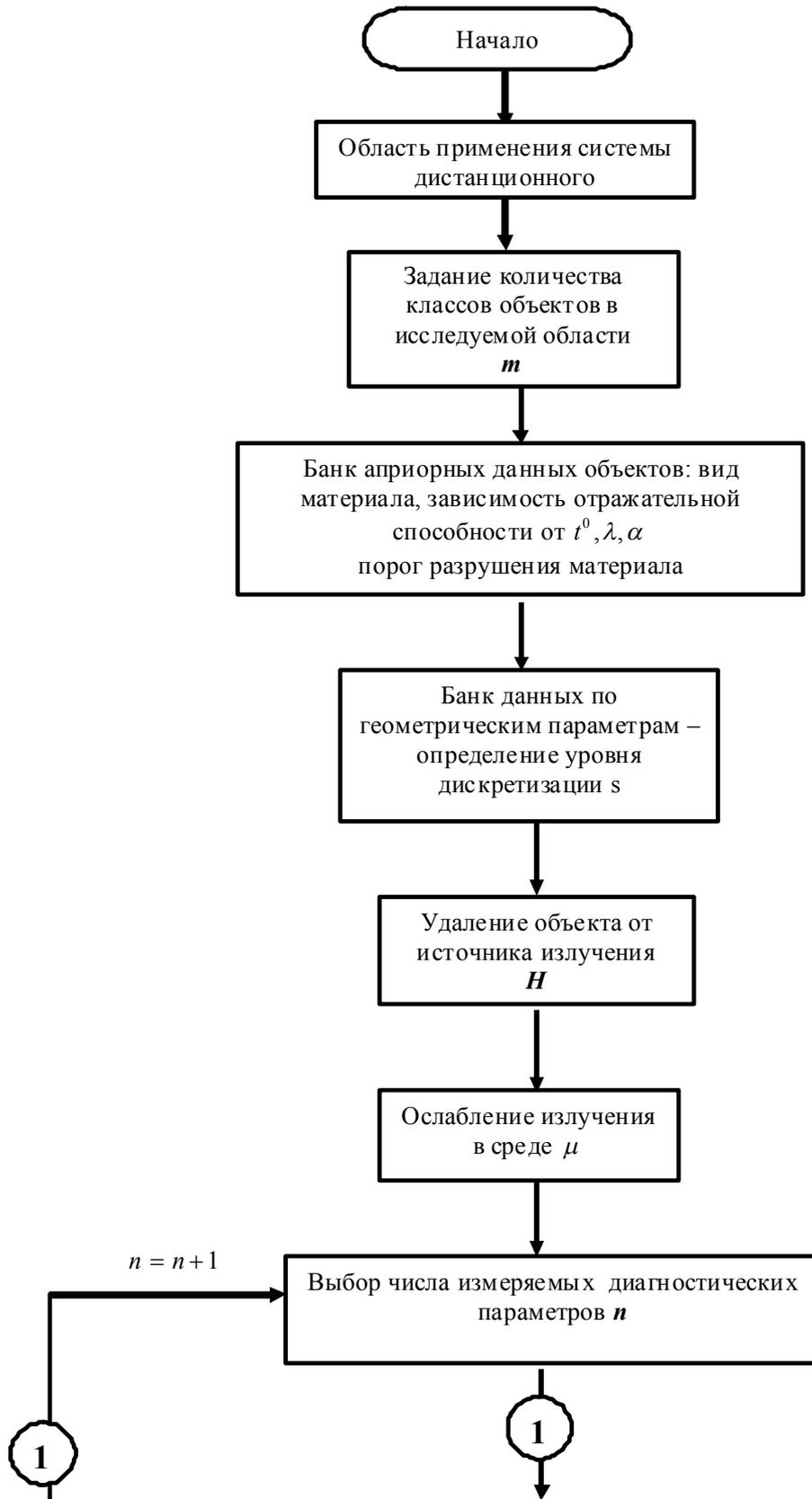
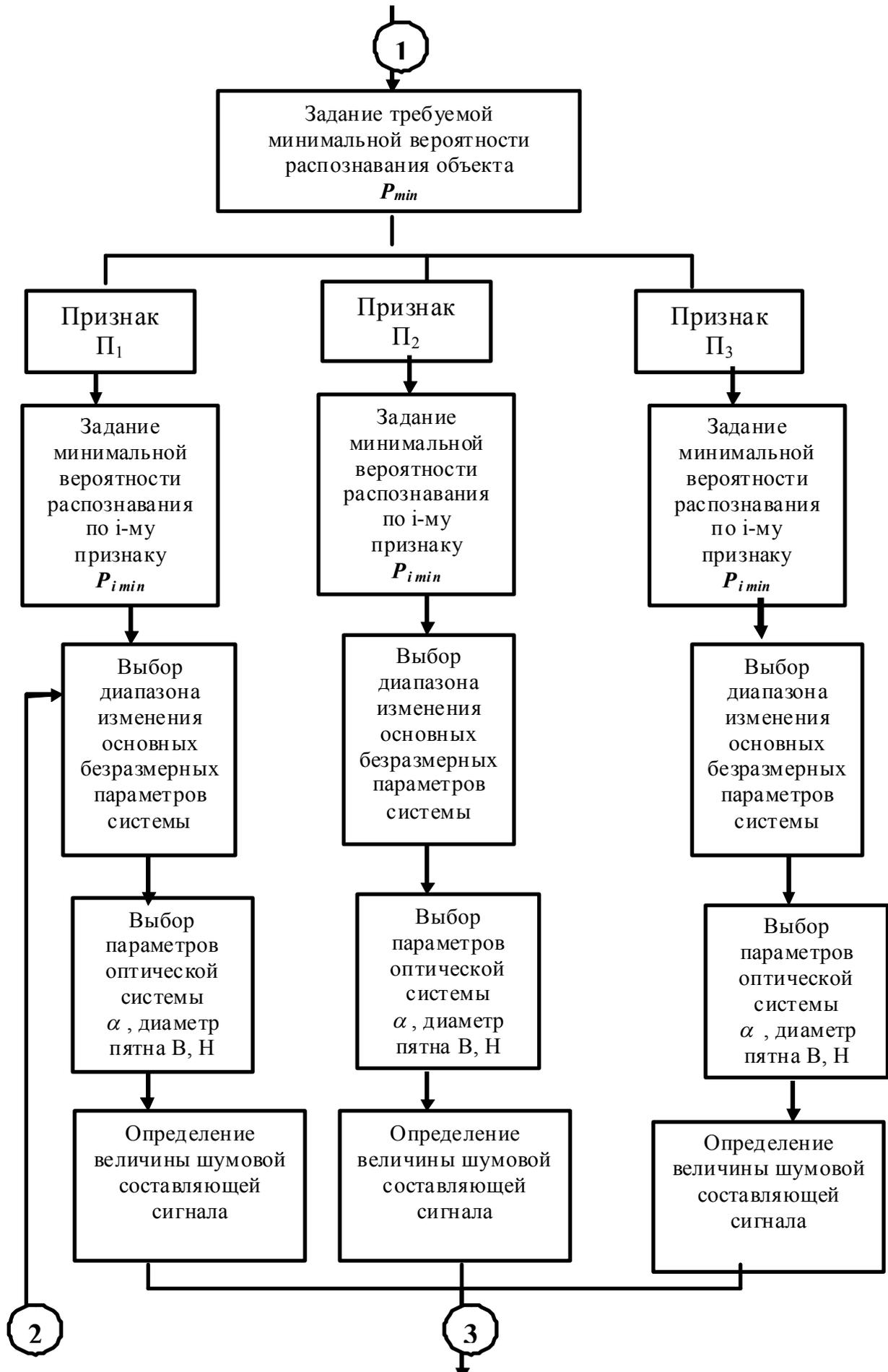
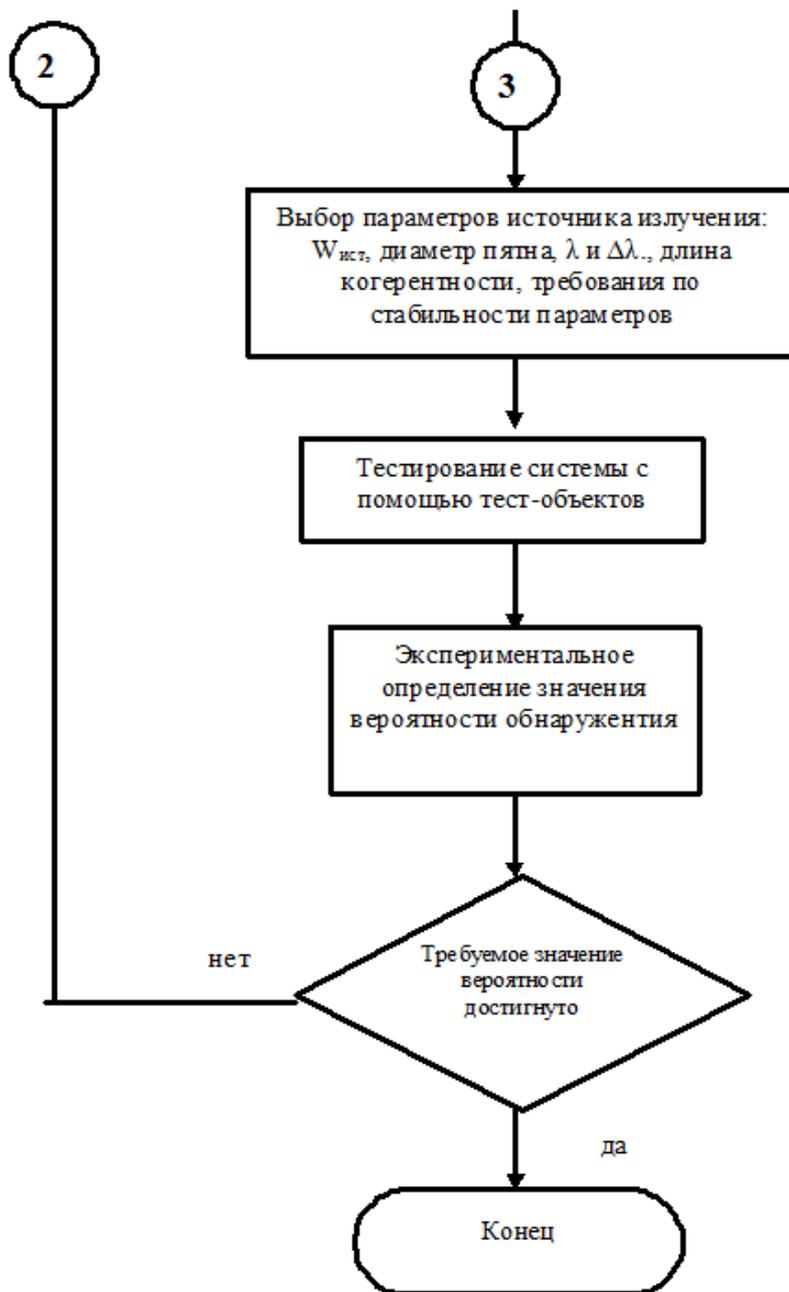


Рисунок 6.8. – Алгоритм оптимизации системы дистанционного зондирования поверхностей конструкционных материалов





характеристик поверхностного слоя, удаление поверхности материала от источника излучения, необходимое число определяемых оптических признаков поверхности [153, 159, 164, 185, 193].

Затем задается требуемая минимальная вероятность обнаружения и распознавания объектов. По каждому из признаков, исходя из требуемой вероятности обнаружения, определяется диапазон изменения основных

безразмерных параметров измерительной системы. Затем определяется допустимая величина шумовой составляющей с учетом предполагаемых характеристик поверхности. На основании этих данных выбирается тип источника излучения и его основные параметры. Далее осуществляется тестирование системы с использованием тест-объектов. По результатам экспериментального определения значения вероятностей обнаружения и распознавания проводится сравнение заданного и достигнутого значений целевой функции. Если требуемое значение не достигнуто, проводится корректировка параметров измерительной системы и ее повторное тестирование.

### **6.3 Лазерный дефектоскоп для обнаружения и распознавания дефектов поверхностного слоя конструкционных материалов**

Выявление повреждений поверхностей образцов осуществлялось по результатам измерения интенсивности зеркально отраженного излучения при сканировании по поверхности [116-118, 143-145, 153].

Схема установки для исследований показана на рисунке 6.9. Излучение полупроводникового лазерного модуля М-65.2 (длина волны излучения  $\lambda = 0,65$  мкм; мощность излучения  $W = 2,5$  мВт) направляется с помощью плоского зеркала 2, коллиматора 4 и линзы 9 на поверхность исследуемого образца 12. Отраженное поверхностью образца излучение с помощью собирающей линзы 5 и плоского зеркала 2 направляется на фотодиод оптического ваттметра поглощаемой

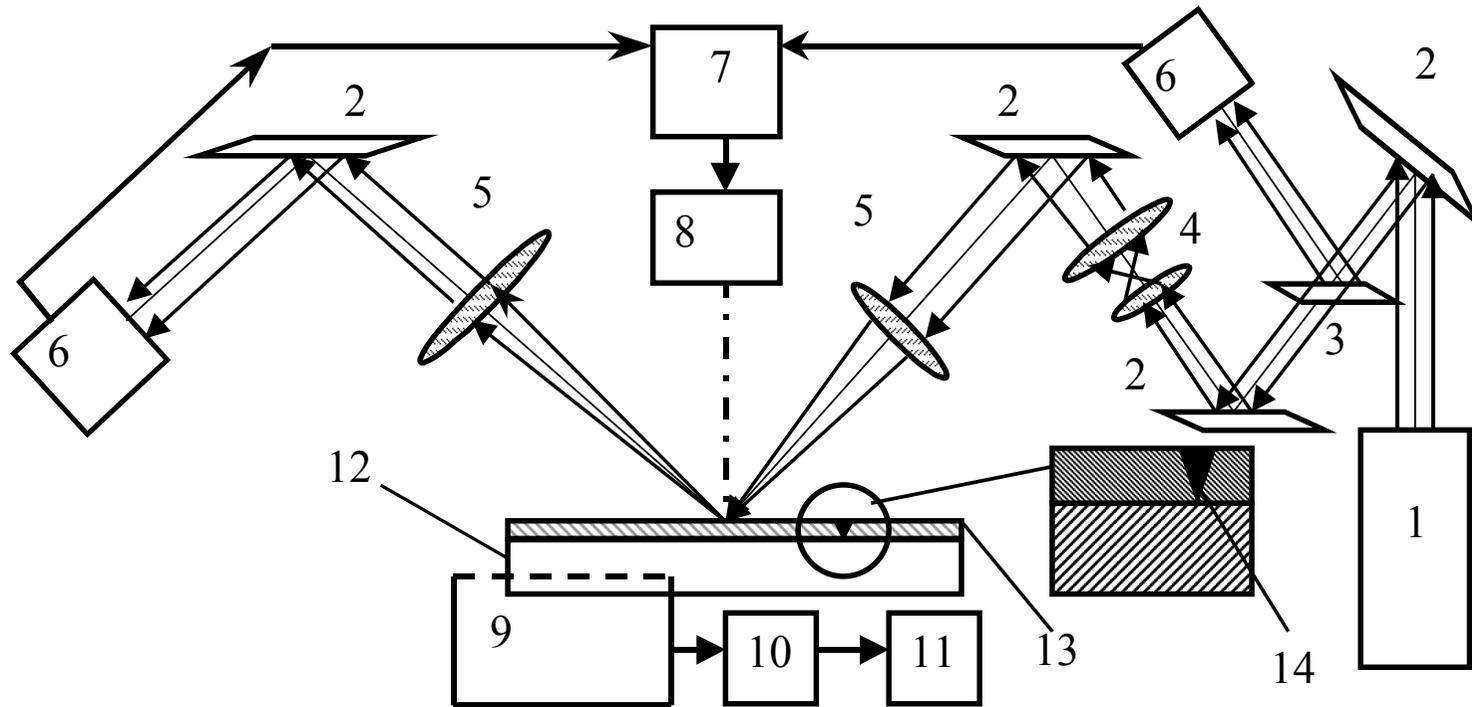


Рисунок 6.9 – Схема экспериментальной установки для выявления поверхностных повреждений: 1 – полупроводниковый лазерный модуль М65.2 ( $\lambda=0,65$  мкм,  $W=2,5$  мВт), 2 – плоские зеркала, 3 – расщепитель, 4 – коллиматор, 5 – собирающие линзы, 6 – оптический ваттметр поглощаемой мощности ОМЗ-65, 7 – устройство сравнения сигналов опорного и измерительного каналов, 8 – блок обработки сигнала, 9 – устройство для перемещения образца, 10 – привод, 11 – регистратор перемещений образца, 12 – образец, 13 – покрытие, 14 – повреждение

мощности ОМЗ-65. Стеклянная пластина 3 используется для формирования опорного сигнала, величина которого регистрируется с помощью фотоприемника 6. Устройство 9 используется для перемещения исследуемого образца, координата пятна излучения на поверхности задается углом поворота винта с шагом резьбы 0,8 мм. Угол падения излучения на исследуемую поверхность определяется углом установки зеркала 2 к направлению излучения источника. Фокусное расстояние линзы 5 и ее высота над исследуемой поверхностью определяют площадь сканирующей апертуры. Фокусное расстояние и диаметр линзы 10 ограничивают максимально допустимую шероховатость исследуемых поверхностей, при которой возможно получение достоверных результатов, так как с ростом шероховатости увеличивается угол рассеивания излучения, и доля излучения, попадающего на фотодиод, зависит от параметров указанной линзы. Диаметр пятна на исследуемой поверхности составлял 0,2 мм.

Измерение величины опорного сигнала позволяет учитывать флуктуации мощности излучения источника в процессе измерений. Величина опорного сигнала составляет  $\approx 4\%$  от интенсивности источника излучения).

Параметры оптической системы имели следующие значения: длина волны излучения  $\lambda=0,63$  мкм, угол падения излучения  $\alpha=30^\circ$ , диаметр зондирующего пучка  $B=0,3$  мм, высота объектива над исследуемой поверхностью  $H=20$  мм.

Были исследованы поверхности следующих образцов: из титанового сплава ВТ-14, из химически полированного алюминия АД-1М, из алюминиевого сплава АД-1М с покрытием на основе полисилоксанового масла, из углеродистой стали с наличием окалины на поверхности, из стеклотекстолита АФТ-2П, образца с покрытием на основе карбида хрома, образца с покрытием на основе калиевого жидкого стекла с наполнителем  $ZrO_2$ ,  $MgO$ ,  $ZnO$ ; с покрытием черный анод, из полилавсановой пленки с алюминиевым покрытием, с покрытием на основе калиевого жидкого стекла с наполнителем  $ZrO_2$  модифицированным, образца с зеркальной поверхностью, образца из алюминиевого сплава, имитирующего трещину.

По результатам измерения интенсивности отраженного излучения при сканировании по поверхности с шагом  $x_0$  строились зависимости изменения относительной величины сигнала  $W/W_0$  от координаты  $x/x_0$ . Полученные зависимости сопоставлялись с профилограммами исследованных поверхностей. Профилограммы поверхностей образцов были записаны на профилографе завода "Калибр" модели 250. Начальная и конечная точки исследуемых участков поверхности отмечались на поверхности образцов механическим методом. Точность совмещения линий сканирования оптическим и механическим методом составляла 0,1 мм. Зависимости изменения относительной величины сигнала целесообразно сопоставлялись с профилограммами исследуемых участков поверхности образцов (Приложение 4).

Выявление повреждений поверхностного слоя образцов осуществлялось по результатам измерения интенсивности зеркально отраженного излучения при сканировании по поверхности [143-145, 158-159, 176, 177, 180, 182, 184].

#### **6.4 Методика поверхностной дефектоскопии конструкционных материалов**

На основе проведенных теоретических и экспериментальных исследований была разработана методика выявления поверхностных дефектов элементов конструкций изделий машиностроения в условиях производства и эксплуатации [158, 159].

На рисунке 6.10 представлена структурная схема процесса дефектоскопии, которая состоит из входных параметров, определяемых параметров – среднего значения оптических характеристик поверхности (отражательной способности, параметров рассеяния) и распределения оптических характеристик по поверхности [159].

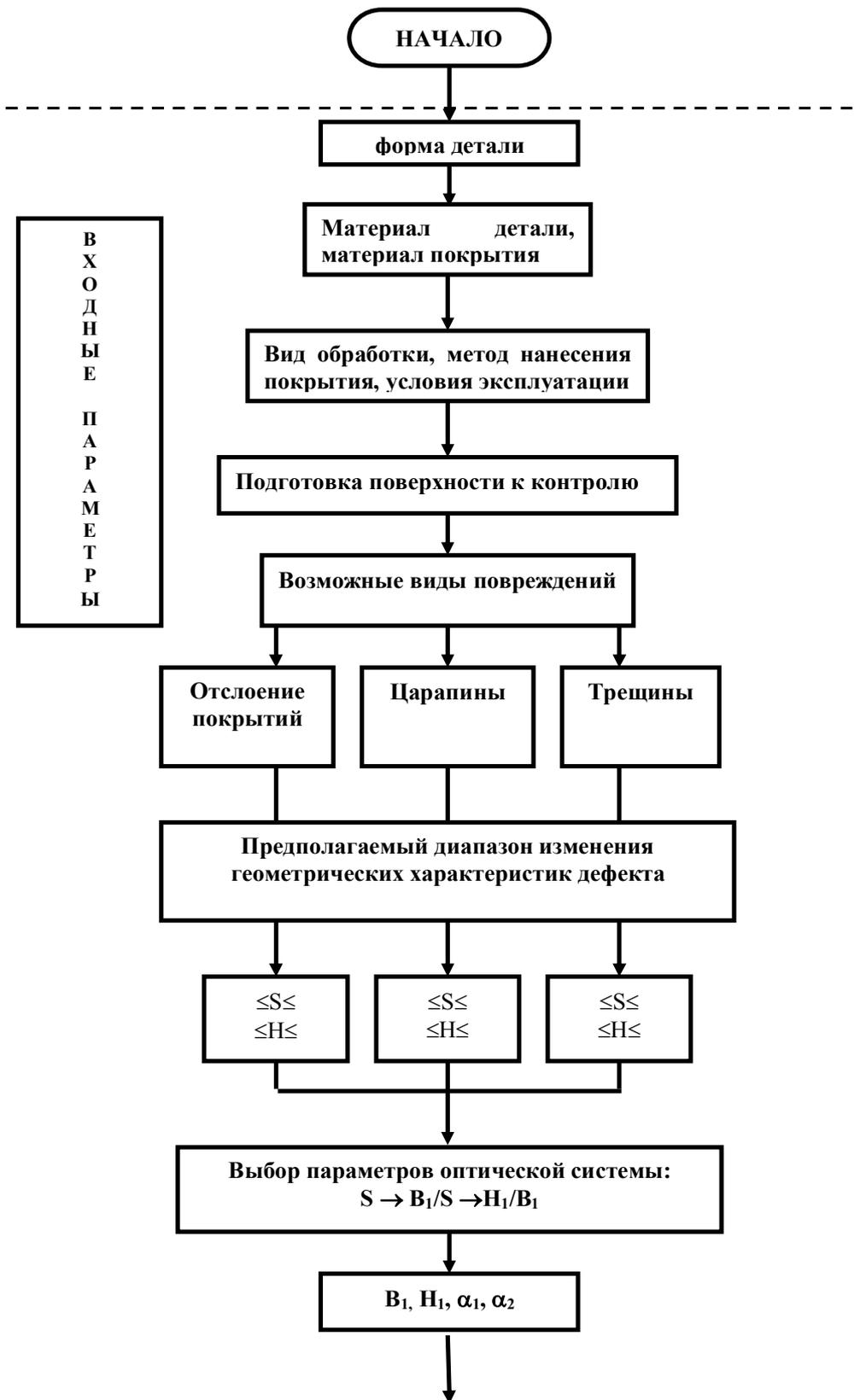
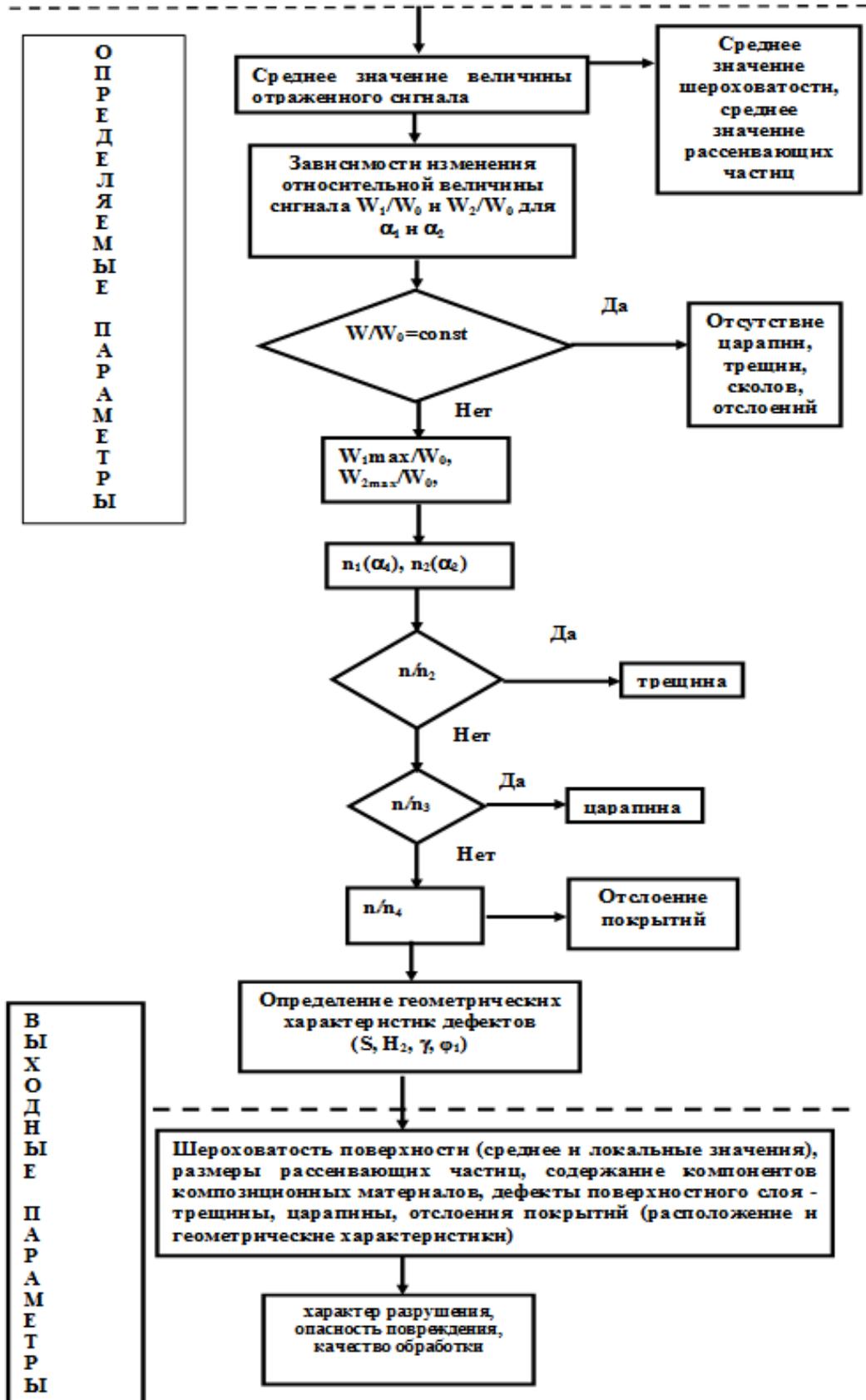


