



Учредитель и издатель – Общественная академия «Контенант»  
Издается с 2002 г.

**СОДЕРЖАНИЕ****НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ОПТИКЕ****Немтинов В.Б., Сериков В.Ю.**

Графовая идентификация научной проектно-технической инженерии для разработки и апробации оптико- и лазерно-электронных приборов ..... 3

**Архипов С.А.**

Термостабильность оптико-электронной съемочной аппаратуры дистанционного зондирования Земли. Часть I ..... 20

**Архипов С.А.**

Термостабильность оптико-электронной съемочной аппаратуры дистанционного зондирования Земли. Часть II ..... 28

**Гайнутдинов И.С., Гусев А.Г., Хасанов А.М., Кольцов А.Ю., Потапов Р.И.**

Многозональные интерференционные оптические фильтры ..... 43

**Гайнутдинов И.С., Гусев А.Г., Хасанов А.М., Кольцов А.Ю., Потапов Р.И.**

Оптические свойства пленок PbTe – ZnSe при криогенных температурах ..... 46

**Потапов Р.И., Гайнутдинов И.С., Кольцов А.Ю., Хасанов А.М.,**

Двухдиапазонный интерференционный фильтр для Ик области спектра ..... 49

**Азербайев А.А., Мухаммедзянов Т.Р., Абдулкадыров М.А., Баландин В.Ю.**

Нанесение отражающих покрытий на оптические детали диаметром до 4 м методом магнетронного распыления ..... 52

**Гинзбург Э.С., Плешкова Д.М.**

Компенсация дрожания изображения в телевизионных камерах на много-пиксельных матрицах в реальном времени ..... 60

**Азарова В.В., Акишев Ю.С., Бланк В.Д., Голяев Ю.Д., Голяева А.Ю., Грушин М.Е., Кульницкий Б.А., Петряков А.В., Сухов Е.В., Трушкин Н.И.**

Холодная плазма при атмосферном давлении как эффективный инструмент для упрочнения оптического контакта в лазерных гироскопах ..... 64

**Иванов С.Е., Федотов Ю.В., Городничев В.А., Белов М.Л., Филимонов П.А.**

Лазерный измеритель характеристик атмосферных аэрозольных неоднородностей ..... 70

**Городничев В.А., Белов М.Л., Антонюк Т.К., Еременко Л.Н.**

Метод определения количественного состава газовых смесей из многоспектральных лазерных измерений, устойчивый к выбросам сигнала ..... 77



## СОДЕРЖАНИЕ

(продолжение)

<b>Городничев В.А., Белов М.Л., Болвачев В.В., Назаров В.В.</b> Контроль стрессовых состояний растений при возбуждении флуоресценции в УФ спектральном диапазоне .....	83
<b>ТЕХНОЛОГИИ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ</b>	
<b>Васильева С.Н., Грималюк М.В., Ломакин Ю.В., Подобрянский А.В.</b> Исследование технологического процесса полирования сферических поверхностей оптических деталей методом «круговой осцилляции» .....	88
<b>Гречишников В.А., Аксютин П.А., Живодров О.Г., Романов В.Б., Тарасов А.В.</b> Модульный подход к разработке комплексной системы автоматизированного проектирования инструментов .....	93
<b>Осипович И.Р.</b> Определение интегрального коэффициента пропускания объективов тепловизионных систем в условиях производственного контроля .....	95
<b>Дьякова И.И., Лелянов А.Б., Бабин С.А., Бессмельцев В.П., Достовалов А.В.</b> Технология нанесения сеток методом прожигания лазером, заполнения запуском, нанесения рисунка на металлическом покрытии и исследование повреждений стеклянной подложки .....	98
<b>Горшков В.А., Кузнецов С.А.</b> Асферика-комплекс – технологический комплекс для автоматизированного формообразования поверхностей оптических деталей диаметром до 3000 мм дифракционного качества. Часть I.....	101
<b>ИСТОРИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ</b>	
<b>Титов Е.И.</b> История бренда «Зенит» и его будущее .....	110

## ГРАФОВАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ НАУЧНОЙ ПРОЕКТНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ИНЖЕНЕРИИ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ И АПРОБАЦИИ ОПТИКО- И ЛАЗЕРНО-ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ

НЕМТИНОВ В.Б.,\* СЕРИКОВ В.Ю.\*\*

\*МГТУ им. Н.Э.Баумана

\*\*ОАО «Лыткаринский завод оптического стекла», Лыткарино, Московская обл.

E-mail: vbnemtinov@bmstu.ru; vnemtinov@mail.ru; omp-21@lzos.ru

*В рамках факторно-модельного синтеза рассмотрены основные модельно-графовые положения структурной теории оптико- и лазерно-электронных систем. Проведена трансформация фундаментальной науки в прикладные технические разработки и обратно с помощью прямых и обратных графовых связей. Идентифицированы фактормаршрутизаторы (путеуказатели), задающие пути построения и применения приборов и исследованы инженерно-технические законы связности этапов и моделей. Рассмотрены графовые, гиперграфовые и структурно-поведенческие математические модели разработки, апробации и последующей прогностической ликвидации приборов. Введено понятие графового фазиса, раскрывающего функционально-тематические аспекты синтеза системы. Разработан канонический каскадно-этапный дуодецимарный орциклический фазис-прообраз и дана его 1-факторизация. Построена пятираздельная вариация фазис-прообраза из трёх объект-факторов идентифицирующая научную проектно-техническую инженерию.*

**Ключевые слова:** графовая целевая функция, графовый фазис, математическая модель, оптико- и лазерно-электронная система, прямые и обратные графовые связи, структурная теория, факторизация, фактормаршрутизатор, факторно-модельный и этапно-модельный синтез системы.

### ВВЕДЕНИЕ

В работе [1] в рамках системно-модельного подхода дано определение системы с помощью модели, не обязательно математической, и введены отправные положения структурно-графовой методологии для анализа и синтеза оптико- и лазерно-электронной системы (ОиЛзЭлнС). В данной статье решается задача расширения этих положений на основе задания основных элементов структурной теории (СТ) ОиЛзЭлнС в рамках факторно-модельного синтеза (ФМС) системы [2]. При этом изучается глубинная графовая конструкторско-технологическая связность науки и техники в оптическом приборостроении, которая оттеняет инженерно-практическую значимость структурной теории.

Кроме того, в [1] рассмотрен частный слу-

чай ФМС – этапно-модельный синтез (ЭМС) ОиЛзЭлнС, в рамках которого исследованы шесть каскадно-этапных дуодецимарных орциклических фазисных объект-факторных маршрутизаторов и проведена рубрикация графовых каскадов на разделы. Идентификация фазисов начинается с построения канонического каскадно-этапного дуодецимарного графового орциклического фазис-прообраза  $ОФЦК_{12}^{ЭМС}$ . Он строится на основе глобальной орграфовой целевой функции арности 12 и задаёт концептуально-орграфовый модельный синтез-прообраз процессов построения и применения приборов.

Известный американский астроном и популяризатор науки Карл Эдвард Саган писал: «Мы живём в обществе, полностью зависящим от науки и техники, но в этом обществе почти никто почти ничего не знает ни о на-

уке, ни о технике». Так как построение и применение оптико- и лазерно-электронных приборов (ОиЛзЭлнП) – главная научно-техническая задача оптического приборостроения, то для её решения в статье вводятся структурно-графовые связи между наукой и техникой с целью перехода от фундаментальных исследований к прикладной технической науке. При этом прямая трансформация фундаментальной науки в прикладные технические разработки и обратно осуществляется с помощью прямых и обратных графовых структурных связей в результате идентификации научной проектно-технической инженерии для разработки и апробации приборов.

Накопленный опыт показывает, что развитие ОиЛзЭлнП с существенным временным отрывом следует за развитием радиоэлектронных приборов и вычислительной техники. Например, понятие временной частоты, измеряемой в [Гц], появилась в радиоэлектронике в конце XIX века. Пространственная частота в [мм<sup>-1</sup>] введена в Швейцарии в 40-х годах XX века.

В настоящее время наблюдается интенсивная разработка и внедрение в практику ОиЛзЭлнП различного назначения, перечислить которые практически невозможно. Лазерная локация, возникшая в результате перехода в радиолокации к оптическому диапазону спектра, широко используется во всех областях оптико- и лазерно-электронного приборостроения, связанных с задачами обнаружения и распознавания различных объектов в результате дистанционного зондирования [3]. Для лазерного излучения изготавливаются волоконные световоды (аналоги радиоволноводов), с помощью которых создают волоконнооптические линии связи.

Поэтому статья дополнительно направлена на то, чтобы такое же отставание для всего оптического приборостроения не произошло в будущем с графовой методологией разработки и апробации ОиЛзЭлнП, которая создана на основе СТ ОиЛзЭлнС [2-4]. В настоящее время она хорошо коррелирует с графовой методологией, широко используемой в радиоэлектронике и вычислительной технике [5,6].

В работе основное внимание уделяется установлению графовых связей между наукой и техникой с целью научно-инженерной идентификации прикладной технической науки. С 2002 года федеральным законом разделены понятия «*технический регламент*» и «*стандарт*», так что стандарты в сфере технического регулирования утрачивают обязательный характер и применяются добровольно. Теперь такие стандарты – это реперные точки рабочего инженерно-технического проектирования, а не творческого подхода. В пищевой промышленности стандарты не позволяют травить потребителей. Они нужны для того, чтобы средний инженер создал средний прибор, а для хорошего инженера – это просто грамотное подспорье. Поэтому в структурной теории, с необходимостью, учитывается функционально-инженерное назначение стандартов.

Создание научной проектно-технической инженерии для разработки и апробации приборов должно начинаться с идентификации строгих определений понятий науки и техники, которые в настоящее время приведены в большом количестве справочной литературы. С одной стороны, наука (17-ый том 3-го издания БСЭ) суть сфера человеческой деятельности, функция которой – выработка, накопление и теоретическая систематизация объективных знаний об окружающей действительности. Непосредственные цели науки – описание, объяснение и предсказание процессов и явлений действительности, составляющих предмет её изучения, на основе открываемых законов. Так как наука неоднородна, то в зависимости от природы результатов научной деятельности исследования разделяют на фундаментальные (фундаментальная наука) и прикладные (прикладная наука).

Фундаментальная наука – основа развития всего человечества. Фундаментальные структурно-поведенческие исследования открывают новые закономерности, привносят новое знание, новую теорию, так или иначе пополняют общемировой запас знаний. Поэтому основная задача настоящего учёного всегда

находить что-то новое. Прикладные исследования продуцируют технические, технологические, организационные и другие решения. Результатом таких изысканий должно быть внедрение, практическое использование.

В рамках фундаментальных исследований при построении и применении приборов выявляются новые практические ответвления. Прикладные приборные разработки, также могут привести к формулировке фундаментальной проблемы. Важна правильная постановка задачи. В рамках такого подхода в статье акцент делается на прикладную техническую науку, хотя проводятся дополнительные физико-математические исследования.

С другой стороны, техника (25-ый том 3-го издания БСЭ) представляет собой сумму средств, создаваемых для осуществления процессов производства и обслуживания непроизводительных потребностей общества. Назначение техники – частичная или полная замена производственных функций человека с целью облегчения труда и повышения его производительности. Другими показателями техники, кроме производительности, являются её надёжность, и экономичность.

Развитие (модернизация) технических достижений в результате улучшения показателей всех видов приборов на основе использования научных знаний – главное условие научно-технического прогресса как в целом, так и в оптико- и лазерно-электронном приборостроении в частности. Поэтому одной из особенностей современной техники является проникновение новых технических достижений в производство, в том числе в такие области, где её использование трудно было предвидеть. Яркий пример этого – *лазерные технологии и квантовая электроника*. Дополнительно, следует отметить, что использование пятикоординатных обрабатывающих центров с ЧПУ при изготовлении деталей сложной конфигурации привело к увеличению производительности труда и резкому сокращению станочного парка.

Универсальная классификация технических средств ещё не создана, да и вряд ли её удастся построить. Поэтому в работе с

целью проведения идентификации научной проектно-технической инженерии для разработки и апробации приборов с необходимостью рассматриваются основные положения структурной теории ОиЛзЭлнС.

#### ЭЛЕМЕНТЫ СТРУКТУРНОЙ ТЕОРИИ ОПТИКО- И ЛАЗЕРНО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ

Взаимосвязь науки и техники проявляется во всё большей материализации научного знания, ибо научные исследования уже невозможны без современной техники высочайшего уровня. Таким образом, синхронное развитие техники и науки является непременным условием движения человеческой цивилизации по выбранному ей технологическому пути.

Создание новых оптико- и лазерно-электронных приборов и комплексов и анализ их свойств являются весьма трудоёмкими задачами. Для их решения анализ и синтез процессов построения и применения приборов в работе проводится на основе научных положений структурной теории оптико- и лазерно-электронных систем (СТ ОиЛзЭлнС), созданной В.Б.Немтиновым и опубликованной более чем в 50-ти работах, основные из них приведены в [2,4].

Конфуций (V век до н. э.) говорил: «правильно назвать – значит и правильно понять». Поэтому с целью разработки строгой терминологии научной проектно-технической инженерии в СТ ОиЛзЭлнС всё время «протираются» такие термины как система, модель, прибор, анализ, синтез, фактор и т.п. для связной, холистичной и эмерджентной системы [1].

Любая теория – это совокупность научных положений, объясняющих с помощью общего принципа какие-нибудь накопленные факты и дающих возможность открывать и объяснять новые факты. Известно, что нет ничего практичней хорошей теории, так как она представляет собой систему основных идей в той или иной отрасли знания. Одной из таких инженерных теорий является СТ ОиЛзЭлнС, которая возникла на стыке классической поведенческой теории оптико-электронных систем

(ТОЭС) и структуралистского направления общей математической теории систем [7].

Классическая ТОЭС [8] является научной теорией, описывающей процесс преобразования оптических, электрических, акустических и других физических сигналов в ОЭС, как отображение множества сигналов в себя с помощью соответствующих модельных представлений. Она постулирует научные основы создания приборов.

В свою очередь, структурная теория ОиЛ-зЭлнС – это модельно-графовая теория, представляющая собой объединение графового языка и факторного средства для идентификации маршрутов (путей) разработки, апробации и последующей прогностической ликвидации в процессе создания и использования приборов на основе открываемых принципиально новых графовых инженерно-технических законов. Именно связная структурно-графовая бинарная физико-техническая парадигма «графовый язык – факторное средство» лежит в основе задания маршрутов структурной теории.

В структурной теории любой связный граф рассматривается как графовая целевая функция, которая играет роль маршрутизатора (путеуказателя), задающего пути построения и применения приборов. Маршрутизатор, реализующий вершинно-графовую целевую функцию, приобретает факторно-целевое содержание и называется вершинным фактор-маршрутизатором [10].

В общем случае, фактор – это широкое понятие, используемое в разных областях научного знания [4]. Он трактуется, как движущая сила, причина произвольного процесса, определяющая его характер или отдельные черты. На практике фактором может быть: 1) модель (в частности графовая); 2) основополагающий принцип, или научное положение; 3) явление, определяющее какие-либо изменения в изучаемой системе; 4) пример, подтверждающий обоснованность выбранного подхода; 5) связь; 6) условие; 7) существенное обстоятельство; 8) коэффициент или множитель в разложении и т.п. Вводимые факторно-графовые модельные представле-

ния выражают сложные процессы разработки и апробации приборов в сжатой форме на наглядном графовом языке.

В результате графовый языковой аспект теории, как первый элемент бинарной физико-технической парадигмы, представляет собой ансамбль вершинных фактор-маршрутизаторов из связных совокупностей графовых факторов в виде моделей-вершин: этапов, каскадов, орциклов, разделов, шагов и пунктов. Кроме того, язык содержит специфические графы: цепи, циклы, маршруты (пути), маршрутизаторы (путеуказатели), мосты, деревья, матроиды, фазисы, регулярные и ориентированные графы, гиперграфы, ультраграфы и т.п. Особый научный интерес представляют остовные подграфы FG, содержащие все вершины графа, но, вообще говоря, не совпадающие с ним и не являющиеся вполне несвязными (пустыми) [9].

В структурной теории вершинный фактор-маршрутизатор трактуется как движущая сила, задающая пути идентификации процессов построения и применения приборов. Он выступает в виде модельно-графовой реализации специфического графового путеуказателя и определяется начальной и конечной целевыми вершинными компонентами графа – графовыми факторами. В результате вершинный фактор-маршрутизатор визуализирует графовые пути (маршруты) разработки, апробации и последующей прогностической ликвидации создаваемых и используемых приборов.

В свою очередь, введение факторного средства, как второго элемента бинарной физико-технической парадигмы в структурной теории, обусловлено наличием глубоких прорывов в ряде областей оптико- и лазерно-электронного приборостроения, сопровождающихся трансформацией графовых вершинно-модельных факторов в научно-технические объект-факторы ObF. К последним относятся используемые на практике теоретические, конструкторско-технологические и технические объекты в виде сигналов (прежде всего функций рассеяния), характеристик, параметров, стадий разработки, макет-

ных образцов, преобразующих приборных элементов и т.п. [8]. Простейшим унарно графовым научно-техническим объект-фактором ObF служит любая вершина, задающая конкретный физико-технический этап в каскадных орциклах построения и применения приборов [1].

В итоге возникает проблема научного наполнения физико-техническим смыслом графовых факторов в виде моделей-вершин в результате их идентификации как научно-технических объект-факторов ObF. Иначе говоря, в рамках системно-модельного подхода, опираясь на фундаментальный принцип структурной теории – принцип единства структурно-поведенческой связности предметных и теоретических модельных представлений [2-4], речь идёт о единстве физико-технических объектов и графовых вершинно-модельных факторов. В результате объект-факторы задают физико-техническое поведенческое содержание создаваемых графовых факторов в виде моделей-вершин разного структурного вида.

Поэтому на основе выделения характерных физико-технических черт процессов построения и применения приборов графовые вершины приобретают объект-факторное наполнение, тем самым идентифицируя переход от вершинного фактормаршрутизатора к научно-техническому объект-факторному маршрутизатору.

Таким образом, факторное средство структурной теории представляет собой ансамбль научно-технических объект-факторных маршрутизаторов из связных совокупностей физико-технических объект-факторов ObF, которые получаются из графовых факторов в виде моделей-вершин в результате их наполнения физико-техническим смыслом. В структурной теории научно-технический объект-факторный маршрутизатор представляет собой физико-техническую причину, определяющую необходимость переходов от одной объект-факторной графовой вершины процесса построения и применения прибора к другой. Он представляет собой разновидность графовой целевой функции, которая

детализирует отдельные аспекты разработки, апробации и прогностической ликвидации создаваемых и используемых приборов, как физических предметных моделей системы. Иначе говоря, когда какая-то совокупность вершин наполняется физико-техническим смыслом, она трансформируется в научно-технический объект-факторный маршрутизатор, который теперь несёт как вершинно-графовую, так и вершинную физико-техническую нагрузку.

Более того, в структурной теории в рамках системно-модельного подхода конкретный научно-технический объект-факторный маршрутизатор из связных совокупностей физико-технических объект-факторов ObF раскрывает определённые функционально-тематические аспекты графовой методологии синтеза системы и называется графовым фазисом. Термин «графовый фазис», или отдельный момент (положение, научная стадия) в состоянии синтеза, применяется для отделения понятий научной стадии (фазиса), как реализации процесса синтеза технической системы, от шести стандартных рубрик проектных стадий разработки прибора: НИР, техническое предложение (аванпроект), эскизный и технический проект, рабочая КД и ОКР. При этом идентифицируется модельная связность процессов построения и применения приборов в рамках факторно-модельного синтеза системных фазисов.

Факторно-модельный синтез (ФМС) системы, а также его частный случай этапно-модельный синтез (ЭМС), служат ядром структурной теории, задают концептуально-графовую математическую связность физико-технических объектов и моделей и значат собой начало нового стиля модельного мышления в процессе создания приборов. В результате формирования научно-технического системного фазиса устанавливаются факторно-модельные конструкторско-технологические, проектные и технические связи между системой и её моделями, и прежде всего физической предметной модельной реализацией – прибором. На современном уровне развития науки и техники наглядная

эффективная идентификация таких связей осуществляется только на языке теории графов. Таким образом, инженерно-графовая методика синтеза системы сводится к построению рабочих графовых научно-технических объект-факторных маршрутизаторов в результате задания прямых и обратных графовых переходов от физико-технических объект-факторов ObF к моделям (идентификация прямых и обратных факторно-модельных связей) [2-4,10]. В работе [1] рассмотрен частный случай ФМС в виде этапно-модельной реализации синтеза системы. В рамках ЭМС с помощью графовых орциклических научно-технических объект-факторных маршрутизаторов исследованы инженерно-технические законы структурно-поведенческой связности этапов и моделей.

Таким образом, с помощью бинарной графовой физико-технической парадигмы «графовый язык – факторное средство», лежащей в основе структурной теории ОиЛзЭлнС, в рамках ФМС появляется возможность открывать принципиально новые графовые инженерно-технические законы, задаваемые научно-техническими объект-факторными маршрутизаторами. Формируемые факторно-графовые модельные представления выражают сложные процессы построения и применения приборов в процессе их разработки, апробации и прогностической ликвидации. В результате эти модельные представления в сжатой форме на наглядном графовом языке образуют основу инженерно-технических законов создания приборов.

До построения структурной теории в технике своих законов не было, а применялись и применяются естественно научные законы физики, математики, химии, биологии и других наук. Открываемые в теории инженерно-технические законы, описывающие, объясняющие и прогнозирующие факторно-модельные связи (пути) построения и применения приборов задаются с помощью ансамбля научно-технических объект-факторных маршрутизаторов с физико-техническим наполнением на основе факторно-модельного синтеза системы. В результате в оптическом

приборостроении на основе СТ ОиЛзЭлнС устанавливается связность науки и техники.

В частности, в работе [1] на основе принципа единства структурно-поведенческой связности предметных и теоретических модельных представлений идентифицирован ряд инженерно-технических законов построения и применения приборов. Законы вводятся с помощью различных разделов созданного канонического научно-технического фазис-прообраза ОФЦК<sub>12</sub><sup>ЭМС</sup>, как тематически направленного объект-факторного маршрутизатора для построения и применения приборов.

#### **ГРАФОВЫЕ, ГИПЕРГРАФОВЫЕ И СТРУКТУРНО-ПОВЕДЕНЧЕСКИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ПОСТРОЕНИЯ И ПРИМЕНЕНИЯ ОПТИКО- И ЛАЗЕРНО-ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ**

Накопленный опыт создания оптико- и лазерно-электронных приборов показывает, что в основе их построения и применения лежит этапно-модельный синтез (ЭМС) ОиЛзЭлнС из 12 этапов разработки, апробации и прогностической ликвидации [1]. ЭМС, как частный случай факторно-модельного синтеза, определяет концептуально-графовую связность этапов и моделей, устанавливая факторно-модельные научные, конструкторско-технологические и технические связи между физико-техническими этапными объект-факторами ObF системы и её физической предметной модельной реализацией – прибором.

В основе синтеза лежит канонический каскадно-этапный дуодецимарный графовый орциклический объект-факторный маршрутизатор (канонический научно-технический фазис-прообраз ОФЦК<sub>12</sub><sup>ЭМС</sup> построения и применения приборов), введённый в [1], объект-факторные графовые вершины которого имеют вид: 1<sub>12</sub> – документно-постановочный (ДтПост); 2<sub>12</sub> – документно-схемный (ДтСх); 3<sub>12</sub> – структурно-поведенческий математический (СтрПоведнчМатем); 4<sub>12</sub> – компьютерно-предметный (КмптрПредм); 5<sub>12</sub> – компьютерно-математический (КмптрМатем); 6<sub>12</sub> – документно-конструкторский (ДтКонстр);

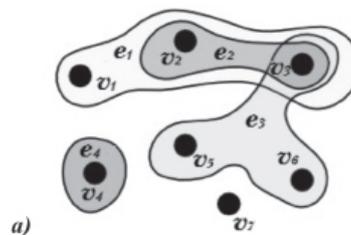
7<sub>12</sub> – документно-технологический (ДтТехнлг); 8<sub>12</sub> – подготовительно-производственный (ПодгтвПроизвд); 9<sub>12</sub> – изготовительный (Изготвл); 10<sub>12</sub> – экспериментальный (Экспер); 11<sub>12</sub> – эксплуатационный (Эксплтц); 12<sub>12</sub> – ликвидационно-прогностический (ЛиквдцПрогнст).

В рамках СТ ОиЛзЭлнС отправной концептуально-знаковой моделью для построения канонического научно-технического фазиса ОФЦК<sub>12</sub><sup>ЭМС</sup> является неупорядоченная парадигма арности 12 в виде конечной совокупности вершин с общим этапным основанием. Парадигма может быть визуализирована только на гиперграфовом языке. При этом перечисление графовых и гиперграфовых объект-факторов ОбF в теории сводится к построению неизоморфных графов, обладающих физико-техническим объект-факторным преобразующим свойством.

Граф – непустое множество вершин  $V = \{v - \text{vertex (вершина)}\}$  и множество рёбер  $E = \{e - \text{edge (ребро)}\}$ , связывающих две вершины. Число подходящих к вершине (инцидентных) рёбер называется степенью (валентностью) вершины. Если все вершины графа связаны между собой и имеют одинаковую степень, то граф называется полным регулярным графом.

Гиперграф – это такое обобщение графа, когда рёбрами могут быть не только двухэлементные, но и любые другие подмножества вершин. Иначе говоря, гиперграф – пара  $(V, E)$ , где  $V$  – непустое множество объектов некоторой природы, называемых вершинами гиперграфа, а  $E$  – семейство непустых (не обязательно различных) подмножеств множества  $V$ , называемых рёбрами гиперграфа. На рис. 1а приведен пример гиперграфа произвольной мультирёберной конфигурации, содержащей семь вершин и четыре гиперребра, так что

$$V = \{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5, v_6, v_7\}, E = \{e_1, e_2, e_3, e_4\} = \{\{v_1, v_2, v_3\}, \{v_2, v_3\}, \{v_3, v_4, v_5, v_6\}, \{v_4\}\}. \quad (1)$$



б)

Рисунок 1.