Рисунок.6.10 – Структурная схема процесса поверхностной дефектоскопии



Продолжение рисунка 6.10

Процесс выявления дефектов зондирующим лазерным пучком включает в себя следующие стадии: определение исходных данных (характеристик материала и детали, вида обработки, условий эксплуатации, определение возможных видов дефектов и повреждений, выбор параметров оптической системы и траектории сканирования), определение оптических характеристик поверхности изделия (определение тепловых характеристик для выявления внутренних дефектов), преобразование полученных оптических (или тепловых) характеристик в требуемые физические и механические характеристики поверхностной и внутренней структуры и составление прогноза работоспособности изделия.

Исходными данными являются: характеристики детали: геометрические характеристики детали, механические и теплофизические свойства материала, виды обработки: получение (литье, обработка резанием и др.), соединение (сварка, пайка, адгезионное, болтовое), термообработка, поверхностная обработка, способ и режим нанесения покрытия; параметры оптической системы: источник излучения и его характеристики (длина волны, мощность излучения, модовый состав, диаметр пятна), приемник излучения и его характеристики, элементы оптической системы и их характеристики, расстояние до исследуемой поверхности; условия эксплуатации.

Параметры оптической системы выбираются с учетом характеристик материала и детали и предполагаемого диапазона изменения геометрических характеристик выявляемых дефектов [163, 164, 172, 174].

Возможны следующие виды контроля: производственный и в условиях эксплуатации. При производственном контроле выявляются: дефекты, внесенные при производстве и ведущие к зарождению трещины: царапины, подрезы, сварочные дефекты, плохая пригонка и др.; структурные дефекты, ведущие к зарождению трещины: включения, поры, структурные неоднородности.

В условиях эксплуатации выявляются: характер дефекта (поверхностный или внутренний), местоположение дефекта, размер, форма, ориентация; изменение состояния поверхности (коррозия, абразивный износ и др.).

Определяемыми параметрами для поверхностных дефектов являются: при выявлении трещин ( $n > 2$ ): определение зависимости  $W/W_0 = f(x/x_0)$  для и углов падения излучения  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ . Вид зависимости позволяет определить значения ширины трещины  $S$ . Относительная величина сигнала в центре трещины  $W_{ц.т.}/W_0$  и максимальное значение  $W_{max}/W_0$  позволяют определить значения параметров  $n_1$  и  $n_2$ , а по значениям этих величин – форму и геометрические параметры трещины  $\gamma$ ,  $\phi_1$ ,  $H_2$ , величины напряжений в вершине трещины и коэффициентов интенсивности напряжений, значения приложенных напряжений, параметров  $n_1$  и  $n_2$ , а по значениям этих величин – форму и геометрические при изменении состояния поверхности ( $n < 2$ ): локальное значение коэффициента отражения: абразивный износ (параметры шероховатости), окисная пленка (толщина пленки), размеры рассеивающих частиц (структурные неоднородности), искривление поверхности (элементы топологии поверхности); параметры рассеяния.

Выходными параметрами являются: шероховатость поверхности, размеры рассеивающих частиц, состав композиционных материалов и содержание компонентов в них, толщина и состав окисной пленки, геометрические характеристики участков повреждений (участков с абразивным износом, забоин, трещин (ширина, глубина, угол раскрытия, положение плоскости симметрии), величина и характер приложенных напряжений, качество обработки.

На основе накопленного на предприятиях опыта производства и эксплуатации изделий аэрокосмической техники создан банк данных наиболее характерных повреждений поверхностного слоя (место расположения, виды повреждений и диапазон изменения их геометрических характеристик) [145, 159, 161, 167, 171, 177].

Траектория сканирования поверхности выбирается с учетом расположения участков поверхности с наибольшей вероятностью поверхностных дефектов.

На поверхности исследуемых деталей механическим способом отмечается начальная точка сканирования, ее координаты задаются относительно базовой линии или плоскости детали.

Параметры оптической системы выбираются с учетом характеристик материала и детали и предполагаемого диапазона изменения геометрических характеристик выявляемых дефектов. В соответствии с результатами теоретических исследований диаметр пятна излучения на поверхности детали не должен превышать наименьшей предполагаемой ширины поверхностных повреждений, т.е. должно выполняться соотношение  $B_1/S \leq 1$ . В соответствии с выбранным диаметром пятна определяется значение высоты расположения приемного объектива над поверхностью из условия  $H_1/B_1 \leq 1$ . Диапазон изменения глубины поверхностных дефектов определяет углы падения излучения  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ . Каждому из этих значений угла падения излучения должно соответствовать минимальное число переотражений для максимально возможной глубины поверхностных трещин, что обеспечивает наибольшую точность определения глубины дефектов. Значения  $B_1$  и  $H_1/B_1$  определяются фокусным расстоянием и числовой апертурой линз, направляющих излучение от источника на исследуемую поверхность и отраженное излучение на фотоприемник.

Разработанная методика была применена для выявления поверхностных и внутренних дефектов элементов конструкций изделий машиностроения [145, 159, 161, 167, 171, 177, 187].

### 6.5 Результаты поверхностной дефектоскопии

Были исследованы поверхности следующих образцов: из титанового сплава ВТ-14, из химически полированного алюминия АД-1М, из алюминиевого сплава АД-1М с покрытием на основе полисилоксанового масла, из углеродистой стали с наличием окалины на поверхности, из стеклотекстолита АФТ-2П, образца с покрытием на основе карбида хрома, образца с покрытием на основе калиевого жидкого стекла с наполнителем  $ZrO_2$ ,  $MgO$ ,  $ZnO$ ; с покрытием черный анод, из полилавсановой пленки с алюминиевым покрытием, с покрытием на основе калиевого жидкого стекла с наполнителем  $ZrO_2$  модифицированным, образца с

зеркальной поверхностью, образца из алюминиевого сплава, имитирующего трещину.

По результатам измерения интенсивности отраженного излучения при сканировании по поверхности с шагом  $x_0$  строились зависимости изменения относительной величины сигнала  $W/W_0$  от координаты  $x/x_0$ . Полученные зависимости сопоставлялись с профилограммами исследованных поверхностей. Профилограммы поверхностей образцов были записаны на профилографе завода "Калибр" модели 250.

В приложении 4 показаны зависимости изменения относительной величины сигнала  $W/W_0$  от координаты  $x/x_0$  и общий вид профилограмм поверхностей различных образцов. Величина  $W$  определялась при перемещении по поверхности с шагом  $x_0$ . Колебания мощности излучения источника составляли 4%. Среднее значение сигнала  $W_0$  для конкретного образца определяется состоянием поверхности и снижается с ростом шероховатости (зеркальной поверхности соответствует  $W_0=1,797$  мВт, поверхности с наличием ржавчины –  $W_0=10,15$  мкВт). Исключения составляют образцы с поверхностью с покрытием на основе калиевого жидкого стекла с наполнителем  $ZrO_2$ ,  $MgO$ ,  $ZnO$  –  $W_0=44,34$  мкВт,  $Ra=8,19$ , черного цвета (черный анод) –  $W_0=7,95$  мкВт и образец из титанового сплава с покрытием на основе карбида хрома –  $W_0=55,55$  мкВт,  $Ra=0,784$ . Разброс величины сигнала  $W/W_0$  увеличивается с ростом шероховатости поверхности. Искривлению поверхности образца соответствует монотонное повышение или снижение величины сигнала  $W/W_0$  с ростом координаты  $x/x_0$  (образец из химически полированного алюминия с покрытием на основе полисилоксанеового масла). Изменению шероховатости на участке поверхности образца соответствует изменение среднего уровня величины  $W/W_0$  (образец из стеклотекстолита АФТ-2П:  $Ra=7,45$  –  $W/W_0=0,49$ ;  $Ra=4,8$  –  $W/W_0=1,1$ ).

Износ участка поверхности образца из титанового сплава ВТ14 характеризуется увеличением шероховатости и отклонением средней линии

профиля, что соответствует снижению интенсивности излучения, отраженного от поверхности образца.

Наличие царапин, трещин и повреждений покрытий приводит к резкому снижению сигнала  $W/W_0$ . Возможно также резкое увеличение интенсивности отраженного излучения (образец из стеклотекстолита). Наиболее сильное снижение сигнала отмечается при наличии трещин ( $W/W_0 \approx 0,03$ ). Размеры дефекта определяются разницей координат, соответствующих изменению величины сигнала. Царапины имеются на поверхности образца из химически полированного алюминия с покрытием на основе полисилоксанового масла и образца, имитирующего трещину,  $W/W_0 = 0,3-0,7$ . Повреждению зеркальной поверхности соответствует резкое снижение сигнала до уровня  $W/W_0 = 0,1-0,2$ . На поврежденных участках поверхности образца из стеклотекстолита АФТ-2П регистрируется не только снижение  $W/W_0 = 0,1-0,4$ , но и повышение значений сигнала  $W/W_0 = 1,9$ .

Для имитации трещин использовался образец из двух частей с закрепленной между ними фольгой (Толщина фольги  $s = 0,022$  мм). При отсутствии фольги ширина трещины составляет 0,1 мм, величина сигнала  $W/W_0 = 0,45$ . Трещина обнаруживается при перемещении по поверхности с шагом не более 0,1 мм. Измерения проводились при закреплении в образце 4, 8 и 16 слоев фольги. Расчетная ширина трещины в этих случаях была равна 0,188, 0,276 и 0,452 мм по результатам измерений – 0,2, 0,3 и 0,5 мм, величина сигнала  $W/W_0$  составляла 0,1, 0,03, 0,03 соответственно. Снижение интенсивности излучения определяется соотношением ширины трещины и диаметра пятна на поверхности. При отсутствии фольги в образце диаметр пятна превышает ширину трещины 0,1 мм, в этом случае снижение сигнала  $W/W_0$  более слабое по сравнению с трещинами большей ширины.

Наличие воды на поверхности образца приводит к снижению среднего уровня сигнала  $W_0$ , величина которого зависит от материала образца. Для образца из титанового сплава ВТ14 слой воды толщиной 1,5 мм приводит к снижению

интенсивности излучения, отраженного от поверхности образца в 2 раза. Наличие повреждения регистрируется так же, как и на сухой поверхности. При смачивании поверхности образца водой происходит смещение пятна излучения на фотодиоде, величина которого зависит от толщины слоя жидкости. Для образца с покрытием черный анод мощность излучения, отраженного от поверхности воды на порядок выше мощности излучения, отраженного от сухой поверхности. При толщине слоя воды 1-2 мм величина сигнала, соответствующего отраженному от поверхности образца излучению составляет  $W/W_0 = 0,125$  от значения, соответствующего сухой поверхности.

При толщине слоя воды менее 1 мм на фотоприемном устройстве совпадают пятна, соответствующие отраженному от поверхности воды и отраженному от поверхности образца излучению, величина сигнала составляет  $W/W_0 = 9-10$ . Испарению воды с поверхности образца соответствует снижение интенсивности излучения до значений, соответствующих сухой поверхности.

В таблице 6.1 приведены результаты дефектоскопии элемента конструкции, выполненного из сплава ЖС6А с покрытием КТП35Н.

Таблица 6.1 – Величина отраженного сигнала  $W$ , мВт от внешней поверхности элемента конструкции, выполненного из сплава ЖС6А с покрытием КТП35Н.

Мощность источника излучения  $P=2,2$  мВт,  $B_l=0,2$  мм,  $\lambda=0,65$  мкм

Значение координаты $x$ , мм	Значение координаты $y$ , мм					
	0	5	10	15	20	25
0	0,12	0,06	0,07	0,2	0,08	0,11
1,5	0,11	0,1	0,19	0,105	0,1	0,08
2,1	0,08*	0,13	0,13	0,09	0,09	0,06
2,7	0,15	0,08*	0,05*	0,05*	0,12	0,09
3,3	0,06*	0,07*	0,09*	0,06*	0,08*	0,04*
3,9	0,04*	0,15*	0,07*	0,09*	0,07*	0,06*
4,5	0,08*	0,08*	0,06*	0,11*	0,04*	0,13*
5,1	0,05*	0,09*	0,03*	0,06*	0,08*	0,08*
5,7	0,07*	0,08*	0,12*	0,09*	0,11*	0,07*
6,3	0,13*	0,07*	0,09*	0,04*	0,09*	0,04*
6,9	0,11	0,10*	0,06*	0,08*	0,06	0,08
7,5	0,09	0,05	0,07	0,07	0,08	0,07
9,0	0,11	0,07	0,16	0,13	0,11	0,09
10,5	0,08	0,09	0,09	0,1	0,08	0,11
12,0	0,09	0,08	0,06	0,09	0,09	0,09
13,5	0,18	0,07	0,09	0,1	0,07	0,15
15,0	0,08	0,11	0,19	0,17	0,15	0,14
16,5	0,11	0,08	0,12	0,09	0,11	0,06
16,8	0,04	0,05	0,05	0,05	0,07	0,08
17,1	0,02**	0,02**	0,03**	0,02**	0,05	0,07
17,4	0,05	0,00**	0,05**	0,05**	0,02**	0,06
17,7	0,06	0,05	0,02**	0,03**	0,00**	0,09
18,0	0,07	0,07	0,06	0,06	0,04	0,06
19,5	0,08	0,09	0,08	0,12	0,12	0,11
21,0	0,27	0,10	0,11	0,15	0,07	0,1
22,5	0,10	0,14	0,1	0,07	0,09	0,13
24,0	0,09	0,09	0,09	0,11	0,1	0,09
25,5	0,15	0,10	0,08	0,08	0,11	0,12
27,0	0,11	0,13	0,17	0,17	0,08	0,08

\* – Изменение шероховатости и концентрации рассеивающих частиц на участке размером  $25 \times 4,2$  мм<sup>2</sup>

\*\* – Трещина длиной 20 мм, шириной 0,9 мм и глубиной 2 мм, ориентированная под углом  $88^\circ$  к направлению сканирования

## 6.6 Дефектоскопия головного обтекателя ракеты-носителя

Проведены исследования по определению эффективности обнаружения дефектов лазерно-виброакустическим способом [183, 184, 196]. Разработан и изготовлен лабораторный стенд по физическому моделированию лазерной виброакустической диагностики на стандартных образцах предприятия (рисунок 6.11). Определены параметры механического воздействия вибратора на образцы. Разработаны методы обработки многоканальной информации для обнаружения несплошности на фоне структурных неоднородностей и помех. Разработано программное обеспечение ПЭВМ для обработки многоканальной информации для обнаружения несплошности образца на фоне структурных неоднородностей и помех (скорость обработки изображения, характерные параметры обрабатываемого сигнала, помехоустойчивость информационного канала).



Рисунок 6.11 – Общий вид испытательного стенда для выявления дефектов многослойных клееных конструкций

Методика выявления дефектов включает в себя следующие стадии [183, 184, 196]:

1. Выбор объекта контроля:

Объект контроля – многослойная клееная конструкция. Проверяемая конструкция изготовлена методом склеивания;

Подготовка изделия. Образец ставится на голографический стол. Включают лазер и прогревают его в течение 15 минут;

Контроль основных параметров лазерного излучения: диаметра пучка лазерного излучения; энергетической расходимости лазерного излучения; средней мощности лазерного излучения; относительной нестабильности средней мощности лазерного излучения;

Выбор параметров измерительной системы. Выбирается параметр – частота колебаний ( $\nu$ );

Задание диапазона изменения координат:  $x_0 < x \leq x_{\max}$ ;  $y_0 < y \leq y_{\max}$ ;

Задание начальных координат ( $x_0$ ,  $y_0$ ). Сначала происходит сканирование по координате  $x$ , при фиксированном значении  $y$ , а затем при фиксированном  $x$  поверхность сканируется по координате  $y$ .

2. Стадия получения изображения дефекта:

Получение изображения объекта;

Сравнение изображения с эталонным;

Определение величины смещения ( $\Delta S$ );

Фиксация координат дефекта. Если  $\Delta S < 0$ , то повреждение отсутствует. Если  $\Delta S > 0$ , то повреждение присутствует. При наличии повреждения фиксируется значение  $x - x_{\max}$ . Если  $x - x_{\max} < 0$ , то задается следующая координата по  $x$  ( $x = x_0 + \Delta x$ ). Если  $x - x_{\max} > 0$ , то проводится сканирование по координате  $y$ , при фиксированном  $x$  (аналогично процедуре сканирования по координате  $x$ , при фиксированном значении  $y$ ).

3. Определение границ дефектной области:

Определение границ дефекта. Просканировав все точки на поверхности, по значениям  $x$ ,  $y$ ,  $\Delta S$ , определяют границы дефекта;

Сравнение полученных результатов с существующим банком внутренних дефектов, который был накоплен опытным путем. По полученным значениям  $x$ ,  $y$ ,  $\Delta S$  из банка данных определяется возможный дефект;

Определение дефекта из перечня дефектов конструкций: разноплотность слоев материала, непроклей слоев, пустоты в области изгиба, недостаток или избыток клеящего материала.

#### 4. Определение характеристик дефекта:

Определение вида дефекта состоит из следующих этапов: задания пороговых значений сигнала, соответствующих различным уровням нагрузок в элементах конструкции, разбиения объекта диагностики на конечное число элементов, сравнения величины сигнала в каждом элементе с пороговыми значениями;

Определения областей, соответствующих дефектам;

Расчет границ дефектов и их геометрического центра;

5. Определение видов дефектов осуществляется по величине безразмерного параметра отраженного сигнала ( $D$  – диаметр лазерного пятна,  $h$  – перемещение светового пятна): отсутствие дефекта при  $\frac{h}{D}=10\dots12$ , –непроклей слоев при  $\frac{h}{D}\leq 9$ , поверхностные трещины при  $\frac{h}{D}\leq 6$ , расслоение обшивки при  $\frac{h}{D}\leq 2$ , потеря устойчивости заполнителя при  $\frac{h}{D}\approx 0$ .

## Выводы по главе 6

1. С использованием разработанного стенда для физического моделирования процессов обнаружения и распознавания получены зависимости контрастности изображения от длины волны, угла падения излучения и скважности импульсов. Показано, что с ростом длины волны в диапазоне 0,56...1,06 мкм и угла падения излучения в диапазоне 30...45° контрастность изображений возрастает в 1,5 раза. С увеличением скважности импульсов с 2 до 6 контрастность изображений снижается в 1,5...3 раза в зависимости от угла падения излучения. Полученные зависимости показывают, что с ростом угла падения излучения в диапазоне 30...45 при скважности, равной 6, контрастность возрастает в 1,5 раза, а при скважности, равной 2 – в 2 раза.

2. Коэффициент правдоподобия обнаружения объекта зависит от его конструкции при неизменном составе группы материалов внешней компоновки. С ростом безразмерного коэффициента  $K_1$  в диапазоне 0,5...1,5 вероятность обнаружения снижается в среднем с 0,7 до 0,3 при неизменном угле падения излучения на поверхность.

3. Разработана методика оптимизации лазерно-электронных систем дистанционного зондирования для обеспечения вероятности обнаружения в до 80...85% и распознавания до 65%.

4. Выработаны рекомендации по повышению эффективности обнаружения и распознавания лазерно-электронными системами дистанционного зондирования для дефектоскопии поверхности изделий аэрокосмической техники, систем обнаружения спутников в космическом пространстве и систем обнаружения и распознавания с борта летательного аппарата при наличии помехового сигнала на уровне 20..25 % позволяющие увеличить вероятность обнаружения и распознавания в 1,5...2,0 раза.

5. Разработаны рекомендации по созданию лазерно-электронных систем для дефектоскопии поверхности изделий аэрокосмической техники, обнаружения

спутников в космическом пространстве и бортовых анализаторов систем посадки и проведено экспериментальное исследование их возможностей.

6. Проведены экспериментальные исследования и выявлена зависимость отражательной способности конструкционных материалов внешней компоновки изделий аэрокосмической техники для АО «РКЦ «Прогресс» от состояния поверхности и вида повреждений поверхностного слоя.

7. Разработанная методика и РТМ по созданию лазерных измерительных систем для выявления поверхностных повреждений в условиях производства и эксплуатации внедрены на предприятиях ПАО «Кузнецов», АО «РКЦ «Прогресс». Применение лазерной 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%.

8. Результаты исследований внедрены на предприятиях АО «РКЦ «Прогресс», ПАО «Кузнецов», в Самарском государственном медицинском университете, в учебный процесс Самарского государственного аэрокосмического университета при чтении курсов лекций, проведении лабораторных занятий, в курсовом и дипломном проектировании для специальности «Лазерные системы в ракетной технике и космонавтике. Реализация результатов работы подтверждена актами внедрения (Приложение 5).

## Заключение

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  $5^\circ$ , расхожимость не более  $2...3^\circ$ , 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° 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 ( $1 \leq f \leq 300$ )  $\text{с}^{-1}$ , 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.

**Список сокращений и условных обозначений**

- ОЭС – оптико-электронные системы;
- ИИС – информационно-измерительные системы;
- ОЭП – оптико-электронный прибор;
- ЭЦО – энергетический центр освещенности;
- УФ – ультрафиолетовая область спектра излучения;
- ИК – инфракрасная область спектра излучения;
- $E$  – энергия импульса излучения;
- $\mu$  – степень монохроматичности;
- $\lambda$  – длина волны излучения;
- $D$  – диаметр потока излучения;
- $d$  – диаметр пятна излучения;
- $Q$  – энергия излучения;
- $P$  – парциальное давление смеси;
- $I$  – ток разряда;
- $W$  – мощность излучения;
- $\nu$  – частота следования импульсов;
- $\Theta$  – расходимость излучения;
- $\Delta l$  – погрешность измерения расстояний;
- $e$  – плотность энергии излучения на мишени;
- $\Delta d$  – погрешность измерения диаметра пятна;
- $n$  – показатель преломления;
- $\rho$  – плотность;
- $\delta$  – глубина проникновения света;
- $q$  – удельная мощность;
- $x, y$  – координата в направлении плоскости, перпендикулярной р-п-переходу  
и в плоскости р-п-перехода;
- $H_1$  – высота расположения приемного объектива над поверхностью;
- $H_2$  – глубина трещины;

$x$  – координата в направлении сканирования;

$x_1, x_2$  – координаты границ пучка на выходе из трещины;

$\Delta x$  – ширина пучка на выходе из трещины;

$S$  – ширина трещины;

$h_{\text{ск}}$  – среднеквадратическая высота микронеровностей;

$\alpha$  – угол падения излучения на поверхность;

$\beta$  – угол, определяющий направление распространения излучения на выходе из трещины;

$\gamma$  – половина угла раскрытия трещины;

$n$  – числопереотражений в трещине;

$n$  – общее число элементов поверхности;

$q$  – площадь сканирующей апертуры;

$\xi_1, \xi_2$  – количество элементов бездефектной поверхности, элементов поверхности с наличием дефектов;

$t$  – время;

$T$  – температура;

$I_{\text{th}}$  – пороговый ток полупроводникового лазера;

$I$  – рабочий ток полупроводникового лазера;

$I_0$  – пороговый ток при стандартной температуре;

$P$  – выходная мощность излучения полупроводникового лазера;

$\eta$  – дифференциальная эффективность полупроводникового лазера;

$U$  – напряжение на лазерном диоде;

$\lambda$  – длина волны излучения;

$k$  – волновое число;

$\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость;

$h$  – постоянная Планка;

$c$  – скорость света;

$\Delta v$  – полная ширина линии генерации на половине ее высоты;

$\theta_{\parallel}$ ,  $\theta_{\perp}$  – расходимость излучения полупроводникового лазера в плоскости р-п-перехода и в плоскости, перпендикулярной р-п-переходу,

$S_0$  – амплитуда рассеяния;

$R$ ,  $A$  – коэффициент отражения поверхности;

$\alpha$  – коэффициент поглощения;

$\Omega$  – частота генерации;

$n$  – концентрация носителей заряда;

$\Gamma$  – потери в резонаторе;

$G$  – коэффициент усиления;

$\omega_0$  – собственная частота резонатора полупроводникового лазера;

$W$  – величина сигнала;

$\varphi_1$  – угол поворота плоскости симметрии трещины;

$n'$  – безразмерный параметр;

$\alpha_2$  – угол поворота плоскости наблюдения;

$\varphi_2$  – угол наклона плоскости симметрии трещины;

$P$  – вероятность;

$k$  – показатель индикатрисы рассеяния

**Список литературы**

1. Мухин, В.С. Поверхность: конструирование, технология, свойства, прочность / В.С. Мухин // Вестник УГАТУ. – 2000. – №1. – С. 97-104.
2. Мухин, В.С. Инженерия поверхности деталей машин / В.С. Мухин, А.М. Смыслов // Вестник УГАТУ. – Т. 12. – 2009. – №4 (33). – С. 106-112.
3. Терентьев, В.Ф. Основы механики разрушения / В.Ф. Терентьев. – М.: Интерконтакт Наука, 2009. – 47 с.
4. Шилин, А.Н. Анализ погрешности измерения сканирующего преобразователя оптико-электронной системы / А.Н. Шилин, Д.А. Черных // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2007. – №6. – С. 98-103.
5. Орлов, М.Р. Технологическое обеспечение ресурса рабочих лопаток первых ступеней турбины авиационных и наземных газотурбинных двигателей: автореф. дис. на соискание ученой степени д-ра техн. наук: 05.16.01 / М.Р. Орлов. – М.: Московское моторостроительное производственное предприятие «Салют». – 46 с.
6. Петухов, А.Н. Роль поверхностного слоя в формировании несущей способности и ресурса основных деталей ГТД и ЭУ / А.Н. Петухов // Авиационно-космическая техника и технология. – 2009. – №9 (55). – С. 68-72.
7. Туманова, А.В. Вероятностная структура сигналов и помех в лазерных системах передачи и обработки информации: автореф. дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук / А.В. Туманова. – С.-П., 2008. – 30 с.
8. Акишин, А.И. Космическое материаловедение. Методическое и учебное пособие / А.И. Акишин. – М: НИИЯФ МГУ, 2007. – 209 с.
9. Марукович, Е.И. Дистанционная дефектоскопия контурных поверхностей / Е.И. Марукович, А.П. Марков, О.Ю. Бондарев; под общ. ред. Е.И. Маруковича. – Минск: Беларус. навука, 2011. – 330 с.
10. Гридин, В.Н. Адаптивные системы технического зрения / В.Н. Гридин, В.С. Титов, М.И. Труфанов – С.-П.: Наука, 2009. – 442 с.

11. Белопухов, В.Н. Когерентно-оптическое обнаружение дефектов на поверхности изделий / В.Н. Белопухов, В.Г. Волостников, В.В. Котляр, А.Н. Малов, В.Н. Подвигин // Лазерная технология и автоматизация исследований: Труды ФИАН. – Т. 198. – М.: Наука, 1989. – С.111-115.
12. Chang, P.T. Detection and imaging of surface cracks by optical scanning / P.T. Chang, I. Kaufman, D.Y. Shyong // "Mater. Eval.", 1987, Vol.45, No.8, p.943-945.
13. Бессуднов, И.А. Совершенствование технологии ремонта дисков газотурбинных авиационных двигателей с использованием ресурсосберегающих технологий: дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук: 05.02.08 / И.А. Бессуднов. – Рыбинск, 2014. – 208 с.
14. Беляков, А.В. Дифракционные оптические элементы в лазерном контроле профиля поверхности / А.В. Беляков, В.Г. Волостников, Т.В. Кривко, Н.Н. Лосевский // Лазерная технология. Исследования и автоматизация: Труды ФИАН. – Т. 217. – М.: Наука, 1993. – С. 159-161.
15. Заякин, О.А. Восстановление микрорельефа зеркально отражающих поверхностей с помощью информационно-измерительной системы на основе двумерной лазерной триангуляции / О.А. Заякин // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – Т. 6. – 2004. – №1. – С. 72-80.
16. Краснопевцев, Е.А. Панорамные голографические и спекл-интерферометры / Е.А. Краснопевцев // Высокие технологии, фундаментальные и прикладные исследования, образование: сборник трудов Третьей международной научно-практической конференции «Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности». – Т. 8. – С.-П.: Изд-во Политехнического института, 2007. – С. 69-70.
17. Потапов, А.И. Информационно-физическая подготовка и дистанцирование первичной информации в оптическом контроле / А.И. Потапов, С.С. Сергеев, А.П. Марков, А.В. Конов и др. // Опыт использования в промышленности неразрушающего контроля качества неметаллических изделий,

чугунного литья и композитов: Сборник докладов Всероссийского научно-практического семинара. – С.-П.: СЗТУ, 2007. – С. 179-186.

18. Обратные задачи в оптике / Под ред. Г.П. Болтса. – М.: Машиностроение, 1984. – 200 с.

19. Непогодин, И.А. Критерии и метод оценки информативности признаков объектов в задачах лазерной локации / И.А. Непогодин // Оптический журнал: научно-технический журнал. – С.-П.: Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова; Оптическое общество им. Д.С. Рождественского. – Т. 74. – 2007. – №1. – С.55-64.

20. Ruiz, P.D. Depth-resolved whole-field displacement measurements by wavelength scanning electronic speckle pattern interferometry / P.D. Ruiz, J.M. Huntley and R.D. Wildman // Applied Optics, 2005, Vol.44, Issue 19, p.3945-3953.

21. Патент 2059230 РФ. Способ ИК-дефектоскопии / Е.В. Берников, С.С. Гапонов, В.И. Туринов. – №92007717/25; заявл. 27.11.1992; опубл. 27.04.1996.

22. Лазерные и инфракрасные методы дефектоскопии // Надежность и контроль качества: Экспресс-информация. – 1989. – №25 (178).

23. Волоконно-оптический прибор для контроля качества поверхности // Контрольно-измерительная техника: Экспресс-информация. – 1996. – №12 (59).

24. Волоконно-оптическая связь: Приборы, схемы и системы: Пер. с англ. / Под ред. М.Дж. Хауэса и Д.В. Моргана. – М.: Радио и связь, 1982. – 272 с.

25. Cohen, L.G. Microlenses for Coupling Junction Lasers to Optical Fibers / L.G. Cohen, M.V. Schneider // Applied Optics, 1974, Vol.13, No.1, p.89-94.

26. Лазерная система контроля профиля поверхности // Приборы и элементы автоматики. Испытательные стенды: Экспресс-информация. – 1995. – №21 (115).

27. Будников, Н.С. Компьютерная реконструкция рельефа поверхности методом оптической томографии / Н.С. Будников, В.Е. Котомина, Т.В. Шаргавнина // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. – 2012. – №4 (1). – С. 91-95.

28. А.с. 835209. Фотоэлектронное устройство обнаружения дефектов поверхности / В.С. Котляров. П.А. Сорокин. – Оpubл. 1981, Бюл. №17.
29. Матейко, О.Н. Исследование системы технического диагностирования лопаток ГТД: дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук / О.Н. Матейко. – Самара, 1992. – 282 с.
30. ГОСТ 26782-85. Контроль неразрушающий. Дефектоскопы оптические и тепловые. Общие технические требования.
31. ГОСТ 23479-79. Контроль неразрушающий. Методы оптического вида. Общие требования.
32. Кульчин, Ю.Н. Распределенные волоконно-оптические измерительные системы / Ю.Н. Кульчин. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2001. – 272 с.
33. Топорец, А.С. Оптика шероховатой поверхности / А.С. Топорец. – Л.: Машиностроение. Ленинградское отделение, 1988. – 191 с.
34. Лабунец, Л.В. Математическое и физическое моделирование переходных характеристик 3D-объектов в однопозиционной системе оптической локации / Л.В. Лабунец // Радиотехника и электроника. – Т. 47. – 2002. – №3. – С. 308-321.
35. Кеткович, А.А. Лазерная компьютерная система контроля лопаток газотурбинных двигателей ПКПЛ-1 / А.А. Кеткович, Н.И. Яковлева, Б.А. Чичигин // Контроль. Диагностика. – 2007. – №3. – М: Машиностроение. – С. 32-34.
36. Yamaguchi, I. Speckle decorrelation in surface profilometry by wavelength scanning interferometry / I. Yamaguchi, A. Yamamoto and S. Kuwamura // Applied Optics, 1998, Vol.37, No.28, p.6721-6728.
37. Козлов, А.А. Анализ применимости методов определения шероховатости поверхности заготовки в адаптивных системах управления / А.А. Козлов, С.И. Ярыгин // Новый университет. – 2014. – №07-08 (29-30).
38. Chu, An-Shyang. Laser surface profiler / An-Shyang Chu and M.A. Butler // Optics Letters, 1999, Vol.24, No.7, p.457-459.

39. Suzuki, T. Phase-shifting laser diode interferometer using pulse modulation / T. Suzuki, T. Adachi, O. Sasaki and S. Choi. // *Applied Optics*, 2012, Vol. 51, Issue 18, p. 4109-4112.
40. Lai, Cheng-Chung. Surface profilometry with composite interferometer / Cheng-Chung Lai and I-Jen Hsu // *Optics Express*, 2007, Vol.15, Issue 21, p. 13949-13956.
41. Chakrabarti, S. The inversion of inchoherent light scattering data to obtain statistical and optical properties of a two-dimensional randomly rough dielectric surface / S. Chakrabarti, A.A. Maradudin, I. Simonsen, E.I. Chaikina // *Reflection, Scattering and Diffraction from Surfaces IV Proceedings of SPIE. Volume Number: 9205; 92505* (September 5, 2014).
42. Емельянов, П.Н. Расширение функциональных возможностей информационно-измерительных систем для контроля шероховатости поверхности изделий машиностроения на принципах рефлектометрии: дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук / П.Н. Емельянов. – М., 1996. – 182 с.
43. Тарасов, В.В. Двух- и многодиапазонные оптикоэлектронные системы / В.В. Тарасов, Ю.Г. Якушенков. – Логос, 2007. – 192 с.
44. Новиков, А.А. Эллипсометрия неоднородных поверхностных слоев анизотропных оптических элементов. / А.А. Новиков, И.А. Храмцовский, В.Ю. Иванов, И.С. Федоров, А. Туркбоев // *Известия вузов. Приборостроение*. – Т. 52. – 2009. – №1. – С. 62-68.
45. Курженков, Д.Г. Метод и программное обеспечение тепловой дефектометрии и томографии при контроле композиционных и сплошных структур: дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук / Д.Г. Курженков. – Томск, 1998.
46. Патент 94697 РФ, МПК G01J1/00, G06F17/00. Установка для измерения отражательных характеристик материалов / И.М. Хмаров. – №2010105346/22; заявл. 17.02.2010; опубл. 27.05.2010. Бюл. №15.

47. Холопов, Г.К. Фотометрическое подобие при лабораторно-стендовых исследованиях отражательных характеристик тел. В кн. Импульсная фотометрия / Г.К. Холопов, Ю.А. Шуба. – Л.: Машиностроение, 1981. – Вып. 7. – С. 119-124.
48. Непогодин, И.А. Отражательные характеристики объектов и фонов и их информативность в лазерной локации: дис. на соискание ученой степени д-ра физ.-матем. наук: 05.12.01 / И.А. Непогодин. – Казань, 1998. – 373 с.
49. Georgiev, Georgi T. Comparison between laboratory and airborne BRDF measurements for remote sensing / Georgi T. Georgiev, Charles K. Gatebe, James J. Butler, Michael D. King // Proc. of SPIE, 2006, Vol.6296, 629603.
50. Ермолаев, Д.А. Использование дифракционного метода для измерения микроперемещений в линейной дилатометрии / Д.А. Ермолаев, А.Ю. Махоньков, А.Я. Суранов // Известия Алтайского государственного университета.– 2009. – Вып. 1. – С. 117-119.
51. Рыбаков, С.Г. Применение рефлектотрии для измерения параметров поверхностей, рассеивающих свет: дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук / С.Г. Рыбаков. – С-П., 1996.
52. Перевозчиков, С.М. Анализ погрешностей измерения теплофизических характеристик неограниченной пластины импульсным методом / С.М. Перевозчиков, Л.Д. Загребин // Измерительная техника. – 2001. – №12. – С. 39-43.
53. Germer, A. Ray model of light scattering by pigmented coatings and by coated rough surfaces / A. Germer and E. Marx // Applied Optics, 2004, Vol.43(6), p. 1266-1274.
54. Akiyama, H. Sinusoidal wavelength-scanning interferometer using an acousto-optic tunable filter for measurement of thickness and surface profile of a thin film / H. Akiyama, O. Sasaki and T. Suzuki // Optics Express, 2005, Vol.13, Issue 25, p. 10066-10074.
55. Theocaris, P.S. Light scattering from laser-damaged speckled surface / P.S. Theocaris // Applied Optics, 1997, Vol.36, No.33, p.8775-8784.

56. А.с. 381885 СССР. Фотоэлектронное устройство для измерения шероховатости металлической поверхности / А.В. Башарин, В.А. Солнцев, А.С. Потемкин, В.А. Богородский и Е.Е. Смирнова. – №1662030; заявл. 10.05.1971; опубл. 22.05.1973, Бюл. №22.
57. А.с. 375478 СССР. Устройство для оценки качества поверхности / А.В. Башарин, В.А. Солнцев, А.С. Потемкин, В.А. Богородский и Е.Е. Смирнова. – №1662187; заявл. 18.10.1971; опубл. 23.11.1973, Бюл. № 16.
58. А.с. 236024 СССР. Прибор для контроля качества поверхности / Н.М. Рудный, А.П.Клименый. – №1147140; заявл. 05.04.1967; опубл. 24.01.1969, Бюл. №6.
59. Lacey, C. Optical measurement of flying height / C. Lacey, C. Duran, K. Womack and R. Simmons // Proceeding of the Future Dimensions in Storage Symposium (International Disk Drive Equipment and Materials Association, Santa Clara, Calif., 1997), p.81-88.
60. Mendoza-Suarez, A. Light Scattering by a reentrant fractal surface / A. Mendoza-Suarez and E.R. Mendez // Applied Optics, 1997, Vol.36, No.15, p.3521-3530.
61. Рыбаков, С.Г. Бесконтактное определение параметра шероховатости поверхностей в ЦБП / С.Г. Рыбаков, С.И. Дмитриева // В межвузовском сборнике научных трудов: Машины и аппараты целлюлозно-бумажного производства. – С.-П., 1998. – С. 140-141.
62. Nakatsuka, S. Resolution enhancement printing with variable spot-size diode / S. Nakatsuka, A. Arimoto, S. Maruo and S. Kobayashi // Applied Optics, 1997, Vol.36, No.24, p.5876-5880.
63. Gharbi, T. Backscatter-modulated laser diode for low-frequency small-amplitude vibration measurement / T. Gharbi, A. Courteville and A. Chebbour // Applied Optics, 1997, Vol.36, No.31, p.8223-8237.

64. Vega, F. Optical properties of  $\text{GeO}_x$  films obtained by laser deposition and dc sputtering in reactive atmosphere / F. Vega, J.C.G. de Sande, C.N. Afonso, C. Ortega and J. Siejka // *Applied Optics*, 1994, Vol.33, No.7, p.1203-1208.

65. Richter, W. Calorimetric support of directional-hemispherical reflection measurement in the infrared spectral range / W. Richter, S.M. Sarge and F. Kammer // *Applied Optics*, 1994, Vol.33, No.7, p.1270-1273.

66. Le Tolguenec, G. Imaging through scattering media by parametric amplification of images: study of resolution and the signal-to-noise ratio / G. Le Tolguenec, E. Lantz and F. Devaux // *Applied Optics*, 1997, Vol.36, No.31, p.8292-8296.

67. Delplancke, F. Investigation of rough surface and transparent birefringent samples with Mueller-matrix scatterometry / F. Delplancke // *Applied Optics*, 1997, Vol.36, No.30, p.7621-7628.

68. Meyer, W.V. Hybrid reflection-transmission surface light scattering instrument with reduced sensitivity to surface sloshing / W.V. Meyer, J.A. Lock, H.M. Cheung, T.W. Taylor, P. Tin and J.A. Mann // *Applied Optics*, 1997, Vol.36, No.30, p.7605-7614.

69. Лебедько, Е.Г. Анализ рельефа поверхности при моноимпульсной лазерной локации / Е.Г. Лебедько, Нгуен Ву Тунг // Сборник трудов конференции «Лазеры, измерения, информация 2005». – С.-П.: СПбГТУ, 2005. – С. 36.

70. Смирнова, Ю.Л. Лазерная дальномерная станция как составная часть аэрокосмической системы / Ю.Л. Смирнова // *Аэрокосмические технологии: материалы Первой международной научно-технической конференции, посвященной 90-летию со дня рождения академика В.Н. Челомея.* – М., 2004. – С. 38-42.

71. Белов, М.Л. Рассеяние лазерного излучения на неровной поверхности со сложной локальной индикатриссой отражения в турбулентной атмосфере / М.Л. Белов, В.И. Козинцев, Б.В. Стрелков // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия «Приборостроение».* – 2007. – №1. – С. 63-73.

72. Лабунец, Л.В. Реконструкция тепловизионного изображения 3D-объекта по набору ракурсных снимков / Л.В. Лабунец, А.В. Попов // Научный вестник МГТУ ГА. – 2010. – №158. – С. 141-148.

73. Кеткович, А.А. Лазерная компьютерная система контроля лопаток газотурбинных двигателей ПКПЛ-1 / А.А. Кеткович, Н.И. Яковлева, Б.А. Чичигин // Контроль. Диагностика. – 2007. – №3. – М.: Машиностроение. – С. 32-34.

74. Nakao, T. Defect inspection method. Patent Publication Application / T. Nakao, Y.Oshima, Y. Urano, Patent Publication Application US 2011/0128534, Int. Cl. G01N 21/47, 02.06.2011.

75. Патент 2243540 РФ. Устройство и способ для высокоскоростной дефектоскопии отражающего материала / Барри С. Смит, Майкл Дж. Маллинс, Рой Ван Дерлинден, Дональд Ирвин. – №2002100056/28; заявл. 07.06.2000; опубл. 27.09.2003.

76. Демкин, В.Н. Лазерные методы и средства измерения геометрии поверхностей сложной формы: автореф. дис. на соискание ученой степени д-ра техн. наук / В.Н. Демкин. – М.: НИИ «Полюс». – 32 с.

77. Дмитриев, В. И. Интегральные характеристики в обратных задачах оптики / В.И. Дмитриев // Вестник Московского государственного университета, серия 15, “Вычислительная математика и кибернетика”. – 1998. – №4. – С. 10-13.

78. Павленко, В.Д. Критерии отбора информативных совокупностей параметров при многоклассовом распознавании / В.Д. Павленко, А.А. Фомин // Сборник трудов Одесского политехнического университета. – 2000. – №3. – С. 25-28.

79. Кузнецов, В.И. Устойчивость сопровождения цели средствами технического зрения / В.И. Кузнецов, В.И. Мордасов // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 1995. – №34. – С. 50-54.

80. Кузнецов, В.И. Использование лазерной подсветки для обнаружения подвижных объектов / В.И. Кузнецов, В.И. Мордасов, Н.А. Сазонникова //

Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. – 2006. – №2 (10). – Ч. 2. – С. 27-31.

81. Медведев, Е.М. Лазерная локация земли и леса / Е.М. Медведев, И.М. Данилин, С.Р. Мельников // Издательство института леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, 2007. – 320 с.

82. Соллогуб, А.В. Космические аппараты систем зондирования поверхности Земли: математические модели повышения эффективности КА / А.В. Соллогуб, Г.П. Аншаков, В.В. Данилов и др.; Под ред. Д.И. Козлова. – М.: Машиностроение, 1993. – 366 с.

83. Патент на полезную модель 94699 РФ. Установка для измерения отражательных характеристик материалов / И.М. Хмаров. – №2010105346/22; заявл. 17.02.2010; опубл. 27.05.2010.

84. Павлов, Н.И. Определение удельной нагрузки фрагментов космического «мусора» по их отражательно-излучательным характеристикам / Н.И. Павлов, Ю.А. Шуба, В.А. Шеволдин // Оптический журнал. – Т. 65. – 1998. – №11. – С. 37-40.

85. Непогодин, И.А. Критерии и метод оценки информативности признаков объектов в задачах лазерной локации / И.А. Непогодин // Оптический журнал. – Т. 74. – 2007. – №1. – С. 55-64.

86. Boucher, Y. Comparison of measured and modeled BRDF of natural targets / Y. Boucher, H. Cosnefroy, D. Petit etc. // SPIE, 1999, Vol.3699, p.16-26.

87. Beecroft, M.T. Bidirectional reflectance data to support paint development and signature calculations / M.T. Beecroft, J.T. Neu, J. Jafolla // SPIE, 1992, Vol.1753.

88. Козинцев, В.И. Основы импульсной лазерной локации: Учебное пособие для вузов / В.И.Козинцев, М.Л.Белов, В.М.Орлов и др.; Под ред. В.Н. Рождествина. – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2006. – 512 с.

89. Малашин, М.С. Основы проектирования лазерных локационных систем: Учебное пособие для радиотехнических специальных вузов / М.С. Малашин, П.П. Каминский, Ю.Б. Борисов. – М.: Высшая школа, 1983. – 207 с.