Гиперграфы этапно-модельного синтеза (ЭМС) ОиЛзЭлнС:  
а) общий вид гиперграфа, состоящего из 7 вершин и 4 гиперрёбер;

б) дуодецимарное гиперребро HE<sub>12</sub><sup>ЭМС</sup>, идентифицирующее неупорядоченную парадигму ЭМС ОиЛзЭлнС из двенадцати графовых этапных вершин

Тогда идентификация неупорядоченной парадигмы этапно-модельного синтеза ОиЛзЭлнС из двенадцати графовых этапных вершин осуществляется в результате задания гиперграфа в виде дуодецимарного гиперребра HE<sub>12</sub><sup>ЭМС</sup> (Hyper Edge) из 12 вершин, как показано на рис. 1б. Дуодецимарное гиперрёберное обобщение унарновершинного объект-фактора ОбF представляет собой 12-ти вершинный объект-фактор ОбF. Задание вершин в виде окружностей, квадратов и треугольников отражает физико-технический смысл этапов. На основе дуодецимарного гиперрёберного объект-фактора HE<sub>12</sub><sup>ЭМС</sup> (рис. 1б) строится первая графовая модель ЭМС (рис. 2), задающая этапную связность синтеза с помощью канонической дуодецимарной простой этапной орцепи GK<sub>12</sub><sup>ЭМС</sup>.

Орцепь является исходной глобальной орграфовой целевой функцией в виде научно-технического объект-факторного маршрутизатора, идентифицирующего двенадцать графовых вершин синтеза системы.

В рамках структурной теории графовая модель произвольной оптико- и лазерно-электронной системы строится с помощью точного и строгого определения математической модели (ММ), которая представляет собой тернарную математическую структуру MSt Бурбаку-Колмогорова [8]

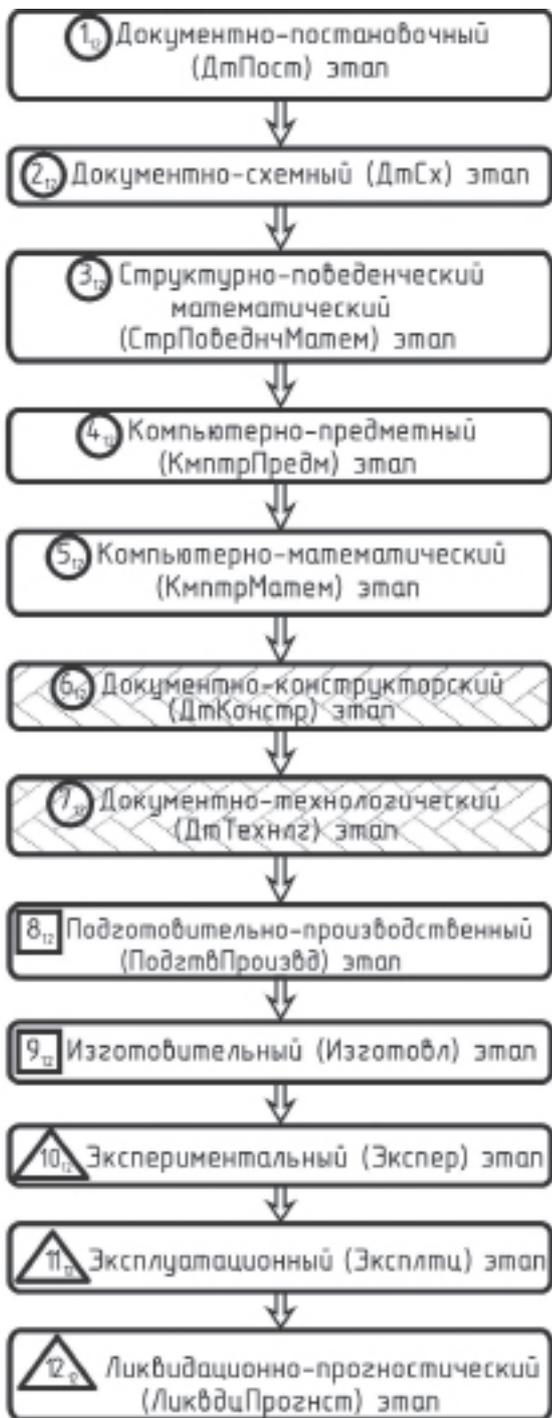


Рисунок 2.

Каноническая дуодецимарная простая этапная орцель  $GK_{12}^{ЭМС}$ , задающая, этапно-модельные строительные графовые «кирпичики» ЭМС в рамках структурной теории оптико- и лазерно-электронных систем

$$MSt = \langle \langle S_0, S_1, \dots, S_k; \mathcal{R}_1, \mathcal{R}_2, \dots, \mathcal{R}_l; \mathcal{P}_1, \mathcal{P}_2, \dots, \mathcal{P}_n \rangle \rangle. \quad (2)$$

MSt имеет вид набора объектов, который обозначается двойными угловыми скобками,

и содержит:

1) основные множества математических элементов  $S_0, S_1, \dots, S_k$  разной природы, различающиеся условно приписываемыми им наименованиями;

2) заданные на этих множествах унарные (одноместные), бинарные (двуместные), тернарные (трехместные) отношения связности  $\mathcal{R}_1, \mathcal{R}_2, \dots, \mathcal{R}_l$ . В общем случае  $m$ -арное ( $m$ -местное) отношение  $\mathcal{R}^m$ .  $(s_{i1}, s_{i2}, \dots, s_{im}) \subseteq S_{i1} \times S_{i2} \times \dots \times S_{im}$  представляет собой подмножество декартова произведения множеств  $m$ -ой степени. Оно связывает упорядоченные совокупности  $(s_{i1}, s_{i2}, \dots, s_{im})$  из  $m$  элементов (упорядоченные  $m$ -ки), вообще говоря, различных множеств;

3) конечный запас отображений  $\mathcal{P}_1, \mathcal{P}_2, \dots, \mathcal{P}_n$  из декартовых произведений множеств  $S_i$  в  $S_r$ , т.е. отображений (операторов) вида  $\mathcal{P} : S_{i1} \times S_{i2} \times \dots \times S_{im} \rightarrow S_r$ .

С помощью триадной MSt, содержащей «основные множества  $S_k$ ; отношения  $\mathcal{R}_l$ ; отображения (операторы)  $\mathcal{P}_n$ » [2],

строятся все известные и новые как структурно-поведенческие ММ, так и компьютерные ММ оптико- и лазерно-электронных систем и идентифицируется их структурная связность.

Идея математической структуры даёт возможность перейти от расплывчатого описания физико-технической системы (процесса), выраженного с помощью математической символики, к строгой формулировке понятия ММ, которая отражает моделируемые свойства физико-технического объекта. Иначе говоря, она показывает, что значит взять реальный физико-технический объект (процесс) в «абстрактные математические руки».

Обобщающие свойства тернарной математической структуры MSt проявляются в том, что операторы и формулы, (формулы трактуются как простейшие операторы), фактически задают частные случаи MSt, в которых множества  $S_k$  и отношения  $\mathcal{R}_l$  оказываются очевидными.

1. Простейшая расчётно-формульная ММ поведения (РсчтФормулМП), в которой формула  $f(x, y)$  идентифицируется оператором

$$\text{РсчтФормулнМП} = \langle\langle S; \mathcal{R}; \mathcal{P}_f : x, y \rightarrow f(x, y) \rangle\rangle. \quad (3)$$

В качестве простого оптического примера РсчтФормулнМП можно рассмотреть идентификацию амплитудного коэффициента пропускания транспаранта, так что

$$\mathcal{P}_{\text{тр}} : x, y \rightarrow \tau_a^{\text{TP}}(x, y). \quad (4)$$

2. Операторно-вычислительное обобщение расчётно-формульной ММ поведения (ОператВычислтМП), в которой осуществляется замена формулы на оператор поведения  $\mathcal{P}_{\text{пвд}}$ , устанавливающий связь между входными  $S_{\text{вх}}$  и выходными  $\sigma_{\text{вых}}$  оптическими сигналами, так что

$$\text{ОператВычислтМП} = \langle\langle S; \mathcal{R}; \mathcal{P}_{\text{пвд}}; : S_{\text{вх}}(P) \rightarrow \sigma_{\text{вых}}(Q), \text{ или } \sigma_{\text{вых}}(Q) = \mathcal{P}_{\text{пвд}} \{S_{\text{вх}}(P)\} \rangle\rangle. \quad (5)$$

Все оптические операторы поведения моделируют процесс формирования изображения, при котором входной сигнал преобразуется в выходной.

Именно формулы и операторы, задающие поведенческие свойства ММ технической системы, и стали исходными модельными представлениями, на основе которых создана современная трактовка ММ как математической структуры MSt Бурбаку-Колмогорова. Поэтому для получения простых ММ, имеющих вид РсчтФормулнМП и ОператВычислтМП, прежде всего, идентифицируют рабочие формулы и операторы, описывающие поведение технической системы, с учётом основных используемых множеств и отношений связности (большой частью очевидных по умолчанию).

На основе MSt Бурбаку-Колмогорова графовая ММ содержит только множества и отношения и имеет бинарный вид

$$\text{MSt}_{\text{грф}} = \langle\langle S_0, S_1, \dots, S_k; \mathcal{R}_1, \mathcal{R}_2, \dots, \mathcal{R}_l \rangle\rangle. \quad (6)$$

Граф служит геометрическим образом ГрфМ. Предтечей ГрфМ является структурная схема (СтрСх), определяющая основные части изделия или процесса, их назначение и взаимосвязи. В структурной теории ГрфМ строят, задавая отношения на частях СтрСх в виде научно-технических объект-факторных маршрутизаторов различной арности, связы-

вающих части схемы, идентифицируя их как этапно-модельные вершины, эквивалентные в смысле функционально-технической значимости. ГрфМ – это непереломная ММ, ибо в неё можно добавлять любое число вершин при увеличении арности фактормаршрутизатора.

В частности, для орцепи GK<sub>12</sub><sup>ЭМС</sup> основное множество  $S_k$  – это 12-ти этапный ансамбль  $S_{12} = \{1_{12}, 2_{12}, \dots, 12_{12}\}$ . В свою очередь, унарные отношения  $\mathcal{R}_1$  – это различные подмножества 12-ти этапного множества  $S_{12}$ . Бинарные отношения  $\mathcal{R}_2$  – это различные упорядоченные двойки, так что  $\mathcal{R}_2 = \{(1_{12}, 2_{12}); (2_{12}, 3_{12}); \dots; (11_{12}, 12_{12})\}$ . Тернарные отношения  $\mathcal{R}_3$  – различные упорядоченные тройки, т.е.  $\mathcal{R}_3 = \{(1_{12}, 2_{12}, 3_{12}); (2_{12}, 3_{12}, 4_{12}); \dots; (10_{12}, 11_{12}, 12_{12})\}$  и т.д. Наконец, дуодецимарное отношение (арности 12), задаваемое графом на рис. 2, имеет вид  $\mathcal{R}_{12} = \{(1_{12}, 2_{12}, 3_{12}, 4_{12}, 5_{12}, 6_{12}, 7_{12}, 8_{12}, 9_{12}, 10_{12}, 11_{12}, 12_{12})\}$ . Формальное перечисление отношений подчёркивает визуальную наглядность их задания с помощью графа (рис. 2) по сравнению с математическим модельным прообразом (6).

В структурной теории в основе построения концепции научных основ современного технического приборостроения лежит их факторизация (декомпозиция, разделение) на ряд определяющих (основных) областей нового знания и фазисов (научно-технических стадий) оптико- и лазерно-электронного приборостроения [2-4]. Функционально-тематически фазисы идентифицируют задачи построения и применения приборов, которые решаются с помощью графовых целевых функций в виде введённых ранее вершинных фактормаршрутизаторов и научно-технических объект-факторных маршрутизаторов. Фундаментом задания этих маршрутизаторов служит связная структурно графовая бинарная физико-техническая парадигма теории «графовый язык – факторное средство». Язык и средство идентифицируют маршруты (пути) разработки, апробации и последующей прогностической ликвидации в процессе создания и использования приборов на основе открываемых принципиально новых

графовых инженерно-технических законов. В результате маршрутизаторы задают модельную факторизацию научных основ и выделение этапных разделов внутри фазисов  $GK_{mn}^{ЭМС}$ , которые формируют инженерно-технические законы в результате идентификации специфических графовых целевых маршрутизаторов ( $m \ll n$ ) [1].

На основе этапно-модельного синтеза, представляющего собой последовательно-параллельный перебор этапов и моделей, реализуются не только прямые, но и обратные переходы между этапами синтеза системы. В результате в рамках языкового аспекта структурной теории за счёт замыкания орцепи на рис. 2 с помощью моста обратной связи  $M_{12-1}$  формируется вершинный фактормаршрутизатор, имеющий вид циклического графа  $C_{12}^{ЭМС}$ . Одновременно с учётом физико-технического поведенческого содержания этот маршрутизатор, как факторное средство, представляет собой канонический каскадно-этапный дуодецимарный графовый орциклический объект-факторный маршрутизатор  $ОФЦК_{12}^{ЭМС}$ , приведённый на рис. 3 и построенный в [1].

Далее, принимая во внимание функционально-тематическую целевую направленность объект-факторного маршрутизатора, в поведенческом плане его следует рассматривать как канонический научно-технический фазис-прообраз расширенного объектно-технического проектирования [1,10], обозначая его по-прежнему как  $ОФЦК_{12}^{ЭМС}$ . Иначе говоря, графовый орцикл (см. рис. 3) представляет собой концептуально-орграфовый фазисный синтез-прообраз построения и применения приборов.

Он задаёт внутренние этапные связи, описывающие процессы проектирования, производства и апробации приборов с целью их использования и последующей прогности-

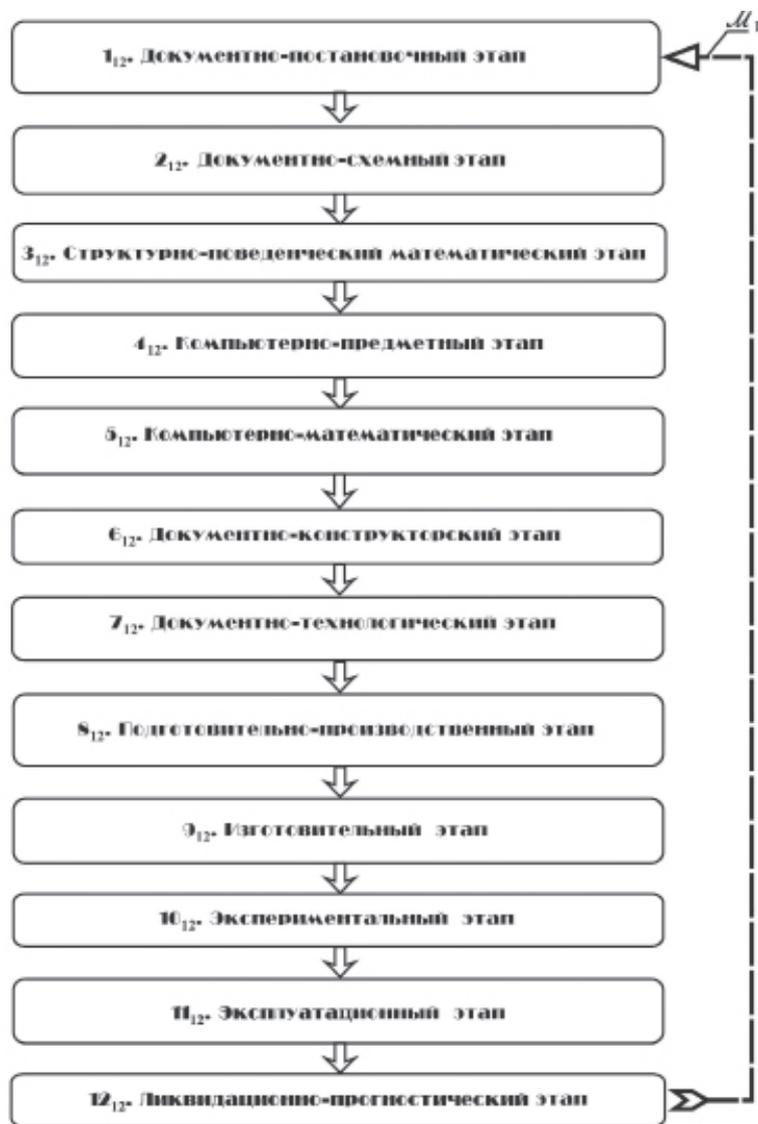


Рисунок 3.

Канонический каскадно-этапный дуодецимарный графовый орциклический объект-факторный маршрутизатор  $ОФЦК_{12}^{ЭМС}$  синтеза ОнЛЭЭлС. Он строится из простой орцепи в виде глобальной орграфовой целевой функции (12 « $\ll$ » 1) аности 12, в которой вершины приобретают тематическое объект-факторное этапное содержание. С помощью моста обратной связи  $M_{12-1}$  орцепь трансформируется в каскадно-этапный орцикл, задающий концептуально-орграфовый модельный фазисный синтез-прообраз процессов проектирования, производства и апробации прибора с целью его использования и последующей прогностической ликвидации.

ческой ликвидации. Дополнительно в структурной теории графовый орцикл используется для идентификации внешних прямых и обратных этапно-модельных рёберных связей с графовыми вершинами модельного фазиса [2-4].

Для углублённой детализации графовой

связности объект-факторов ObF в научно-технических маршрутизаторах проводится их факторизация, или факторинг [9]. Целью факторизации является идентификация в графе основных строительных «маршрутных блоков» – остовных подграфов, упомянутых выше. Она сводится к декомпозиции графового маршрутизатора в виде суммы остовных подграфов, которые при объединении формируют исходный граф. В результате факторизации получается сумма более простых объектов, чем исходный.

В общем случае фактором графа G (факторграфом FG) называется непустой остовный подграф. В частности, регулярный остовный подграф степени «*m*» называется *m*-факторграфом, или *m*-фактором (*m*-FG). Граф в виде объединения всех остовных подграфов U(FG), которые не имеют попарно общих рёбер, называется факторизацией исходного графа. Если граф представляет собой сумму *m*-факторов, то их объединение U(*m*-FG) называется *m*-факторизацией, а сам граф считается *m*-факторизуемым.

В качестве примера на рис. 4 приведён 1-факторизуемый циклический граф  $C_{12}^{ЭМС}$ , который разделяется на два более простых

маршрутных блока  $(1-FC_{12}^{ЭМС})_1$  и  $(1-FC_{12}^{ЭМС})_2$ . Первый блок раскрывает переход от постановочно-схемного раздела к эксплуатационно-прогностическому. Второй блок идентифицирует схемно-математический, компьютерный, конструкторско-технологический, изготовительный, экспериментально-эксплуатационный и ликвидационно-постановочный разделы.

#### ИДЕНТИФИКАЦИЯ НАУЧНОЙ ПРОЕКТНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ИНЖЕНЕРИИ НА ОСНОВЕ КАНОНИЧЕСКОГО НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОГО ФАЗИС-ПРООБРАЗА ПОСТРОЕНИЯ И ПРИМЕНЕНИЯ ПРИБОРОВ

Структурная теория (да и никакая другая теория) не скажет, как сделать новый прибор. Создание прибора было, есть и будет искусством, доступным только истинным творцам. Принято считать: тот, кто изобрёл первое колесо, был идиотом, но изобретатель трёх остальных был гением.

Используемые в теории графовые маршрутизаторы определяют пути, которые необходимо (полезно), но не достаточно, пройти, чтобы изготовить хороший прибор на основе канонического каскадно-этапного орци-

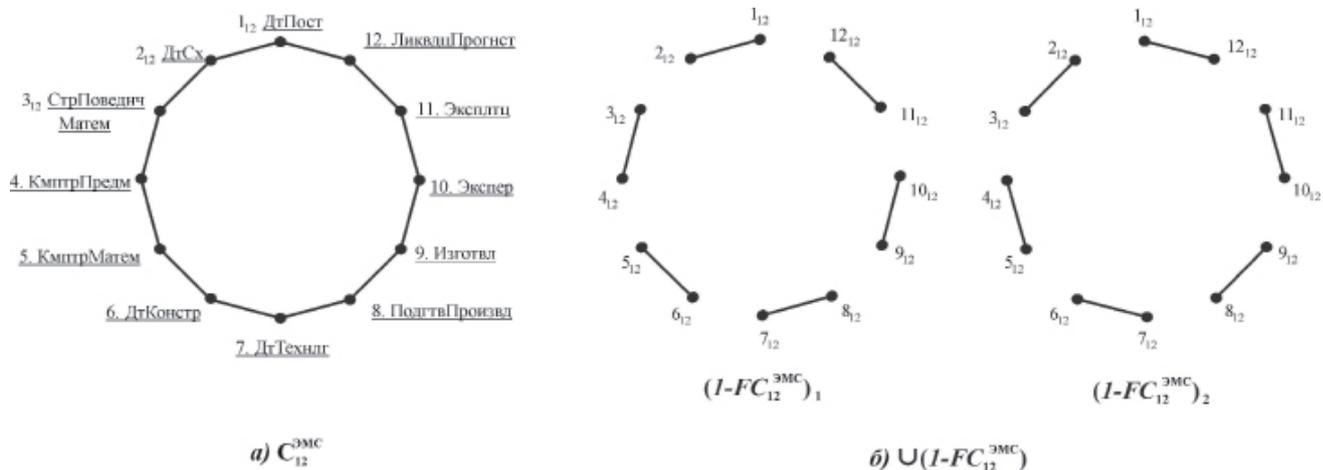


Рисунок 4.

Циклический граф  $C_{12}^{ЭМС}$  и его 1-факторизация  $U(1-FC_{12}^{ЭМС})$ :

а) циклический граф  $C_{12}^{ЭМС}$  с 24-мя бинарными прямыми и обратными меж-этапными мультисвязями, в том числе с двумя замыкающими (12 «» 1);

б) 1-факторизация  $U(1-FC_{12}^{ЭМС})$  графа  $C_{12}^{ЭМС}$  в виде объединения двух остовных подграфов  $(1-FC_{12}^{ЭМС})_1$  и  $(1-FC_{12}^{ЭМС})_2$

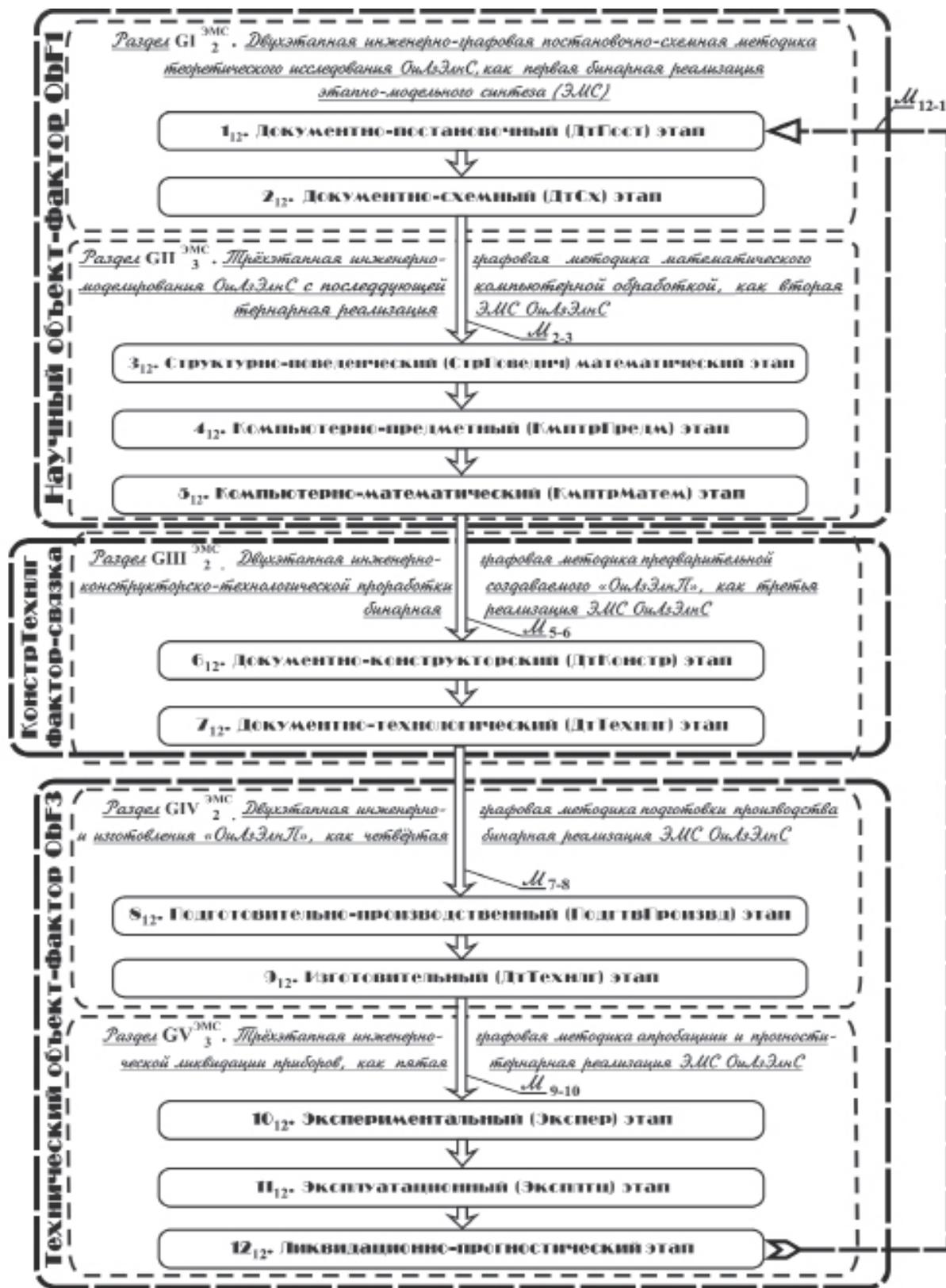


Рисунок 5.