90. Jafolla, J. Theory and measurement of bidirectional reflectance for signature analysis / J. Jafolla, D. Thomas, J. Higers etc. // SPIE, 1999, Vol.3699, p.2-15.
91. Сахновский, М.Ю. Регулярное отражение (пропускание) излучения шероховатыми поверхностями и его использование для контроля качества зеркал / М.Ю. Сахновский // Оптика и спектроскопия. – Т. 58. – Вып. 1. – 1995. – С. 130-134.
92. Якушенков, Ю.Г. Теория и расчет оптико-электронных приборов / Ю.Г. Якушенков – М.: Машиностроение, 1989. – 360 с.
93. Патент на изобретение 2284486 РФ. Устройство определения эффективной площади рассеяния оптико-электронного средства / И.В. Бурзак, А.А. Болкунов, А.Ю. Козирацкий, Ю.Л. Козирацкий, П.Е. Кулешов, А.В. Кусакин, Д.В. Прохоров, В.Д. Попело, А.А. Сирота. – №2005111364/28; заявл. 18.04.2005; опубл. 27.09.2006.
94. Козирацкий, Ю.Л. Построение физических моделей каналов распространения лазерного излучения для экспериментальных исследований конфликтного взаимодействия оптико-электронных средств / Ю.Л. Козирацкий и др. – Радиотехника. – 1999. – №8. – С. 80-84.
95. Хмаров, И.М. Метод определения эффективной площади рассеяния летательных аппаратов с учетом реальных условий / И.М. Хмаров // Радиотехника: Ежемесячный научно-технический журнал – 2010. – №11. – С. 79-84.
96. Сверхширокополосные технологии в радиолокации / Под ред. Д.Д. Тейлора // Лондон, Нью-Йорк, Вашингтон, 2000. – 45 с.
97. Корн, Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн. – М.: Наука, 1974. – 832 с.
98. Елисеев П.Г. Полупроводниковые лазеры – от гомопереходов до квантовых точек / П.Г. Елисеев // Квантовая электроника. – Т. 32. – 2002. – №12. – С. 1085-1098.

99. Кейси, Х. Лазеры на гетероструктурах. Т. 1 / Х. Кейси, М. Паниш. – М.: Мир, 1981. – 299 с.
100. Кейси, Х. Лазеры на гетероструктурах. Т. 2 / Х. Кейси, М. Паниш. – М.: Мир, 1981. – 364 с.
101. Поршнева, С.В. Компьютерное моделирование физических процессов в пакете MATLAB / С.В. Поршнева. – М.: Горячая линия – Телеком, 2003. – 592 с.
102. Елисеев, П.Г. Введение в физику инжекционных лазеров / П.Г. Елисеев. – М.: Наука, 1983. – 294 с.
103. Физика полупроводниковых лазеров: Пер. с японск. / Под ред. Х. Такумы. – М.: Мир, 1989. – 310 с.
104. Елисеев, П.Г. Электрические свойства лазерных InAs/InGaAs-гетероструктур на основе квантовых точек InAs: пороговый эффект / П.Г. Елисеев, А. Уханов, А. Штинц, К.Д. Маллой // Квантовая электроника. – Т. 39. – 2009 – №6. – С. 501-504.
105. Фриман, Р. Волоконно-оптические системы связи / Р. Фриман. – М.: Техносфера, 2003. – 590 с.
106. Елисеев, П.Г. Оптическое усиление в структурах с квантовыми точками на основе InAs/InGaAs. Эксперименты и теоретическая модель / П.Г. Елисеев, Х. Ли, Г.Т. Лиу, А. Штинц, Т.С. Ньювел, Л.Ф. Лестер, К.Д. Маллой // Квантовая электроника. – Т. 30. – 2000. – №8. – С. 664-668.
107. Елисеев, П.Г. Гистерезис мощности и волноводная бистабильность вполосковых квантово-размерных гетеролазерах на основе InGaAs/GaAs/GaAlAs с напряженным активным слоем / П.Г. Елисеев, Г. Байстер, А.Е. Дракин, И.В. Акимова, Г. Эрберт, Ю. Меге, Ю. Себастиан // Квантовая электроника. – Т. 22. – 1995. – №4. – С. 309-320.
108. Давыдова, Е.И. Излучательные характеристики и диаграмма направленности кванторазмерного инжекционного лазера в спектральной области 780 нм / Е.И. Давыдова, А.Е. Дракин, П.Г. Елисеев, Г.Т. Пак, В.В.

Поповичев, М.Б. Успенский, С.Е. Хлопотин, В.А. Шишкин // Квантовая электроника. – Т. 19. – 1992. – №10. – С. 1024-1031.

109. Златов, А.С. Исследование параметров полупроводниковых лазеров / А.С. Златов, А.П. Кушнарченко // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2006. – Вып. 26. – С. 67-76.

110. Жуков, А.Е. Лазеры на основе полупроводниковых наногетероструктур / А.Е. Жуков. – С.-П.: ООО«Техномедиа» / Изд-во «Элмор», 2007. – 304 с.

111. Асрян, Л.В. Теория пороговых характеристик полупроводниковых лазеров на квантовых точках / Л.В. Асрян, Р.А. Сурис // Физика и техника полупроводников. – Т. 38. – Вып. 1. – 2004. – С. 3-25.

112. Авдеев, К.С. Автодинный эффект в полупроводниковых лазерах в условиях токовой модуляции и при движущемся отражателе: дис. на соискание ученой степени канд. физ.-матем. наук: 01.04.05, 05.27.01. – Саратов, 2008.

113. Величанский, В.Л. Преобразование эллиптического пучка излучения инжекционного лазера в аксиально-симметричный пучок / В.Л. Величанский, А.К. Чернышев // Краткие сообщения по физике ФИАН. – 1996. – №3-4. – С. 38-45.

114. Корюкин, И.В. Динамика одномодового полупроводникового лазера с некогерентной оптической обратной связью / И.В. Корюкин // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. – Т. 57. – 2014. – №5. – С. 427-435.

115. Веселов, Д.А. Исследование импульсных характеристик полупроводниковых лазеров с расширенным волноводом при низких температурах (110 – 120 К) / Д.А. Веселов, И.С. Шашкин, Ю.К. Бобрецова, К.В. Бахвалов, А.В. Лютецкий, В.А. Капитонов, Н.А. Пихтин, С.О. Слипченко, З.Н. Соколова, И.С. Тарасов // Физика и техника полупроводников. – Т. 50.– Вып. 10. – 2016. – С. 1414-1419.

116. Козлов, В.Л. Измерительные системы на основе двухволновых полупроводниковых лазеров и концепции «Безаприорности» / В.Л. Козлов, М.М. Кугейко // Приборы и методы измерений. – 2012. – №2 (5). – С. 20-27.
117. Takahashi, Y. Amplitude-stabilized frequency-modulated laser diode and its interferometric sensing applications / Y. Takahashi, T. Yoshino and N. Ohde // Applied Optics, 1997, Vol.36, No.24, p.5881-5887.
118. Ai, Ch. Multimode laser Fizeau inerferometer for measuring the surface of a thin transparent plate / Ch. Ai // Applied Optics, 1997, Vol.36, No.31, p.8135-8138.
119. Onodera, R. Effect of laser-diode power change on optical heterodyne interferometry / R. Onodera, Y. Ishii, N. Ohde, Y. Takahashi and T. Yoshio // Journal of Lightwave Technology, 1995, Vol.13, p.675-681.
120. ГОСТ 4784-97. Алюминий и сплавы алюминиевые деформируемые.
121. Фридляндер, И.Н. Алюминиевые сплавы в авиаракетной и ядерной технике / И.Н. Фридляндер // Вестник РАН. – Т. 74. – 2004. – №12. – С. 1076-1081.
122. Белов, А.Ф. Строение и свойства авиационных материалов / А.Ф. Белов, Г.П. Бенедиктова, А.С. Висков и др.; учебник для вузов. – М.: Металлургия, 1989. – 368 с.
123. Ильин, А.А. Титановые сплавы. Состав, структура, свойства / А.А. Ильин, Б.А. Колачёв, И.С. Полькин. – М.: ВИЛС-МАТИ, 2009. – 520 с.
124. Власов, С.В. Основы технологии переработки пластмасс / С.В. Власов, Л.Б. Кандырин, В.Н. Кулезнев и др. – М.: Мир, 2006 – 600 с.
125. Шишков, М.М. Марочник сталей и сплавов. Справочник. 3-е изд. / М.М. Шишков. – Донецк: Юго-Восток, 2002. – 456 с.
126. Арзамасов, Б.Н. Материаловедение: Учебник для высших технических учебных заведений / Б.Н. Арзамасов, И.И. Сидорин, Г.Ф. Косолапов и др.; Под общ. ред. Б.Н. Арзамасова. – М.: Машиностроение, 1986. – 384 с.
127. Кугультинов, С.Д. Технология обработки конструкционных материалов: Учебник для машиностроительных специальностей вузов / С.Д.

Кугультинов, А.К. Ковальчук, И.И. Портнов. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. – 680 с.

128. Жук, Н.П. Курс теории коррозии и защиты металлов / Н.П. Жук. – М.: Металлургия, 1976. – 472 с.

129. Самсонов, Г.В. Тугоплавкие соединения: Справочник / Г.В. Самсонов, И.М. Веницкий. – М.: Металлургия, 1976. – 560 с.

130. Самсонов, Г.В. Физико-химические свойства окислов: Справочник / Г.В. Самсонов, А.Л. Борисова, Т.Г. Жидкова и др. – М.: Металлургия, 1980. – 472 с.

131. Воинов, Б.А. Износостойкие сплавы и покрытия / Б.А. Воинов. – М.: Машиностроение, 1980. – 120 с.

132. Оптическая биомедицинская диагностика. В 2 т. Т. 2 / Пер. с англ. под ред. В.В. Тучина. – М.: Физматлит, 2007. – 368 с.

133. Тучин В.В. Лазеры и волоконная оптика в биомедицинских исследованиях / В.В. Тучин – М.: Физматлит, 2010. – 478 с.

134. Citkaya, A. Yasin. Modeling and Simulation of Temperature Distribution in Laser-tissue Interaction / A. Yasin Citkaya and S. Selim Seker // Progress In Electromagnetics Research Symposium Proceedings, Marrakesh, Morocco, Mar. 20-23, 2011, p.844-847.

135. Kienle, A. Investigation of two-layered turbid media with time-resolved reflectance / A. Kienle, T. Glanzmann, G. Wagnieres and H. van den Berg // Applied Optics, 1998, Vol.37, No.28, p.6852-6861.

136. Rovati, L. Hollow-beam geometry for dynamic light scattering measurements: a theoretical analysis / L. Rovati // Applied Optics, 1997, Vol.36, No.34, p.9083-9090.

137. Финкель, В.М. Физические основы торможения разрушения / В.М. Финкель. – М.: Металлургия, 1977. – 360 с.

138. Хан, Х. Теория упругости / Х. Хан. – М.: Мир, 1988. – 344 с.

139. Найдич, Ю.В. Контактные явления в металлических расплавах / Ю.В. Найдич. – Киев: Наукова думка, 1972. – 196 с.
140. Каневский, И.Н. Неразрушающие методы контроля: учебное пособие / И.Н. Каневский, Е.Н. Сальникова. – Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2007. – 243 с.
141. Earnshaw, J.C. Surface light scattering: a methodological review / J.C. Earnshaw // *Applied Optics*, 1997, Vol.36, No.30, p.7583-7592.
142. Surface light scattering: integrated technology and signal processing // *Applied Optics*, 1997, Vol.36, No.30, p.7593-7600.
143. Сазонникова, Н.А. Оценка механических повреждений оптическим методом / Н.А. Сазонникова, В.И. Мордасов, В.П. Шорин // *Известия Самарского научного центра Российской Академии наук*. – 1999. – №2. – С. 270-276.
144. Сазонникова, Н.А. Выявление поверхностных повреждений покрытий оптическим методом / Н.А. Сазонникова, В.И. Мордасов // *Перспективные материалы*. – 2000. – №3. – С. 95-99.
145. Сазонникова, Н.А. Обнаружение поверхностных повреждений при нанесении покрытий на металлическую поверхность / Н.А. Сазонникова, В.И. Мордасов // *Известия Академии наук «Металлы»*. – 2000. – №4. – С. 56-60.
146. Сазонникова, Н.А. Исследование процессов взаимодействия интенсивных лазерных пучков с покрытиями конструкционных материалов / Н.А. Сазонникова, В.Н. Гришанов, В.И. Мордасов // *Труды IX Межнародного совещания «Радиационная физика твердого тела»*. – Т. 1. – Севастополь, 1999. – С. 666-675.
147. Sazonnikova, N.A. Development of particle control device for gas and plasma flows / N.A. Sazonnikova, A.V. Grishanov, V.N. Grishanov, V.I. Mordasov // *Abstract V Russian-Chinese International Symposium “Advanced materials and processes”*. – Baikalsk, Russia, July 27 – August 1, 1999. – Томск: Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, 1999. – С. 214-215.

148. Sazonnikova, N.A. The laser machining of wearless coatings with use of plane optical elements / N.A. Sazonnikova // The Second Russian-Chino Simposium on Austronautical Science and Technics. – Samara: Samara Av. Inst., 1992, p.149.

149. Сазонникова, Н.А. Использование полупроводниковых инжекционных лазеров в медицине и экологии / Н.А. Сазонникова, В.Н. Гришанов, В.И. Мордасов // Тезисы докладов I Поволжской научно-практической конференции «Лазеры в медицине и экологии». – Самара, 1998. – С. 123-124.

150. Сазонникова, Н.А. Формирование банка данных лазерных технологий критического уровня с учетом социально-экономических приоритетов / Н.А. Сазонникова, В.Н. Гришанов, В.И. Мордасов, С.П. Мурзин // Тезисы докладов VIII Республиканской научно-методической конференции «Пути и методы совершенствования учебного процесса». – Самара, 1999. – С. 71.

151. Сазонникова, Н.А. Совершенствование учебного оборудования дисциплины «Лазерные системы экологического мониторинга» / Н.А. Сазонникова, В.Н. Гришанов, В.И. Мордасов // Тезисы докладов Российского научно-методического семинара «Теория и практика экологического мониторинга в образовательных учреждениях». – С.-П., 1999. – С. 92-93.

152. Сазонникова, Н.А. Требования к временным и энергетическим характеристикам полупроводниковых инжекционных лазеров используемых в медицине / Н.А. Сазонникова, В.Н. Гришанов, В.И. Мордасов // Тезисы докладов Второго Международного конгресса «Лазер и здоровье'99». – М., 1999.

153. Сазонникова, Н.А. Исследование переотражения излучения в элементах поверхности / Н.А. Сазонникова // Компьютерная оптика. – 2002. – Вып. 22. – М.: МЦНТИ. – С. 23-28.

154. Сазонникова, Н.А. Методика выявления поверхностных повреждений / Н.А. Сазонникова // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2000. – №2. – С. 41-49.

155. Мордасов, В.И. Лазерное инициирование воспламенения высокоэнергетических веществ / В.И. Мордасов, Н.А. Сазонникова, Е.Г. Иванова,

Н.И. Лаптев, В.В. Пойлов // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. – 2009. – №3 (19). – Ч. 3. – С. 13-18.

156. Гребнев, Д.Н. Использование эффекта обратной связи в полупроводниковых лазерах для построения систем диагностики состояния многослойных сотовых оболочек / Д.Н. Гребнев, Н.А. Сазонникова, О.В. Шулепова // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. – 2009. – №3 (19). – Ч. 1. – С. 382-388.

157. Сазонникова, Н.А. Математическое описание лазерной поверхностной дефектоскопии элементов конструкций / Н.А. Сазонникова, В.И. Мордасов, Г.В. Гусева, О.Р. Адиярова // Материалы III Всероссийской научно-технической конференции «Проблемы решения краевых задач прикладной математики». – Самара, СамГТУ, 2004. – С. 174-177.

158. Сазонникова, Н.А. Повышение эффективности обнаружения при лазерном зондировании поверхности / Н.А. Сазонникова // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. – 2009. – №3 (19). – С. 219-226.

159. Сазонникова, Н.А. Разработка диагностической системы для выявления поверхностных повреждений деталей / Н.А. Сазонникова, В.И. Мордасов // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2002. – №4. – С. 13-17.

160. Варламов, Е.П. Методика лазерной дефектоскопии бурильных и обсадных труб / Е.П. Варламов, В.И. Мордасов, В.Е. Чемоданов // Научно-технический журнал «Интервал. Передовые нефтегазовые технологии». – 2002. – №1(36). – Самара: Венсис, 2002. – С. 61-66.

161. Варламов, Е.П. Использование лазерной дефектоскопии для исследования поверхностей бурильных и обсадных труб. / Е.П. Варламов, В.И. Мордасов, Г.М. Файн // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и море. – 2002. – №9. – С. 14-19.

162. Сазонникова, Н.А. Построение и применение лазерной системы для диагностики состояния суставного хряща / Н.А. Сазонникова, В.И. Мордасов, Ю.В. Ларцев, С.А. Гусев // Компьютерная оптика. – 2001. – Вып. 21. – М: МЦНТИ. – С. 150-153.

163. Сазонникова, Н.А. Исследование энергоемкости взаимодействия лазерного излучения с высокоэнергетическими веществами / 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.

164. Сазонникова, Н.А. Экспериментальное исследование эффективности лазерно-электронных систем дистанционного зондирования поверхностей летательных аппаратов / Н.А. Сазонникова // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. – 2011. – №6 (30). – С. 22-30.

165. Сазонникова, Н.А. Повышение эффективности обнаружения при лазерном зондировании поверхности / Н.А. Сазонникова // Материалы докладов Международной конференции «Проблемы и перспективы развития двигателестроения». – Самара, СГАУ, 2009. – Ч. 2. – С. 25-27.

166. Сазонникова, Н.А. Использование эффекта обратной связи в полупроводниковых лазерах для построения систем диагностики состояния многослойных сотовых оболочек / 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.

167. Мордасов, В.И. Использование эффекта обратной связи в полупроводниковых лазерах для построения систем диагностики элементов конструкций / В.И. Мордасов, Н.А. Сазонникова // Использование эффекта обратной связи в полупроводниковых лазерах для построения систем диагностики элементов конструкций: Тезисы докладов международной научно-технической

конференции «Проблемы и перспективы развития двигателестроения». – Т. 1. – Самара, СГАУ, 2003. – С. 12-14.

168. Барвинок, В.А. Выявление поверхностных повреждений в трубных колоннах / В.А. Барвинок, В.И. Мордасов, Н.А. Сазонникова // Тезисы докладов Международной научно-практической конференции «Ашировские чтения». – Самара, СамГТУ, 2002. – С. 74.

169. Сазонникова, Н.А. Оптические методы диагностики заболеваний тканей суставов / Н.А. Сазонникова, В.И. Мордасов, Ю.В. Ларцев, С.А. Гусев // Тезисы докладов Российской научно-технической конференции «Технологии на страже здоровья». – Геленджик, 2000. – С. 45-46.

170. Сазонникова, Н.А. Обнаружение поверхностных дефектов лазерным пучком / Н.А. Сазонникова, А.А. Шуваев, С.А. Гусев // Тезисы докладов Всероссийской научно-технической конференции молодых ученых «Технология и оборудование современного машиностроения». – Уфа, 2000. – С. 17.

171. Сазонникова, Н.А. Лазерная диагностика качества покрытий изделий машиностроения / Н.А. Сазонникова, А.А. Шуваев, С.А. Гусев // Тезисы докладов. Решетневские чтения. IV Всероссийская научно-практическая конференция аспирантов и молодых специалистов. – Красноярск, 2000. – С. 111.

172. Варламов, Е.П. Создание технических средств для контроля траектории бурения наклонно-направленных и горизонтальных скважин / Е.П. Варламов, В.И. Мордасов, Н.А. Сазонникова // Тезисы докладов Международной научно-практической конференции «Ашировские чтения». – Самара: СамГТУ, 2002. – С. 78.

173. Сазонникова, Н.А. Оптико-электронное устройство для обнаружения повреждений обсадных колонн / Н.А. Сазонникова, Е.П. Варламов, В.И. Мордасов // Тезисы докладов Всероссийской научно-технической конференции ученых и студентов «Нефтегазовые и химические технологии». – Самара: СамГТУ, 2001. – С. 57-59.

174. Лаптев, Н.И. Лазерно-вибрационный стенд для выявления дефектов в многослойных оболочках / Н.И. Лаптев, В.И. Мордасов, А.Д. Сторож, Н.Е. Гребнев, Н.А. Сазонникова // Материалы международной XIII конференции «Решетневские чтения». Красноярск, СибГАУ, 10 ноября 2009 г. – Т. 1. – С. 286-287.

175. Мордасов, В.И. Повышение эффективности обнаружения при лазерном зондировании поверхности / В.И. Мордасов, Н.А. Сазонникова, Д.Н. Гребнев // Материалы международной XIII конференции «Решетневские чтения». Красноярск, СибГАУ, 10 ноября 2009 г. – Т. 1. – С. 233-234.

176. Сазонникова, Н.А. Лазерно-электронные системы дистанционного зондирования поверхности изделий авиационной и космической техники / Н.А. Сазонникова // Материалы международной XIV конференции «Решетневские чтения». Красноярск, СибГАУ, 10 ноября 2009 г. – Т. 1. – С. 169-170.

177. Мордасов, В.И. Методика повышения эффективности лазерно-электронных систем дефектоскопии поверхности машиностроительных материалов / В.И. Мордасов, Н.А. Сазонникова, Т.С. Карпухина // Материалы доклада 22 Всероссийской 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. 57-59.

178. Варламов, Е.П. Разработка технических средств для контроля траектории бурения наклонно-направленных и горизонтальных скважин / Е.П. Варламов, В.И. Мордасов, В.Н. Гришанов, Н.А. Сазонникова // Научно-технический журнал «Интервал. Передовые нефтегазовые технологии». – Самара: Венсис, 2002. – №4 (39). – С. 31-45.

179. Варламов, Е.П. Методика контроля траектории скважин в процессе бурения при использовании лазерных средств диагностики / Е.П. Варламов, В.И. Мордасов, Ю.И. Глинский, Н.А. Сазонникова, В.Е. Чемоданов, А.А. Шуваев //

Научно-технический журнал «Интервал. Передовые нефтегазовые технологии». – Самара: Венсис, 2002. – №2 (37). – С. 51-54.

180. Варламов, Е.П. Использование лазерной дефектоскопии для исследования поверхностей бурильных и обсадных труб / 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.

181. Варламов, Е.П. Лазерные инклинометры для управления процессом бурения и эксплуатации нефтегазовых скважин / Е.П. Варламов, В.И. Мордасов, Н.А. Сазонникова // В сборнике: Нефтегазовому образованию в Сибири – 50 лет. Труды международной конференции. – Томск: ТПУ, 2002. – С. 254-257.

182. Сазонникова, Н.А. Исследование эффективности лазерных информационно-измерительных систем для оценки состояния поверхностей летательных аппаратов / Н.А. Сазонникова // В сборнике: «Проблемы управления и моделирования в сложных системах». Труды XIV международной конференции.– Самара, ИПУСС РАН, 2012. – С. 484–491.

183. Мордасов, В.И. Использование эффекта обратной связи в полупроводниковых лазерах для построения систем диагностики элементов конструкций / В.И. Мордасов, Н.А. Сазонникова // В сборнике: Лазерные технологии и средства их реализации. IV Международная научно-техническая конференция. – С.-П.: СПбГПУ, 2004. – С. 92-93.

184. Лаптев, Н.И. Измерительная система дефектоскопии крупногабаритных оболочек / Н.И. Лаптев, В.И. Мордасов, В.В. Пойлов, Н.Е. Гребнев, Н.А. Сазонникова, О.В. Шулепова // В сборнике: Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности. Труды Седьмой международной научно-практической конференции. – Т. 2. – С.-П.: Изд-во Политехнического университета, 2009. – С. 122-123.

185. Мордасов, В.И. Повышение эффективности обнаружения объектов при лазерном зондировании поверхности / В.И. Мордасов, Е.Г. Иванова, Н.А.

Сазонникова, О.В. Шулепова // В сборнике: Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности. Труды Седьмой международной научно-практической конференции. – С.-П.: Изд-во Политехнического университета, 2009. – С. 132-134.

186. Мордасов, В.И. Обнаружение объектов при лазерном зондировании поверхности / В.И. Мордасов, Е.Г. Иванова, Н.А. Сазонникова, О.В. Шулепова // В сборнике: Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности. Труды Седьмой международной научно-практической конференции. – Т. 1. – С.-П.: Изд-во Политехнического университета, 2009. – С. 228-229.

187. Мордасов, В.И. Лазерный метод исследования поверхностных дефектов штамповой оснастки / В.И. Мордасов, Н.А. Сазонникова // В сб.: Металлофизика, механика материалов, наноструктур и процессов деформирования. Металлдеформ – 2009. Труды Третьей международной научно-технической конференции. – Т. 2. – Самара, СГАУ, 2009. – С. 149-157.

188. Сазонникова, Н.А. Лазерный измеритель концентрации частиц в газовых потоках / Н.А. Сазонникова, В.И. Мордасов, В.Н. Гришанов, А.В. Гришанов // В сборнике: «Проблемы и перспективы развития двигателестроения». – Вып. 4, Ч. 1. – Самара, СГАУ, 1999. – С. 147-151.

189. Патент 21500690 РФ. Оптический дефектоскоп для контроля внутренней поверхности жидкостных трубопроводов / В.Н. Гришанов, В.И. Мордасов, В.М. Русанов, Н.А. Сазонникова. – №98118305/28; заявл. 07.10.1998; опубл. 10.06.2000.

190. Патент 2153159 РФ. 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. – №8122284/284; заявл. 07.12.1998; опубл. 20.07.2000.

191. Патент 2203609 РФ. Устройство для диагностики поражения тканей суставов человека / Н.А. Сазонникова, С.А. Гусев, Ю.В. Ларцев, Г.П.

Котельников, В.И. Мордасов. – 2001100319/14; заявл. 04.01.2001; опубл. 10.05.2003.

192. Сазонникова, Н.А. Исследование влияния параметров лазерного излучения на эффективность оценки состояния поверхностей летательных аппаратов / Н.А. Сазонникова // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. – 2011. – №3 (27). – С. 315-319.

193. Сазонникова Н.А. Повышение эффективности лазерных измерительных систем для оценки состояния поверхности летательных аппаратов и двигателей / Н.А. Сазонникова // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. – 2012. – №3 (34). – Ч. 2. – С. 41-46.

194. Абдуллин, И.А. Исследование эффективности лазерно-электронных систем дистанционного зондирования поверхностей летательных аппаратов / И.А. Абдуллин, Н.И. Лаптев, Н.А. Сазонникова // Вестник Казанского технологического университета. – 2012. – №22. – С. 134-137.

195. Сазонникова, Н.А. Экспериментальное исследование эффективности лазерно-электронных систем дистанционного зондирования поверхностей летательных аппаратов / Н.А. Сазонникова // Вестник Самарского государственного технического университета, серия «Технические науки». – 2013. – №3 (39). – С. 86-91.

196. Sazonnikova, N.A. Method of laser vibrating defectoscopy of multilayer composite materials / Vasily I. Mordasov, Nadezhda A. Sazonnikova, Alexander D. Storozh, Nikolay E. Grebnev, Dmitry N. Grebnev // Procedia Engineering, Vol. 106 (2015), p.240-246.

197. Патент 2528033 РФ, МПК G01B 11/24. Устройство для диагностики состояния внутренней поверхности труб / В.И. Мордасов, Н.А. Сазонникова. – №2012129256/28, заявл. 10.07.2012; опубл. 10.09.2014.

198. 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.

## Приложение А

### Программа для численного моделирования процессов обнаружения и распознавания элементов поверхности при отражении лазерного излучения

```

function [W, X, K2, deltaW, Q, Q1, NN] = stat_mod_last(gamma, alpha, A1, A2, B1, H1, S, step,
Wlim, Noise_level) %delta_11=delta1" delta_1=delta1' x_1=x1'
X=[];
X1=[];
NN=[];
Q=0;
Q1=0;
Noise=unifrnd(-Noise_level,Noise_level,length(S),(2+2.3/step));
for j=1:length(S)
    K2(j)=B1/S(j);
    H2(j) = S(j)/(2*tan(gamma));
    n = (pi/2 - alpha)/gamma;
    N = unidrnd(10);
    if mod(N,2)==1
        N=N+(-1)^unidrnd(2,1,1);
    end;
    NN(j)=N;
    if (mod(n,2) < 0.01) % по идее ==0, но для избавления от наличия чисел в разрядах после
запятой
%     disp('%%%%%%%%%%целые четные значения')
    for i=0:(1+2.3/step)
        x=i*step;
        X1(j,i+1)=x;
        if H2(j)==1 && B1==1
            if (x < H2(j)*tan(gamma))
                W(j,i+1) = (B1-x*cos(alpha))/B1;
            elseif (x >= H2(j)*tan(gamma) && x < B1/cos(alpha))
                x1=2*H2(j)*tan(gamma)-x;
                W(j,i+1) = (B1-x*cos(alpha))/B1+(x-x1)*cos(alpha)*A2^N/(A1*B1);
            end
        end
    end
end

```

```

elseif (x >= B1/cos(alpha) && x < 2*H2(j)*tan(gamma))
    x2 = 2*H2(j)*tan(gamma)-(x - B1/cos(alpha));
    x1=2*H2(j)*tan(gamma)-x;
    W(j,i+1) = (x2-x1)*cos(alpha)*A2^N/(A1*B1); %!!!!!!!
elseif (x >= 2*H2(j)*tan(gamma) && x < (H2(j)*tan(gamma) + B1/cos(alpha)))
    if x <= (H2(j)*tan(gamma)+B1/(2*cos(alpha)))
        x2 = 2*H2(j)*tan(gamma);
    else
        x2 = 2*H2(j)*tan(gamma)-(x - B1/cos(alpha));
end;
W(j,i+1) = (x-2*H2(j)*tan(gamma))*cos(alpha)/B1 + (x2-(x-
B1/cos(alpha)))*A2^N/(A1*B1/cos(alpha));
    elseif (x >= (H2(j)*tan(gamma) + B1/cos(alpha)))
        W(j,i+1) = (x-2*H2(j)*tan(gamma))*cos(alpha)/B1;
    else
        disp('else 1')
    end;
elseif B1>=1 && H2(j)<=1
    x1=2*H2(j)*tan(gamma)-x;
    if (x < H2(j)*tan(gamma))
        W(j,i+1) = (B1-x*cos(alpha))/B1;
    elseif (x >= H2(j)*tan(gamma) && x < 2*H2(j)*tan(gamma))
        W(j,i+1) = (B1-x*cos(alpha))/B1 + (x-x1)*cos(alpha)*A2^N/(A1*B1);
    elseif (x >= 2*H2(j)*tan(gamma) && x < B1/cos(alpha))
        x2=2*H2(j)*tan(gamma);
        W(j,i+1) = (x-2*H2(j)*tan(gamma))*cos(alpha)/B1 +
x2*cos(alpha)*A2^N/(A1*B1)+(B1-x*cos(alpha))/B1;
        elseif (x >= B1/cos(alpha) && x < (H2(j)*tan(gamma) + B1/cos(alpha)))
            x2=2*H2(j)*tan(gamma)-(x-B1/cos(alpha));
            W(j,i+1) = (x-2*H2(j)*tan(gamma))*cos(alpha)/B1 + (x2-(x-
B1/cos(alpha)))*A2^N/(A1*B1/cos(alpha));
        elseif x>=H2(j)*tan(gamma)+B1/cos(alpha)
            W(j,i+1) = (x-2*H2(j)*tan(gamma))*cos(alpha)/B1;
        else

```

```

disp('else 2')
W(j,i+1)=1;
end;
elseif B1<=1 && H2(j)>=1
x1=2*H2(j)*tan(gamma)-x;
x2=2*H2(j)*tan(gamma)-(x-B1/cos(alpha));
if (B1/cos(alpha))>(H2(j)*tan(gamma))
if (x < H2(j)*tan(gamma))
W(j,i+1) = (B1-x*cos(alpha))/B1;
elseif (x >= H2(j)*tan(gamma) && x < B1/cos(alpha))
W(j,i+1) = (B1-x*cos(alpha))/B1 + (x-x1)*cos(alpha)*A2^N/(A1*B1);
elseif (x >= B1/cos(alpha) && x < 2*H2(j)*tan(gamma))
W(j,i+1) = (x2-x1)*cos(alpha)*A2^N/(A1*B1);
elseif (x >= 2*H2(j)*tan(gamma) && x <= (H2(j)*tan(gamma) + B1/cos(alpha)))
W(j,i+1) = (x-2*H2(j)*tan(gamma))*cos(alpha)/B1 + (x2-(x-
B1/cos(alpha)))*A2^N/(A1*B1/cos(alpha));
elseif x>H2(j)*tan(gamma)+B1/cos(alpha)
W(j,i+1) = (x-2*H2(j)*tan(gamma))*cos(alpha)/B1;
else
disp('else 3.1')
W(j,i+1)=1;
end;
else
if (x < B1/cos(alpha))
W(j,i+1) = (B1-x*cos(alpha))/B1;
elseif (x >= B1/cos(alpha) && x < H2(j)*tan(gamma))
W(j,i+1) = (B1-x*cos(alpha))/B1 + (x-x1)*cos(alpha)*A2^N/(A1*B1);
elseif (x >= H2(j)*tan(gamma) && x < 2*H2(j)*tan(gamma))
W(j,i+1) = (x2-x1)*cos(alpha)*A2^N/(A1*B1);
elseif (x >= 2*H2(j)*tan(gamma) && x <= (H2(j)*tan(gamma) + B1/cos(alpha)))
W(j,i+1) = (x-2*H2(j)*tan(gamma))*cos(alpha)/B1 + (x2-(x-
B1/cos(alpha)))*A2^N/(A1*B1/cos(alpha));
elseif x>H2(j)*tan(gamma)+B1/cos(alpha)
W(j,i+1) = (x-2*H2(j)*tan(gamma))*cos(alpha)/B1;

```

```

else
    disp('else 3.2')
    W(j,i+1)=1;
end;
end;
else
    x1=2*H2(j)*tan(gamma)-x;
    x2 = 2*H2(j)*tan(gamma)-(x - B1/cos(alpha));
    if (x < H2(j)*tan(gamma))
        W(j,i+1) = (B1-x*cos(alpha))/B1;
    elseif (x >= H2(j)*tan(gamma) && x < B1/cos(alpha))
        W(j,i+1) = (B1-x*cos(alpha))/B1+(x-x1)*cos(alpha)*A2^N/(A1*B1);
    elseif (x >= B1/cos(alpha) && x < 2*H2(j)*tan(gamma))
        W(j,i+1) = (x-x1)*cos(alpha)*A2^N/(A1*B1);
    elseif (x >= 2*H2(j)*tan(gamma) && x < (H2(j)*tan(gamma) + B1/cos(alpha)))
        W(j,i+1) = (x-2*H2(j)*tan(gamma))*cos(alpha)/B1 + (x2-(x-
B1/cos(alpha)))*A2^N/(A1*B1/cos(alpha));
    elseif (x >= (H2(j)*tan(gamma) + B1/cos(alpha)))
        W(j,i+1) = (x-2*H2(j)*tan(gamma))*cos(alpha)/B1;
    else
        disp('else 4')
    end;
end;
deltaW(j,i+1)=1-W(j,i+1)+Noise(j,i+1);
end;
end;
if max(deltaW(j,:)) > Wlim
    Q=Q+1;
end;
v = deltaW(j,1+abs(round(0.5*S(j)/(step*B1))));
if v<0.15
    N1=0;
elseif v>=0.15&&v<0.3
    N1=2;

```

```
elseif v>=0.3&&v<0.55
    N1=4;
elseif v>=0.55&&v<0.65
    N1=6;
elseif v>=0.65&&v<0.72
    N1=8;
elseif v>=0.72&&v<=0.8
    N1=10;
else
    N1=11;
end;
if N==N1
    Q1=Q1+1;
end;
N1=0;
end;
if ~isempty(X1)
    X=X1;
end;
end

for ii=1:3
    if ii==1
        Noise_level=0.05;
    elseif ii==2
        Noise_level=0.1;
    else Noise_level=0.25;
    end;
    for k=1:3
        if k==1
            B1=0.75;
            n=40;
        elseif k==2
            B1=1;
```

```

n=80;
elseif k==3
B1=1.5;
n=140;
end
for j=1:5
R = normrnd(1,0.3,n,1);
[W, X, K2, deltaW, Q, Q1, NN] = stat_mod_last(pi/6, pi/6, 0.85, 0.85, B1, 1, R, 0.1, 0.25,
Noise_level);
F(k,1,j)=Q;
F(k,2,j)=Q1;
N(k,1,j)=(Q/n);
N(k,2,j)=(Q1/n);
end
WW(ii,k,1)=mean(N(k,1,:));
WW(ii,k,2)=mean(N(k,2,:));
end
end

plot([0.75,1,1.5],WW(1,:,1),[0.75,1,1.5],WW(2,:,1),[0.75,1,1.5],WW(3,:,1));
title('Вероятность обнаружения от B1 для разных значений шума')
legend('P=f(B1) при шуме 0.05','P=f(B1) при шуме 0.1','P=f(B1) при шуме 0.25',3)
xlim([0.7 1.6])
saveas(gcf,'C:\25task1.jpg')

plot([0.75,1,1.5],WW(1,:,2),[0.75,1,1.5],WW(2,:,2),[0.75,1,1.5],WW(3,:,2))
title('Вероятность распознавания от B1 для разных значений шума')
legend('P=f(B1) при шуме 0.05','P=f(B1) при шуме 0.1','P=f(B1) при шуме 0.25',3)
xlim([0.7 1.6])
saveas(gcf,'C:\25task2.jpg')

plot([0.05 0.1 0.25],WW(:,1,1),[0.05 0.1 0.25],WW(:,2,1),[0.05 0.1 0.25],WW(:,3,1))
title('Вероятность обнаружения от макс величины шума для разных значений B1 ')

```

```
legend('P=f(Макс. уровень шума) при B1=0.75','P=f(Макс. уровень шума) при B1=1','P=f(Макс.  
уровень шума) при B1=1.5',3)  
saveas(gcf,'C:\25task3.jpg')
```

```
plot([0.05 0.1 0.25],WW(:,1,2),[0.05 0.1 0.25],WW(:,2,2),[0.05 0.1 0.25],WW(:,3,2))
```

```
title('Вероятность распознавания от макс величины шума для разных значений B1 ')
```

```
legend('P=f(Макс. уровень шума) при B1=0.75','P=f(Макс. уровень шума) при B1=1','P=f(Макс.  
уровень шума) при B1=1.5',3)  
saveas(gcf,'C:\25task4.jpg')
```

## Приложение Б

## Результаты поверхностной дефектоскопии конструкционных материалов

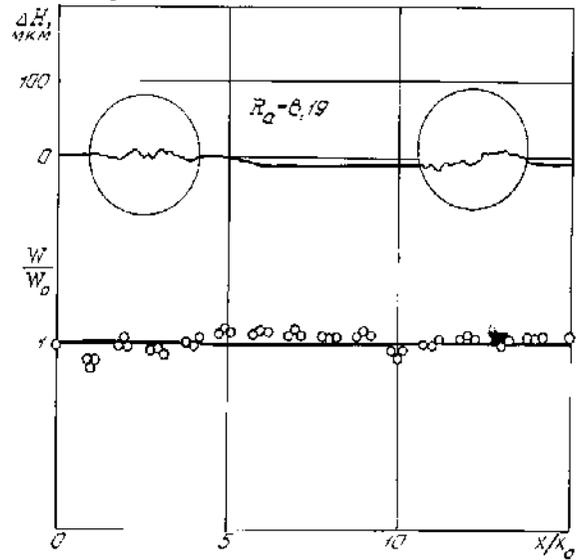


Рисунок Б.1 – Общий вид профилограммы поверхности и зависимость изменения относительной величины сигнала  $W/W_0$  от безразмерной координаты  $x/x_0$  для образца с покрытием на основе калиевого жидкого стекла с наполнителем  $ZrO_2$ ,  $MgO$ ,  $ZnO$ .  $x_0=1,6$  мм,  $W_0=0,04$  мВт, увеличение на профилограмме: вертикальное – 200, горизонтальное – 50

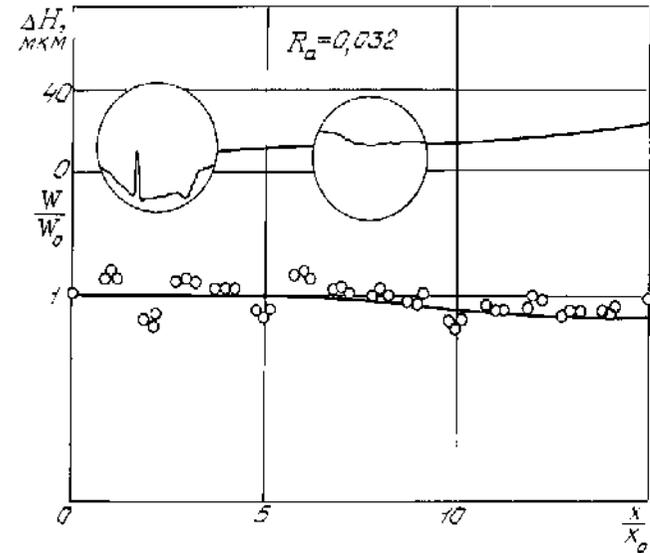


Рисунок Б.2 – Общий вид профилограммы поверхности и зависимость изменения относительной величины сигнала  $W/W_0$  от безразмерной координаты  $x/x_0$  для образца из химически полированного алюминия АД-1М.  $x_0=1,6$  мм,  $W_0=1,34$  мВт, увеличение на профилограмме: вертикальное – 2000, горизонтальное – 50

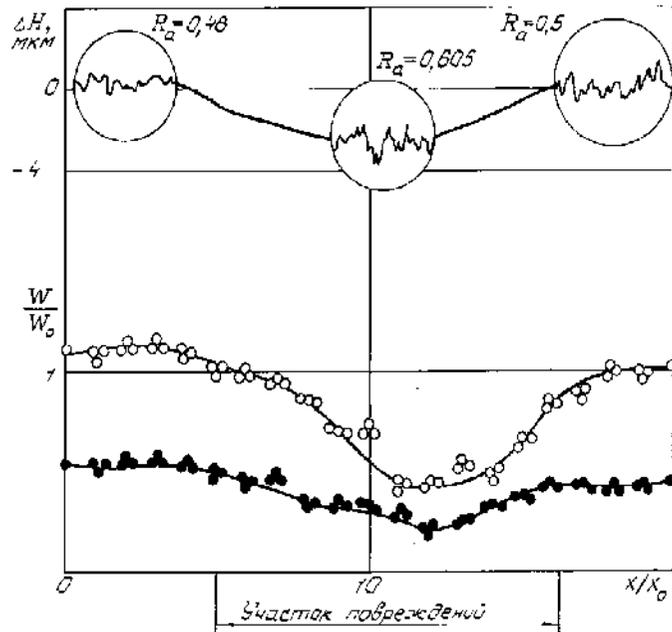


Рисунок Б.3 – Общий вид профилограммы поверхности и зависимость изменения относительной величины сигнала  $W/W_0$  от безразмерной координаты  $x/x_0$  для образца из титанового сплава ВТ-14.  $x_0=1,6$  мм,  $W_0=0,54$  мВт, о – сухая поверхность, • – поверхность, смачиваемая слоем воды толщиной  $s=1,5$  мм, увеличение на профилограмме: вертикальное – 5000, горизонтальное – 50

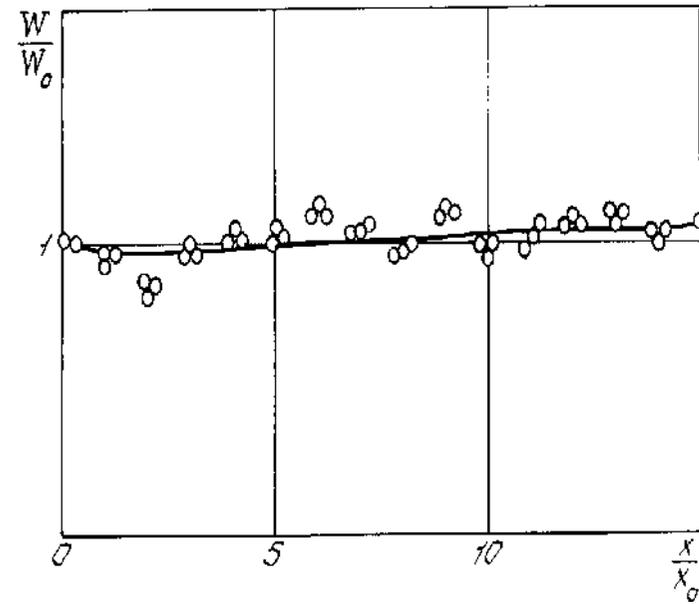


Рисунок Б.4 – Зависимость изменения относительной величины сигнала  $W/W_0$  от безразмерной координаты  $x/x_0$  для образца с покрытием на основе карбида хрома.  $x_0=1,6$  мм,  $W_0=0,06$  мВт,  $R_a = 0,784$  мкм, увеличение на профилограмме: вертикальное – 200, горизонтальное – 50

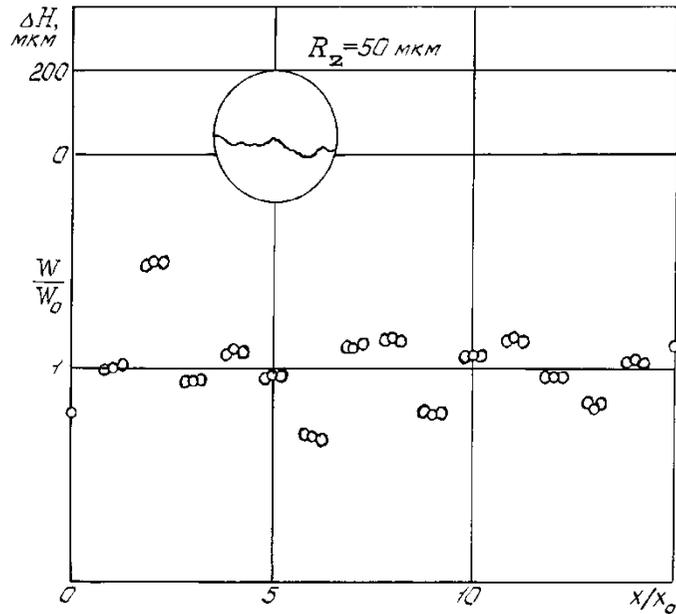


Рисунок Б.5 – Общий вид профилограммы поверхности и зависимость изменения относительной величины сигнала  $W/W_0$  от безразмерной координаты  $x/x_0$  для образца с наличием окалины на поверхности.  $x_0=1,6$  мм,  $W_0=0,01$  мВт, увеличение на профилограмме: вертикальное – 100, горизонтальное – 50

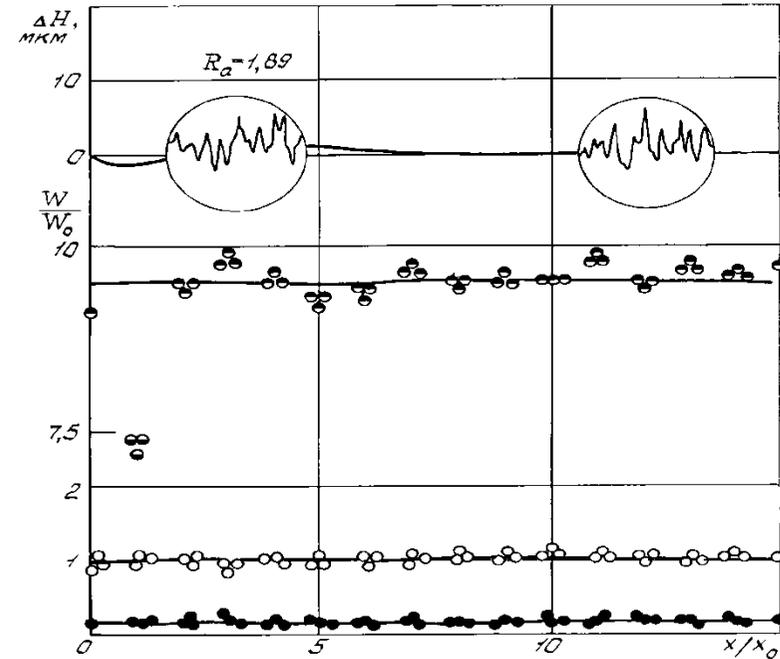
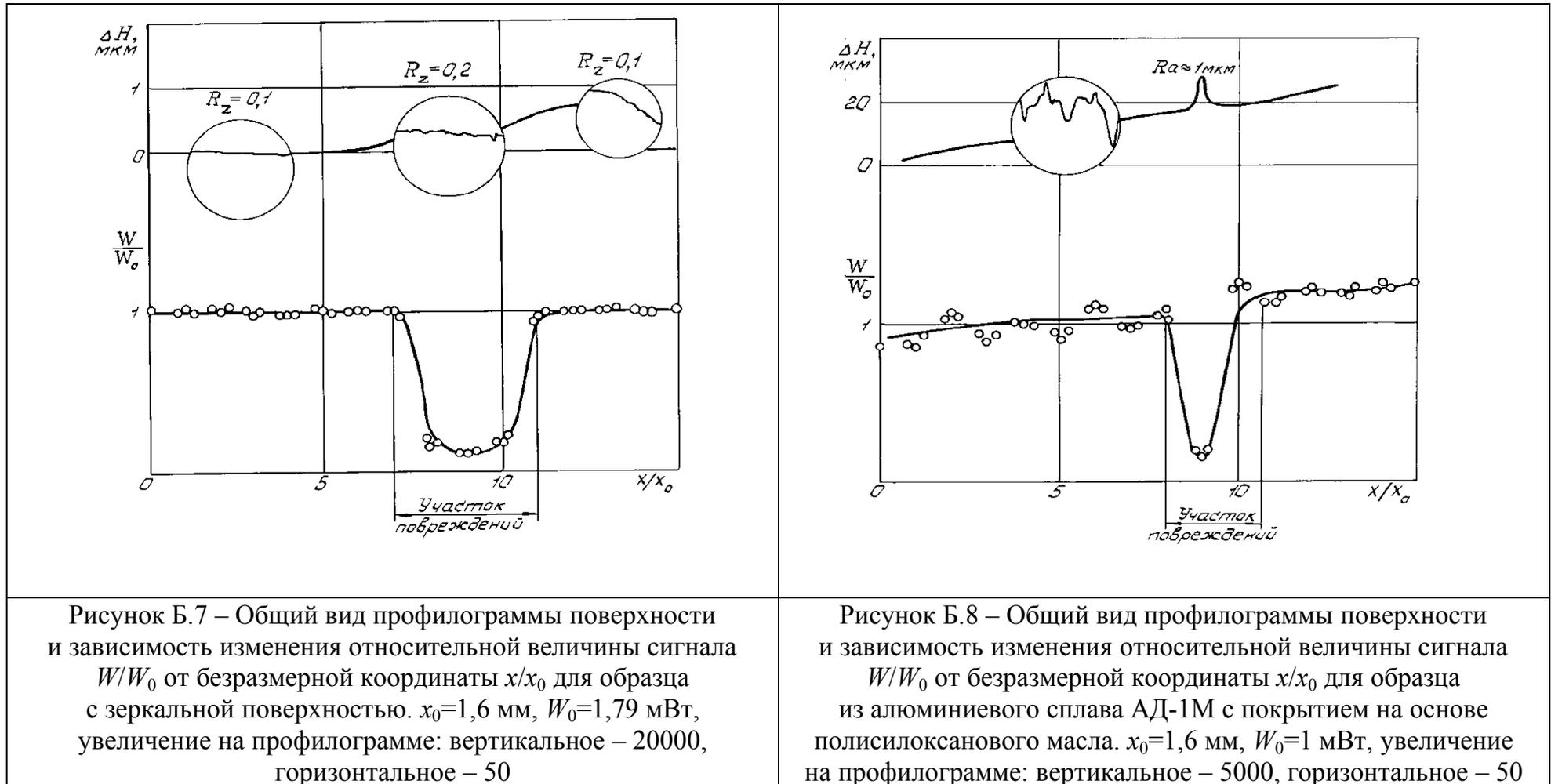