Вариация научно-технического фазис-прообраза ОФЦК<sub>23(2)23</sub><sup>ЭМС</sup>, задающего 12-ти этапный модельный синтез системы. Орциклический фазис строится в результате детализации канонического фазис-прообраза ОФЦК<sub>12</sub><sup>ЭМС</sup> на основе выделения в нём трёх объект-факторов ОбF и пяти разделов GN<sup>ЭМС</sup> (N=I-V), соединённых мостами M<sub>2-3</sub>, M<sub>5-6</sub>, M<sub>7-8</sub>, M<sub>9-10</sub> и M<sub>12-1</sub>. Он визуализирует законы научной проектно-технической инженерии, идентифицирующие процессы построения и применения ОбЪЭлП

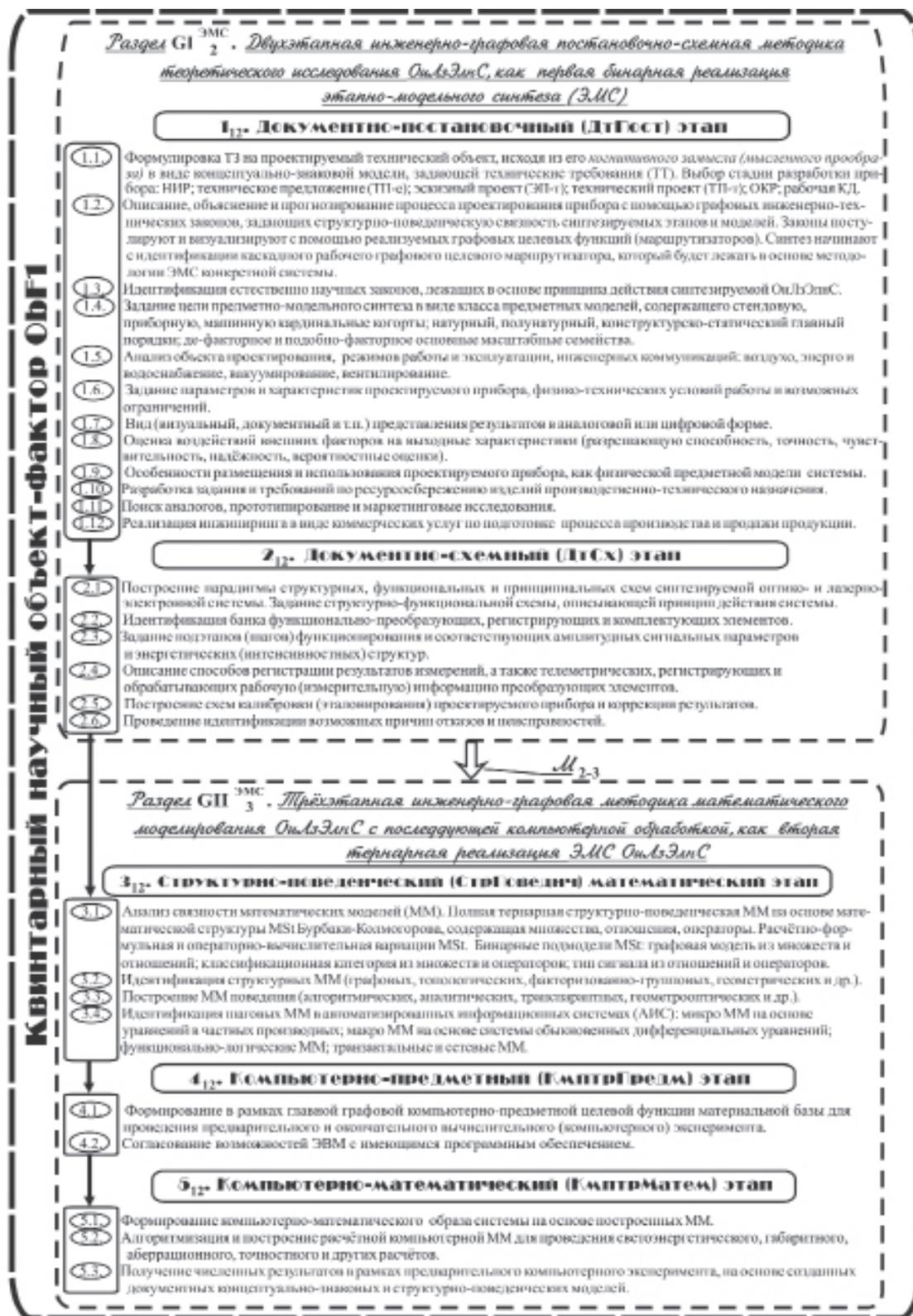
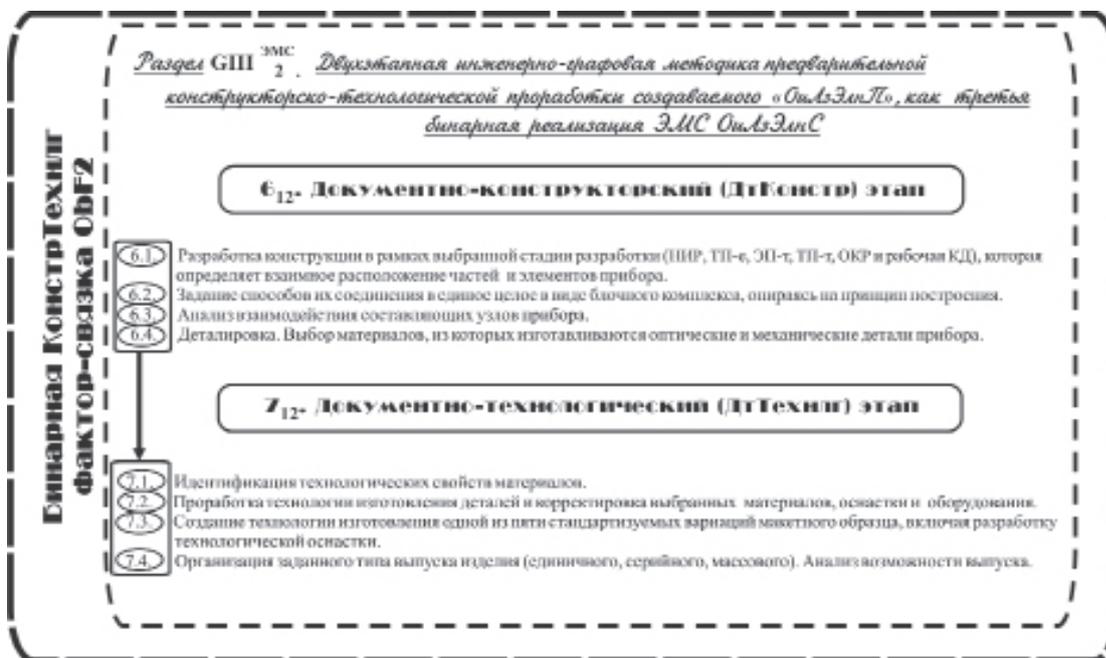


Рисунок 6.

Квинтарный двураздельный научный объект-фактор ОбГ1 фазис-преобраза ОФЦК<sub>23(2)23</sub><sup>ЭМС</sup> в виде пяти-этапной простой постановочно-схемной математической орцени из шаговых гиперрёбер, выделяющих подмножества смежных модельных вершин-шагов, которые могут быть использованы при формировании фазис-образа на создаваемый прибор



**Рисунок 7.**

***Бинарный однораздельный фактор-связка ОбF2 фазис-прообраза ОФЦК<sub>23(2)23</sub><sup>ЭМС</sup> в виде двухэтапной простой конструкторско-технологической орцепи-связки, соединяющей научный и технический объект-факторы ОбF. Этапы орцепи состоят из шаговых гиперрёбер, выделяющих подмножества смежных модельных вершин-шагов, которые могут быть использованы при формировании фазис-образа на проектируемый прибор***

клического фазис-прообраза ОФЦК<sub>12</sub><sup>ЭМС</sup> в рамках ЭМС связной, холистичной (целой, неразрывной) и эмерджентной (обладающей новыми свойствами, отсутствующими в исходных элементах) ОиЛзЭлнС [1]. Достаточность определяется талантом разработчика.

Накопленный опыт показывает, что при построении и применении приборов в рамках СТ ОиЛзЭлнС на основе принципа единства структурно-поведенческих модельных представлений устанавливается связность науки и техники с помощью конструкторско-технологической документации. В то же время из рис. 3 следует, что именно канонический каскадный дуодецимарный орциклический объект-факторный маршрутизатор может быть положен в основу идентификации связности процессов проектирования, производства и апробации прибора с целью его использования и последующей прогностической ликвидации. Этапы дуодецимарной орцепи концептуально-графового этапного-модельного синтез-прообраза показывают, как переходит фундаментальная физико-мате-

матическая направленность исследования в производственно-эксплуатационную конкретику изготовления и использования прибора, идентифицируя в итоге построение научной проектно-технической инженерии.

В структурной теории в рамках системно-модельного подхода каскадный объект-факторный маршрутизатор, в котором можно выделить связанные совокупности физико-технических объект-факторов ОбF, раскрывает функционально-тематические аспекты графовой методологии синтеза системы и называется графовым фазисом (научно-технической стадией). Фактически он является поведенческим следствием объект-факторного маршрутизатора (рис. 3) и строится из канонической простой орцепи (см. рис. 2) в виде глобальной орграфовой целевой функции (12 «» 1) арности 12, в которой вершины приобретают тематическое объект-факторное этапное содержание.

Развивая целевую в поведенческом плане тематическую направленность приведённого на рис. 3 фазис-прообраза ОФЦК<sub>12</sub><sup>ЭМС</sup>,

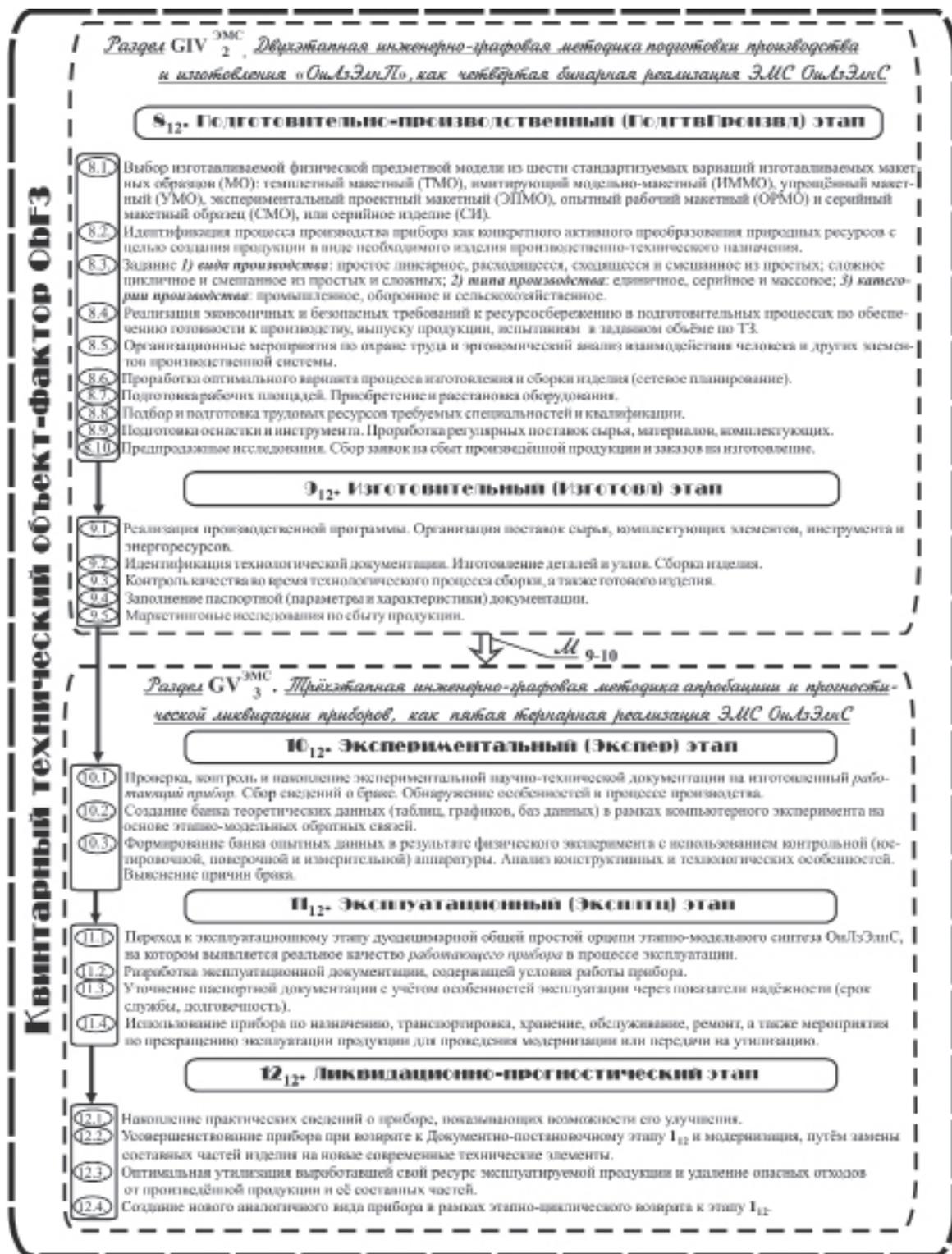


Рисунок 8.

Квинтарный двураздельный технический объект-фактор ОбФЗ фазис-прообраза ОФЦК<sub>23(2)23</sub><sup>ЭМС</sup> в виде пятиэтапной простой изготовительно-эксплуатационной прогностической орцепи из шаговых гиперрёбер, выделяющих подмножества смежных модельных вершин-шагов, которые могут быть использованы при формировании фазис-образа на изготавливаемый и исследуемый прибор

задают его вариацию в виде пятираздельной (2-3 « 2 » 2-3) триадной орцепи ОФЦК<sub>23(2)23</sub><sup>ЭМС</sup> ЭМС ОиЛзЭлнС из объект-факторов ОбF (см. рис. 5). Детализация вариативного фазис-прообраза сводится к выделению трёх объект-факторов ОбF с целью идентификации научной проектно-технической инженерии. Последующее пошаговое наполнение отдельных этапов на рис. 6-8 показывает, что искусство построения и применения приборов – это зеркальный образ расширенного проектирования на основе науки и техники.

Во-первых, в триаде выделяют квинтарный двураздельный научный объект-фактор ОбF1 (см. рис. 6). В первом разделе объект-фактора ОбF формулируется концептуально-схемная постановка задачи. Во втором разделе с помощью основополагающих теоретических принципов процесса преобразования сигналов идентифицируют математические и компьютерные модели. Во-вторых, в триаде описывают бинарный однораздельный конструкторско-технологический документный объект-фактор ОбF2 (см. рис. 7). Он устанавливает связность научно-постановочных разделов триады с технико-изготовительными разделами и носит название фактор-связки. В-третьих, в триаде задают квинтарный двураздельный технический объект-фактор ОбF3 (см. рис. 8), который определяет процессы изготовления и апробации, как принципиально новых, так и модернизируемых приборов с целью их последующей прогностической ликвидации.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, идентификация научной проектно-технической инженерии сводится к заданию связности научного исследования (квинтарный научный объект-фактор ОбF1) и технической приборной реализации (квинтарный технический объект-фактор ОбF3) системы. Связность этих двух объект-факторов описывается на графовом языке с помощью бинарной конструкторско-технологической фактор-связки ОбF2. Особая инженерно-практическая значимость СТ ОиЛзЭлнС состоит в том, что с помощью дуодецимарного графа, который лежит в основе

12-ти этапного модельного синтеза системы, в оптическом приборостроении с помощью фактор-связки устанавливается глубинная связность и взаимопроникновение науки и техники друг в друга. Триадная орцепь ОФЦК23(2)23ЭМС ЭМС ОиЛзЭлнС задаёт графовую методологию решения любой технической задачи (рис. 5). При этом актуальность, цель, научная новизна, практическая ценность работы естественным образом следуют из содержания шагов 12-ти этапов триадной орцепи, идентифицирующей разработку и апробацию приборов, как физических предметных моделей системы (рис. 6 - 8).

В результате физико-технический смысл фазисного анализа и синтеза ОиЛзЭлнС сводится к открытию факторно-графовых инженерно-технических законов структурно-поведенческой связности на основе детализации трёх базовых объект-факторов ОбF. В работе детально изучен канонический научно-технический фазис-прообраз, задающий дуодецимарный этапно-модельный синтез. Графовые маршрутизаторы визуализируют идентифицируемую связность и поведение системы.

В то же время в структурной теории ОиЛзЭлнС построен ряд других функционально-тематических фазисов [3,4,10-12]: 1) системно-модельный подход к построению, применению и анализу приборов; 2) модельные представления системы; 3) комплекс модельных научных основ современного приборостроения; 4) множество прямых и обратных связей между моделями и этапами построения и применения приборов; 5) расширенное научно-техническое и спектрально-реберное проектирование; 6) структурно-групповая классификация сигналов. Идентификация этих фазисов будет проведена в дальнейшем.

#### *Список литературы:*

1. Немтинов В.Б. Сериков В.Ю. Структурно-графовая методология в задачах анализа и синтеза оптико-электронных систем // Контенант, 2014, т 13, №4. С. 12-26.
2. Немтинов В.Б. Докторская диссертация на тему «Структурная теория и математическое моделирование ОиЛзЭлнС» 2004 // <http://>

www.dissercat.com/content/strukturnaya-teoriya-i-matematicheskoe-modelirovanie-optiko-i-lazerno-elektronnykh-sistem#ixzz2stxrYkAa

3. *Белозёров А.Ф.* Оптика России. Очерки истории и развития. – Казань: Центр инновационных технологий, 2013. – Т. 2 – 612с. // Раздел 11.3.6. Структурная теория оптико- и лазерно-электронных систем, созданная В.Б.Немтиновым: научные основы современного оптико-электронного приборостроения. С. 515-522.

4. *Немтинов В.Б.* Факторно-графовые модельные представления терагерцевых и инфракрасных оптико-электронных систем // Вестник МГТУ. Приборостроение. Спец. выпуск «Современные проблемы оплотехники». 2011. С. 78–99.

5. *Овчинников В.А.* Графы в задачах анализа и синтеза структур сложных систем / – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2014. – 415с.

6. *Абросимов М.Б.* Графовые модели отказоустойчивости / – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 2012. – 192с.

7. *Бусленко Н.П.* Моделирование сложных систем. – М.: Наука, 1978. – 400с.

8. *Мосягин Г.М., Немтинов В.Б.* Преобразование сигналов в оптико-электронных приборах систем управления летательными аппаратами. – М.: Машиностроение, 1980. – 176с.

9. *Оре О.* Теория графов: Пер. с англ. / Под ред. Н.Н.Воробьева. – М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1980. – 336с.

10. *Немтинов В.Б.* Графовые маршрутизаторы каскадного объектно-технического проектирования. Межд. конф. «Прикладная оптика 2014»: Сб. Трудов Оптического Общества на Электронном Диске. Секция «Оптическое приборостроение. Компьютерное моделирование». С-Пб., 2014. С. 171–175.

11. *Немтинов В.Б.* Фундаментальные научные фазисы для построения и применения новых приборов // Лазеры в науке, технике, медицине: Сб. научных трудов XXIV Межд. НТК. Том 24. М.: 2013. С. 126-131.

12. *Немтинов В.Б.* Спектрально-реберное объектно-техническое проектирование оптико- и лазерно-электронных приборов // Лазеры в науке, технике, медицине: Сб. научных трудов XXV Межд. НТК. Том 25. М.: 2014. С. 122-127.

# ТЕРМОСТАБИЛЬНОСТЬ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОЙ СЪЕМОЧНОЙ АППАРАТУРЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ.

## Часть I

АРХИПОВ С.А.

ПАО «Красногорский завод им. С.А. Зверева»

E-mail: arhipof@zenit-kmz.ru

*Первая часть статьи содержит краткий обзор публикаций на тему термостабильности оптико-электронных приборов, классификацию и общие сведения о съёмочной аппаратуре дистанционного зондирования Земли.*

**Ключевые слова:** термостабильность, съёмочная аппаратура, дистанционное зондирование Земли, тепловой режим, термоабберации, пространственно-частотные, фотограмметрические, радиометрические характеристики.

Съёмочная аппаратура дистанционного зондирования Земли (СА ДЗЗ или далее СА) устанавливается на космических аппаратах и предназначена для получения изображений поверхности Земли. Важнейшее требование, предъявляемое к СА – сохранность ее информационных характеристик в условиях эксплуатации. Невыполнение этого требования приводит к снижению качества получаемых изображений, невозможности их достоверного сравнения, потерям информации. На информационные характеристики СА оказывают влияние разнообразные эксплуатационные факторы: невесомость, вибрации, условия теплообмена, ионизирующие излучения космического пространства и др.

Цель настоящей статьи – обзор и обобщение известных подходов и исследований термостабильности оптических и оптико-электронных приборов, построение теоретической базы для практического анализа и обеспечения термостабильности СА. Термостабильность – свойство СА сохранять значения своих выходных информационных характеристик в допустимых пределах в заданных условиях теплообмена.

Актуальность и сложность проблемы термостабильности СА демонстрирует простой пример. Известно [1], что допуск сохранно-

сти волнового фронта оптической системы по критерию Рэлея не должен превышать  $\lambda/4 = 0,15$  мкм. Известно также [2], что диапазон изменения температур на платформе космического аппарата может достигать величин  $-150 \div +100$  °С, если не предпринимать специальных мер. Пусть перепад температур по толщине некоторого зеркала (диаметр  $D=400$  мм, толщина  $h=40$  мм, коэффициент температурного расширения материала зеркал  $\alpha = 10^{-6}$  1/К) составляет  $\vartheta = 0,5$  К. Тогда прогиб формы поверхности зеркала составит [3]:

$$w = \frac{\vartheta \alpha D^2}{8h} = 0,25 \text{ мкм}$$

Отраженный от этого зеркала волновой фронт исказится на 0,5 мкм, что в два раза превосходит критерий Рэлея.

### КРАТКИЙ ОБЗОР ПУБЛИКАЦИЙ

С проблемой термостабильности неизбежно сталкивается каждый разработчик высокоточного оптического или оптико-электронного прибора. Проблема термостабильности находится на стыке различных инженерных специализаций: теплофизика, вычислительная и прикладная оптика, механика, материаловедение, электроника, расчет и конструирование оптических и оптико-электронных

приборов. Такая многоплановость порождает трудности реализации системного подхода к задачам термостабильности, объясняет огромное количество публикаций на эту тему и тот факт, что большая часть этих публикаций посвящена, либо специальным частным вопросам, либо описанию результатов исследования конкретного прибора. Число работ, в которых проблема термостабильности оптико-электронных приборов рассмотрена во всей ее полноте, относительно невелико.

Первым наиболее точным оптическим прибором был телескоп. Поэтому именно астрономами впервые исследовано влияние температуры на изображение, образованное телескопом. Было замечено, что с изменением температуры положение фокуса не остается постоянным. Вследствие этого в результаты измерений вносится ошибка, зависящая от температуры. Kruger A. (1863) [4] вывел формулу для фокусного расстояния объектива астрономической трубы в зависимости от температуры. Температурный коэффициент изменения показателя преломления он определял из теоретической формулы. В расчет входило также изменение показателя преломления воздуха при изменении атмосферного давления.

Sonnefeld A. (1933) [5] изложил основные результаты предыдущих исследований, указал на необходимость для некоторых объективов учитывать температурные изменения толщин линз и воздушных промежутков, отметил, что в краевых зонах могут возникать напряжения, вследствие разности коэффициентов линейного расширения материала оправы и стекла. Он также указал на важность изучения влияния температуры не только для астрономических приборов, но и для оптических дальномеров.

В работе Максудова Д.Д. (1936) [6] вновь рассмотрена зависимость фокусного расстояния двухлинзового ахроматического объектива от температуры. Для расчетов влияния температуры на изменение фокусного расстояния им введена постоянная

$$V = \frac{\beta}{n-1} - \alpha$$

где  $\beta$  - коэффициент температурного изменения показателя преломления стекла

$n$  - относительный показатель преломления стекла,

$\alpha$  - коэффициент температурного расширения стекла.

Произведение  $V$  на фокусное расстояние  $f'$  при изменении температуры линзы  $t$  дает изменение фокусного расстояния линзы. Эта постоянная называется термооптической постоянной и ее значения приводятся в каталогах оптического стекла [7].

Perry J.W. (1943) [8] опубликовал работу, в которой проблема влияния температуры на выходные характеристики оптической системы рассмотрена в общем виде, дано ее теоретическое обоснование и решены практические задачи. Он подробно рассмотрел влияние равномерного изменения температуры на положение и размеры изображения для любой центрированной оптической системы. Изменения положения и величины изображения он назвал температурными аберрациями. В этой работе Perry J.W. исследовал в общей форме методы исправления температурных аберраций оптической системы таких, при которых система удовлетворяла бы заданным требованиям, и подробно рассмотрел случай, при котором взаимно компенсируются изменения длины камеры и смещение изображения. Этот случай он назвал термомеханическим исправлением.

Он указал, что в склеенных линзах при изменении температуры могут возникать значительные внутренние напряжения, вызывающие порчу изображения. Поэтому, если возможно, нужно избегать склейки линз или пользоваться таким клеем, который при ограниченных колебаниях температуры будет до некоторой степени сохранять свойства жидкости или обладать высокой текучестью. В работе впервые обращено внимание на большое значение неравномерного распределения температуры для работы оптических приборов. Он предложил следующие способы устранения неравномерных изменений температуры:

- вентиляция, искусственная циркуляция

воздуха в сочетании с искусственным подогревом и охлаждением,

- термостатирование,
- применение в конструкции прибора сочетаний экранов или чехлов непроводящих тепло, с внутренней проводящей подкладкой для уменьшения притока тепла и облегчения его равномерного распределения

- применение материалов с низкими коэффициентами температурного расширения,

- ориентирование системы во время работы таким образом, чтобы при наличии неравномерного распределения температуры в атмосфере изотермы были направлены перпендикулярно оптической оси системы,

- выдерживание прибора перед работой до тех пор, пока не установится стационарное температурное состояние.

Работа Ретгу J.W. отразила основное содержание проблемы температурной расстраиваемости оптической системы, лежащей на стыке прикладной оптики и теории теплообмена, и заложила теоретический фундамент термооптики, как технической науки.

Волосов Д.С. (1958) [9,10] изложил теорию термооптических aberrаций положения изображения, а также линейного, углового и продольного увеличения при равномерном изменении температуры и вывел уравнения, которым должны удовлетворять системы, свободные от термооптических aberrаций. Он ввел термины: коэффициент термооптической aberrации положения или первый коэффициент термооптической aberrации, и коэффициент термооптической aberrации увеличения или второй коэффициент термооптической aberrации. Формулы для определения коэффициентов приведены к форме, удобной для вычислений, исследованы термооптические aberrации систем линз конечной толщины и систем из бесконечно тонких линз.

Слюсарев Г.Г. (1959) [11] исследовал влияние градиента температуры на изображение. Рассмотрел случаи линейного и параболического распределения температуры в плоскопараллельной пластинке, клине и линзе.

В исследовании принято, что коэффициенты линейного расширения и температурные

коэффициенты показателей преломления постоянны, градиент температуры направлен перпендикулярно оси симметрии оптической детали, лучи образуют малые углы с оптической осью. Напряжения в материале не приняты во внимание. Он показал, что неравномерность распределения температуры может вызывать в зависимости от формы оптической детали и закона распределения температуры дефокусировку изображения, кому или сферическую aberrацию.