Рисунок Б.6 – Общий вид профилограммы поверхности и зависимость изменения относительной величины сигнала  $W/W_0$  от безразмерной координаты  $x/x_0$  для образца с покрытием черной анод.  $x_0=1,6$  мм,  $W_0=0,008$  мВт, о – сухая поверхность, • – поверхность, смачиваемая слоем воды толщиной  $s=2$  мм, увеличение на профилограмме: вертикальное – 2000, горизонтальное – 50



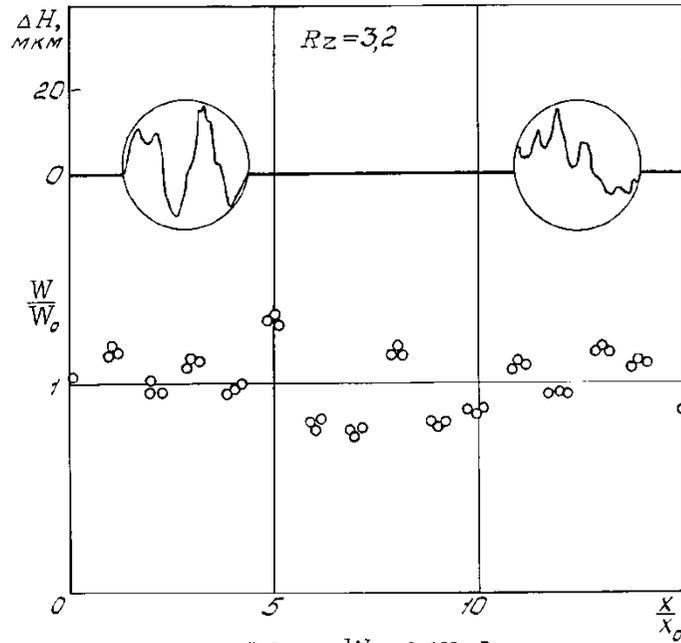


Рисунок Б.9 – Общий вид профилограммы поверхности и зависимость изменения относительной величины сигнала  $W/W_0$  от безразмерной координаты  $x/x_0$  для образца с покрытием на основе калиевого жидкого стекла с наполнителем  $ZrO_2$  модифицированным.  $x_0=1,6$  мм,  $W_0=0,28$  мВт, увеличение на профилограмме: вертикальное – 2000, горизонтальное – 50

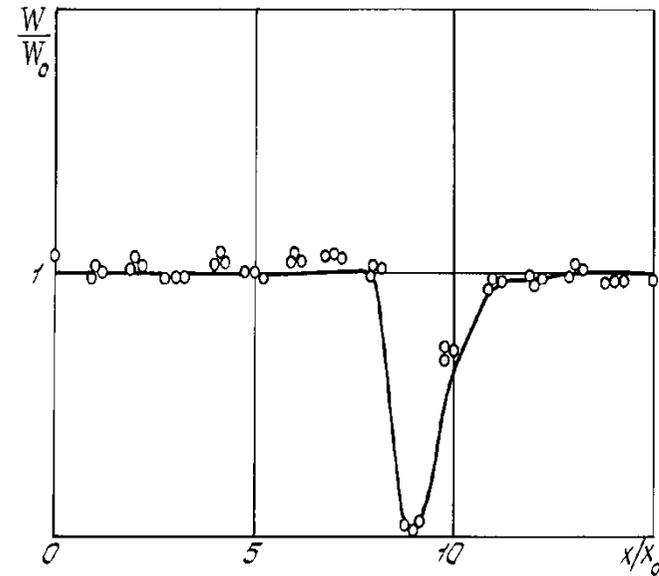


Рисунок Б.10 – Общий вид профилограммы поверхности и зависимость изменения относительной величины сигнала  $W/W_0$  от безразмерной координаты  $x/x_0$  для образца из полилавсановой пленки с алюминиевым покрытием,  $x_0=1,6$  мм,  $W_0=1,9$  мВт

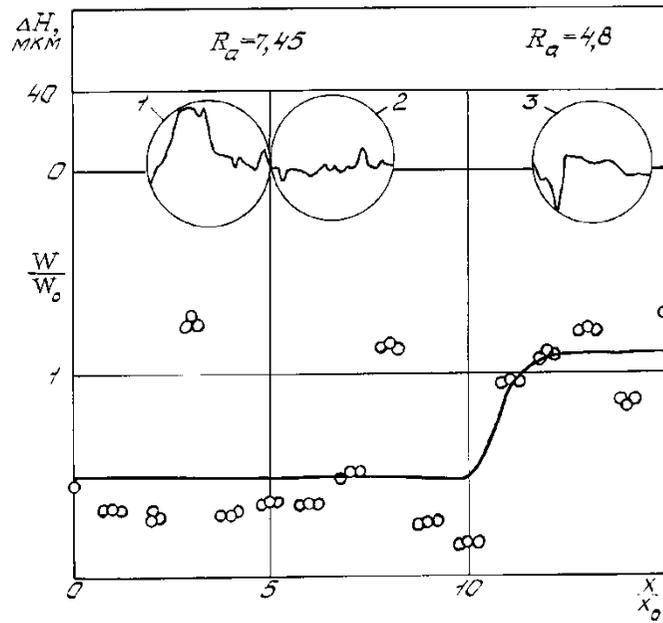


Рисунок Б.11 – Общий вид профилограммы поверхности и зависимость изменения относительной величины сигнала  $W/W_0$  от безразмерной координаты  $x/x_0$  для образца из стеклотекстолита АФТ-2П.  $x_0=1,6$  мм,  $W_0=0,03$  мВт, увеличение на профилограмме: вертикальное – 1,2 – 500, 3 – 1000, горизонтальное – 50

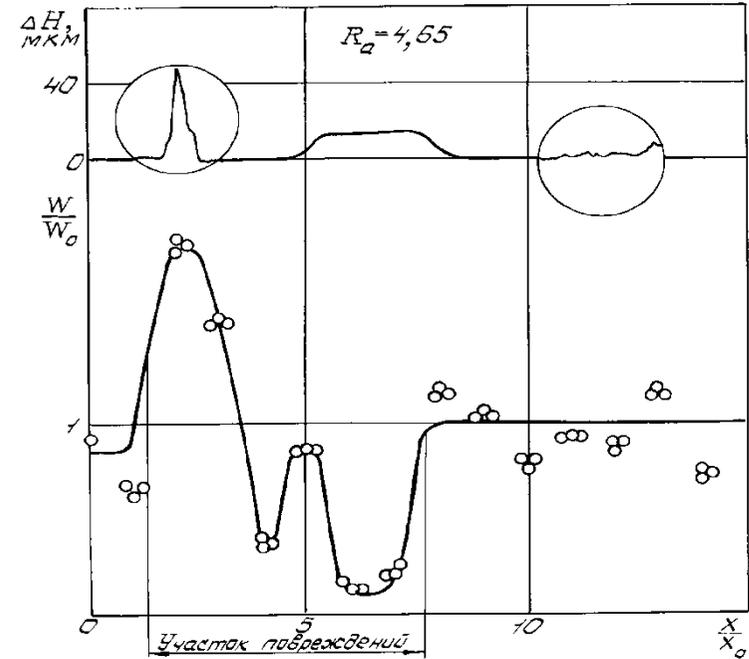


Рисунок Б.12 – Общий вид профилограммы поверхности и зависимость изменения относительной величины сигнала  $W/W_0$  от безразмерной координаты  $x/x_0$  для образца из стеклотекстолита АФТ-2П.  $x_0=1,6$  мм,  $W_0=0,05$  мВт, увеличение на профилограмме: вертикальное – 500, горизонтальное – 50

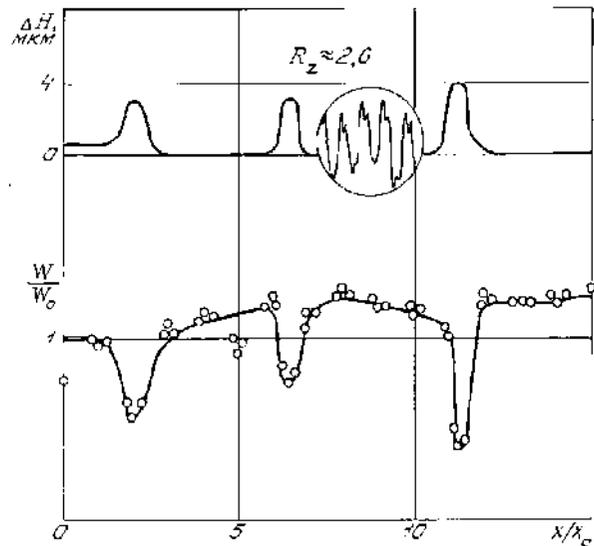


Рисунок Б.13 – Общий вид профилограммы поверхности и зависимость изменения относительной величины сигнала  $W/W_0$  от безразмерной координаты  $x/x_0$  для образца, имитирующего трещину.  $x_0=1,6$  мм,  $W_0=0,44$  мВт, увеличение на профилограмме: вертикальное – 5000, горизонтальное – 50

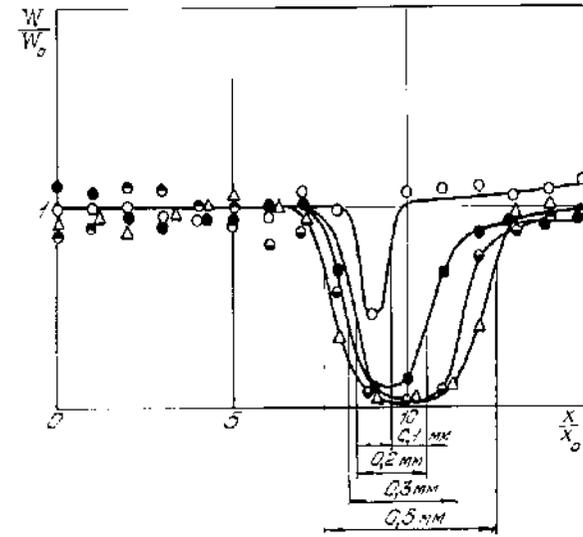


Рисунок Б.14 – Общий вид профилограммы поверхности и зависимость изменения относительной величины сигнала  $W/W_0$  от безразмерной координаты  $x/x_0$  для образца, имитирующего трещину.  $x_0=1,6$  мм, о – образец без фольги, ● – в образце закреплены 4 слоя фольги, ● – в образце закреплены 8 слоев фольги, Δ – в образце закреплены 16 слоев фольги,  $W_0=0,62$  мВт, увеличение на профилограмме: вертикальное – 5000, горизонтальное – 50

## Приложение В

### **Дефектоскоп для выявления повреждений в обсадных колоннах нефтяных и газовых скважин**

В нефтегазодобывающей промышленности часто возникают проблемы, связанные с диагностикой состояния действующих и строящихся скважин. Это происходит из-за отсутствия современных многоцелевых приборов, предназначенных для исследования стенок скважин, мест притока нефти, воды и других флюидов при их совместном движении в стволе скважины. Трудность создания подобных приборов заключается в требованиях, предъявляемых к ним и сложных условиях эксплуатации [160, 161, 168, 172, 173, 179-181].

Причиной аварий нефтегазодобывающих скважин могут быть повреждения обсадных колонн, которые характеризуются смятием, коррозией, образованием трещин и отверстий, а также отложениями парафинов, асфальтенов, солей металлов на стенках колонны и др.

Обсадная труба (колонна) – это стальная или пластиковая труба, которая служит для укрепления стенок и изоляции ствола скважины.

Обсадную колонну составляют из труб, соединённых с помощью резьбы или сварки. Обсадные трубы должны обладать достаточной прочностью на сжатие наружного давления горных пород и промывочной жидкости, находящейся в затрубном пространстве; выдерживать нагрузку от собственного веса при спуске и подъёме и от трения о стенки скважины. Выдерживать заданное наружное и внутреннее давление, а их муфтовые соединения должны быть непроницаемыми для газа, нефти и воды.

Капитальный ремонт, связанный с исправлением технического состояния обсадных колонн приводит к потере времени работы скважин и, следовательно, к потере добычи нефти. Нарушения обсадных колонн, носят сложный характер, и восстановление их работоспособности при существующих методах и технологии ремонта вызывает длительный простой скважин.

На ремонт колонн затрачиваются значительные средства, увеличиваются сроки разработки месторождений.

Следовательно, создание более совершенных методов и технологии ремонта скважин является весьма актуальной задачей.

Дефект колонны – это каждое отдельное несоответствие нормативам: в стенке, в сварном шве трубы, геометрических параметров трубы, а также соединительные детали, не соответствующие требованиям на изготовление.

Дефекты подразделяются на дефекты, подлежащие ремонту (ДПР), из которых по степени опасности выделяются дефекты первоочередного ремонта (ПОР) [160, 161].

Дефектами, подлежащими ремонту, являются дефекты труб, соединительные детали, установленные на магистральных и технологических нефтепроводах, параметры которых не соответствуют требованиям СНиП, ГОСТ, ВСН и других нормативных документов [160, 161, 180].

Дефектами первоочередного ремонта являются дефекты, представляющие повышенную опасность для целостности нефтепровода при его эксплуатации и подлежащие ремонту в первую очередь для восстановления несущей способности трубы.

Комбинированными дефектами являются комбинации различных видов дефектов. К таким дефектам относятся

1. вмятины в сочетании с риской, потерей металла, расслоением или трещиной;
2. вмятины, примыкающие или находящиеся на сварном шве.

Дефект считается примыкающим к сварному шву, если минимальное расстояние от границы дефекта до границы сварного шва не превышает 4-х толщин стенки трубы в районе дефекта.

Критерии классификации дефектов на ДПР и ПОР приведены в таблице В.1.

Таблица В.1 – Классификация дефектов по критерию очередности ремонта

	Описание дефекта	Дефекты, подлежащие ремонту	Дефекты первоочередного ремонта
	Вмятина, без дополнительных дефектов и примыкания к сварным швам	Глубиной, равной или более 3,5% от номинального диаметра трубы	Глубиной, равной или более 3,5% от номинального диаметра трубы
	Вмятина, примыкающая к сварному шву или расположенная на сварном шве	Глубиной более 6 мм	Глубиной, равной или более 1% от номинального диаметра трубы, но не менее 6 мм
	Вмятина в комбинации с дополнительным дефектом (риской, задиром, трещиной, потерей металла)	Все дефекты	Все дефекты
	Внутренняя потеря металла	Глубиной, равной или более 20% от толщины стенки трубы	Глубиной, равной или более 50% от толщины стенки трубы. Опасные по результатам расчета на статическую прочность или с допустимым сроком эксплуатации 1 год и менее
	Дефекты сплошной коррозии длиной и шириной 100 мм и более и точечные внешние потери металла, объединенные в единый дефект с размерами 100x100 мм и более на участках трубопроводов	Все дефекты	Все дефекты
	Риска (царапина, задир)	Глубиной, равной или более 0,2мм	Глубиной, равной или более 0.2 мм
	Трещина по телу трубы или сварном шве	Все дефекты	Все дефекты
	Несплошность плоскостного типа продольного (спирального) шва	Один дефект длиной по оси трубы более 13 мм на длине 150 мм по оси трубы или 2 дефекта длиной по оси трубы более 7 мм на длине 150 мм по оси трубы	Длиной по оси трубы равной или более $2\sqrt{D_H t}$ при любой глубине. Опасные по результатам расчета на статическую прочность или с допустимым сроком эксплуатации 1 год и менее

Дефекты геометрии трубы – это дефекты, связанные с изменением ее формы. К ним относятся [160, 161] вмятина – уменьшение проходного сечения трубы длиной не более 1,5 номинального диаметра трубы, возникшее в результате

механического воздействия, при котором не происходит излома оси нефтепровода.

Дефекты в стенке трубы. К ним относятся:

1) Потеря металла – изменение толщины стенки трубы, характеризующееся локальным утонением в результате механического или коррозионного повреждения или обусловленное технологией изготовления.

2) Дефекты сплошной коррозии длиной и шириной 100 мм и более включаются в состав дефектов ДПР независимо от глубины дефекта. При их расположении на участках трубопроводов, находящихся на расстоянии не более 3-х км от электрифицированных железных дорог, данные дефекты классифицируются как дефекты ПОР.

3) Точечные коррозионные дефекты (внешние потери металла), объединенные при интерпретации по результатам внутритрубной диагностики в единый дефект с размерами 100x100 мм и более включаются в состав дефектов ДПР. При их расположении на участках трубопроводов, находящихся на расстоянии не более 3-х км от электрифицированных железных дорог, данные дефекты классифицируются как дефекты ПОР.

4) Риска (царапина, задир) – дефект поверхности в виде углубления с уменьшением толщины стенки трубы, образованный перемещающимся по поверхности трубы твердым телом.

5) Трещина – дефект в виде разрыва металла стенки трубы.

6) Дефекты сварного шва – это дефекты в самом сварном шве или в околошовной зоне, типы и параметры которых установлены нормативными документами.

К дефектам сварного шва относятся:

– Трещина, непровар, несплавление – дефекты в виде несплошности металла по сварному шву, классифицируются как "несплошности плоскостного типа" поперечного/продольного/спирального сварного шва.

– Поры, шлаковые включения, наружные дефекты (подрез, превышение проплава, наплывы, чешуйчатость, отклонения размеров шва от требований

нормативных документов) классифицируются как "аномалии" поперечного/продольного/спирального сварного шва.

– Смещение кромок – несовпадение уровней расположения внутренних и наружных поверхностей стенок сваренных (свариваемых) труб (для поперечного сварного шва) или листов (для спиральных и продольных швов) в стыковых сварных соединениях, классифицируется как "смещение" поперечного/продольного/спирального сварного шва.

Трубная секция, содержащая совокупность дефектов ДПР с общей площадью всех потерь металла 15% и более от площади наружной поверхности секции, классифицируется как секция, подлежащая ремонту и может быть отремонтирована только заменой всей секции.

Расчеты статической прочности труб с дефектами потери металла проводятся в соответствии с "Методикой определения опасности повреждений стенки труб магистральных трубопроводов по данным обследования внутритрубными дефектоскопами" [160].

Расчеты допустимого срока эксплуатации (долговечности) труб с коррозионными дефектами стенки проводятся в соответствии с "Методикой оценки работоспособности и проведения аттестации магистральных нефтепроводов" [161]. В расчетах допустимого срока эксплуатации труб с коррозионными дефектами стенки используются скорости роста коррозионных дефектов.

Дефекты, параметры которых не могут быть определены только по данным инспекционного контроля, а также в которых по данным инспекционного контроля могут быть не выявлены дополнительные дефекты должны, быть дополнительно обследованы неразрушающими методами контроля при проведении дополнительного дефектоскопического контроля (ДДК). Дефекты, подлежащие ДДК, приведены в таблице В.2.

При проведении ДДК используются следующие методы неразрушающего контроля: визуально-измерительный, ультразвуковой, магнитный (магнитографический и др.).

Возможно применение (при необходимости) других методов контроля, обеспечивающих выявление дефектов и определение их параметров (капиллярный, вихретоковый и др.). Основные требования к проведению дополнительного дефектоскопического контроля дефектов изложены в [160].

На рисунке В.1 наглядно показаны некоторые виды дефектов.

Методика лазерной дефектоскопии была рассмотрена с использованием дефектоскопа для выявления поверхностных повреждений [189, 190]. Данное изобретение относится к контрольно-измерительной технике и может быть использовано для обнаружения механических дефектов и определения их геометрических параметров на внутренней поверхности жидкостных трубопроводов (рисунок В.2).

Ширина трещины определяется разницей во времени между сигналами, соответствующими изменению интенсивности зеркально отраженного излучения. Сканирование поверхности трубы по винтовой линии позволяет регистрировать трещины, ориентированные в различных направлениях.

Таблица В.2 – Дефекты, подлежащие ДДК

Описание и параметры дефекта	Цель проведения ДДК
Вмятины, глубиной до 3,5% от номинального наружного диаметра трубы	Определение наличия дополнительных дефектов в дефекте геометрии и для уточнения очередности и метода ремонта
Смещения кромок в поперечных сварных швах	Определение наличия дополнительных дефектов в сварном шве, необходимости и метода их ремонта
Сварные швы, смонтированные с применением подкладных колец	Определение наличия дефектов в сварном шве, необходимости и метода их ремонта

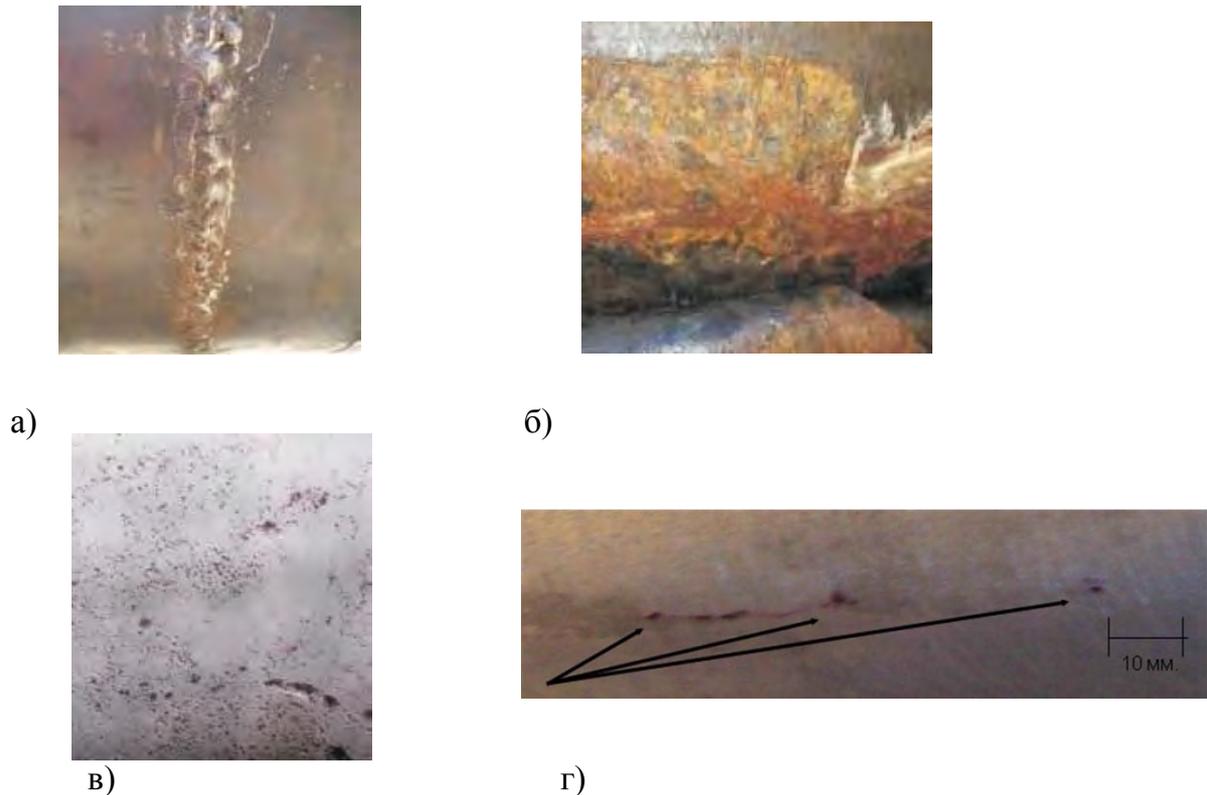


Рисунок В.1 – Виды дефектов, где (а) – аномальное сварное соединение; (б) – участок общей и язвенной коррозии с потерей металла; (в) – участки с локальными коррозионными дефектами; (г) – фрагмент внутренней поперечной трещины в дефектном сварном шве нефтепровода, образованной на цепочке пор и неметаллических включений, зона раскрытия дефекта 0,1 мм, глубина 9 мм ( $\times 12$ )

Оптический дефектоскоп для контроля внутренней поверхности жидкостных трубопроводов содержит лазерный излучатель 1, оптическая ось которого совпадает с осью трубы 2, уголкового отражателя 3, закрепленного на валу 4, установленном в опорах 5, фотоприемник 6, цилиндрическую подвижную обечайку 7 с оптически прозрачными окнами 8, герметично одетую на корпус дефектоскопа 9 и совершающую поворот на нужный угол с помощью привода 10 [189, 197].

Луч лазера 1 с помощью вращающегося уголкового отражателя 3 направляется на исследуемую поверхность 2, при отсутствии дефектов зеркально отражается и регистрируется фотоприемником 6. Выходной сигнал фотоприемника 6 пропорционален интенсивности зеркально отраженного от поверхности 2 излучения. Одновременно происходит перемещение дефектоскопа вдоль трубы.

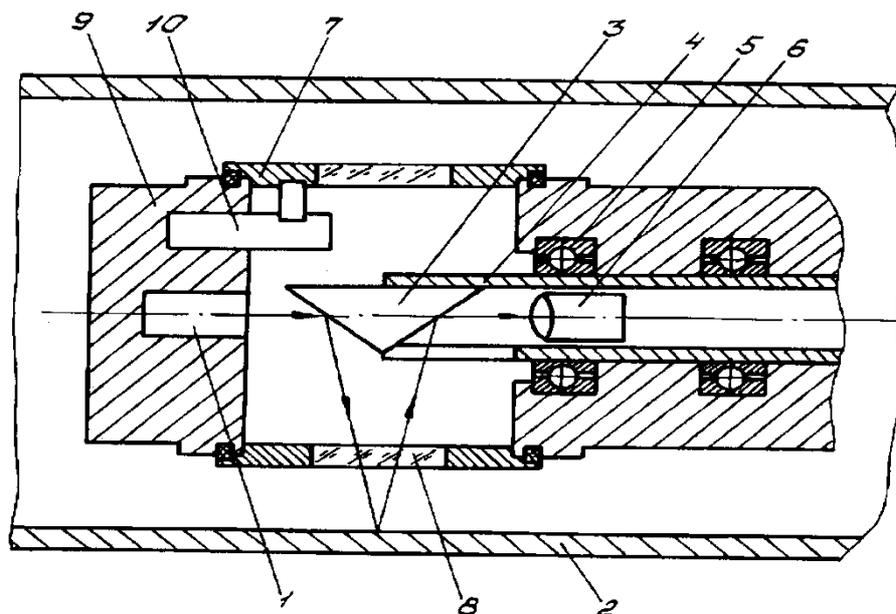


Рисунок В.2 – Оптический дефектоскоп для контроля внутренней поверхности жидкостных трубопроводов

В результате траектория светового луча на поверхности исследуемого объекта представляет собой винтовую линию. При наличии трещин значительная часть светового потока рассеивается на их краях, что приводит к резкому снижению сигнала фотоприемника 6.

Изменению шероховатости, наличию ржавчины или загрязнений соответствует более слабое изменение интенсивности зеркально отраженного излучения.

Цилиндрическая обечайка 7, герметично одетая на корпус 9, имеющая четное количество  $n$  прозрачных окон, размеры перемычек между которыми не превышают величины оптического окна, позволяет проводить контроль внутренней поверхности трубопроводов при наличии жидкости. Поворот обечайки 7 с помощью привода 10 на определенный угол обеспечивает полный обзор контролируемой поверхности. [189, 197].

Предложенной схеме дефектоскопа соответствует следующий принцип измерения (рисунок В.3).

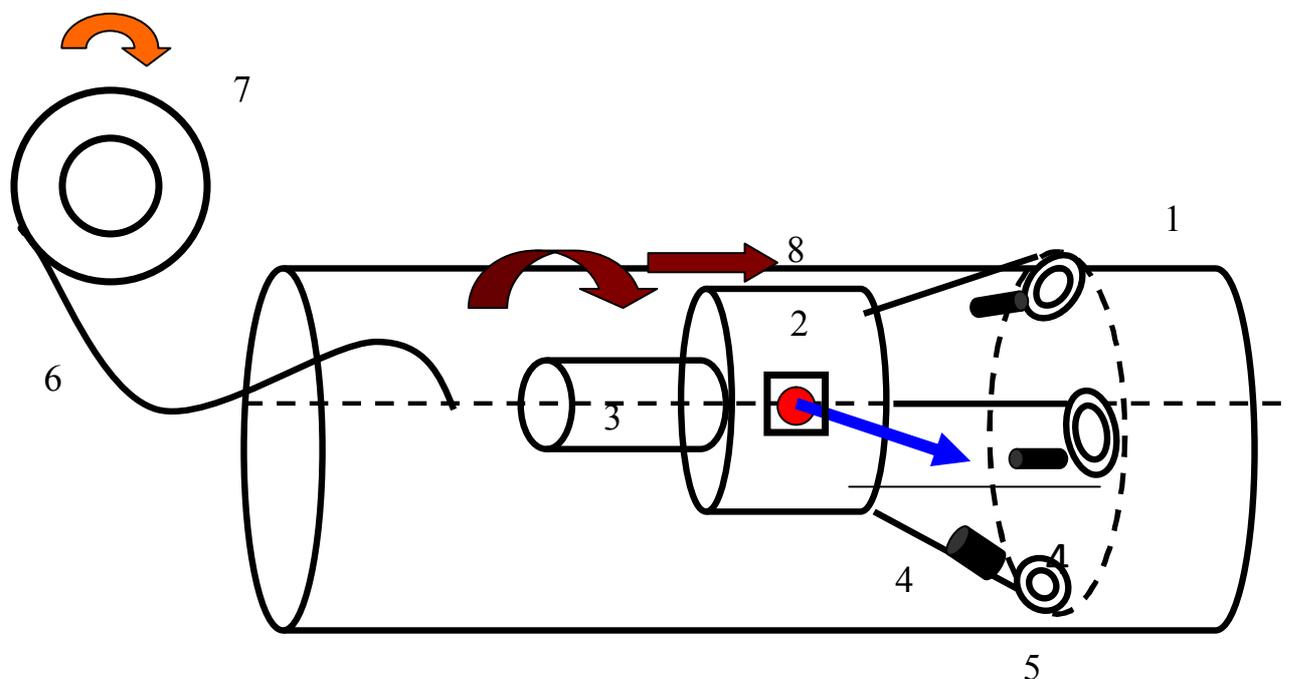


Рисунок В.3 – Схема дефектоскопа и его принцип измерения: 1 – труба, 2 – полупроводниковый лазерный излучатель, 3 – электродвигатель, 4 – опоры, 5 – пружины, 6 – кабель, 7 – катушка, 8 – направление перемещения

Объектом диагностики является труба 1. В корпусе измерительного блока 8 установлены полупроводниковый лазерный излучатель 2 и электродвигатель 3 для перемещения измерительного блока внутри трубы 1. Корпус измерительного блока снабжен тремя опорами 4 с пружинами 5, обеспечивающими устойчивое положение прибора и перемещение внутри трубы. Прибор соединен кабелем 6 с блоком регистрации обработки информации. Перед началом измерений кабель намотан на катушку 7. По углу поворота катушки 7 производится отсчет перемещения прибора внутри трубы.

## Приложение Г

### Прибор и методика исследования оптических характеристик тканей суставов

Лазерное излучение может поглощаться, отражаться, рассеиваться, переизлучаться средой, и каждый из указанных процессов несет информацию о микро- и макроструктуре этой среды. Многообразие структур биотканей определяет различный характер прохождения света через них. Взаимодействие света с живой материей определяется как параметрами источника излучения (интенсивность, длина волны, длительность и частота повторения импульсов и др.), так и параметрами биотканей (степенью однородности и пигментации, тепловыми и упругими свойствами и т.д.) [133-136].

Процессы, характеризующие взаимодействие лазерного излучения с биобъектами, можно разделить на три группы. К первой группе относятся невозмущающие процессы, ко второй – процессы, в которых проявляется фотохимическое или тепловое действие, и к третьей – процессы, приводящие к фоторазрушению (абляции, коагуляции).

Представляет интерес область очень малых интенсивностей, в которой возможно применение ряда наиболее чувствительных методов исследования, не требующих сильных световых потоков, и, следовательно, не вносящих искажений в результаты измерений из-за отсутствия возмущающего воздействия на исследуемый объект, так как не запускаются адаптационные механизмы биосистемы и не возникают необратимые изменения биотканей.

Биологические ткани являются оптически неоднородными поглощающими средами со средним показателем преломления большим, чем у воздуха, поэтому на границе раздела биобъект-воздух часть излучения отражается (френелевское отражение), а остальная часть проникает в биоткань. За счет многократного рассеяния и поглощения лазерный пучок уширяется и затухает при распространении в биоткани. Объемное рассеяние является причиной распространения значительной доли излучения в обратном направлении (обратное рассеяние). Клеточные мембраны, ядра и органеллы являются

основными рассеивателями для многих биотканей. Поглощенный свет преобразуется в тепло, переизлучается в виде флуоресценции, а также тратится на фотобиохимические реакции (модификация пространственной структуры макромолекул белков в электрическом поле световой волны, фотовозбуждение молекулярного кислорода, содержащегося в биобъекте, в синглетное состояние и др.). Спектр поглощения определяется типом доминирующих поглощающих центров и содержанием воды в биоткани. Характер фотовоздействия лазерного излучения на биоткань определяется ее составом и коэффициентом поглощения на длинах волн облучения. Таким образом, оптические свойства биоткани определяются ее структурой и состоянием: физиологическим состоянием, уровнем гидратации, гомогенностью видовой вариантностью, измерения *in vivo* – *in vitro* и др.

Ослабление лазерного пучка в биоткани происходит по экспоненциальному закону, интенсивность прошедшего коллимированного излучения оценивается по закону Бугера-Бера [133,134]:

$$I(z) = (1 - R)I_0 \exp(-\mu_t z), \quad (\text{Г.1})$$

где  $R$  – коэффициент отражения при нормальном падении пучка,  $R = ((n-1)/(n+1))^2$ ,  $n$  – показатель преломления биоткани,  $I_0$  – интенсивность падающего света,  $\mu_t = \mu_a + \mu_s$  – коэффициент экстинкции (коэффициент взаимодействия или ослабления),  $\mu_a$  – коэффициент поглощения,  $\mu_s$  – коэффициент рассеяния,  $z$  – толщина образца. Средняя длина свободного пробега однократно рассеянного фотона в биоткани определяется как  $l_{ph} = \mu_t^{-1}$ . Сильная анизотропия рассеяния биотканей и многократный его характер приводят к отклонению характера пропускания от закона Бугера-Бера (Г.1).

Достаточно строгое математическое описание процесса распространения немодулированного излучения в рассеивающей среде может быть получено с помощью стационарной теории переноса излучения [133-135].

Таким образом, основными оптическими характеристиками биотканей являются:  $\mu_a$  – коэффициент поглощения,  $\mu_s$  – коэффициент рассеяния,  $g$  – средний косинус угла рассеяния (параметр анизотропии рассеяния). В таблице Г.1 приведены значения оптических характеристик некоторых биотканей [133]

Таблица Г.1 – Оптических характеристик биотканей

Биоткань	$\lambda$ , нм	$\mu_a$ , см <sup>-1</sup>	$\mu_s$ , см <sup>-1</sup>	$g$
Измерения in vitro				
Кожа: Роговой слой	337	330	2300	0,9
	400	230	2000	0,9
Эпидермис	337	120	1200	0,72
	633	35	450	0,80
Кровь	517	354	468	0,995
	600	25	464	0,995
Мышечная ткань	515	11,2	530	–
	1064	2,0	215	0,96
Аорта	633	0,52	316	0,87
	1064	2,7	–	–
Ткани зуба Дентин	633	6,0	1200	0,44
	Эмаль	633	0,97	1,1

Знание оптических характеристик биотканей и методов их определения необходимо для создания методов диагностики, терапевтического и хирургического воздействия. Существует много методов определения оптических параметров биотканей [133-136]. Эти методы можно разделить на две большие группы: прямые и косвенные. К прямым относятся методы, в основе которых лежат базовые понятия и определения, например закон Бугера-Бера (Г.1), фазовая

функция однократного рассеяния для тонких образцов или эффективная глубина проникновения света для объемных сред. Измеряемыми параметрами являются коллимированное пропускание и индикатриса рассеяния для тонких образцов или освещенность внутри объемной среды. Достоинства этих методов заключаются в чрезвычайной простоте аналитических выражений, используемых при обработке данных для нахождения коэффициента экстинкции и фактора анизотропии рассеяния. Недостатками прямых методов является необходимость строго выполнения условий эксперимента, соответствующих модели, однократность рассеяния для тонких образцов, исключения влияния поляризации и преломления излучения на границах кюветы и т.п., для объемных сред с многократным рассеянием – детектор, регистрирующий освещенность (обычно это волоконный световод с изотропно-рассеивающим шариком на торце), должен быть расположен вдали от источника света и границ среды.

Косвенные методы предполагают решение обратной задачи рассеяния света на основе использования той или иной теоретической модели распространения света в среде. В свою очередь косвенные методы делятся на итерационные и неитерационные. Неитерационные методы используют уравнения, в которых оптические свойства определяются через параметры, непосредственно связанные с измеряемыми величинами. В основе косвенных неитерационных методов лежат модель Кубелки-Мунка (двухпотоковая), трех-, четырех- и семипотоковая модели [133-136]. В косвенных итерационных методах оптические свойства выражаются неявно через измеряемые параметры. Величины, определяющие оптические свойства рассеивающей среды, перебираются до тех пор, пока расчетные значения отражения и пропускания не будут с заданной точностью совпадать с измеренными. Эти методы являются громоздкими, однако используемые оптические модели могут быть существенно более сложными. Одним из таких методов является метод Монте-Карло, базирующийся на использовании макроскопических оптических свойств среды, которые предполагаются однородными в пределах небольших объемов ткани [133-134]. Главным недостатком метода Монте-Карло являются большие затраты машинного

времени. Разработка новых средств лазерной диагностики и терапии требует создания эффективных, сравнительно простых и надежных алгоритмов метода Монте-Карло.

Для измерения оптических параметров биотканей ( $\mu_a$ ,  $\mu_s$  и  $g$ ) используются различные методы. Наибольшее распространение при *in vitro* измерениях параметров образцов биотканей имеет метод двух интегрирующих сфер в сочетании с измерениями коллимированного пропускания. Метод заключается в последовательном или одновременном измерении трех параметров: коллимированного пропускания  $T_c$ , определяемого соотношением (7.1), полного пропускания  $T = T_c + T_d$  ( $T_d$  – диффузное пропускание) и диффузного отражения  $R_d$ . Для определения оптических параметров ткани можно использовать различные соотношения, устанавливающие связь  $\mu_a$ ,  $\mu_s$  и  $g$  с измеряемыми параметрами. В простейшем случае используют двухпотокую модель Кубелки-Мунка [133, 135].

Определение  $\mu_t$  из измерений коллимированного пропускания на основании соотношения (Г.1) позволяет с помощью экспериментальных данных найти все три параметра ткани:  $\mu_a$ ,  $\mu_s$  и  $g$ .

Любые три измерения из последующих пяти вариантов достаточны для определения всех трех оптических параметров.

- полное (или диффузное) пропускание для коллимированного или диффузного облучения;
- полное (или диффузное) отражение для коллимированного или диффузного облучения;
- поглощение образца, помещенного внутри интегрирующей сферы;
- коллимированное пропускание (нерассеянного света);
- угловое распределение рассеянного образцом излучения.

Итерационные методы обычно учитывают несогласованность показателей преломления на границах образца и многослойность образца. Источниками

погрешности при определении оптических характеристик биотканей являются следующие причины [133]:

- физиологическое состояние биологических образцов, уровень гидратации, гомогенность, видовая вариантность, замороженное – незамороженное состояние;
- *in vivo* – *in vitro* измерения;
- фиксированный – нефиксированный образец, гладкость его поверхности;
- геометрия облучения;
- согласованность – несогласованность показателя преломления на границах;
- ориентация регистрирующих волоконных световодов внутри образца по отношению к световоду-источнику.

Разработанная математическая модель [145, 153] позволила создать методику диагностики состояния биотканей. Были проведены экспериментальные исследования характера распространения излучения в тканях суставов человека. Целью исследований являлось исследование оптических характеристик здорового и пораженного деструктивно-дистрофическим процессом хряща для выявления возможности диагностики состояния тканей оптическими методами. Исследованы участки здорового и деструктивно-измененного хряща человека, взятые интраоперационно при удалении головки бедра у больных по медицинским показаниям. Пациенты были оперированы по поводу патологии тазобедренного сустава: деформирующий коксартроз III степени, несросшийся перелом шейки бедра, деформации сустава вследствие неустраненного врожденного или приобретенного вывиха бедра [149, 162, 169].

Установка для проведения исследований включала в свой состав в качестве источника излучения гелий-неоновый лазер ЛГИ-224-1 ( $\lambda=0,6328$  мкм) с диаметром пучка излучения  $d_0=1$  мм, устройство для закрепления исследуемого образца, объектив с фокусным расстоянием 20 мм, диафрагму с регулируемым диаметром отверстия и фотометр ФПМ-01 [199]. Образец располагался между

источником излучения и объективом на расстоянии 20 мм от объектива. Последовательно проводились измерения пропускания излучения при значениях диаметра диафрагмы  $d = 1; 3; 5; 8$  мм с целью определения коллимированного и диффузного пропускания. Использовались образцы различной толщины (0,8-3,0 мм), полученные при срезах параллельно и перпендикулярно поверхности сустава. Измерения проводились на свежепрепарированных образцах, часть образцов здоровой ткани исследовалась после выдержки в течение суток в 1% растворе NaCl [152].

На рисунке Г.1 показаны радиальные распределения относительной мощности излучения  $W/W_0$ , полученные при экспериментальных исследованиях.  $W_0$  – мощность источника излучения,  $W_0=10$  мВт,  $d_0$  – диаметр пучка. Проведенные исследования показывают, что для хряща характерно сильное рассеивание ( $g=0,32-0,4$ ). Были исследованы хрящи двух серий. Зависимости 1-6 соответствуют тканям первой серии, 7-10 – второй (9 и 10 соответствуют образцам 7 и 8 после выдержки в течение суток в растворе поваренной соли). Как показывают проведенные исследования, коллимированное пропускание мало как для здоровых, так и для пораженных тканей. Хрящ является однородной сильно рассеивающей структурой с изотропными оптическими свойствами (характер распространения излучения одинаков при облучении перпендикулярно и параллельно поверхности сустава). Глубина проникновения излучения слабой интенсивности с длиной волны  $\lambda=0,6328$  мкм составляет менее 2 мм. Экспериментальные зависимости показывают, что диффузное пропускание для здорового хряща в 2 раза выше, чем для пораженного деструктивно-дистрофическим процессом хряща того же пациента. После выдержки в растворе поваренной соли оптические характеристики здоровой и пораженной ткани совпадают (зависимости 9 и 10). Также обнаружены различия в диффузном пропускании пораженной ткани разных пациентов при одинаковой толщине ткани. Зависимость оптических характеристик от состояния суставных тканей показывает возможность создания оптических методов диагностики состояния этих тканей. Результаты исследования оптических характеристик хряща могут

быть использованы при создании методов лечения заболеваний суставов с использованием лазерного излучения.

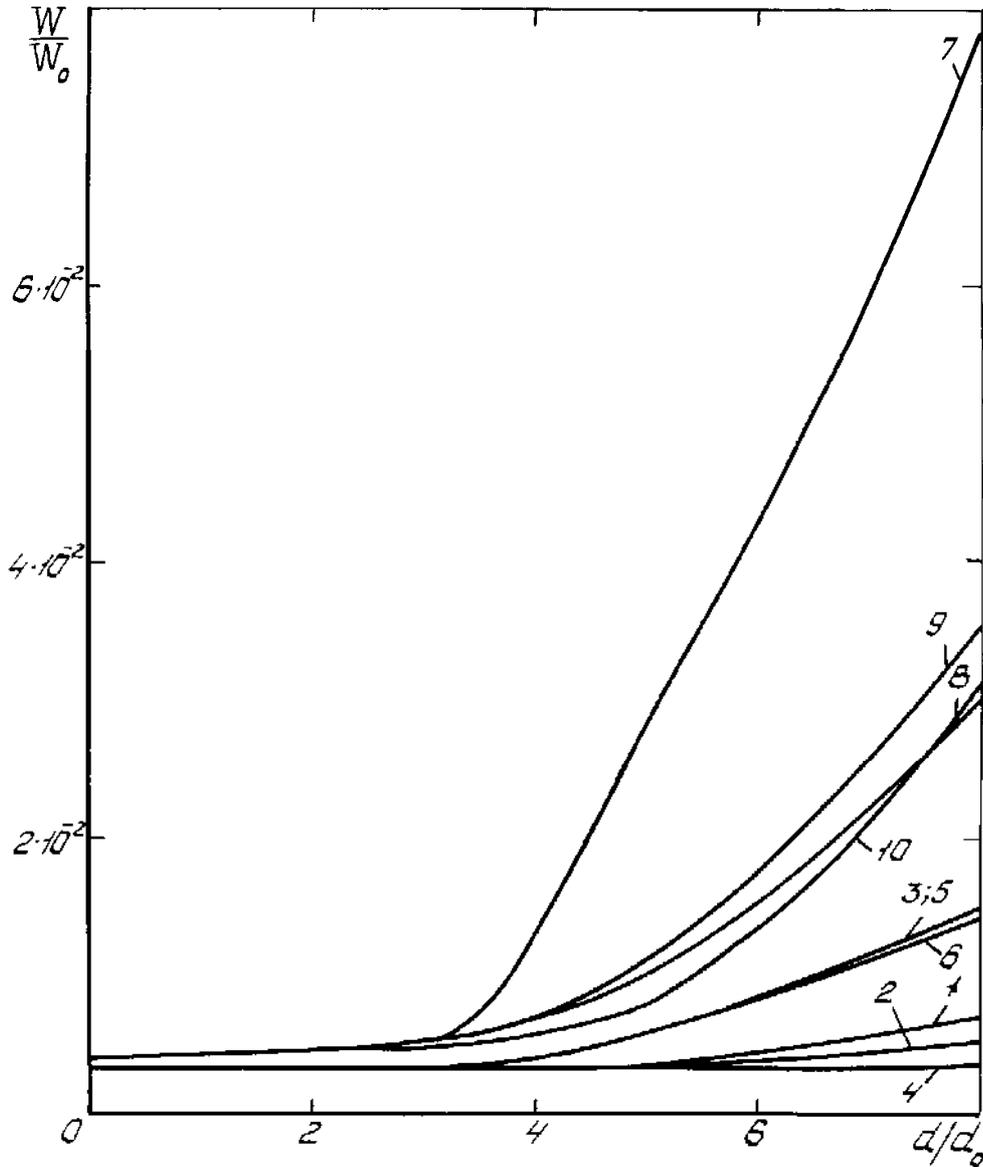


Рисунок Г.1 – Радиальные распределения относительной мощности излучения, рассеянного биотканями. Толщина хряща: 1 –  $S=1$  мм, 2 –  $S=1,5$  мм, 3 –  $S=0,8$  мм, 4 –  $S=1,4$  мм, 5 –  $S=0,8$  мм, 6 –  $S=0,8$  мм, 7 –  $S=1$  мм, 8 –  $S=1,5$  мм, 9 –  $S=1$  мм, 10 –  $S=1,5$  мм

## Приложение Д

## Акты внедрения результатов исследований



СЕРЖДАЮ:

исследователю научной работе СГАУ

Е. В. Шахматов

2000 г.