Дальнейшее обобщение и развитие проблемы температурных эффектов в оптических системах получила в работах Шрамко Ю.П. (1972-1990) [12-14] и Jamieson'a E.H. (1981) [15].

Шрамко Ю.П. создана практическая методика и программа расчета термооптических aberrаций высокоточных оптических систем и их элементов, которые эксплуатируются в условиях изменяющихся внешних тепловых потоков, проведён значительный объем работ по расчету и оптимизации тепловых режимов различного типа оптических систем.

В работах Дульнева Г.Н. и его учеников [16-21] развиты инженерные методы расчета температурных полей электронных блоков и устройств, объективов, крупногабаритных телескопов, систем накачки и активных тел лазеров, различных типов оптико-электронных приборов. Среди этого внушительного объема публикаций следует отметить исследования Ушаковской Е.Д. и Парфенова В.Г., в которых предложена последовательность анализа влияния теплового режима на работу и выходные характеристики оптико-электронных приборов, проведены расчеты конкретных приборов.

Поэтапный метод моделирования теплового режима [17] основан на последовательном использовании математических моделей, соответствующих различным уровням иерархии. Для расчетов сложной системы предложена четырехуровневая иерархия [18]. К первому уровню относятся отдельные детали: зеркала, линзы, оправы, корпусные элементы и т.д., ко второму – оптические, механические, электронные устройства: лазеры,

объективы и т.д., к третьему – оптико-электронные приборы, а к четвертому – приборы в приборных отсеках. Начиная с верхнего, на каждом последующем уровне иерархии рассчитываются средние температуры отдельных областей, которые необходимы для определения конструктивных параметров, соответствующих этому уровню. Внутренняя структура областей учитывается через их усредненные характеристики. Найденные пространственно-временные распределения тепловых потоков, коэффициентов теплоотдачи и температур окружающей среды используются в качестве граничных условий на последующем уровне иерархии. Т.о. моделирование теплового режима системы проводится поэтапно с постепенным переходом от верхнего (четвертого) уровня иерархии к нижнему, включающему простейшие области – детали.

В аналитическом обзоре (1993) [22] систематизированы работы по теоретическим основам термооптики, методам математического моделирования и способам тепловой защиты оптических приборов. Введены понятия статической и динамической термооптической дефокусировки, предложен алгоритм проектирования средств термозащиты оптических приборов.

В работе Савицкого А.М. (2009) [23] предложено тепловой режим космического телескопа характеризовать «температурными параметрами» элементов конструкции (ЭК), к которым относятся: диапазон изменения температуры ЭК, средняя температура ЭК, перепад температур по ЭК, разность средних температур различных ЭК, а также их изменение во времени. Для телескопа, построенного по схеме Ричи-Кретьена, предложены простые соотношения между температурными параметрами ЭК телескопа и смещениями, а также наклонами оптических компонентов. Введение в состав космического телескопа автоматических систем фокусировки и юстировки позволяет корректировать взаимное положение оптических компонентов и восстанавливать качество изображения телескопа.

Ханков С.И. и его аспиранты Лаповок Е.В.,

Баева Ю.В. [24-28] разработали аналитические методы расчета термоаббераций двухзеркальных анаберрационных систем телескопов, типа Грегори и Кассегрена, с учетом влияния осевых и радиальных перепадов в зеркалах, предложили аналитические методы расчета внешних лучистых тепловых потоков на телескоп в условиях орбитальной эксплуатации. Разработанные методы применены в практических расчетах теплового режима, термоаббераций и для обоснования требований по обеспечению термостабильности солнечного лимбографа СЛ-200.

История методов анализа термостабильности оптических и оптико-электронных приборов неразрывно связана с этапами развития вычислительной техники. С появлением мощных отечественных ЭВМ (Минск, БЭСМ) в 1960-80 годы на кафедрах и предприятиях страны создавались специализированные вычислительные программы, среди которых наиболее известны:

- в области механики - конечно-элементные комплексы ЛИРА, ПЛАНК, СУМРАК,
- в области оптики – (600-е оптические программы ГОИ, ОПАЛ, ДЕМОС),
- в области тепловых расчетов (программы кафедры теплофизики ЛИТМО, ТЕРМ, ТЕПЛО).

Шрамко Ю.П. были разработаны и успешно применялись оригинальные программы сквозного расчета анализа влияния температурных полей на выходные характеристики высокоточных объективов. Совокупность всего программного обеспечения по оптике, механике, анализу теплообмена обеспечила адекватное моделирование и сквозные расчеты влияния теплообмена на выходные характеристики СА. Эти работы в 60-80-е годы успешно выполнялись коллективами разработчиков СА оптических предприятий страны, в т.ч. СКБ-1 Красногорского завода. Специалистами СКБ-1 были созданы уникальные оптико-фотографические и оптико-электронные комплексы СА [29], превосходящие лучшие зарубежные аналоги, обеспечившие обороноспособность страны. Исторически сложившийся «промышленный подход» к выполнению ОКР характеризовался:

- совместным единовременным, информационно открытым трудом узких специалистов, работающих на предприятиях кооперации,

- наличием ведущих и главных конструкторов проекта, обеспечивающих координацию и управление проектом, владеющими необходимыми специальными знаниями,

- максимально возможным полным ресурсным обеспечением проекта, в т.ч. доступностью всех известных методов и программ.

Развитие возможностей персональных ЭВМ в 90-годы совпало с «перестройкой», развалом электронной промышленности страны, остановкой разработок отечественного программного обеспечения и САПР, в т.ч. программ для решения приборостроительных задач механики, оптики и теплообмена. Последние 25 лет во всех научных коллективах, кафедрах и предприятиях страны повсеместно внедрялись зарубежные системы CAD/CAM/CAE, в том числе специализированные программные комплексы типа ANSYS, Patran, ZEMAX. Некоторым научным школам и производственным коллективам все же удалось сохранить наработанный потенциал в своих профессиональных нишах, к ним можно отнести Кафедру Прикладной и компьютерной оптики (программный комплекс ОПАЛ), Кафедру Компьютерной теплофизики и энергофизического мониторинга ИТМО, научно-педагогический коллектив которой активно развивает аналитические подходы к решению задач теплообмена и термостабильности оптико-электронных приборов. Буквально единицам удалось создать отечественные программные продукты лидирующие на международном рынке (OptiLayer разработка НИВЦ МГУ Тихонравов А.В., Трубецков М.К. [30]).

Сегодня в России состояние «инструментов», обеспечивающих инженерные расчеты (механика, оптика, теплообмен) имеет три характерных особенности:

- неофициально признанный стандарт – использование в инженерных расчетах зарубежных САЕ, в т.ч. «массовых» комплексов ANSYS, ZEMAX [31],

- сохранившийся огромный научный, ана-

литический потенциал научных коллективов университетов и разработчиков предприятий промышленности в специальных областях знаний, который не «положен» в отечественные программные продукты,

- тенденция постоянного развития зарубежных программных средств, появление программных комплексов, интегрирующих инструменты различных областей знаний (в т.ч. программы OFELIA, SigFit для решения задач термооптики [32-33]) и их активных продаж в России.

Изменение позиции государства к приборостроительной промышленности, успехи ИТМО [34] в международных программистских олимпиадах позволяют надеяться, что специалисты России «переварят иностранные инструменты», и в недалеком будущем появятся более совершенные интеллектуальные комплексы инженерного программного обеспечения, превосходящие по своим потребительским свойствам известные зарубежные аналоги.

#### ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О СЪЕМОЧНОЙ АППАРАТУРЕ

Общепринято различать следующие основные классы съемочной аппаратуры (СА) [35]:

- аппаратура высокого пространственного разрешения (АВР) предназначена для получения панхроматического или многоспектрального изображения с пространственным разрешением до 1 м,

- *аппаратура среднего пространственного разрешения (АСР)* обеспечивает разрешение от 1 до 20 м,

- *аппаратура низкого пространственного разрешения (АНР)* – более 20 м,

- *гиперспектральная аппаратура (ГСА)*, предназначена для получения изображений более чем в 100 спектральных диапазонах,

- *изображающие ИК фурье-спектрометры (ИКФС)* предназначены для мониторинга спектральных тепловых излучений атмосферы Земли,

- *топографическая съемочная аппаратура (ТА)* предназначена для получения стереоизображений с высокой фотограмметрической точностью.

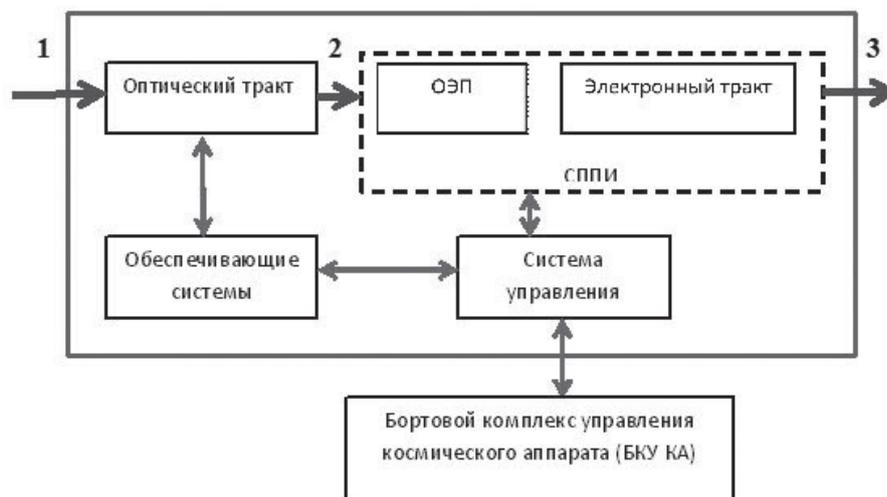


Рисунок 1.

Укрупненная структурно-функциональная схема СА

Укрупненная структурно-функциональная схема СА представлена на рис. 1.

Солнечное излучение, отраженное от подстилающей поверхности, дважды проходит через атмосферу Земли, поступает (1) в оптический тракт, преобразуется оптическим трактом в изображение подстилающей поверхности (2), регистрируется оптико-электронным преобразователем (ОЭП), далее в электронном тракте преобразуется в цифровой сигнал от каждого пиксела, который передается (3) в высокоскоростную линию связи для передачи на Землю. ОЭП и блоки электронного тракта в отечественных проектах принято называть система приема и предразования информации (СППИ). Аббревиатура СППИ<sup>TM</sup> – товарный знак НПП ОПТЭКС [36]. В состав СА также входят обеспечивающие системы и система управления, реализующие автоматическое управление работой СА по командам БКУ КА.

Разделение СА на классы обусловлено различными целевыми задачами и выходными информационными параметрами и, как следствие, различными схемами построения оптического тракта СА.

В состав оптического тракта типичной АВР [37] входит объектив и блок светофильтров, устанавливаемый перед приемниками изображения. Для получения детального пространственного разрешения объектив строится на основе длиннофокусных линзовых апохроматов, зеркальных или зеркально-

линзовых оптических систем типа Корша, Риччи-Кретьена и т.п.

В состав оптического тракта типичной АСР [38] входит объектив и призменное спектроразделительное устройство, предназначенное для апертурного разделения спектральных каналов, или блок светофильтров для случая полевого разделения спектральных каналов. В качестве объективов используются широкоугольные линзовые апохроматы или зеркальная схема Кука.

АНР предназначена для получения панорамных изображений, поэтому типичный оптический тракт АНР [39] строится на основе сканирующего зеркала, линзового или зеркального объектива, блока светофильтров.

В состав оптического тракта ГСА [40] входят изображающий объектив и спектрометр, содержащий коллимирующий объектив, дисперсионное устройство, фокусирующий объектив. В состав ГСА может также входить сканирующее зеркало, обеспечивающее либо тангажное замедление съемки, либо сканирование поперек направления полета с целью получения больших захватов.

Гиперспектральная съемка предназначена для получения гиперкуба данных – совокупности снимков одного и того же сюжета, полученных одновременно в более чем 100 узких спектральных зонах. Спектральные приборы делятся на два типа [41]:

– приборы, регистрирующие непосредственно спектр излучения – классические

спектрометры (дисперсионные, решеточные, приборы со сменными фильтрами),

– приборы, регистрирующие интерферограмму (статические спектрометры, динамические Фурье-спектрометры).

В соответствии с принятой классификацией гиперспектральная аппаратура (ГСА), объединяющая в своем составе изображающий объектив и спектрометр, также делится на два типа [42]:

– видеоспектрометры или ГСА, спектрометры которой строятся на основе разложения входного излучения в спектр с помощью призм, дифракционных решеток или с помощью набора фильтров,

– изображающие интерферометры, спектрометры которых строятся на основе интерферометра.

К второму типу ГСА относятся также изображающие ИК фурье-спектрометры (ИКФС) предназначенные для регистрации излучений газовых сред с предельно высоким спектральным и низким пространственным разрешением [43].

Типичный оптический тракт ТА [44] содержит два или более объективов, оптические оси которых развернуты по направлению полета для получения стереоизображений и блоков светофильтров.

Несмотря на существенные различия построения оптического тракта и большое разнообразие оптических систем объективов, качество изображений для всех классов СА принято описывать однотипным набором выходных информационных характеристик, среди которых выделяются основные группы параметры:

- пространственно-частотные (частотно-контрастная характеристика),

- радиометрические (отношение сигнал/шум, спектральная чувствительность, светосигнальная характеристика),

- фотограмметрические (фокусное расстояние, дисторсия и положение узловой точки).

Сохранность перечисленных параметров СА в заданных условиях теплообмена определяет ее термостабильность.

#### Список литературы:

1. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. – М.: Наука. – 1970.
2. ГОСТ РВ 20.39.304-98. Комплексная система общих технических требований. Аппаратура, приборы, устройства и оборудование военного назначения. требования стойкости к внешним воздействующим факторам.
3. Коваленко А.Д. Термоупругость. Учебное пособие. – К.: Вища школа, 1975.
4. Kruger A. Notiz uber die Veranderungen der Beeren Weile der Objective durch Temperatur und Luftdruck. // Astr.Nachr., 1863, № 1421.
5. Sonnefeld A. Zentr. Optic. Mech //Augen Optik, 1933, vol.54, №3.
6. Максумов Д.Д. О температурном коэффициенте фокусного расстояния объектива. //Цирк. ГАО в Пулково, 1936, № 20, с.37.
7. ГОСТ 13659-78 Стекло оптическое бесцветное. Физико-химические характеристики. Основные параметры.
8. Perry J.W. Termal effects upon the performance of lens systems.// Proc. of the Phys. Soc., 1943, № 310, vol.55, p.257-285.
9. Волосов Д.С. Основы теории термооптических aberrаций I./ Оптика и спектр.,1958, вып.5, с.663-669.
10. Волосов Д.С. Основы теории термооптических aberrаций II./ Оптика и спектр.,1958,с вып.6, с.772-778.
11. Слюсарев Г.Г. Влияние термического градиента стекла оптических систем на изображение, даваемое последними. // Оптика и спектр., 1959, том 6, вып 2, с.211-217.
12. Шрамко Ю.П. Влияние теплового режима иллюминатора на деформацию фронта волны. // ОМП, 1972, № 3, с.14-17.
13. Шрамко Ю.П., Виноградов В.Д. Влияние теплового режима на качество изображения объектива «Зикар-2Б.// ВОТ, 1979, вып. 140.
14. Шрамко Ю.П., Нифонтова Е.Г. Влияние градиентов температуры на качество изображения линзовых объективов. // ОМП, 1990, № 1, с.25-29.
15. Jamieson T.H. Thermal effects in optical systems.// Opt.Eng, 1981, vol.20, №2, p.156-160.
16. Дульнев Г.Н., Тарновский Н.Н. Теплообмен в радиоэлектронных аппаратах. – Л.: Энергия, 1968.
17. Дульнев Г.Н., Сигалов А.В. Поэтапное моделирование теплового режима сложных систем.// ИФЖ. –1983. – том 45.-№ 4, с.651-656.

18. Дульнев Г.Н., Ушаковская Е.Д. Тепловое и математическое моделирование оптико-электронных приборов // ИФЖ, 1984, том 46, № 4. – с.659-666.
19. Дульнев Г.Н., Ушаковская Е.Д., Цуканова Г.И. Термооптические процессы в зеркально-линзовых объективах. I. Схема синтеза термостабильного телескопа. // ИФЖ, 1987, том 52, № 5, с.827-833.
20. Дульнев Г.Н., Цуканова Г.И., Ушаковская Е.Д. Термооптические процессы в зеркально-линзовых объективах. II. Поэтапное моделирование термооптических процессов. // ИФЖ, 1987, том 53, № 1, с.101-106.
21. Дульнев Г.Н., Парфенов В.Г., Баранцев В.В. Моделирование тепловых режимов объективов оптико-электронных приборов // ИФЖ, 1988, том 54, № 6, с.995-1002.
22. Архипов С.А., Ефимов Е.Н. Влияние тепловых режимов на выходные характеристики и способы тепловой защиты высокоточных оптических приборов и устройств. Обзор №3546. – М.: НТЦ «Информатика», 1993.
23. Савицкий А.М. Влияние теплового режима на конструктивные характеристики космического телескопа. // ОЖ, 2009, № 10, с.89-93.
24. Трунева Е.В., Ханков С.И. Термооптические aberrации зеркал с центральным отверстием // ОМП, 1986, № 6, с.8-10.
25. Ханков С.И. Расчет влияния направления и интенсивности теплоотвода на термооптические aberrации фокусирующих зеркал // ОМП, 1986, № 7, с.21-24.
26. Абдусаматов Х.И., Лаповок Е.В., Ханков С.И. Методы обеспечения термостабильности космического телескопа солнечного лимбографа. – СПб, Изд-во Политехнического университета, 2008.
27. Баёва Ю.В., Ханков С.И. Аналитическая методика расчета термоаббераций телескопа при кратковременном режиме съемки поверхности Земли. // ОЖ, 2012, № 10, с. 42-46.
28. Баёва Ю.В., Лаповок Е.В., Ханков С.И. Термооптическая aberrация положения изображения в зеркальных телескопах // ОЖ., 2013, №3., с. 30-29.
29. Архипов С.А. 70 лет Специальному Конструкторскому Бюро-1 ОАО «Красногорского завода им. С.А. Зверева» // Научно-технический журнал «Контенант», 2014, том 13, №3.
30. www.optilayer.com/
31. Цаплин С.В., Большев С.А., Романов А.Е. Основы теплообмена космических аппаратов. – Самара: Самарский университет, 2013.
32. old.beepitron.com/Oofelie::Multiphysics
33. http://sigmadyne.com/sigfit-software/
34. Васильев В.Н., Парфенов В.Г. Истории кафедры «Компьютерные технологии» НИУ ИТМО. – СПб: НИУ ИТМО, 2013.
35. Ежегодник «Космическая съёмка Земли» (с приложением на CD). Главный редактор Ю.А. Подъездов
36. Бакланов А.И. Системы наблюдения и мониторинга. – М.: Бином, 2009.
37. Архипов С.А., Бакланов А.И., Герасименко В.В. Многоспектральная оптико-электронная аппаратура «Геотон» космического аппарата «Ресурс-П» // Исследование Земли из космоса, 2014, №2, с.44-54.
38. Архипов С.А., Заварзин В.И., Сенник Б.Н. Современные тенденции в разработке и изготовлении оптических систем для перспективной космической аппаратуры дистанционного зондирования Земли // ОЖ, 2013, том 80, № 1, с.34-38.
39. Акимов Н.П. и др. Многозональное сканирующее устройство для дистанционного получения изображения земли с геостационарных орбит. – Патент РФ 2319183.
40. Архипов С.А., Бакланов А.И., Линько В.М. Гиперспектральная съемочная аппаратура для космического аппарата «Ресурс-П» // Исследование Земли из космоса, 2014, №3, с.1-12.
41. Толмачев Ю.А. Новые спектральные приборы. Принципы работы. – ЛГУ, 1976.
42. Горбунов Г.Г., Демин А.В. и др. Гиперспектральная аппаратура для дистанционного зондирования Земли // ОЖ, том 75, № 10, с.76-82.
43. Завелевич Ф.С., Головин Ю.М., и др. Бортовой инфракрасный фурье-спектрометр ИКФС-2: характеристики летного образца // Сб. тезисов докладов научно-технической конференции «Гиперспектральные приборы и технологии». ОАО «Красногорский завод им. С.А. Зверева». – Контенант, 2013, с. 83-84.
44. D. Subrahmanyam et al. Design and development of the Cartosat payload for IRS P5 mission // Proceedings of SPIE, 'Multispectral, Hyperspectral, and Ultraspectral Remote Sensing Technology, Techniques, and Applications', Vol. 6405, 2006.

# ТЕРМОСТАБИЛЬНОСТЬ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОЙ СЪЕМОЧНОЙ АППАРАТУРЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ.

## Часть II

АРХИПОВ С.А.

ПАО «Красногорский завод им. С.А. Зверева»

E-mail: arhipof@zenit-kmz.ru

*Во второй части статьи рассмотрены вопросы теоретических основ термостабильности, описаны тепловые, механические и оптические модели съемочной аппаратуры дистанционного зондирования Земли (СА). Предложено различать внешние, внутренние и конструктивные оптические модели. Совокупность моделей описывает физические механизмы влияния условий теплообмена на пространственно-частотные, фотограмметрические и радиометрические выходные характеристики СА.*

**Ключевые слова:** термостабильность, съемочная аппаратура, тепловой режим, напряженно-деформированное состояние, термоабберации, тепловая, механическая, оптическая модель.

В эксплуатации съемочная аппаратура (СА) находится в неоднородных, переменных тепловых условиях, отличных от условий, при которых она настраивалась и юстировалась, что приводит к снижению выходных характеристик. Причинно-следственные связи, описывающие физические механизмы влияния тепловых условий эксплуатации СА на ее выходные характеристики, схематично изображены на рис. 1.

Далее последовательно рассмотрим модели, указанные на рис. 1.

**Тепловая модель** описывает влияние внешних тепловых потоков и температур элементов конструкции КА на распределение температур в СА.

Механизмы, характер и условия теплообмена космического аппарата (КА) и СА, как его составной части (или «полезной нагрузки»), во многом идентичны, что позволяет использовать модели и методы, разработанные для анализа теплообмена КА в космосе [1-3], также и для расчета теплообмена СА в эксплуатации.

Тепловой баланс элемента внешней поверхности СА определяется следующим образом:

$$\frac{mc}{F} \cdot \frac{dT}{dt} = q_c A_s + q_{co} A_s \varphi_{\kappa-3} + q_z \varepsilon \varphi_{\kappa-3} + \sum_k Q_{\kappa-k} + \sum_i Q_{\kappa-i} + Q_{\kappa-KA} - \varepsilon \sigma T^4 \quad (1)$$

где:  $q_c$  – плотность потока солнечного излучения,

$q_{co}$  – плотность потока отраженного от Земли солнечного излучения,

$q_z$  – плотность потока излучения Земли,

$Q_{\kappa-KA}$  – тепловой поток от элементов конструкции КА,

$Q_{\kappa-k}$  – тепловой поток от элементов внешней поверхности СА,

$Q_{\kappa-i}$  – тепловой поток от внутренних элементов СА,

$\sigma$  – постоянная Стефана-Больцмана, для  $\kappa$ -того элемента внешней поверхности:

$T$  – абсолютная температура,

$m$  – масса,

$c$  – удельная теплоемкость,

$F$  – площадь,

$A_s$  – коэффициент поглощения солнечного излучения,

$\varepsilon$  – степень черноты,

$\varphi_{\kappa-3}$  – коэффициент облученности элемента с Землей.

Модель внешнего теплообмена описывает распределение по поверхности СА поглощенной лучистой энергии и его изменение в зависимости положения на орбите. Степень сложности модели внешнего теплообмена или «подробность» разбиения на элементарные

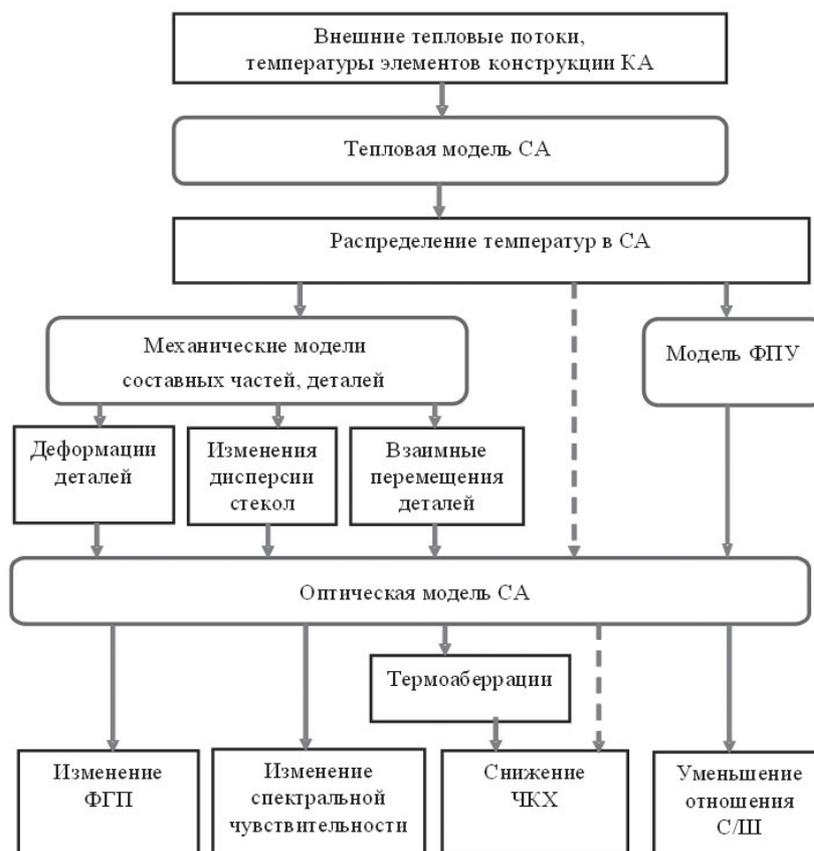


Рисунок 1.

Схема связи моделей, описывающих термостабильность СА

площадки внешней поверхности СА и, соответственно, число уравнений (1) зависят от:

- цели исследования, которая требует адекватного описания теплового режима СА,
- наличия сведений о характеристиках орбиты, конструкции внешней поверхности СА, геометрическом «затенении» СА конструктивными элементами КА, сведений о радиационных характеристиках и коэффициентах облученности внешних поверхностей СА.

Внутренний теплообмен СА, используя метод узлов [2], можно описать системой уравнений теплового баланса.

$$m_i c_i \cdot \frac{dT_i}{dt} = \sum_j \sigma_{i-j} (T_i - T_j) - \sum_k Q_{k-i} + W_i \quad (2)$$

где:  $i=1...N$  – номер узла (элемента),  $j$  – номер другого узла,

для  $i$ -го узла:

$T_i$  – абсолютная температура,

$m_i$  – масса,

$c_i$  – удельная теплоемкость,

$\sigma_{i-j}$  – тепловая проводимость между  $i$ -ым и  $j$ -ым узлами,

$Q_{i-k} = \sigma_{k-i} (T_i - T_k)$  – тепловой поток между  $k$ -ым элементом внешней поверхности СА и  $i$ -ым элементом конструкции СА,

$W_i$  – тепловыделения.

Степень сложности модели внутреннего теплообмена, аналогично внешнему, зависит от:

- цели исследования,
- априорных сведений по составу, конструкции СА, тепловыделениям в ее электронных блоках, наличия сведений о теплофизических свойствах материалов и радиационных характеристиках поверхностей.

Совокупность уравнений внешнего (1) и внутреннего (2) теплообмена составляет **тепловую модель СА**. Прямое решение тепловой модели, т.е. системы дифференциальных уравнений (1-2), возможно получить лишь численными методами [4].

Для расчетов теплового режима СА, с учетом небольшого интервала изменения температур элементов СА (до 10-20 градусов), принимается допущение о линейности лучистого теплообмена, производные по времени

заменяются конечными разностями, таким образом система (1-2) может быть сведена к системе линейных уравнений с постоянными коэффициентами, методы решения которой известны.

Вопросы теплообмена СА в наземных условиях актуальны при ее настройках, юстировках и контроле. В тепловой модели СА для наземных условий необходимо, дополнительно к кондуктивной и лучистой, учитывать конвективную составляющую теплообмена в самой СА и в окружающем ее пространстве, в зоне оптического контроля выходных параметров.

**Механические модели** составных частей и деталей СА связывают распределение температур с их напряженно-деформированным состоянием. Перепады температур между составными частями СА приводят к неравномерным температурным расширениям элементов несущей конструкции СА и, как следствие, к взаимному линейному смещению и угловому развороту оптических деталей. Изменения распределения температур в оптических деталях, вследствие их температурных деформаций, вызывает искажение форм рабочих поверхностей. Напряженно-деформированное состояние детали описывается линейными уравнениями теории упругости, которые в декартовых координатах для элементарного объема и изотропного материала запишем в матричной форме [5]:  $\tau$

#### Уравнения равновесия

$$\mathbf{A} \boldsymbol{\sigma} + \mathbf{g} = \mathbf{0} \quad (3)$$

где:  $\boldsymbol{\sigma}^T = [\sigma_x \sigma_y \sigma_z \tau_{xy} \tau_{yz} \tau_{zx}]$  – вектор напряжений,

$\mathbf{g}^T = [X \ Y \ Z]$  – вектор интенсивности объемной нагрузки,

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial x} & 0 & \frac{\partial}{\partial z} \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 & \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial z} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} & 0 & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix} \text{ – матрица операторов дифференцирования.}$$

#### Геометрические уравнения (уравнения Коши)

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{A}^T \mathbf{u} \quad (4)$$

где:  $\boldsymbol{\varepsilon}^T = T [\varepsilon_x \varepsilon_y \varepsilon_z \varepsilon_{xy} \varepsilon_{yz} \varepsilon_{zx}]$  – вектор деформаций,

$\mathbf{u}^T = [u \ v \ w]$  – вектор перемещений,

#### Физические уравнения (закон Гука)

В прямой форме:

$$\boldsymbol{\varepsilon} - \boldsymbol{\varepsilon}_0 = \mathbf{C} \boldsymbol{\sigma} \quad (5)$$

где:  $\boldsymbol{\varepsilon}_0 = \alpha T [1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0]^T$  – вектор температурной (начальной) деформации,

$T$  – операция транспонирования,

$T = T(x, y, z)$  – температура элементарного объема  $dx dy dz$

– матрица податливости материала,

$$\mathbf{C} = \frac{1}{E} \begin{bmatrix} 1 & -\nu & -\nu & 0 & 0 & 0 \\ -\nu & 1 & -\nu & 0 & 0 & 0 \\ -\nu & -\nu & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2(1+\nu) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2(1+\nu) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2(1+\nu) \end{bmatrix} \text{ –}$$

$E$  – модуль Юнга,

$\nu$  – коэффициент Пуассона.

В обратной форме:

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{D} \boldsymbol{\varepsilon} - \mathbf{D} \boldsymbol{\varepsilon}_0 \quad (6)$$

где:

$$\mathbf{D} = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1 & \frac{\nu}{1-\nu} & \frac{\nu}{1-\nu} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu}{1-\nu} & 1 & \frac{\nu}{1-\nu} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu}{1-\nu} & \frac{\nu}{1-\nu} & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} \end{bmatrix}$$

– матрица жесткости материала.

Система уравнений (3-5) теории упругости замкнута – число уравнений (3+6+6) совпадает с числом неизвестных (6 – напряжений, 6 – деформаций, 3 – перемещения). При задании необходимых граничных условий на по-

верхности тела, в виде заданных перемещений или поверхностных нагрузок и распределения температур в теле  $T = T(x, y, z)$  система уравнений (3-5) является **механической моделью** детали или элемента конструкции СА.

Наиболее эффективным методом расчета широкого круга задач механики твердого деформируемого тела, в том числе и задачи (3-5), является метод конечных элементов (МКЭ). Цель МКЭ – нахождение перемещений узлов под действием внешних нагрузок при заданных граничных условиях. Рассмотрим далее кратко его суть [6].

Тело «разрезается» на конечное число  $m$  мелких частей (называемых «конечными элементами» – КЭ), имеющих сравнительно простую и однотипную форму. КЭ имеют общие узловые точки (называемые «узлы»). Перемещения  $\mathbf{u}^i$  внутри  $i$ -го КЭ выражаются через перемещения узлов  $\mathbf{U}^i$  простыми интерполяционными полиномами первой или второй степени.

$$\mathbf{u}^i = \mathbf{N}^i \mathbf{U}^i, \quad (7)$$

где  $\mathbf{N}^i$  – матрица интерполяционных полиномов (называется «матрица функций формы»).

С помощью формул (4) для  $i$ -го КЭ можно выразить вектор деформаций  $\boldsymbol{\varepsilon}^i$  через узловые перемещения  $\mathbf{U}^i$ .

$$\boldsymbol{\varepsilon}^i = \mathbf{B}^i \mathbf{U}^i, \quad (8)$$

где  $\mathbf{B}^i$  – матрица, получаемая дифференцированием матрицы  $\mathbf{N}^i$  по правилам формулы (4).

Формулы (5) позволяют для  $i$ -го КЭ выразить вектор напряжений через узловые перемещения  $\mathbf{U}^i$

$$\boldsymbol{\sigma}^i = \mathbf{D} \mathbf{B}^i \mathbf{U}^i - \mathbf{D} \boldsymbol{\varepsilon}_0^i \quad (9)$$

Потенциальная энергия  $i$ -го КЭ объемом  $V^i$  и площадью  $S^i$  равна энергии деформации (1-й интеграл) за вычетом работы объемных сил (2-й интеграл) и работы поверхностных сил (3-й интеграл):

$$\Pi^i = \int_{V^i} \left( \frac{1}{2} \boldsymbol{\varepsilon}^{i^T} \boldsymbol{\sigma}^i - \frac{1}{2} \boldsymbol{\varepsilon}_0^{i^T} \boldsymbol{\sigma}^i \right) dV^i - \int_{V^i} \mathbf{u}^{i^T} \mathbf{g}^i dV^i - \int_S \mathbf{u}^{i^T} \mathbf{p}^i dS^i \quad (10)$$

где  $\mathbf{g}^i$  – вектор объемных сил действующих в  $i$ -ом КЭ,

$\mathbf{p}^i$  – вектор поверхностных сил действующих на грани  $i$ -го КЭ.

Подставив в (10) выражения перемещений (7), деформаций (8) и напряжений (9) получим потенциальную энергию КЭ, которая зависит от перемещений узлов.

$$\Pi^i = \Pi^i(\mathbf{U}^i) \quad (11)$$

Полная потенциальная энергия тела объемом  $V$  состоит из суммы потенциальных энергий всех КЭ ( $i=1 \dots m$ ), на которые было «разрезано» тело.

$$\Pi = \sum_{i=1}^m \Pi^i(\mathbf{U}) \quad (12)$$

В соответствии с вариационным принципом Лагранжа функционал полной потенциальной энергии имеет минимальное значение для истинных перемещений, то есть таких перемещений, при которых тело находится в равновесии. Таким образом дифференцируя (12) по  $\mathbf{U}$  и приравнявая результат к нулю, получаем разрешающую систему линейных уравнений МКЭ.

$$\mathbf{K} \mathbf{U} = \mathbf{F} \quad (13)$$

где

$\mathbf{K} = \sum_{i=1}^m \mathbf{K}^i$  – глобальная матрица жесткости,

$\mathbf{K}^i = \int_{V^i} \mathbf{B}^{i^T} \mathbf{D} \mathbf{B}^i dV^i$  – матрица жесткости КЭ,

$\mathbf{F} = \sum_{i=1}^m \mathbf{F}^i$  – вектор-столбец,

$\mathbf{F}^i = - \int_{V^i} \mathbf{B}^{i^T} \mathbf{D} \boldsymbol{\varepsilon}_0^i dV^i - \int_{V^i} \mathbf{N}^{i^T} \mathbf{g}^i dV^i - \int_S \mathbf{N}^{i^T} \mathbf{p}^i dS^i$  –

– вектор сил в узлах КЭ, обусловленных температурным расширением КЭ, объемными и поверхностными нагрузками.

После решения системы уравнений (13), т.е. определения перемещений узлов, в рамках МКЭ по формулам (8-9) находятся деформации и напряжения в КЭ.

МКЭ реализован практически во всех САД системах и специализированных комплексах

(ANSYS, Patran и др.), использование которых дает возможность детального анализа напряженно-деформированного состояния оптических деталей и элементов конструкции СА.

### ИЗМЕНЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ

Зависимость показателя преломления среды от длины волны (частоты) проходящего через нее света и плотности среды обоснована в классической теории дисперсии [7]. Формула Лорентц-Лоренца устанавливает связь между средней поляризуемостью  $p$  и показателем преломления среды  $n$ :

$$p = \frac{3}{4\pi N} \frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} \quad (14)$$

где  $N$  – число атомов в единице объема (плотность среды).

Атомы среды, в которой распространяется свет, представляются осцилляторами с собственной частотой  $\omega_0$  (частота линии поглощения в спектре). Тогда решение уравнения осциллятора для электрона массой  $m$  и зарядом  $e$  под действием электромагнитной волны света с частотой  $\omega$  позволяет выразить среднюю поляризуемость через атомные параметры:

$$p = \frac{e^2}{m(\omega_0^2 - \omega^2)} \quad (15)$$

Подставив (14) в (15), получим зависимость (16) величины показателя преломления от разности между собственной частотой и частотой света и от числа атомов в единице объема:

$$\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} = \frac{4\pi}{3} \frac{Ne^2}{m(\omega_0^2 - \omega^2)} \quad (16)$$

Экспериментально установлено, что для большого количества диэлектриков при повышении температуры среды  $t$  резонансные частоты при постоянной плотности смещаются в длинноволновую сторону, т.е. температурное изменение показателя преломления  $dn/dt > 0$ . При нагревании практически все вещества расширяются, что приводит к

уменьшению плотности и, соответственно,  $dn/dt < 0$ .

Величина и знак суммарного коэффициента температурного изменения показателя преломления  $\beta = dn/dt$  зависят от конкретного материала. Для оптических стекол коэффициенты  $\beta$  экспериментально измерены и приведены в ГОСТ 13659-80 [8].

Изменение температуры приводит к смещению полосы пропускания интерференционных фильтров [9]. Величины коэффициента  $\beta = dn/dt$  и  $\alpha$  – коэффициента температурного расширения, известные для массивных материалов, могут отличаться для тонких слоев из этих материалов за счет структуры слоя, его пористости и материала, заполняющего поры. Поэтому для корректных оценок влияния температуры на спектральное пропускание интерференционного фильтра необходимо экспериментально измерять коэффициенты  $\alpha$  и  $\beta$  для материалов, используемых для слоев по заданной технологии.

### ЭФФЕКТ ФОТОУПРУГОСТИ

Неравномерные температурные поля в линзах, защитных стеклах, призмах, вызывают напряжения и, вследствие эффекта фотоупругости, стекло становится анизотропным, изменяется его показатель преломления, возникает двойное лучепреломление.

Из кристаллооптики известно [7]: когда кристаллическое тело подвергнуто напряжению, изменения компонент тензора его диэлектрической проницаемости (6 компонент) линейно связаны упруго-оптическими коэффициентами с шестью компонентами тензора напряжений. Для изотропных сред (в том числе для стекла) имеется всего лишь два независимых упруго-оптических коэффициента  $q_{11}$  и  $q_{12}$ . Стекло в плоском напряженном состоянии подобно одноосному кристаллу, оптическая ось которого совпадает с главным напряжением  $\sigma_j$ .

Изменения показателя преломления пропорциональны величине напряжений и описывается формулами:

$$\begin{aligned} \Delta n' &= -\frac{n^3}{2} q_{11} (\sigma_1 - \sigma_2) = C_1 (\sigma_1 - \sigma_2) \\ \Delta n'' &= -\frac{n^3}{2} q_{12} (\sigma_1 - \sigma_2) = C_2 (\sigma_1 - \sigma_2) \end{aligned} \quad (17)$$

где  $n$  – показатель преломления ненапряженного стекла,

$n'$  и  $n''$  – показатели преломления напряженного стекла для света с колебаниями параллельными направлению действия главных напряжений  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  соответственно,

$C_1$  и  $C_2$  – фотоупругие постоянные стекла.

Плоский волновой фронт света, падающий нормально на пластинку толщиной  $h$ , находящуюся в плоском напряженном состоянии, разделяется на две взаимоперпендикулярных волны, между которыми, по выходу из пластинки, разность хода  $\delta$  составит:

$$\delta = h(C_1 - C_2)(\sigma_1 - \sigma_2) \quad (18)$$

Фотоупругие постоянные оптических стекол приведены в каталоге [8].

**Модель ФПУ** связывает основные характеристики фотоприемного устройства (ФПУ) с его температурой.

Разнообразие характеристик, физических эффектов и конструкций ФПУ описано в обширной литературе [10-13]. С точки зрения оптической радиометрии ФПУ является ключевым элементом, обеспечивающим достоверность и прослеживаемость к эталону параметров регистрируемого излучения, и, в этой связи, получает специальное наименование – оптоэлектронный измерительный преобразователь [14]. В зависимости от физического принципа работы принято разделять ФПУ на тепловые и фотонные (работающие на внешнем фотоэффекте или на внутреннем фотоэффекте). Выбор ФПУ для конкретной СА определяется его спектральной избирательностью. Основные характеристики ФПУ:

- относительная спектральная чувствительность,
- абсолютная светосигнальная характеристика,
- постоянная времени,
- зонная характеристика, определяющая распределение светосигнальной характеристики по светочувствительной поверхности ФПУ,
- квантовый выход (для фотонных ФПУ),
- $NEP$  - шумовая эквивалентная мощность

(порог чувствительности), т. е. оптическая мощность в ваттах, требуемая для генерирования фототока при отношении  $C/Ш = 1$ , отнесенная к чувствительности ФПУ;  $NEP$  интегрально характеризует шумы различной физической природы (фотонный шум, тепловой ток, дробовый, генерационно-рекомбинационный, температурный шумы и др.); удельная обнаружительная способность  $D^*$  связана с  $NEP$ :

$$D^* = \frac{\sqrt{A \Delta f}}{NEP} \left[ \frac{cm\sqrt{Гц}}{Вт} \right]$$

где  $A$  – активная площадь приемной поверхности фотодетектора,

$\Delta f$  – полоса электронных частот.

Зависимости характеристик ФПУ от температуры исследуются специально и приводятся в технических условиях на ФПУ. Задача разработчика СА – обеспечить требуемый диапазон рабочих температур ФПУ. Для этого обычно используются тепловые модели и методы расчета температурных режимов, разработанные для радиоэлектронной аппаратуры [15].

**Оптические модели** СА описывают прохождение светового волнового фронта через искаженную термическими эффектами оптику, позволяют определять температурные разъюстировки конструкции СА, дополнительные шумы и изменения спектральной чувствительности ФПУ, позволяют рассчитывать термоабберации, снижение разрешающей способности, изменения фотограмметрических и радиометрических параметров СА.

При проектировании оптических систем принято различать внешнюю, внутреннюю функциональные и конструктивную модели [16], что отражает три точки зрения:

- 1) потребителя (заказчика) оптической системы,
- 2) физика, объясняющего суть физических процессов, происходящих в оптической системе,
- 3) конструктора, материализующего физические модели в реальной конструкции.

В рамках сложившейся классификации, также с трех точек зрения, будем рассматривать каждую из принятых для СА оптических

моделей (фотограмметрическую, пространственно-частотную, спектро-радиометрическую модели). Таким образом будем различать девять оптических моделей (ОМ) СА.

В табл. 1 указано краткое обозначение оптических моделей.

**ОМ-11. Внешняя фотограмметрическая модель СА.**

СА относится к классу изображающих приборов. Входная информация (входной сигнал) или предмет – поверхность Земли, выходная информация (выходной сигнал) – изображение поверхности Земли.

Для СА предмет находится практически в бесконечности, и его геометрия описывается обобщенными угловыми координатами:

$$\mathbf{x} = \begin{pmatrix} tg\varphi_x \\ tg\varphi_y \end{pmatrix} \quad (19)$$

здесь  $\varphi_x$  и  $\varphi_y$  – углы между оптической осью СА и визирным лучом в соответствующих координатных плоскостях  $XOZ$  и  $YOZ$ .

Изображение находится в фокальной плоскости объектива СА, и его геометрия описывается обобщенными координатами:

$$\mathbf{x}' = \begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} \quad (20)$$

здесь  $x'$  и  $y'$  – координаты изображения точки предмета в фокальной плоскости.

Фотограмметрической функцией СА является преобразование координат точек предмета в координаты изображения

$$\mathbf{x} \rightarrow \mathbf{x}' \quad (21)$$

Если СА удовлетворяет условию изопланатичности, то преобразование (21) линейно:

$$\mathbf{x}' = \mathbf{V}\mathbf{x} \quad \mathbf{V} = \begin{pmatrix} v_x & 0 \\ 0 & v_y \end{pmatrix} \quad (22)$$

здесь  $v_x$  и  $v_y$  – обобщенные увеличения в соответствующих направлениях.

Реальная матрица обобщенных увеличений

$$\mathbf{V}_{\text{фгп}} = \begin{pmatrix} v_x(x, y) & v_{xy}(x, y) \\ v_{yx}(x, y) & v_y(x, y) \end{pmatrix} \quad (23)$$

характеризует отклонения СА от условий ортоскопии  $v_x = v_y = v_0$  и изопланатичности и является внешней фотограмметрической моделью СА.

**ОМ-12. Внутренняя фотограмметрическая модель СА.**

Фотограмметрические параметры составных частей СА указаны в таблице 1.

Если СА линейная и ортоскопическая ( $X_{\text{УТ}} = Y_{\text{УТ}} = 0, \Delta = 0, \delta(x, y) = \zeta(x, y) = 0$ ), съемка осуществляется в надири и движение платформы КА не вносит линейных и угловых искажений в (11) процессе съемки, то  $v_0 = f'/H$ , где  $H$  – высота полета. При этом узлы регулярной квадратной сетки, построенной с шагом проекции пиксела ФПУ, на поверхности Земли изображаются в центрах соответствующих пикселей ФПУ. Так номер узла  $(i, j)$  соответствует тем же номерам пикселей  $(i, j)$  в ФПУ.

При наличии указанных в таблице фотограмметрических искажений каждый визирный луч, построенный из узла с номером  $(i, j)$  регулярной квадратной сетки на поверхности Земли, падает на некоторый другой пиксел с номером  $(i^*, j^*)$ . Заметим, что номера  $(i^*, j^*)$  – уже не целые числа. Эти отклонения визирного луча иллюстрирует рис. 2.

Отклонения номеров пикселей от идеаль-

Таблица 1.  
Обозначения оптических моделей

Модель	Внешняя функциональная	Внутренняя функциональная	Конструктивная
Фотограмметрическая	ОМ-11	ОМ-12	ОМ-13
Пространственно-частотная	ОМ-21	ОМ-22	ОМ-23
Спектро-радиометрическая	ОМ-31	ОМ-32	ОМ-33

Таблица 2.

Составная часть СА	Положение в приборной системе координат XYZ	Фотограмметрические параметры
Объектив	OZ – оптическая ось ХОУ – фокальная плоскость	$X_{УТ}$ $Y_{УТ}$ – проекция положения узловой точки на фокальную плоскость $f'$ – фотограмметрическое фокусное расстояние $\Delta$ - дисторсия
ФПУ	Светочувствительная поверхность ФПУ находится в плоскости ХОУ	$\delta(x,y)$ – неплоскостность светочувствительной поверхности $\varphi$ – разворот ФПУ в фокальной плоскости $\zeta(x,y)$ – нерегулярность расположения пикселей в ФПУ.
Сканирующее устройство (способ съемки)	Возможны различные способы съемки: съемка одноэлементным, линейным, матричным ФПУ, с разверткой вдоль направления полета или поперек направления полета. Каждый из способов имеет свои характерные фотограмметрические параметры. Для простоты изложения полагаем, что сканирующее устройство в составе СА отсутствует, и принимаем способ съемки – кадровый, ФПУ – матрица.	
Платформа КА	ОХ – направление полета платформы КА	Положение приборной системы координат в системе координат КА и в геоцентрической системе, их взаимные перемещения и развороты (в.т.ч. скорости) в процессе съемки.

ного отображения описывается фотограмметрическими полиномами в пространстве изображений:

$$\begin{aligned} i^* - i &= P(i, j) \\ j^* - j &= Q(i, j) \end{aligned} \quad (24)$$

Если отклонения малы, то этими же полиномами, но взятыми с обратным знаком, описывается в пространстве предметов искажение связки визирных лучей, исходящих из

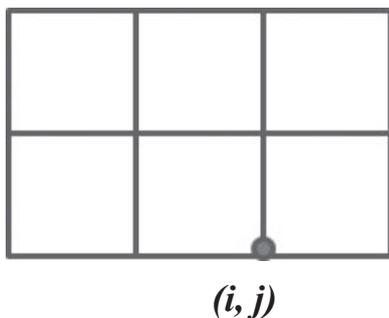
центров пикселей, т.е.:

$$\begin{aligned} i - i^* &= -P(i^*, j^*) \\ j - j^* &= -Q(i^*, j^*) \end{aligned} \quad (25)$$

здесь  $(i^*, j^*)$  – целые числа (номера пикселей), а  $(i, j)$  – нецелые числа.

Связь полиномов P и Q с указанными в табл. 2 фотограмметрическими параметрами – это и есть внутренняя фотограмметрическая модель СА.

### Пространство предметов



### Пространство изображений

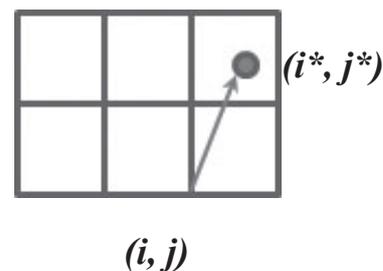


Рисунок 2.

Отклонения точки пересечения визирного луча с фокальной плоскостью

Матрица обобщенных увеличений выражается через полиномы:

$$V_{\text{огп}} = V_0 \begin{pmatrix} 1 + \frac{dP}{dx} & \frac{dP}{dy} \\ \frac{dQ}{dx} & 1 + \frac{dQ}{dy} \end{pmatrix} \quad (26)$$

**ОМ-13. Конструктивная фотограмметрическая модель СА.**

Указанные в ОМ-12 фотограмметрические параметры объектива являются модельными, расчетными параметрами. Для их вычисления необходимо общепринятым способом задать оптическую систему как физический объект [16], т.е. описать:

- оптические стекла зависимостью показателя преломления стекла от длины волны света  $n=n(\lambda)$ , в т.ч. зависимость  $n(\lambda)$  от температуры,
- уравнения оптических поверхностей линз и зеркал в локальных системах координат,
- взаимное расположение оптических поверхностей и диафрагм,
- конструктивные размеры, способ крепления оптических элементов в оправе, корпусе объектива, в том числе задать коэффициенты температурного расширения оправ и элементов корпуса объектива.

Перечисленные конструктивные параметры позволяют с использованием таких понятий, как зрачковые координаты, аберрации оптических систем (смотри далее ОМ-22), рассчитывать фотограмметрические параметры объектива, что и составляет содержание конструктивной фотограмметрической модели объектива. Аналогично для ФПУ, сканера могут быть составлены конструктивные фотограмметрические модели, связывающие свойства материалов, размеры деталей с их внутренними фотограмметрическими параметрами. Совокупность всех моделей составных частей СА составляет конструктивную фотограмметрическую модель СА.