## А К Т

о внедрении результатов диссертационной работы  
в госбюджетные темы

Результаты диссертационной работы Сазонниковой Н. А., а именно

1. Исследование стабильности излучательных характеристик полупроводниковых лазеров;
2. Экспериментальное исследование оптических характеристик биотканей;
3. Оптический способ выявления повреждений поверхностного слоя

выполненные по темам 04В-Б033-204-201 (согл. N16/99Б) ВЗ,  
10Н-Б016-201, 22В-Б062-201, 10Н-Б017-201

КОПИЯ ВЕРНА



- 2 -

шифр темы, N договора	Наименование НИОКР, этапа НИОКР Номер государственной (отрасле- вой) регистрации	Период проведения	
		начало	окончание
04в-Б033- -204-201 ВЗ	"Разработка средств лазерного контроля размеров деталей, обра- батываемых в технологических средах" "Исследование стабильности излу- чательных характеристик полупро- водниковых лазеров".	01.01.99г	31.12.99г
10н-Б016- 201	"Увеличение прокаливаемости ре- жущего и штампового инструмента с применением динамических фо- кусаторов". "Разработка технологического процесса нанесения на заготовки многослойных покрытий лазерным термовакuumным способом".	01.01.99г	31.12.99г
10н-Б017- 201	"Лазерное спекание защитных и износостойких покрытий. Интенси- фикация процессов пайки твердых режущих инструментов лазерной имплантацией". "Разработка новых технологий нанесения покрытий способом сов- местной лазерно-газотермической кой обработки".	01.01.99г	31.12.99г
22в-Б062- 201	"Лазерная модификация гетероген- ных покрытий и материалов с ис- пользованием фокусаторов". "Способ и технологический модуль для лазерного термовакuumного нанесения покрытий с совместной активизацией основы и испарителя"	01.01.99г	31.12.99г

- 3 -

внедрены в составе метода исследования излучательных характеристик полупроводниковых лазеров, метода исследования оптических характеристик биотканей и метода выявления повреждений поверхностного слоя в соответствии с техническими заданиями перечисленных госбюджетных тем.

Назначение внедренных разработок:

Использовать результаты исследований для создания контрольно-измерительных систем с полупроводниковыми лазерными излучателями в качестве источников света для дефектоскопии поверхностного слоя промышленных изделий, разработки приборов и оборудования для диагностики и лечения заболеваний суставов.

Технический уровень разработок: положительное решение по заявке на патент РФ N 98118305/28 от 07.10.1998г, положительное решение по заявке на патент РФ N 98122284/28 от 07.12.1998г.

Вид внедрения:

Разработаны экспериментальная установка и методика выявления и определения количественных характеристик повреждений поверхностного слоя в виде царапин, трещин, абразивного износа поверхности.

Разработаны диагностическая установка и методика исследования оптических характеристик тканей суставов (хряща). Разработана установка для исследования воздействия низкоинтенсивного лазерного излучения на биоткани, с помощью которой проведено облучение суставов экспериментальных животных (крыс).

#### ЭФФЕКТИВНОСТЬ ВНЕДРЕНИЯ

1. Организационно-технические преимущества. Доказано, что наиболее перспективными источниками излучения для создания оптических методов дефектоскопии поверхностного слоя промышленных изделий и медицинской аппаратуры являются полупроводниковые лазеры с квантоворазмерными структурами на основе материалов четверных систем. Преимуществами являются низкое напряжение источника питания, широкий диапазон применения, надежность регулирования мощности излучения модуляцией тока накачки.

Показана возможность выявления повреждений поверхностного слоя промышленных изделий по результатам измерения интенсивности

зеркально отраженного излучения.

Исследования оптических характеристик хряща живых организмов показывают, что он представляет собой сильно рассеивающую структуру (среднее значение параметра анизотропии рассеивания 0,3-0,4) с изотропными оптическими свойствами. Диффузное пропускание для здорового хряща в 2-4 раза выше, чем для тканей, пораженных деструктивно-дистрофическим процессом.

## 2. Социальный эффект.

Создание бесконтактных неразрушающих достоверных методов контроля в реальном масштабе времени в процессе производства деталей и эксплуатации изделий ответственного назначения, расширение круга исследуемых материалов и изделий независимо от состояния их поверхностного слоя и вида предварительной обработки поверхности, снижение цены и повышение качества продукции, достижение максимального уровня соответствия стандартам качества, ресурсосбережение, замещение импорта, возможность проведение контроля для широкого круга материалов и изделий.

Результаты проведенных исследований позволяют создать высокоэффективное оборудование для дефектоскопии поверхностного слоя промышленных изделий, диагностики и лечения заболеваний суставов.

Зав. кафедрой АСЭУ

Шорин В. П.

Научный руководитель

НИОКР

Мордасов В. И.

Наименование исполнителя	Наименование Заказчика
Самарский государственный аэрокосмический университет Адрес: 443086, г. Самара, Московское шоссе, 34.	ОАО "Моторостроитель" Адрес: 443009, г. Самара, Заводское шоссе, 36.

### А К Т

приемки опытных образцов с многослойными, защитными и ударопрочными покрытиями, изготовленных по государственному контракту N302-03(00)-П от 14 января 2000г. на выполнение научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ в рамках Федеральной целевой научно-технической программы "Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития науки и техники гражданского назначения" на 2000год

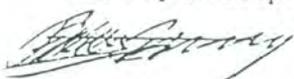
Мы, нижеподписавшиеся, представитель исполнителя вед. научн. сотр., докт. техн. наук Мордасов В. И. с одной стороны, и представитель заказчика главный сварщик, канд. техн. наук Шамарина Г. Г. с другой стороны, составили настоящий акт о том, что научно-техническая продукция удовлетворяет условиям технического задания государственного контракта N302-03(00)-П от 14 января 2000г.

Краткое описание научно-технической продукции: опытные образцы с покрытиями - многослойными, защитными и ударопрочными на основе оксидов, нитридов и карбидов тугоплавких материалов (титана, хрома, вольфрама, циркония и др.)

Эффективность, применение (использование, внедрение) научно-технической продукции: покрытия- многослойные, защитные и ударопрочные - имеют увеличение адгезионной прочности 10...15%, снижение уровня остаточных напряжений 20...30%.

Работу сдал:

Вед. научн. сотр.

 Мордасов В. И.

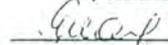
От исполнителя:

Проректор по научной работе  
Самарского государственного  
аэрокосмического университета  
 Шахматов Е. В.

КОПИЯ ВЕРНА

Работу принял:

Главный сварщик

 Шамарина Г. Г.

От заказчика:

Главный инженер

 Курбатов В. П.





- 2 -

характеристик тканей суставов (хряща) и методики облучения низкоинтенсивным лазерным излучением суставов живых объектов, с помощью которой проведено облучение суставов экспериментальных животных (крыс) в соответствии с техническим заданием П2 госбюджетной темы 04в-Б033-204-201 ВЗ. Назначение внедренной разработки:

Использовать результаты исследований для создания методов лечения заболеваний суставов, разработки приборов и оборудования для диагностики и лечения заболеваний суставов.

Технический уровень разработки: подана заявка N 98118305/25

Вид внедрения:

Разработаны диагностическая установка и методика исследования оптических характеристик тканей суставов (хряща). Разработана установка для исследования воздействия низкоинтенсивного лазерного излучения на биоткани, с помощью которой проведено облучение суставов экспериментальных животных (крыс).

#### ЭФФЕКТИВНОСТЬ ВНЕДРЕНИЯ

1. Организационно-технические преимущества. Доказано, что наиболее перспективными источниками излучения для создания медицинской аппаратуры являются полупроводниковые лазеры с квантоворазмерными структурами на основе материалов четверных систем. Преимуществами являются низкое напряжение источника питания, широкий диапазон применения, надежность регулирования мощности излучения модуляцией тока накачки.

Исследования оптических характеристик хряща живых организмов показывают, что он представляет собой сильно рассеивающую структуру (среднее значение параметра анизотропии рассеивания 0,3-0,4) с изотропными оптическими свойствами. Диффузное пропускание для здорового хряща в 2-4 раза выше, чем для тканей, пораженных деструктивно-дистрофическим процессом.

Проведено облучение здоровых суставов экспериментальных животных излучением гелий-неонового лазера слабой интенсивности (мощность излучения не превышала 5 мВт) с помощью многомодового оптического волокна. При этом изменения в структуре тканей в результате воздействия лазерного излучения не были выявлены.

2. Социальный эффект.

- 3 -

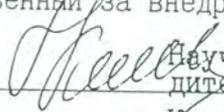
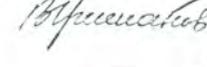
Показана возможность создания оптических датчиков состояния тканей суставов с использованием полупроводниковых лазеров и волоконной оптики.

Результаты проведенных исследований позволяют создать высокоэффективное оборудование для диагностики и лечения заболеваний суставов, осуществлять дозиметрию лазерного излучения при проведении лечения заболеваний суставов.

От медицинского университета:

От СГАУ:

Ответственный за внедрение

1.		Научный руководитель темы		Зам. проректора по научной работе
		Котельников Г.П.		Бочкарев С.К.
2.		Ассистент		Зав. кафедрой АСЭУ
		Ларцев Ю.В.		Шорин В.П.
3.		Вет.врач		Научный руководитель НИОКР
		Горшков О.В.		Мордасов В.И.
				Зав. лабораторией
				В.Н. Гришанов инженер
				Н.А. Сазонникова

**СОГЛАСОВАНО**

Проректор по науке и инновациям  
СГАУ, докт. техн. наук

Прокофьев А.Б.

**УТВЕРЖДАЮ**

Директор ООО Научно-производственное  
предприятие «Радиант»

Апухтин А.Б.



### АКТ внедрения результатов НИР

Настоящий акт составлен о том, что научно-техническая продукция Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева (национальный исследовательский университет)» (СГАУ) по созданию устройства и методики для проведения дефектоскопии изделий внедрена на предприятии ООО НПП «Радиант».

Краткое описание научно-технической продукции:

1. Разработана методика лазерной диагностики состояния поверхности для выявления дефектов в виде царапин, трещин, изменения шероховатости поверхности, абразивного износа, изменения размеров и концентрации рассеивающих частиц нанесенного покрытия и отслоения покрытий.
2. Предложена конструкция дефектоскопа для выявления повреждений поверхности.
3. Проведена оценка эффективности применения.

Организационно-технические преимущества.

1. Проведены теоретические и экспериментальные исследования по определению величины сигнала отраженного лазерного излучения от параметров состояния поверхностного слоя, в том числе вида повреждения и его геометрических размеров – глубины, ширины.
2. Разработана методика выбора пространственно-временных характеристик зондирующих лазерных пучков для лазерных измерительных систем по обнаружению повреждений поверхностного слоя элементов конструкций – покрытиями и без них (длина волны излучения, режим генерации, отношение сигнал/шум и др.). Данная методика позволяет выявлять элементы поверхностного слоя с шириной равной и более диаметра пятна излучения на поверхности и с числом переотражений не более 6.
3. Создана методика лазерной дефектоскопии поверхности изделий, обеспечивающая обнаружение дефектов поверхностного слоя, возникших в результате статических, циклических, комбинированных и ударных нагружений, с вероятностью 95...97% и распознавание дефектов в виде трещин, забоин, абразивного износа с вероятностью 87...90%.
4. Выявлены основные оптические характеристики поверхностных повреждений. Основной характеристикой дефекта является параметр  $n$ , который численно

равен числу переотражений. Его характерные значения (при  $\alpha=\pi/6$ ): глубокие трещины -  $n>6$ , неглубокие трещины -  $2<n<6$ , царапины -  $n<2$ , износ поверхности -  $0<n<1$ , окисная пленка на поверхности -  $n \approx 0$ . Доказана необходимость сканирования поверхности при двух различных углах падения излучения, при этом величины  $n_1/n_2$  однозначно определяет геометрию повреждения.

#### 5. Проведена дефектоскопия изделий.

Использование лазерных измерительных систем 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 в 2...3 раза.

Применение лазерной дефектоскопии в условиях производства позволило снизить себестоимость проведения диагностики в 1,5...2,0 раза, повысить уровень использования в изделиях деталей с улучшенными эксплуатационными характеристиками (в том числе, с более высоким уровнем адгезионной прочности) на 20 %.

От СГАУ:

От ООО НПП «Радиант»

Научный руководитель,  
проф., докт. техн.наук

Начальник участка лазерной резки и  
гибки

 В.И. Мордасов

 Е.В. Волков

Ответственный исполнитель,  
канд. техн. наук

Технолог

 Н.А. Сазонникова

 А.Ю. Долгов

Исполнитель темы, аспирант

 Е.Г. Иванова

УТВЕРЖДАЮ  
 Проректор по науке и  
 инновациям СГАУ, проф.,  
 докт. техн. наук  
 «      »      200\_ г.  
 Шахматов Е.В.



УТВЕРЖДАЮ  
 Проректор по учебной  
 работе СГАУ, проф.,  
 докт. техн. наук  
 «      »      200\_ г.  
 Гречников Ф.В.



#### АКТ

о внедрении результатов научно-исследовательской работы канд. техн. наук Сазонниковой Н.А. и инженера Ивановой Е.Г. 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) в учебный процесс Самарского государственного аэрокосмического университета им. акад. С.П. Королева

Настоящий акт составлен о том, что результаты научно-исследовательской работы канд. техн. наук Сазонниковой Н.А. и инженера Ивановой Е.Г., проводимой в 2002 – 2005 гг. 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):

- Методика оптимизации информационных характеристик системы наблюдения для достоверного обнаружения и распознавания объектов наблюдения;
- Методика определения отражательных характеристик и распознавания материалов внешнего слоя различных материалов для лабораторных и эксплуатационных условий;
- Результаты экспериментальных исследований возможностей системы с использованием лазерной подсветки для различных классов объектов по геометрическим параметрам;
- Результаты экспериментального исследования влияния физических процессов при отражении излучения от поверхности на вероятность обнаружения объекта;
- Рекомендации по разработке и созданию высокоточных помехоустойчивых оптико-электронных систем дистанционного зондирования с лазерным перестраиваемым импульсно-периодическим подсветом

внедрены в учебный процесс Самарского государственного аэрокосмического университета при чтении курсов лекций, в курсовом и дипломном проектировании по дисциплине «Лазерные системы специального назначения» для специальности «Лазерные системы в ракетной технике и космонавтике» 131200.

Основные результаты научно-исследовательской работы канд. техн. наук Сазонниковой Н.А. и инженера Ивановой Е.Г. отражены в учебных пособиях и методических указаниях к курсовому и дипломному проектированию:

1. Выявление эффективности лазерной локации группировок движущихся объектов (методические указания) / Мордасов В.И., Сазонникова Н.А., Гусева Г.В., Адиярова О.Р. - Метод. Указ. Самара: СГАУ, 2004, 8 с.
2. Оценка эффективности информационно-измерительной системы обнаружения групп объектов (указания к проведению испытаний) / Мордасов В.И., Сазонникова Н.А., Гусева Г.В., Адиярова О.Р. - Метод. Указ. Самара: СГАУ, 2004, 15 с.
3. Оптический способ определения характеристик покрытий конструкционных материалов (методические указания к лабораторной работе) / Мордасов В.И., Сазонникова Н.А., Гусева Г.В., Адиярова О.Р. - Метод. Указ. Самара: СГАУ, 2004, 23 с.
4. Проектирование лазерных систем / Мордасов В.И., Мурзин С.П., Сазонникова Н.А., Шорин В.П. Самара, Самарский научный центр РАН, 2004. – 184 с. (Иванова Е.Г. - раздел 1.4).
5. Проектирование лазерных систем технологических установок / Мордасов В.И., Сазонникова Н.А. Самара, издательство СГАУ, 2006. – 168 с. (Иванова Е.Г. - глава 3).

Руководитель лазерного  
цикла, проф., докт. техн. наук



Быстров Н.Д.

Научный руководитель  
темы 201х-093  
проф., докт. техн. наук



Мордасов В.И.

Ответственный исполнитель темы,  
канд. техн. наук



Сазонникова Н.А.

Исполнитель темы,  
инженер



Иванова Е.Г.

## СОГЛАСОВАНО

Первый проректор - проректор по науке и инновациям Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва» проф., д. т. н.

А.Б. Прокофьев



\_\_\_\_\_ - 2016 г.

## УТВЕРЖДАЮ

Первый заместитель Генерального конструктора Акционерного общества «Ракетно-космический центр «Прогресс», к.т.н. А.Д. Сторож.



\_\_\_\_\_ 2016 г.

## АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы Сазонниковой Н.А. на тему «Лазерные информационно-измерительные системы для оценки состояния поверхностей элементов конструкции летательных аппаратов и двигателей» внедрены при разработке оптико-электронных систем обнаружения объектов с лазерным подсветом и проведении лазерной дефектоскопии в условиях производства

Мы, нижеподписавшиеся, профессор кафедры автоматических систем энергетических установок, профессор, д.т.н. Мордасов В.И. заведующий кафедрой автоматических систем энергетических установок, профессор д.т.н. Шахматов Е.В., главный конструктор – начальник отделения АО «РКЦ «Прогресс» Н.Р. Стратилатов, заместитель главного конструктора Д.Н. Гребнев составили настоящий акт в том, что результаты диссертационной работы Сазонниковой Н.А. использованы для разработки оптико-электронных систем обнаружения объектов с лазерным подсветом и при проведении лазерной дефектоскопии в условиях производства, а именно:

1. Методика проведения и аппаратное обеспечение лазерной дефектоскопии в условиях производства элементов конструкций с многослойными защитными ударопрочными покрытиями на основе оксидов, нитридов и карбидов тугоплавких материалов (титана, хрома, вольфрама, циркония и др.). Эффективность внедрения составила три единицы на единицу затрат. Применение лазерной 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 %.

2. Испытательное оборудование для экспериментальной оценки эффективности лазерных информационно-измерительных систем дистанционного зондирования поверхности и определения оптических характеристик конструкционных материалов, обеспечивающее перестройки длины волны в диапазоне  $0,63...10,6 \cdot 10^{-6}$  м, частота следования импульсов  $1...300 \text{ с}^{-1}$ , скважность импульса  $1...5$ .

3. Методика проектирования лазерной информационно-измерительной в составе системы обнаружения объектов и оценки ее эффективности с помощью созданного специализированного испытательного оборудования. Проведена оценка информационно-измерительной системы в составе системы обнаружения объектов. Установлено, что параметры, характеризующие систему наблюдения с вероятностью 0,85 должны находиться в следующих диапазонах: Длины волны излучения зондирующего потока ( $0,63 \leq \lambda \leq 10,6$ )  $10^{-6}$  м, частота следования импульсов ( $1 \leq f \leq 300$ )  $\text{с}^{-1}$ , скважность импульса  $1 \leq S \leq 6$ .

4. Специализированный испытательный стенд для экспериментальной оценки влияния фоновой обстановки на потери мощности лазерного излучателя при его прохождении через диспергированные среды. Он позволяет создавать при испытаниях интенсивность дождевания 2...10 мм/мин для жидкостей с различной концентрацией красителей. Толщина слоя рассеивающей среды составляет 30...40 мм. Средний диаметр капель определяется как среднее арифметическое по числу капель.

5. Методика экспериментальной оценки влияния фоноцелевой обстановки на ослабление лазерного излучения при его прохождении через диспергированные среды. При проведении испытаний длительность искусственного дождевания растворами длится от 0,1 до 2 ч при интенсивности дождевания на единицу площади 2...10 мм/мин. При этом коэффициента преломления увеличивается на 10-20 %, коэффициента потери мощности возрастает на 5-15 %, величина удельной плотности мощности уменьшается на 35-45 %.

6. Обобщенная методика построения и оптимизации систем дистанционного зондирования с учетом области их применения. Выбор значений параметров измерительной системы, глубины их модуляции и определение допустимого уровня шумов в системе осуществляется с учетом требуемой вероятности распознавания в данной задаче и предполагаемого количества классов объектов в исследуемой области. Определение порога обнаружения по каждому из рассматриваемых признаков осуществляется в зависимости от уровня априорной информации. Данный алгоритм предусматривает обучение системы распознавания с использованием тест-объектов или модельных объектов.

7. 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 летательных аппаратов. Показано, что с ростом угла падения излучения в диапазоне 30...45 при скважности, равной 6, контрастность возрастает в 1,5 раза, а при скважности, равной 2 – в 2 раза. С ростом длины волны с 0,56 мкм до 1,06 мкм сначала происходит снижение контрастности на 10...15%, а затем ее рост на 15...20%.

8. Методика выбора пространственно-временных характеристик зондирующих лазерных пучков для измерительных систем по обнаружению повреждений поверхностного слоя многослойных клееных оболочек с сотовым алюминиевым наполнителем. Разработана измерительная система и методика для выявления поверхностных дефектов многослойных конструкций в производственных условиях, позволяющие повысить достоверность контроля на 40...45 %. Проведение дефектоскопии позволяет снизить затраты на доработку изделий на 40...50 %. Создан банк данных выявленных дефектов для проведения анализа их возникновения и

выработки мероприятий по совершенствованию конструкции и технологии изготовления изделия.

Разработана и внедрена нормативно-техническая документация по дефектоскопии образцов конструкционных материалов при производстве элементов конструкций космических аппаратов «Фотон», «Бион», «Ресурс-ДК» на предприятии АО «РКЦ-«Прогресс».

Разработаны и внедрены руководящие технические материалы по оценке эффективности и повышению разрешающей способности обнаружения для построения систем сопровождения и сближения летательных аппаратов с использованием вспомогательного лазерного перестраиваемого импульсно-периодического излучения на предприятии АО «РКЦ-«Прогресс», г. Самара.

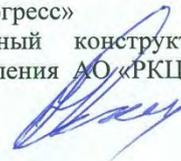
От Самарского национального  
исследовательского университета  
Профессор кафедры автоматических  
систем энергетических установок,  
д.т.н., профессор



В.И. Мордасов

От АО «Ракетно-космический центр  
«Прогресс»

Главный конструктор – начальник  
отделения АО «РКЦ «Прогресс»



Н.Р. Стратилатов

Заведующий кафедрой автоматических  
систем энергетических установок,  
д.т.н., профессор



Е.В. Шахматов

Заместитель главного конструктора



Д.Н. Гребнев

УТВЕРЖДАЮ

Первый проректор – проректор по науке и  
инновациям Федерального  
государственного автономного  
образовательного учреждения высшего  
образования Самарского национального  
исследовательского университета имени  
академика С.П. Королева» проф., д.т.н.  
А.Б. Прокофьев



2016 г.

АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы доцента, кандидата технических наук Сазонниковой Надежды Александровны

Результаты научных исследований, полученные при выполнении диссертационной работы по теме «Лазерные информационно-измерительные системы для оценки состояния поверхностей элементов конструкций летательных аппаратов и двигателей», внедрены в НИИ Технологий и проблем качества.

Разработанные руководящие технические материалы «Лазерный и терморadiационный контроль параметров плазменного напыления покрытий» и системы контроля внедрены и были использованы при изготовлении изделий для контроля параметров процесса плазменного напыления:

теплозащитного покрытия внутренней поверхности камеры сгорания газотурбинного двигателя НК36СТ,

срабатываемого уплотнительного покрытия компрессора высокого давления НК-32,

износостойкого покрытия цилиндра поршневого двигателя П-032 малоразмерного летательного аппарата.

Назначение разработки – улучшение эксплуатационных свойств деталей двигателей.

Указанные руководящие технические материалы также были использованы в НИИ Технологий и проблем качества для контроля состояния поверхности конструкционных материалов при проведении прогрессивных технологических процессов обработки, позволяющих повысить надежность, технический ресурс и вероятность безотказной работы деталей двигателей.

Научный руководитель НИИ  
Технологий и проблем качества  
Самарского национального  
исследовательского университета  
проф., д.т.н.

В.И. Богданович