**ОМ-21. Внешняя пространственно-частотная модель СА.**

Задачей СА является преобразование входного сигнала – функции предмета  $L(\mathbf{x})$  – распределение яркости – в выходной сигнал – функцию изображения  $E'(\mathbf{x}')$  – распреде-

ление освещенности. Штрих указывает на принадлежность пространству изображений. Внешняя функциональная математическая модель изображающего прибора есть оператор И, осуществляющий это преобразование:

$$E'(\mathbf{x}') = I(L(\mathbf{x})) \quad (27)$$

Для идеального изображающего прибора оператор И удовлетворяет трем условиям: 1) изображение должно быть стигматическим, т.е. каждой точке в пространстве предметов соответствует одна и только одна точка в пространстве изображений, 2) ортоскопии, т.е. любая кривая в пространстве предметов отображается геометрически подобно в пространстве изображений, 3) изопланатичности, т.е. при смещении предмета на вектор  $\mathbf{x}=\mathbf{a}$  изображение смещается на вектор  $\mathbf{x}'=\mathbf{a}'$ , причем  $\mathbf{a}$  пропорционален  $\mathbf{a}'$  в соответствии с формулой (22). Из-за дифракции и аберраций оптической системы в реальных изображающих приборах условие стигматизма не выполняется. Светящаяся точка в пространстве предметов изображается пятном рассеяния, которое описывается функцией  $h(\mathbf{x}')$ , называемой «функция рассеяния точки» (ФРТ). Штрих при  $h$  обычно не пишут. Тогда, в силу принятых допущений, формула (27) запишется как свертка стигматического отображения распределения яркости (из пространства предметов в пространство изображений) с ФРТ

$$E'(\mathbf{x}') = k \int_{-\infty}^{\infty} L(\xi) h(\mathbf{x}' - \xi) d\xi \quad (28)$$

где  $k$  – коэффициент, характеризующий числовую апертуру и пропускание оптической системы, для пространственно-частотного описания, т.е. для определения передачи контрастов, может быть опущен, также полагается, что ФРТ нормирована, то есть  $\int_{-\infty}^{\infty} h(\mathbf{x}') d\mathbf{x}' = 1$ ,  $\xi = \mathbf{V} \mathbf{x} = (x' y')^T$  – координаты в пространстве изображений.

Преобразование Фурье от ФРТ характеризует прибор как фильтр пространственных частот и называется оптической передаточной функцией (ОПФ):

$$D(\mathbf{v}') = F[h(\mathbf{x}')] = \int_{-\infty}^{\infty} h(\mathbf{x}') \exp(-2\pi i(\mathbf{v}'^T \mathbf{x}')) d\mathbf{x}', \quad (29)$$

где  $\mathbf{v}'^T = (v'_x v'_y)$  – пространственные частоты, (мм<sup>-1</sup>).

Выражение, определяющее передачу структуры предмета, получается из формулы свертки (28), если к ней применить преобразование Фурье. При этом операция свертки переходит в умножение

$$F[E'(x')] = F[L(x')] \cdot F[h(x')] = \tilde{E}'(\mathbf{v}') = \tilde{L}(\mathbf{v}') \cdot D(\mathbf{v}') \quad (30)$$

Штрихи обычно опускают, хотя имеют в виду, что все функции рассматриваются в пространстве изображений.

ОПФ является комплексной функцией и представляется двумя вещественными функциями: модулем  $T(v)$  – частотно-контрастная характеристика (ЧКХ) или чаще, чтобы указать, что на входе гармонический сигнал, ЧКХ называют функцией передачи модуляции (ФПМ), и аргументом  $\phi(v)$  – частотно-фазовая характеристика:

$$D(\mathbf{v}) = T(\mathbf{v}) \exp(i\phi(\mathbf{v})) \quad (31)$$

Физический смысл ЧКХ оптической системы: ЧКХ (ФПМ) дает зависимость контраста изображения гармонического объекта с контрастом 1,0 от пространственной частоты.

Часто состав изображающей системы СА ограничивается одним объективом, но она также может содержать сканирующее устройство, защитные стекла, светофильтры или, например, для ГСА – спектрометр.

В общем случае ФПМ СА определяется как произведение всех составных частей изображающей системы СА и ФПМ фотоприемного устройства (ФПУ).

Выходной пространственно-частотной характеристикой СА обычно считают значения ФПМ на заданных пространственных частотах, в т.ч. на максимальной рабочей частоте (частоте Найквиста).

### **ОМ-22. Внутренняя пространственно-частотная модель СА.**

Внутренняя модель СА описывает работу изображающей оптической системы как преобразователя волнового фронта (ВФ) или, что эквивалентно, световых пучков лучей, проходящих через нее. Действие оптической систе-

мы сводится к следующим факторам [16]:

- преобразованию ВФ, расходящегося из точки предмета, в сходящийся к точке изображения,
- ограничению размеров проходящего через нее ВФ,
- ослаблению интенсивности ВФ,
- нарушению гомоцентричности светового пучка или искажению фазы ВФ или отклонениям от сферичности, что одно и то же.

Для расчетов влияния всех этих факторов на ВФ вводятся понятия: апертурной диафрагмы, зрачка, зрачковых координат и аберраций.

Апертурной диафрагмой называется материальная диафрагма, максимально ограничивающая пучок световых лучей, исходящих из точки предмета. Входным зрачком называется изображение апертурной диафрагмы в пространстве предметов. Выходным зрачком называется изображение апертурной диафрагмы в пространстве изображений.

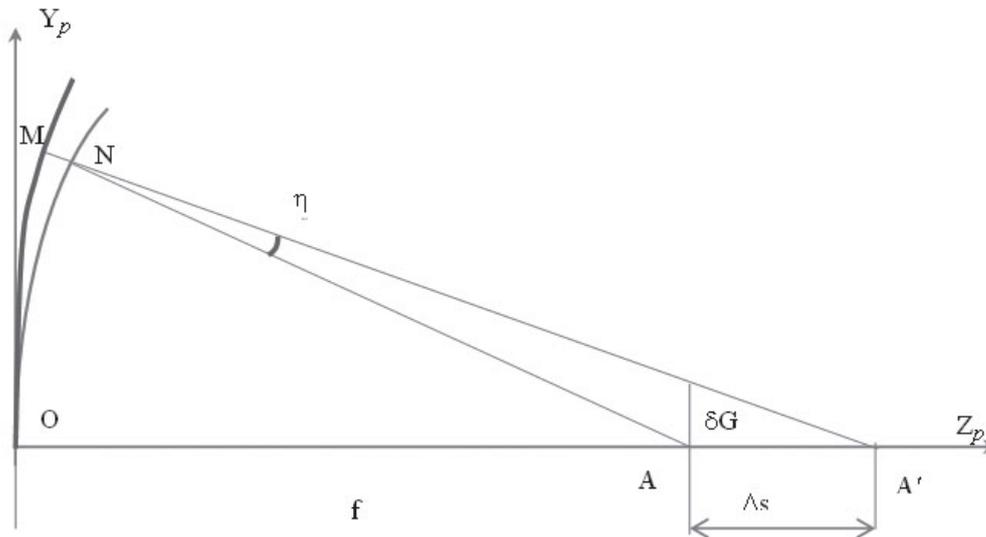
Зрачковые координаты – координаты  $(x_p, y_p)$  точки на зрачке, при этом начало координат расположено в центре зрачка, ось  $OZ_p$  совпадает с оптической осью, ось  $OY_p$  лежит в плоскости чертежа (меридиональной плоскости).

Сферический ВФ, исходящий из точки предмета, после прохождения оптической системы исказится. Волновая аберрация задается на выходном зрачке и описывает отклонение ВФ от сферы сравнения.

Рис. 3 и формулы (32-36) иллюстрируют связь волновой и геометрических (продольной и поперечной) аберраций.

На рис. 3 приняты следующие обозначения:  $NM = [MA - AO]$  – волновая аберрация  $W = W(x_p, y_p)$ , кривая  $OM$  изображает исходящий из выходного зрачка объектива волновой фронт (ВФ),

- точка  $A$  – фокус параксиальных лучей,
- $OA = AN$  – радиус сферы сравнения, который равен заднему фокусу  $f$  объектива,
- точка  $A'$  – пересечение нормали  $A'M$  к ВФ с оптической осью  $OZ$ ,
- точка  $M$  имеет координаты  $(x, y)$ ,
- $\Delta s$  – продольная аберрация,



**Рисунок 3.**  
*Связь волновой и геометрических aberrаций*

$\delta G$  – поперечная aberrация,  
 $\eta$  – aberrация увеличения – разворот нормали  $A'M$  к ВФ в точке  $M$  от радиуса сферы сравнения.

Для упрощения записи штрихи у параметров опущены, хотя все параметры относятся к пространству изображений.

При небольших относительных отверстиях объектива из рассмотрения рисунка 3 следуют формулы:

$$\frac{y_p}{f} = \frac{\delta G}{\Delta s} \quad (32)$$

$$\eta = \frac{\delta G}{f} \quad (33)$$

$$W = \int_0^y \eta dy_p \quad (34)$$

$$W = \frac{1}{f} \int_0^y \delta G dy_p \quad (35)$$

Дифференцируя (34) по  $y$  получаем связь поперечной aberrации с волновой.

$$\delta G = f \frac{dW}{dy_p} \quad (36)$$

Связь внутренних параметров объектива, представленных волновой aberrацией, с внешними параметрами, представленными его ОПФ, получается из рассмотрения дифракционного интеграла. Вводится понятие

зрочковой функции, которая равна нулю вне зрачка.

$$P(\mathbf{p}) = P(x_p, y_p) = C_0 \exp\left(2\pi i \frac{W(x_p, y_p)}{\lambda}\right) \quad (37)$$

где  $\lambda$  – длина волны света,

$\mathbf{p} = (x_p, y_p)^T$  – радиус-вектор координаты точки на зрачке,

$C_0$  – нормировочный коэффициент, определяющий пропускание объектива, для рассмотрения пространственно-частотных характеристик может быть положен равным 1.

Дифракционный интеграл – обратное преобразование Фурье от зрочковой функции – описывает распределение комплексной амплитуды электромагнитного поля в области заднего фокуса объектива.

$$A(x', y') = \int_{-\infty}^{\infty} P(x_p, y_p) \exp\left(i \frac{2\pi}{\lambda f} (x_p x' + y_p y')\right) dx' dy' \quad (38)$$

Квадрат комплексной амплитуды  $A(x', y')$  равен ФРТ, которая регистрируется ФПУ. Повторим, что прямое преобразование Фурье от ФРТ есть ОПФ, (смотри формулу 29). Следуя [16], отметим также, что в соответствии со свойствами преобразования Фурье:

$$A(x', y') = \int_{-\infty}^{\infty} P(x_p, y_p) \exp\left(i \frac{2\pi}{\lambda f} (x_p x' + y_p y')\right) dx' dy' \quad (39)$$

Последняя формула означает, что ОПФ есть автокорреляция зрочковой функции.

Модели ФПУ, раскрывающие структуру его ФПМ, как и сами ФПУ, весьма разнообразны и связаны со способом сканирования. Для ФПУ на основе фоточувствительных приборов с зарядовой связью (ФПЗС) ФПМ определяется тремя факторами: размером и шагом фоточувствительных элементов, эффективностью переноса носителей заряда, диффузией носителей, генерируемых длинноволновыми фотонами [17]. ФПМ ФПЗС есть произведение ФПМ каждого из этих факторов.

### **ОМ-23. Конструктивная пространственно-частотная модель СА.**

Описание этой модели аналогично модели ОМ-13.

Приведем формулы расчета термооптических aberrаций оптической системы, состоящей из  $\theta$  тонких линз, при изменении температуры, следуя [18], когда предмет находится в бесконечности.

Термооптическая aberrация положения:

$$T_{l\infty} = (t - 20) \sum_{j=1}^{j=0} h_j^2 \varphi_j V_j + \sum_{j=2}^{j=0} \alpha_j^2 dd_{j-1} \quad (40)$$

Термооптическая aberrация увеличения:

$$T_{l\infty} = (t - 20) \sum_{j=1}^{j=0} h_j y_j \varphi_j V_j + \sum_{j=2}^{j=0} \alpha_j \beta_j dd_{j-1} \quad (41)$$

где  $(t-20)$  – отклонение температуры от  $20^\circ\text{C}$ ,  $\alpha_j$  – угол между оптической осью и первым параксиальным лучом для  $j$ -ой линзы, для данного случая  $\alpha_j=0$ ,

$\beta_j$  – угол между оптической осью и вторым параксиальным лучом для  $j$ -ой линзы, для данного случая  $\beta_j=1$ ,

$h_j$  – высота первого параксиального луча на  $j$ -ой линзе,

$y_j$  – высота второго параксиального луча для  $j$ -ой линзы,

$\varphi_j = 1/f'_j$  – оптическая сила  $j$ -ой линзы,

$V_j$  – термооптическая постоянная стекла  $j$ -ой линзы.

$dd_{j-1}$  – температурное изменение воздушного промежутка между  $j-1$  и  $j$ -ой линзами, которое зависит от материала корпуса и конструкции крепления линз в оправках.

Продольная температурная aberrация  $\Delta s_t$

может быть определена по формуле

$$\Delta s_t = -f' T_{l\infty} \quad (42)$$

где  $f'$  – заднее фокусное расстояние оптической системы.

Расчет термооптической aberrации увеличения позволяет завершить построение модели ОМ-13. Вследствие отклонения температуры  $(t-20)$ , размер изображения  $L'_{20}$  на светочувствительной поверхности ФПУ изменится и станет  $L'_t$ . Это изменение складывается из двух факторов: 1)  $\Delta a$  – изменение размеров корпуса СА, связывающего объектив с ФПУ, 2) собственно термооптической aberrации увеличения  $T_{l\infty}$ .

$$\frac{L'_t - L'_{20}}{L'_{20}} = \frac{\Delta a}{L'_{20}} \text{tg } w' + T_{l\infty} \quad (43)$$

где  $w'$  – угол поля зрения.

В общем случае, когда, либо оптическая система не моделируется тонкими компонентами, либо температурное поле в конструкции неравномерное, расчет термооптических aberrаций возможен только численными методами, с использованием программ расчета хода лучей.

### **ОМ-31. Внешняя спектро-радиометрическая модель СА.**

Для потребителя радиометрической информации ДЗЗ съемочная аппаратура (СА) представляется набором отдельных яркометров-пикселей. Основные радиометрические характеристики СА: относительная спектральная чувствительность, светосигнальная характеристика, отношение сигнал – шум (С/Ш) задаются в целом для всей СА. Отклонения светосигнальной характеристики для каждого конкретного пикселя описывается корректирующими коэффициентами, которые приводятся в формуляре на СА.

Кратко опишем общепринятую радиометрическую СА (модель съемки) [19]. Спектральная плотность энергетической яркости (СПЭЯ) на входном зрачке СА формирует освещенность на светочувствительной поверхности ФПУ:

$$E'_\lambda(x', y') = \pi \times \frac{\tau_{\text{оптмкш}}(\lambda)}{4z^2} \times L_\lambda(x, y) \left[ \frac{Bm}{m^2 \times \text{мкм}} \right] \quad (44)$$

которая регистрируется каждым пикселом и преобразуется в электронный сигнал:

$$u(x', y') = G \times (dx' \times dy') \times \int_0^{\infty} S(\lambda) \times E'_\lambda(x', y') d\lambda, [A \text{ или } B] \quad (45)$$

здесь:  $L_\lambda(x, y)$ ,  $[\frac{Bm}{cp \times m^2 \times мкм}]$  –

– СПЭЯ на входном зрачке СА,

$\tau_{оптики}(\lambda)$  – спектральное пропускание оптического тракта,

$z$  – светосила оптической системы,

$G$  [А/Вт или В/Вт] – коэффициент передачи ФПУ,

$S(\lambda)$  – относительная спектральная чувствительность ФПУ,

$(dx' \times dy')$  – площадь пикселя в плоскости изображения с координатами  $(x', y')$ .

После светосигнального преобразования, аналоговый сигнал с каждого  $i$ -го пикселя ФПУ усиливается электронным трактом, таким образом, чтобы согласовать ожидаемый динамический диапазон входного сигнала с диапазоном аналого-цифрового преобразователя:

$$U_{i-пикселя} = K_{i-усиления} \times u(x', y') + C_{i-смещения} + B_{i-темн. шум} \quad (46)$$

и квантуется в цифровой сигнал:

$$DN_{i-пикселя} = round \left[ K_{i-усиления} \times u(x', y') + C_{i-смещения} + D_{i-темн. шум} \right] \quad (47)$$

или

$$DN_i = round \left[ A_i \times L(x, y) + C_i + D_i \right] \quad (48)$$

где  $L(x, y)$  – эффективная энергетическая яркость объекта;

$$L(x, y) = \int_0^{\infty} \rho(\lambda) \times L_\lambda(x, y) d\lambda, \left[ \frac{Bm}{m^2 \times cp} \right]$$

$\rho(\lambda)$  – относительная спектральная чувствительность СА;

$$\rho(\lambda) = S(\lambda) \times \tau_{оптики}(\lambda)$$

$A_i$  – крутизна градуировочной характеристики  $i$ -го пикселя;

$C_i$  – смещение градуировочной характеристики  $i$ -го пикселя;

$D_i$  – темновой шум ФПУ и электронного тракта для  $i$ -го пикселя;

$round()$  – операция квантования или округления до ближайшего целого.

### ОМ-32. Внутренняя спектро-радиометрическая модель СА.

В формуле (44)  $\tau_{оптики}(\lambda)$  – спектральное пропускание оптического тракта формируется как произведение коэффициентов спектрального пропускания оптических стекол и спектральных коэффициентов отражения/пропускания рабочих поверхностей оптических деталей.

Светосигнальная характеристика СА (48) связывает цифровой сигнал (количество разрядов) с эффективной энергетической яркостью объекта съемки. Нелинейность и динамический диапазон светосигнальной характеристики определяется характеристиками ФПУ.

Отношение С/Ш для канала СА видимого диапазона спектра оценивается по формуле

$$C / Ш = \frac{U_i n}{\sqrt{U_i n + \sigma_{ФПУ} + \sigma_{mp}}}, \quad (49)$$

где:  $U_i$  – величина сигнала на пикселе (в электронах),

$\sigma_{ФПУ}$  – собственный шум приемника,

$\sigma_{mp}$  – шум тракта обработки видеoinформации,

$n$  – число шагов накопления сигнала в канале.

Для СА теплового диапазона радиометрические модели специфичны, что обусловлено физическим фактом – температура сигнала сопоставима с температурой фона. Перечислим эти особенности:

- обязательное включение в процесс съемки процедуры регистрации излучения эталонных излучателей (АЧТ),

- построение оптической системы, обеспечивающее минимизацию фоновых тепловых потоков,

- ограничение предельной чувствительности ФПУ теплового диапазона флуктуациями фона (для ФПУ видимого диапазона – флуктуации сигнала),

- обеспечение «захолаживания» светочув-

ствительной зоны ФПУ и, при необходимости, оптических элементов.

Все эти вопросы детально изложены в специальной литературе [20-22].

### **ОМ-33. Конструктивная спектро-радиометрическая модель СА.**

В состав модели входят все параметры, указанные в ОМ-13. Дополнительная, определяющая часть модели ОМ-33 – спектральные коэффициенты пропускания/отражения покрытий оптических деталей, формы, размеры светозащитных устройств, диафрагм и экранов, характеристики их спектрального и пространственного отражения.

Наибольшая чувствительность радиометрических параметров от изменения температуры характерна для ГСА. Критичным фактором является смещение шкалы длин волн (ШДВ), то есть изображения спектра сигнала относительно светочувствительной поверхности ФПУ. Приведем пример. Допустимое смещение ШДВ относительно светочувствительной поверхности ФПУ не должно превышать десятой доли пикселя. Пусть размер пикселя  $\Delta = 10$  мкм, размер корпуса от дисперсионного устройства до ФПУ  $B = 200$  мм. Тогда, при диаметре корпуса  $D = 100$  мм, диаметральной градиенте температур  $t = 1$  К и коэффициенте расширения материала корпуса  $\alpha_k = 4 \cdot 10^{-6}$  1/К, фактический разворот дисперсионного устройства относительно ФПУ превышает предельно допустимый:

$$\frac{B \alpha_k t}{D} = \frac{200 \cdot 4 \cdot 10^{-6} \cdot 1}{100} = 1,6 \text{ угл.сек} > \frac{\Delta}{10 \cdot B} = 1,0 \text{ угл.сек},$$

то есть ШДВ сместится относительно пикселя на 1,6 мкм, что недопустимо.

Модель ОМ-33 для СА, регистрирующей изображение в тепловом диапазоне спектра, обязательно должна содержать описание систем обеспечения:

- сохранности температурного поля корпуса за времени съемки,
- сохранности уровня температуры эталонного АЧТ,
- «захолаживания» ФПУ,
- которые непосредственно определяют качество радиометрических параметров такого типа СА.

Специфические конструктивные модели радиометрических параметров криооптических систем, учитывающие термомеханические, релаксационные, молекулярно-кинетические процессы приведены в [23].

#### *Список литературы:*

1. Козлов Л.В. и др. Моделирование тепловых режимов космического аппарата и окружающей среды. Под ред.акад. Г.И.Петрова. – М.: Машиностроение, 1971.
2. Фаворский О.Н., Каданер Я.С. Вопросы теплообмена в космосе. – М.: Высшая школа, 1972.
3. Залетаев В.М., Капинос Ю.В., Сургучев О.В. Расчет теплообмена космического аппарата. – М.: Машиностроение, 1979.
4. Дульнев Г.Н. Применение ЭВМ для решения задач теплообмена. – М.: Высшая школа, 1990.
5. Александров А.В., Потапов В.Д. Основы теории упругости и пластичности. – М.: Высшая школа, 1990.
6. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов. – М.: Мир, 1979.
7. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. – М.: Наука, 1970.
8. ГОСТ 13659-80 Стекло оптическое бесцветное. Физико-химические характеристики. Основные параметры.
9. Гайнутдинов И.С., Несмелов Е.А., Хайбуллин И.Б. Интерференционные покрытия для оптического приборостроения. – Казань: Фэн, 2002.
10. Бесцветное оптическое стекло. Каталог. – М.: Дом оптики, 1990.
11. Шилин В.А. Формирователи видеосигнала на приборах с зарядовой связью. – М. «Радио и связь», 1981.
12. Фотоприемники видимого и ИК диапазонов. Под редакцией Р.Дж. Киеса. –М. «Радио и связь», 1985.
13. Ишанин Г.Г. Приемники излучения оптических и оптико-электронных приборов. – Л. «Машиностроение», 1986.
14. Иванов В.С., Котюк А.Ф. и др. Фотометрия и радиометрия оптического излучения (общий курс). Книга 4. Измерения энергетических и световых величин, характеризующих некогерентное оптическое излучение (оптическая радиометрия). – М : Полиграф сервис, 2001.

15. *Дульнев Г.Н., Семяшкин Э.М.* Теплообмен в радиоэлектронных аппаратах. – Л.: Энергия, 1968.
16. *Родионов С.А.* Автоматизация проектирования оптических систем. – Л.: Машиностроение, 1982.
17. *Бакланов А.И.* Системы наблюдения и мониторинга. – М.: Бином, 2009.
18. *Волосов Д.С.* Фотографическая оптика. – М: Искусство, 1971.
19. *Архипов С.А.* Радиометрическая калибровка оптико-электронной съемочной аппаратуры дистанционного зондирования Земли: текущее состояние и проблемы // Научно-технический журнал «Контенант», 2012, №1, с.32-37.
20. *Ллойд Дж.* Системы тепловидения. М. Мир. 1978.
21. *Голубь Б.И., Пахомов И.И., Хорохоров А.М.* Собственное излучение элементов оптических схем оптико-электронных приборов. – М. Машиностроение. – 1978.
22. *Тарасов В.В., Якушенков Ю.Г.* Инфракрасные системы «смотрящего» типа. – Логос – 2004.
23. *Олейников Л.Ш.* Кривооптические системы. – С-Пб.: ИПК КОСТА, 2013.

# МНОГОЗОНАЛЬНЫЕ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ФИЛЬТРЫ

ГАЙНУТДИНОВ И.С., ГУСЕВ А.Г., ХАСАНОВ А.М., КОЛЬЦОВ А.Ю., ПОТАПОВ Р.И.

ОАО «НПО «Государственный институт прикладной оптики» (ГИПО), г. Казань

E-mail: npogipo@tnpko.ru, almazgnap@yandex.ru, king44@yandex.ru, Potap56411@mail.ru

*В данной статье рассматривается вопрос формирования зон для нанесения покрытия интерференционных фильтров, с помощью ножей и с помощью фигурной маски. Данные оптические фильтры позволяют уменьшить габариты оптико-электронных приборов. Полученные результаты были использованы при разработке интерференционных фильтров для многоспектральных фотоприемников.*

**Ключевые слова:** многозональные интерференционные оптические фильтры.

Интенсивное развитие оптико-электронных приборов привело к необходимости применения многоспектральных матричных фотоприемников (ФП) вместо традиционных фотоприемных устройств с одной приемной площадкой, работающих в одном спектральном диапазоне. Многоспектральные ФП позволяют обеспечить повышенную помехозащищенность оптико-электронных систем, дальность действия, разрешающую способность. Применение многоспектральных ФП в системах наведения позволяет значительно повысить такие характеристики, как точность наведения, сопровождения, селекция целей, обнаружительную способность. [1]

Большое внимание разработчиков вызывают устройства, обеспечивающие получение изображений объектов в заданных спектральных диапазонах. Яркость отдельных фрагментов объектов в некоторых спектральных диапазонах выше, чем в широкой области спектра чувствительности ФП, где она усредняется. Использование ряда узких спектральных интервалов, охватывающих область чувствительности ФП, позволяет увеличить количество оптической информации, получаемой от объекта, что позволяет провести его идентификацию. Применение многоспектральных фотоприемников существенно упрощает схем-

ное решение приборов базирующая на анализе определенных участков спектра излучения (поглощения): газоанализатор и т.д. Позволяет уменьшить габариты оптико-электронных приборов. [2]

Одним из перспективных средств пространственной и спектральной селекции излучения являются многозональные интерференционные фильтры, представляющие собой многослойные интерференционные системы, с определенными спектральными характеристиками нанесенные на заданные области подложки.

Создание фильтров для многоспектральных ФП связано с такими технологическими проблемами, как необходимость нанесения покрытий на определенные зоны одной подложки, геометрические размеры которых практически совпадают с размерами фоточувствительной площадки приемника, жесткие требования к перекрытию зон, одноподложечный вариант исполнения фильтров.

Все это приводит к необходимости проведения комплексных исследований и выбора метода формирования покрытий на определенные зоны единой подложки и обеспечивающего четкие границы перехода от одной зоны к другой. [2]

В микроэлектронике формулирование зон для нанесения покрытия, как правило, производится с помощью фотолитографии. Путем

вскрытия окон в фоторезисте с последующим нанесением необходимого слоя. В процессе используются травители, растворы для снятия фоторезиста, которых в случае нанесения многослойного интерференционного покрытия приводят к ухудшению оптических параметров фильтров, также следы от всех операций ухудшают адгезионные свойства покрытия, что приводит к их отслаиванию.

Сдерживающим фактором данного метода является и то, что нанесения интерференционного многослойного покрытия, как правило, проводится на нагретые подложки до 150-250°C, при которых происходит деградация фоторезиста.

Нами опробовано два варианта формирования зон: с помощью ножей (рис. № 1) и с помощью фигурной маски (рис. № 2)

При формировании границы зоны с помощью “ножа” необходимо отметить следующие факторы. При толщине кромки ножа менее геометрической толщины многослойного покрытия при снятии подложки происходит скалывание слоев на границе, при большой толщине кромки происходит “затенение” в процессе напыления и как следствие размытию границы. Так же необходимо учитывать термический коэффициент расширения материала ножа, держателя и подложки. На (рис. № 3) приведена фотография границы двухзонного фильтра изготовленного на основе пары материалов (Ge-SiO). Размер переходной зоны между фильтрами составляет менее 20 мкм,

это соответствует двум пикселям (10 × 10 мкм) фотоприемной матрицы. 28-30 слойные фильтры обеспечивают выделение областей спектра 3,5-4,0 мкм и 4,0-4,5 мкм с пропусканием более 80 % и подавлением фона до 0,05 % в нерабочих областях спектра. Размер каждой зоны 2,0 × 5 мм.

Возможно изготовление фильтров с большим количеством зон. Количество ограничивается только технологичностью процесса нанесения фильтров.

С помощью маски был изготовлен многозонный фильтр сложной формы. Требовалось выделить в четырех зонах: **А** пропускание в области спектра 4,5-5,5 мкм. И в зоне **В** пропускание 2,5-5,5 мкм. Из-за малых геометрических размеров фильтра и геометрии расположения зоны **В**, невозможно нанести фильтры раздельно на каждые зоны. Поэтому на все зоны первоначально наносили фильтр обеспечивающий заданное пропускание зоны **В**, далее зона **В** закрывалась маской обеспечивающей открытость зон **А** и наносился фильтр обеспечивающий пропускание области **А**. Большие трудности возникли при расчете конструкции фильтра зоны **В**, т.к. на него допылялись слои формирующие пропускание в зоне **А**, потребовалось 7 слоев для согласования фаз в широкой области спектра 2,5-5,5 мкм.

Расчеты проводились по программе “ОРТИМ” разработанной в НПО ГИПО.

При формировании границ зон с помощью масок возникают трудности изготовления держателей подложек с допусками ±0,02 мм, де-

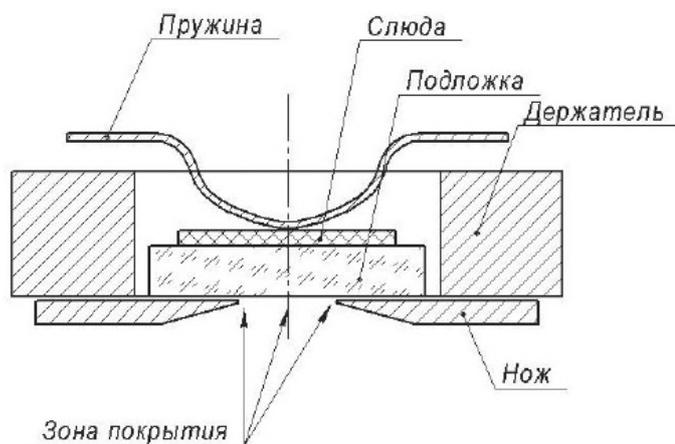


Рисунок 1.  
Держатель с ножами

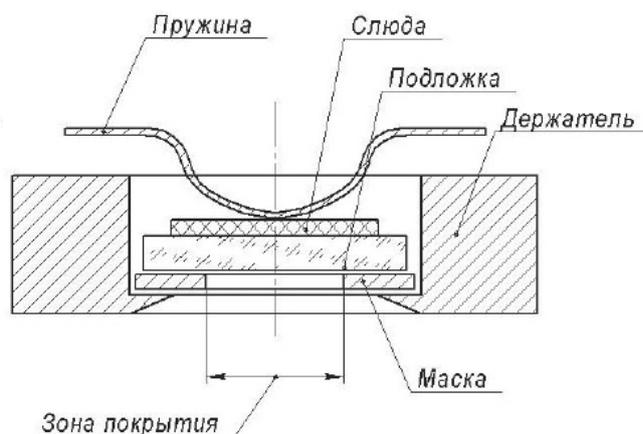


Рисунок 2.  
Держатель с маской

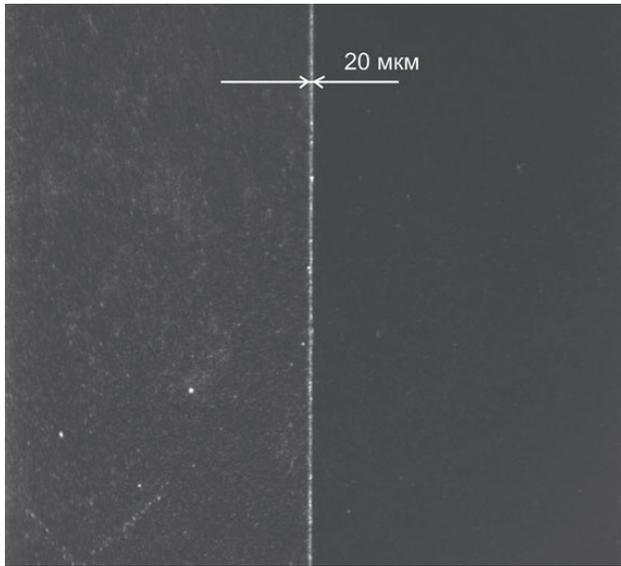


Рисунок 3.

Формирование зон с помощью «ножа»

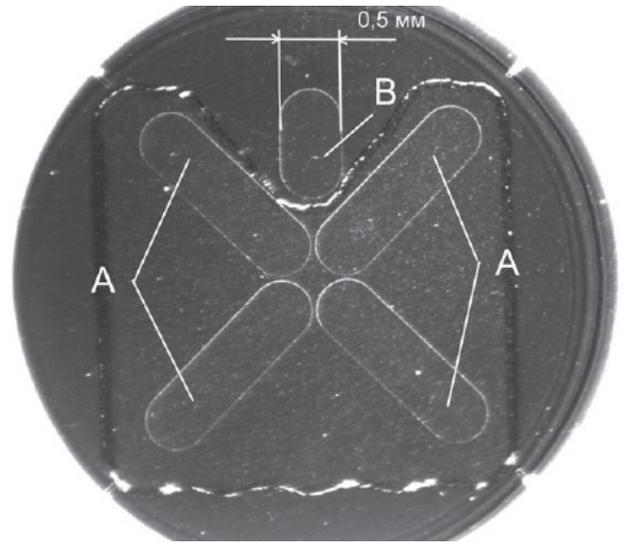


Рисунок 4.

Формирование зон с помощью «маски»

формации масок из-за большого напряжения, возникающих при осаждении слоев многослойного покрытия, реально граница может размываться до 100 мкм.

По спектральным характеристикам многозональные интерференционные фильтры можно разделить на две основные группы:

I – фильтры с разнесенными областями прозрачности,

II – фильтры с непрерывающимися областям.

Для I группы каждый фильтр отдельно наносили на заданную область подложки. В этом случае происходит двойное перекрытие границ зон фильтров, что приводит к её уширению. Фотоприемники матрицы в этом случае

работает на прием каждой отдельной зоны.

Для II группы первая отрезающая система наносится на все зоны подложки, затем наносится вторая отрезающая система на 2, 3 зону и далее отрезающая 3 на 3 зону.

В этом случае границы зон формируются один раз, общее число слоев, формирующие зоны 1-3 уменьшается, т.к. используются слои предыдущих зон.

Фотоприемники матрицы в этом случае в 1 зоне принимают весь спектр  $\lambda_1 - \lambda_d$ , во 2 зоне  $\lambda_2 - \lambda_d$ , в 3 зоне  $\lambda_3 - \lambda_d$ .

С помощью электронных схем можно выделить разностный сигнал участка спектра  $\lambda_1 - \lambda_2$ ,  $\lambda_2 - \lambda_3$ ,  $\lambda_3 - \lambda_k$ .

Нами были проработаны многозональные фильтры I и II вариантов. Эксплуатация многослойных матричных фотоприемников с данными многозональными фильтрами показали высокую эффективность.

Список литературы.

1. И.С. Гайнутдинов, Е.А. Несмелов, И.Б. Хайбуллин - «Интерференционные покрытия для оптического приборостроения» - Казань: издательство «ФЭН», 2002
2. Гайнутдинов И. С., Несмелов Е. А., Михайлов А. В., Иванов В. П., Абзалова Г. И. - «Свойства и методы получения интерференционные покрытий для оптического приборостроения» - Казань: издательство «ФЭН», 2003

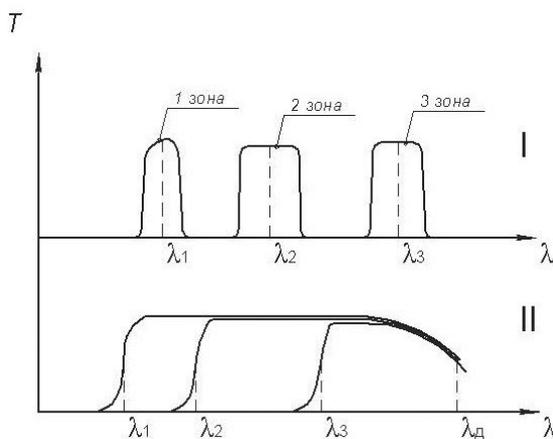


Рисунок 5.

Многозональные интерференционные фильтры по спектральным характеристикам

# ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПЛЕНОК PbTe – ZnSe ПРИ КРИОГЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

ГАЙНУТДИНОВ И.С., ГУСЕВ А.Г., ХАСАНОВ А.М., КОЛЬЦОВ А.Ю., ПОТАПОВ Р.И.

ОАО «НПО «Государственный институт прикладной оптики» (ГИПО), г. Казань

E-mail: npogipo@tnpko.ru, almazgnap@yandex.ru, king44@yandex.ru, Potap56411@mail.ru

*В данной статье представлены результаты исследования изменения спектральных характеристик пленок PbTe-ZnSe при их охлаждении до температуры жидкого азота (минус 196°C). Определены факторы, влияющие на спектральный сдвиг полосы пропускания фильтров на основе данного пленкообразующего материала при их охлаждении. Полученные результаты были использованы при разработке интерференционных фильтров для многоспектральных глубокоохлаждаемых фотоприемников.*

**Ключевые слова:** спектральные характеристики PbTe-ZnSe.

В связи с широким применением в оптических приборах охлаждаемых фотоприемников при разработке и изготовлении фильтра возникают трудности связанные с расчетом конструкции фильтра, так как при низких температурах изменяются показатели преломления и толщины слоев.

Так же трудности возникают с измерением спектральных характеристик фильтров при температуре  $T \leq 190\text{K}$ . Эти измерения трудоемки, что увеличивает стоимость и время разработки фильтров. Поэтому определение зависимости оптических постоянных тонких пленок от температуры является актуальной задачей [1].

Измерение спектральных характеристик фильтров при низких температурах проводилось с помощью ИК спектрометра EQUINOX 55, в кюветное отделение которого был установлен криостат. После вакуумной откачки изолирующего объема криостата измеряемый фильтр охлаждался до требуемой температуры. Температура фильтра измерялась термопарой, установленной на держателе фильтра в криостате. Термопара градуировалась по опорным точкам: 77К – кипящий

$\text{N}_2$ , 193К – твердый  $\text{CO}_2$ , 273К – лед/вода). Теплообмен фильтра с медным держателем обеспечивался In прокладками толщиной 0,1 – 0,15 мм. Соответствие температуры фильтра и температуры держателя проверялась по InAs фильтру.

Спектральные характеристики пропускания образцов согласно методике измерялись при комнатной температуре ( $293 \pm 2$ ) К и при температуре ( $77 \pm 3$ )К. По результатам измерений величины пропускания рассчитывались постоянные пленок PbTe, по сдвигам точек экстремумов рассчитывалась оптическая толщина пленки при разных температурах. Расчет оптических постоянных проводился по методике огибающих точек экстремумов [4], [3].

На рис. 1 приведены спектральные характеристики пленки PbTe при температурах 293К (кривая 1) и температуре 77К (кривая 2), а также огибающих к данным кривым.

На рис. 2 и рис 3. приведены показатель преломления  $n$  и поглощения  $\alpha$  пленки PbTe при температуре  $T=293\text{K}$  и  $T=77\text{K}$ .

Заметно резкое изменение границы поглощения пленки PbTe в области 3-5 мкм.

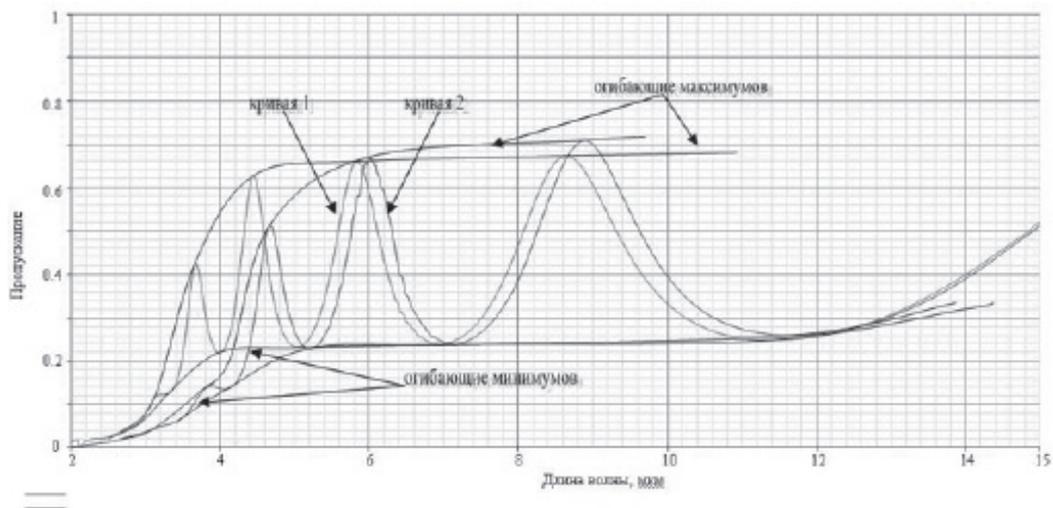


Рисунок 1.

Таблица 1.

T=293K		T=77K	
$\lambda$	g	$\lambda$	g
3.83	11.44	3.96	12.231
4.74	9.503	4.94	11.264
6.4	9.073	6.575	9.494
10.35	8.849	10.27	9.381

По сдвигам точек экстремумов определено изменение оптической толщины пленки.

В табл. 1 приведены значения оптической толщины пленки PbTe при T=293K и T=77K.

Полученные результаты показывают, что показатель преломления пленки PbTe, оптическая толщина пленки PbTe при охлаждении до температуры 77K значительно изменяются, что должно учитываться при расчете интерференционных покрытий работающих при криогенных температурах. Аналогичные измерения были проведены для пленок ZnSe. Изменение показателя преломления и оптической толщины были не значительными менее 5%.

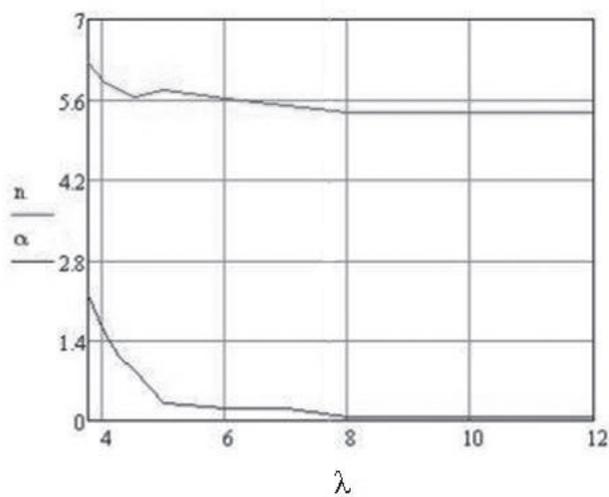


Рисунок 2.

Показатель преломления  $n$  и поглощения  $\alpha$  пленки PbTe при температуре T=293K

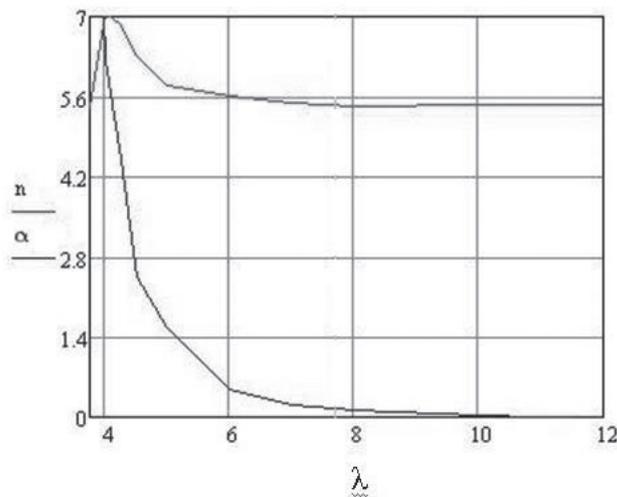
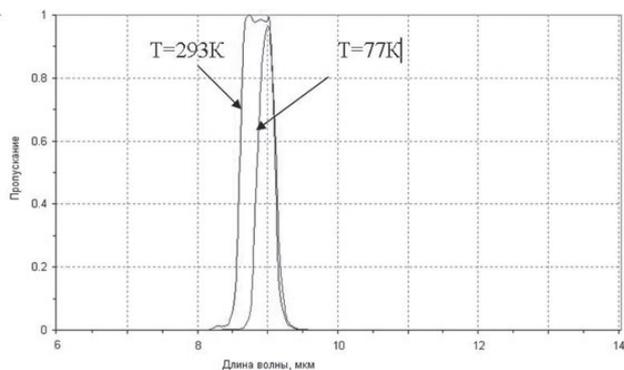
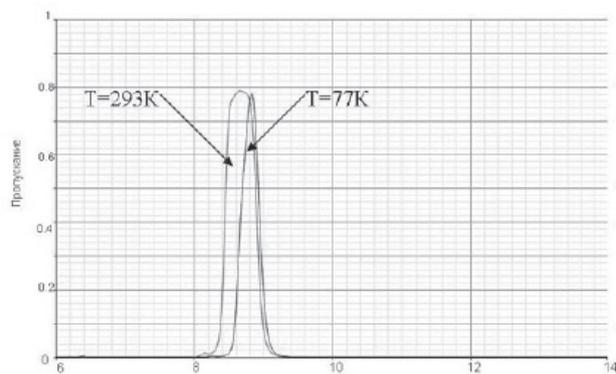


Рисунок 3.

Показатель преломления  $n$  и поглощения  $\alpha$  пленки PbTe при температуре T=77K



**Рисунок 4.**  
**Расчетные спектральные**  
**характеристики фильтра**



**Рисунок 5.**  
**Спектральные характеристики нанесенного**  
**фильтра измеренные при T=293K и T=77K**

На основе данных проведена оценка изменения спектральных характеристик фильтрующих покрытий на основе пар PbTe-ZnSe при охлаждении до 77K.

В качестве примера на рис.4 приведены расчетные спектральные характеристики полосового фильтра с показателем преломления PbTe  $n=5.3$  при  $T=293K$  и  $n=5.55$  при  $T=77K$  с коэффициентом к оптическим толщинам PbTe  $k=1.055$ , ZnSe  $k=0.970$

Результаты данного исследования показывают, что для пленок PbTe наблюдается значительное увеличение показателя преломления с 5,3 до 5,6 и увеличению оптической толщины в 1,05-1,06 раз в зависимости от участка спектра. Для пленок ZnSe наблюдается уменьшение показателя преломления с 2,35 до 2,25 и уменьшению оптической толщины слоя с коэффициентом 0,96.

Полученные результаты позволяют проводить расчет многослойных интерференционных систем работающих при пониженных температурах по стандартным программам путем корректировки оптических толщин и

показателя преломления в зависимости от температуры, что в свою очередь ускорит работу по расчету многослойных покрытий из данных материалов работающих при криогенных температурах.

#### Список литературы:

1. Гайнутдинов И.С., Несмелов Е.А., Михайлов А.В., Иванов В.П., Абзалова Г.И. Свойства и методы получения интерференционных покрытий для оптического приборостроения. – Казань: издательство «Фэн», 2003 – стр424.
2. Воронкова Е.М., Гречушников Б.Н., Дистлер Г.И., Петров И.П. «Оптические материалы для инфракрасной техники». – М.: Наука, 1965.
3. Несмелов Е.А., Гусев А.Г., Иванов О.Н., Матшин Н.П. Метод расчета оптических постоянных тонких диэлектрических пленок. Казань. –ОМП, 1991, №9 стр27-29.
4. Гайнутдинов И.С., Несмелов Е.А., Михайлов А.В., Иванов В.П., Абзалова Г.И. Свойства и методы получения интерференционных покрытий для оптического приборостроения. – Казань: издательство «Фэн», 2003 – стр 424.

# ДВУХДИАПАЗОННЫЙ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЙ ФИЛЬТР ДЛЯ ИК ОБЛАСТИ СПЕКТРА

ПОТАПОВ Р.И., ГАЙНУТДИНОВ И.С., КОЛЬЦОВ А.Ю., ХАСАНОВ А.М.

ОАО «НПО «Государственный институт прикладной оптики» (ГИПО), г. Казань

E-mail: Potap56411@mail.ru, npogipo@tnpko.ru, king44@yandex.ru, almazgnap@yandex.ru

*В данной работе представлен процесс создания интерференционного фильтра с двумя рабочими областями (1,05 – 1,1 мкм; 3,5 – 5 мкм).*

**Ключевые слова:** интерференционный фильтр, область спектра.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Оптические покрытия для ИК области спектра являются неотъемлемой частью современной оптико-электронной промышленности. В настоящее время существует необходимость создания оптических покрытий, позволяющих работу в двух и более каналах пропускания. В данной работе речь пойдет о процессе создания оптического интерференционного фильтра имеющего значения коэффициента пропускания в рабочих областях не менее 96%.

Материалы и методы использованные в процессе создания перечислены во втором разделе, в третьем разделе указаны основные детали напыления, результаты приведены в четвертом разделе. В заключении приведены выводы.

## 2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для создания покрытия была выбрана подложка из материала ZnSe, в качестве пленкообразующих материалов были выбраны оксид алюминия ( $Al_2O_3$ ) и кремний (Si).

Напыление покрытия производилось с помощью ВУ-1А, оснащенной источником ЭЛИ. Контроль толщин осуществлялся фотометрическим методом.

Измерения спектральных характеристик покрытия проводились на ИК фурье-спектрометре Equinox 55 и на прецизионном спектрофотометре PE Lambda 950.

## 3. ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССА

Предполагаемое покрытие должно было иметь две рабочие области (1,05-1,1 мкм; 3-5 мкм), с коэффициентами пропускания >96%.

Для расчета теоретических оптических характеристик покрытия применялся матричный метод расчета лежащий в основе алгоритма программы «Оптимизация», созданной в ОАО НПО ГИПО. Для определения оптимальных толщин слоев был использован алгоритм минимизации функции качества, также использующийся в данной программе.

Оксид алюминия  $Al_2O_3$  в качестве материала для получения пленок используется достаточно широко. Температура плавления  $Al_2O_3$  составляет 2050°C, поэтому пленки из этого материала получают обычно электронно-лучевым испарением (ЭЛИ) или ионно-плазменным распылением. В данной работе использовался метод ЭЛИ, т. к. напыление производилось в вакуумной установке ВУ-1А оснащенной источником ЭЛИ.

Зависимость показателя преломления от длины волны имеет вид:

$$n^2 = 2.624 + \frac{0.0157}{\lambda^2}$$

$$k = \frac{1}{n(\lambda) \left( 4.72 \cdot 10^9 \lambda - \frac{7.84 \cdot 10^9}{\lambda} + \frac{44.27}{\lambda^2} \right)}$$

Величина показателя преломления пленок оксида алюминия зависит от температуры подложки ( $T_n$ ) и скорости конденсации испаряемого материала ( $V_k$ ). Эта зависимость представлена в табл. 1 (для длины волны  $\lambda = 1,06$  мкм).

Таблица 1.

$T_n, \text{ }^\circ\text{C}$	$V_k, \text{ \AA/c}$	$n$
25	7-8	1,61-1,62
25	27-28	1,65-1,66
150	5-7	1,63-1,64
150	17-20	1,65-1,66
250-270	7-8	1,65-1,66
250-270	27-28	1,70-1,71

Кремний (Si) - полупроводниковый материал. Прозрачность пленок начинается при длинах волн падающего излучения более 0.8 мкм, а показатель преломления равен 3,4 – 3,5 в зависимости от условий получения и области спектра. По своим свойствам пленки кремния почти идентичны пленкам германия. Для получения пленок использовался метод электронно-лучевого испарения. Основной сложностью при получении пленок кремния испарением в вакууме оказывается быстро растущая на нагреваемой кремниевой поверхности пленка окисла. Эта пленка весьма прочна и эффективно препятствует выходу пара, что приводит к движению испаряемого материала и разбрызгиванию, снижающему качество получаемых пленок. Именно из-за этого пленки кремния сравнительно редко используются в практике нанесения интерференционных покрытий. Однако оказывается возможным найти те узкие границы по скорости испарения, где вклад энергии в материал еще не приводит к интенсивным

движениям массы испаряемого материала и процесс испарения протекает вполне равномерно.

Влияние температуры подложки и скорости конденсации на величину показателя преломления пленок кремния на длине волны 4 мкм показано в табл. 2.

Температурная зависимость коэффициентов конденсации в экспериментальных условиях оценивалась методом сравнения толщины пленки выросшей на нагретой, до заданной температуры, подложке и пленки выросшей на подложке без нагрева. Отношение этих величин характеризует коэффициент конденсации, который удобно использовать в процессе разработки технологии нанесения пленок.

Таблица 2.

$T_n, \text{ }^\circ\text{C}$	$V_k, \text{ нм/мин}$	$n$
25	15-20	3,32...3,34
25	30-35	3,34...3,36
150	15-20	3,34...3,37
150	30-35	3,38...3,40
250	15-20	3,37...3,40
250	30-35	3,40...3,42

Анализ полученных данных показывает, что система слоев кремний – оксид алюминия является слабо чувствительной к температурному режиму. Поэтому они могут формироваться при использовании стандартных методов нагрева и термостатирования подложек и контрольных образцов.

Проведенные эксперименты показали, что при получении методом электронно-лучевого испарения просветляющих покрытий из слоев оксида алюминия и кремния оптимальная температура испарения лежит в интервале 200 – 250 $^\circ\text{C}$ , давление остаточных газов в вакуумной камере должно быть не менее  $6 \cdot 10^{-5}$  Па, скорость испарения оксида алюминия 40-45 нм/мин, скорость испарения кремния 35-40 нм/мин.

#### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ

Теоретические значения спектральных коэффициентов отражения в заданных областях совпадают с значениями, полученными

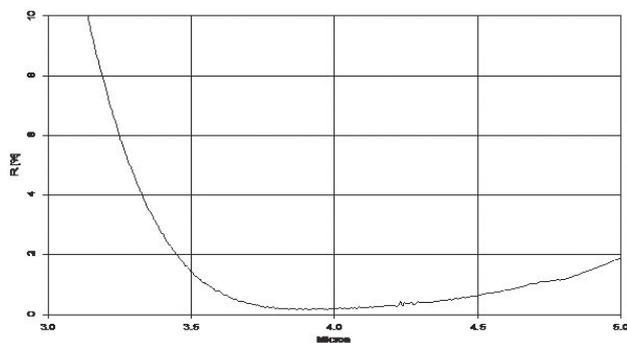


Рисунок 1.

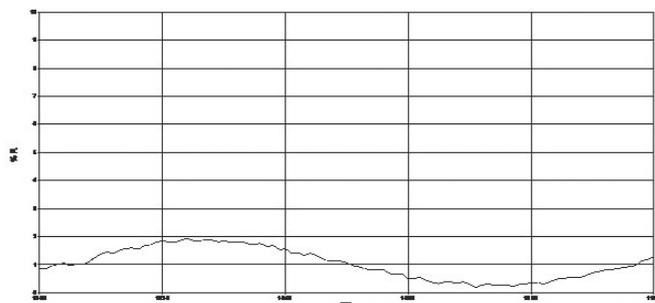


Рисунок 2.

в результате измерения (приведены на рис. 1 и рис. 2)

Учитывая пренебрежимо малые величины поглощения веществ в рабочей области, определить коэффициент пропускания, имея коэффициент отражения не составляет труда.

### 5. ВЫВОДЫ

В данной работе описан процесс создания покрытия с двумя рабочими областями спектра, приведены результаты напыления. Данный вид покрытия может быть использован в тепловизионной аппаратуре при необходимости использования второго канала для иных целей.

*Список литературы:*

1. Гайнутдинов И.С., Несмелов Е.А., Хайбуллин И.Б. Интерференционные покрытия для оптиче-

ского приборостроения. - Казань: издательство «Фэн», 2002 – 592 с.

2. Беляков Ю.М., Гайнутдинов И.С., Лукин А.В., Мельников А.Н., Насыров З.А., Павлычева Н.К., Пряхин Ю.А. Оптические материалы и технологии: Учебное пособие / Под общ. Редакцией докт. техн. Наук Н. К. Павлычевой. Казань: Изд-во Казан. Гос. Техн.ун-та, 2008. 484 с.

3. Окатов М.А., Антонов Э.А., Байгожин А. и др.; под ред. Окатова М.А. Справочник технолога – оптика.-2-е изд., перераб. и доп. – СПб.: Политехника, 2004. – 679 с.

# НАНЕСЕНИЕ ОТРАЖАЮЩИХ ПОКРЫТИЙ НА ОПТИЧЕСКИЕ ДЕТАЛИ ДИАМЕТРОМ до 4 м МЕТОДОМ МАГНЕТРОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ

АЗЕРБАЕВ А.А., МУХАММЕДЗЯНОВ Т.Р., АБДУЛКАДЫРОВ М.А., БАЛАНДИН В.Ю.

ОАО «Лыткаринский завод оптического стекла», Лыткарино, Московская обл.

E-mail: ktb-2@lzos.ru

В ОАО ЛЗОС была создана вакуумная установка для нанесения отражающих покрытий на крупногабаритные оптические детали диаметром до 4.0 м методом магнетронного распыления. Отработан технологический процесс нанесения отражающего алюминиевого покрытия с защитным слоем из  $\text{SiO}_2$ . Проведены ускоренные климатические испытания покрытия  $\text{Al}+\text{SiO}_2$ , по результатам которых определен эксплуатационный ресурс покрытия, составивший 30 лет. Достигнута равномерность толщины покрытия  $\pm 5\%$  на максимальном диаметре 4.0 м.

**Ключевые слова:** вакуумная установка, отражающее покрытие с защитным слоем, магнетронное распыление, крупногабаритная оптическая деталь.

## ВВЕДЕНИЕ

Общеизвестно, что отражающее покрытие для зеркал телескопов требуется регулярно наносить заново вследствие их загрязнения, повреждения в процессе эксплуатации. Для этого, как правило, рядом с обсерваториями создают комплексы по нанесению отражающих покрытий на зеркала телескопов. Однако есть случаи, когда невозможно осуществить нанесение покрытия на оптическую деталь рядом с местом его эксплуатации. Например, для оптических деталей космического базирования или когда создание комплекса по нанесению покрытий экономически нецелесообразно или просто невозможно. В таких случаях заказчику удобно наносить покрытия в том же месте, где и изготавливается оптическая деталь. Это позволяет сократить расходы и риски при транспортировке от места изготовления зеркала к месту нанесения покрытия. С этой целью в ОАО ЛЗОС была создана вакуумная установка для нанесения отражающих покрытий на крупногабаритные оптические детали диаметром до 4.0 м методом магнетронного распыления.

## 1. РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ ПОКРЫТИЯ

На момент создания вакуумной камеры требовалось нанесение отражающего покрытия из алюминия Al с защитным слоем. В качестве материала защитного слоя был выбран  $\text{SiO}_2$  (кварц). Было рассмотрено несколько вариантов отражающего Al покрытия с различными толщинами защитного слоя  $\text{SiO}_2$  (рис. 1).

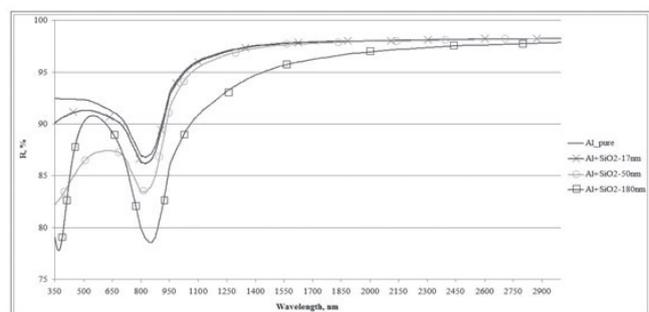


Рисунок 1.

Спектральный коэффициент отражения  
алюминиевого покрытия без защитного слоя и с  
защитным слоем  $\text{SiO}_2$  толщинами 17, 50 и 180 нм

Покрытие с Al без защитного слоя приведено, как эталон по оптическим характеристикам для данного типа покрытия. Покрытие с защитным слоем SiO<sub>2</sub> толщиной 17 нм обладает коэффициентом отражения, близким к параметрам эталонного отражающего Al покрытия без защитного слоя. Однако такое покрытие не имеет механической прочности и защищает слой Al только от деградации его отражающей способности при воздействии окружающей среды (окисление, воздействие влажности и т.д.). Толщина слоя SiO<sub>2</sub>, равная 50 нм, не обеспечивает достаточной механической прочности для проведения многократных операций по очистке поверхности зеркала с покрытием. Покрытие с защитным слоем SiO<sub>2</sub> толщиной 180 нм сильно снижает коэффициент отражения в некоторых областях спектра, но механическая прочность такого покрытия достаточна для многократной протирки поверхности детали с покрытием безворсовой салфеткой.

Поскольку величина механической прочности играет большую роль для покрытий, наносимых в рамках концепции «изготовление+покрытие в одном месте», для проведения ускоренных испытаний по определению ресурса работы было выбрано покрытие с защитным слоем SiO<sub>2</sub> толщиной 180 нм. Испытания проводились циклично и включали в себя:

- проверку на воздействие повышенной температуры +70°C;
- проверку на воздействие пониженной температуры -60°C;
- проверку на воздействие повышенной влажности 95% при температуре +40°C.

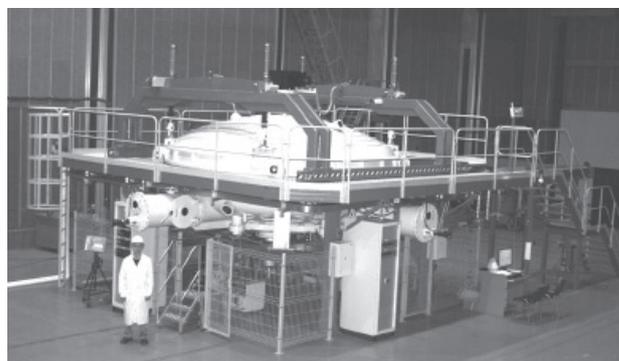
Каждый цикл соответствует примерно 1 году ресурса работы в условиях умеренно-холодного климата и хранения в неотапливаемом помещении. После каждого цикла проверялись параметры покрытия: коэффициент отражения, адгезия, механическая прочность, внешний вид. Длительность испытания составила 10 циклов. Покрытие Al с защитным слоем SiO<sub>2</sub> толщиной 180 нм выдержало 10 циклов испытания без изменения своих параметров. То есть можно говорить, что ресурс

такого покрытия составляет более 10 лет эксплуатации в указанных выше климатических условиях. Таким образом, за базовое покрытие, обрабатываемое на созданной вакуумной установке, было принято покрытие с отражающим слоем Al толщиной 120 нм и с защитным слоем SiO<sub>2</sub> толщиной 180 нм.

## 2. ВАКУУМНАЯ УСТАНОВКА. СОСТАВ И ОПИСАНИЕ РАБОТЫ

Созданная вакуумная установка (рис. 2) состоит из следующих основных частей:

- вакуумной камеры с узлом вращения детали;
- системы откачки;
- системы напыления и ионной очистки;
- системы управления.



*Рисунок 2.*

*Вакуумная установка для нанесения отражающих покрытий на крупногабаритные оптические детали методом магнетронного распыления*

### 2.1. Вакуумная камера с узлом вращения детали

Вакуумная камера объемом 23 м<sup>3</sup> представляет собой разъемную торосферическую обечайку и состоит из стационарной части и съемной крышки. В стационарной части камеры расположены 4 патрубка (гаража) для парковки магнетронов во время техобслуживания и для наблюдения за магнетронами при выводе их на рабочий режим. Также в стационарной части находится опорный подшипник диаметром 4700 мм, на который ложится оправа с деталью, расположенной рабочей поверхностью вниз (рис. 3).

Подшипник совместно с приводом вращения, установленным на съемной крышке ка-



**Рисунок 3.**

*Загрузка оправы с деталью в вакуумную камеру*

меры, обеспечивает вращение оптической детали во время нанесения покрытия. Привод передает крутящий момент через специальное зацепление на оправе, в которой крепится оптическая деталь. Сам привод установлен вне камеры, а передача вращающего момента внутрь камеры происходит через герметизированный вал. Герметизация вала происходит при помощи магнитожидкостного уплотнения, в котором роль механического уплотнения играет магнитная жидкость, удерживаемая постоянным магнитом. Использование цельного подшипника в роли опорного кольца позволяет добиться максимально плавного вращения оправы с деталью, а также снять с привода вращения осевую нагрузку. Также в стационарной части камеры находятся различные вводы, обеспечивающие подвод рабочего газа, холодной воды и электропитания к устройствам, расположенным внутри камеры, и патрубки, необходимые для монтажа к камере насосов и вакуумпроводов. Съёмная крышка при открытии камеры поднимается вверх 4 приводами на высоту ~500 мм, затем по направляющим рельсам отъезжает в сторону, открывая свободный доступ внутрь камеры. На внешней поверхности камеры крепится змеевик для подвода холодной и горячей воды, необходимой для охлаждения или нагревания камеры. В вакуумной камере есть 6 смотровых окон - 4 окна по бокам в стаци-

онарной части и 2 в верхней части съёмной крышки для наблюдений за процессом нанесения покрытия. Все внутренние элементы вакуумной камеры, находящиеся в вакууме, изготовлены из нержавеющей стали.

## **2.2. Система откачки**

При помощи запорной и коммуникационной арматуры к стационарной части камеры прикреплены три криогенных насоса Coolvac10000 производительностью 10000 л/с, турбомолекулярный насос HiPace2300 и форвакуумный агрегат, состоящий из насоса Рутса WH7000 и винтового насоса DV650S. Для контроля давления в области форвакуума используются датчики Pirani, пьезорезистивные датчики и баратрон, а в области высокого вакуума - ионизационные Bayard-Alpert датчики.

Все используемые при откачке насосы – безмасляные. Это гарантирует отсутствие углеводородов в остаточной среде, что положительно сказывается на качестве покрытия.

Благодаря синхронизации работы насосов откачка вакуумной камеры до давления  $1 \cdot 10^{-5}$  mbar происходит всего за 30 минут, а до давления  $3 \cdot 10^{-6}$  mbar, при котором можно начинать процесс нанесения покрытия – меньше, чем за 2 часа.

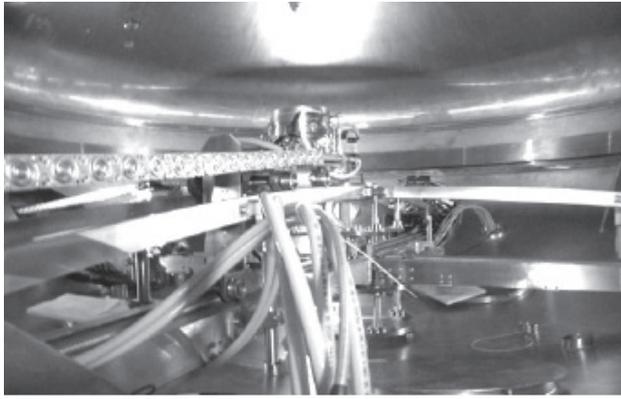
## **2.3. Система напыления и ионной очистки**

Как правило, в вакуумных установках подобного типа для нанесения покрытия используются протяженные магнетроны длиной 1,0 м и больше [1], [2]. Наша установка отличается тем, что в ней используются циркулярные магнетроны диаметром всего 160 мм.

Система напыления и ионной очистки состоит из трех циркулярных магнетронов с диаметром распыляемой мишени 160 мм, ионного источника и системы их перемещения.

Система перемещения магнетронов представляет собой направляющую рейку, по которой на роликах передвигается каретка с магнетроном (рис. 4).

Движение магнетрона осуществляется посредством преобразования крутящего момента от шарико-винтовой пары в поступательное движение каретки с магнетроном. Конфигурация направляющей рейки повто-



**Рисунок 4.**  
**Каретка с магнетроном**  
**при движении по направляющей рейке**

ряет профиль поверхности оптической детали. Таким образом, при использовании всего 1 привода на 1 магнетрон удастся добиться эквидистантного и нормального (по углу) расположения магнетрона от поверхности детали. Точность перемещения при этом составляет  $\pm 0,5$  мм. Такое перемещение магнетрона является важной составляющей для достижения равномерности толщины покрытия не хуже  $\pm 5\%$ . Поступательное движение магнетрона и вращение детали в сумме дают, что магнетрон относительно детали движется по спирали. Такая система нанесения покрытия при помощи циркулярного магнетрона технически более сложная, чем системы, основанные на протяженных магнетронах. Однако она имеет и несколько преимуществ:

- управляя скоростью движения магнетрона и его скоростью напыления, можно достичь указанной равномерности покрытия без использования специальной выравнивающей маски;

- добиться стабильной работы циркулярного магнетрона легче, чем протяженного магнетрона;

- мишень для циркулярного магнетрона проще и дешевле в изготовлении, а также для диаметра 160 мм мишени монолитные, а не наборные, как например, кремниевая мишень для протяженного магнетрона.

Для нанесения базового покрытия  $Al+SiO_2$  система напыления оснащена двумя магнетронами для нанесения слоя Al и одним магнетроном для нанесения слоя  $SiO_2$ .

Конструктивно все три магнетрона одинаковы и отличаются только мишенями. Это позволяет использовать три различных материала для нанесения других типов покрытия, например, 4-слойное отражающее покрытие  $NiCrN_x-Ag-NiCrN_x-Si_3N_4$ . Для нанесения слоя Al используется мишень диаметром 160 мм из высокочистого Al (99.999%), а для нанесения  $SiO_2$  – мишень диаметром 160 мм из сплава Si:Al (90%:10%). Получение слоя  $SiO_2$  достигается путем распыления кремниевой мишени в среде аргона и кислорода. В качестве рабочего газа при распылении Al используется аргон. Три циркулярных магнетрона питаются от двух источников Pinnacle Plus+Pulsed-DC мощностью 10kW фирмы Advanced Energy. Выход одного источника питания Pinnacle Plus+Pulsed-DC коммутируется на два магнетрона.

Контроль скорости нанесения покрытия происходит с помощью кварцевых датчиков и штатно осуществляется только при выводе магнетронов на рабочий режим перед процессом нанесения покрытия. Этого, как показывает практика, достаточно для проверки нормальной работы магнетрона. Однако в систему управления заложена возможность проверки скорости роста толщина покрытия и во время его нанесения. Для этого магнетрон перемещается в гараж, где находится кварцевый датчик, затем проверяется скорость нанесения покрытия, при необходимости производится коррекция параметров магнетрона, магнетрон возвращается на то место, где был прерван процесс напыления, и нанесения покрытия продолжается.

Для подготовки и активации поверхности детали внутри вакуумной камеры и непосредственно перед нанесением покрытия применяется DC Ion Source с источником питания Solus DC Ion Source Controller мощностью 6 kW. Ионный источник перемещается радиально до центра зеркала и назад с заданной скоростью. Скорость перемещения источника и скорость вращения детали подобрана таким образом, чтобы обеспечить равномерную обработку поверхности детали. Система перемещения ионного источника идентична системе перемещения магнетронов.

## 2.4. Система управления

Система управления установкой выполнена на основе программируемого логического контроллера (PLC). Взаимодействие человека с PLC осуществляется при помощи управляющей программы на персональном компьютере, соединенном с PLC. Управляющая программа имеет несколько уровней допуска для обслуживающего персонала – от полного доступа для разработчика до уровня оператора, в котором возможен только запуск автоматического режима работы установки. В системе управления реализовано три режима работы установки – ручной, полуавтоматический и автоматический. Это обеспечивает достаточную гибкость в работе с установкой: ручной и полуавтоматические режимы позволяют внедрять новые технологические процессы нанесения покрытий, а автоматический режим удобен при нанесении уже отработанных покрытий. Система управления оснащена программными и аппаратными блокировками, максимально предотвращающими получение травм обслуживающим персоналом, а также повреждение оборудования установки или оптической детали вследствие возникновения аварийной ситуации. Кроме того, в системе управления заложена возможность возобновления процесса нанесения покрытия с места прерывания. Система управления ведет постоянный мониторинг состояния частей установки и проходящего технологического процесса. Эта информация записывается и хранится в банке данных. Таким образом, можно отследить хронологию и причинно-следственные связи того или иного события, произошедшего в работе установки.

## 3. НАНЕСЕНИЕ БАЗОВОГО ПОКРЫТИЯ $Al+SiO_2$

После монтажа вакуумной установки в ОАО ЛЗОС и проведения пуско-наладочных работ последовал этап отработки нанесения базового покрытия. Требовалось получить покрытие  $Al+SiO_2$  со следующими характеристиками:  $R_{\text{среднее}}$  для диапазона длин волн 250-1200 нм должен быть  $\geq 85\%$  и равномерность покрытия на диаметре 4.0 м (за исключением центральной зоны диаметром 200 мм) - не хуже

$\pm 5\%$ . Также покрытие должно иметь хорошую адгезию и механическую прочность.

Отработка проводилась на образцах диаметром 30 мм, изготовленных из астроситалла. Образцы в специальной оснастке равномерно распределялись через каждые 100 мм по 4 радиусным направлениям, расположенным под  $90^\circ$  друг к другу (рис. 5).



Рисунок 5.

*Специальная оснастка с держателями образцов и экраном для избегания запыления внутрикамерных элементов*

Для измерения коэффициента отражения использовался спектрофотометр Lambda 950 с Universal Reflectance Accessory (URA). Равномерность отражающего слоя  $Al$  исследовалась по толщине при помощи оптического профилометра NanoCam (рис. 6), а равномерность защитного слоя  $SiO_2$  - по спектральному коэффициенту отражения.

Механическая прочность проверялась методом истирания на приборе проверки механической прочности, разработанном в ОАО ЛЗОС. Принцип метода заключается в измерении сопротивляемости покрытия истиранию резиновым наконечником, находящимся под нагрузкой. Истирание происходит при вращательном движении образца с покрытием. Количественно сопротивляемость истиранию выражается в числе оборотов, при которых не происходит разрушение покрытия. Для отражающего покрытия из  $Al$  с защитным слоем  $SiO_2$  толщиной 180 нм механическая прочность должна составлять минимум 2000 оборотов. Адгезия покрытия проверялась при помощи наклеивания поло-



**Рисунок 6.**

*Измерение толщины слоя Al при помощи оптического профилометра NanoCam*

сок липкой ленты типа скотч на поверхность образца и последующего их (полосок) отрыва. Адгезия покрытия считается хорошей, когда не происходит отслоения ни слоев покрытия между собой, ни всего покрытия от поверхности образца.

Обработка нанесения базового покрытия проходила в два этапа – сначала достигались требуемые параметры для покрытия с Al без защитного слоя SiO<sub>2</sub>, а затем для покрытия Al+SiO<sub>2</sub>. Для достижения требуемой равномерности покрытия были опробованы различные комбинации изменения скорости нанесения покрытия, скорости движения магнетронов, скорости вращения оправы и количества проходов магнетронов. Этап обработки нанесения базового покрытия длился около двух месяцев. За этот срок было выполнено порядка 30 циклов нанесения покрытия.

В итоге процесс нанесения покрытия выглядит следующим образом: после откачки камеры и проведения ионной обработки производится включение двух магнетронов с мишенями из Al и вывод их на рабочий режим. Под рабочим режимом магнетрона подразумевается стабильное получение заданных параметров без электрических пробоев. Вместе с магнетронами включается вращение оправы. Источник питания магнетронов работает в режиме стабилизации мощности, т.е. мощность магнетрона поддерживается на одном уровне путем изменения напряжения

и тока. Затем происходит проверка скорости нанесения покрытия при помощи кварцевых датчиков. И вывод магнетронов на рабочий режим, и проверка скорости нанесения осуществляется в гараже. После проверки скорости нанесения магнетроны выезжают из гаражей – начинается нанесение слоя Al на образцы (рис. 7).



**Рисунок 7.**

*Нанесение слоя Al на образцы методом магнетронного распыления*

Причем один магнетрон идет с небольшим запаздыванием относительно другого. Это сделано, чтобы избежать столкновения магнетронов в центре. Дойдя до центра, каждый из двух магнетронов выключается и с максимальной скоростью движется обратно в гараж. Затем включается только один магнетрон и цикл действий повторяется. Таким образом, нанесения слоя Al толщиной 120 нм осуществляется за три прохода при помощи двух магнетронов. После нанесения слоя Al включается магнетрон с мишенью из кремния. Происходит вывод его на рабочий режим, измерение скорости нанесения, после чего магнетрон выезжает из гаража, и начинается процесс нанесения слоя SiO<sub>2</sub>. Слой кварца получается путем окисления частиц кремния, распыленного из мишени, в среде подаваемой смеси из аргона и кислорода. Для этого источник питания магнетрона работает в импульсном режиме при стабилизации напряжения. При работе источника питания в импульсном режиме кремний на поверхности мишени окисляется в промежутках

Таблица 1.

## Итоговые параметры технологического процесса базового покрытия

Параметры технологического процесса нанесения базового покрытия	Значение параметра	
	для нанесения слоя Al	для нанесения слоя SiO <sub>2</sub>
Скорость вращения оправы	возрастающая линейно от 0.2 до 3 оборотов/мин.	постоянная, 2 оборота/мин.
Скорость движения магнетрона	возрастающая по определенному закону	возрастающая по определенному закону
Скорость нанесения покрытия	постоянная	постоянная
Параметры источника питания магнетрона	стабилизация мощности	стабилизация напряжения
Количество проходов магнетрона	3 прохода двумя магнетронами	3 прохода одним магнетроном

между импульсами подачи напряжения, а при подаче напряжения получившийся оксид кремния распыляется. Слой SiO<sub>2</sub> толщиной 180 нм осуществляется за три прохода при помощи одного магнетрона. В табл. 1 изложены итоговые параметры технологического процесса базового покрытия.

#### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ

По итогам этапа обработки нанесения базового покрытия были получены следующие результаты:

- разброс толщины слоя Al в радиальном направлении составил от 115.9 нм до 125.9 нм (рис. 8) при требовании 120 нм ± 6 нм (±5%), а разброс толщин между радиусными направлениями составил от 120.4 нм до 123.8 нм по усредненным значениям (рис. 9).

- $R_{\text{среднее}}$  составил от 85% до 85.7% согласно спектральным распределениям коэффициента отражения, представленным на рис. 10;

- неравномерность слоя SiO<sub>2</sub> составила меньше ±5%.

Это видно из рис. 11 и 12, на которых отображены участки спектральных кривых покрытий на разных образцах. Рис. 11 показывает разброс спектральных кривых вследствие неравномерности слоя SiO<sub>2</sub> в области спектра около длины волны 700 нм, а рис. 12 показывает то же, но для области около 400 нм. К сожалению, данный метод дает лишь приблизительную оценку неравномерности. Так для области около 700 нм неравномер-

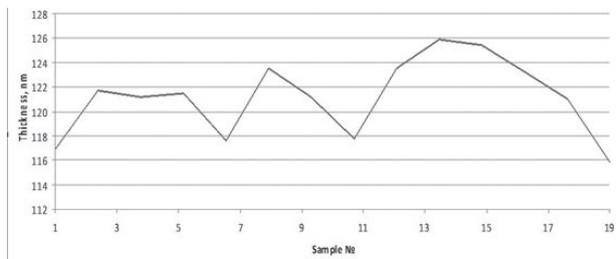
ность составляет примерно ±1%, а для области около 400 нм – примерно ±2%.

Адгезия и механическая прочность покрытия соответствуют поставленным требованиям на всех образцах в течение всей обработки нанесения базового покрытия. Более того, покрытие на части образцов было испытано на истирание при 3000 оборотов. И покрытие на всех исследуемых образцах выдержало данное испытание. По стандарту оптического приборостроения, принятому в России, это соответствует высшей группе механической прочности.

Были проведены ускоренные испытания для определения максимального срока службы покрытия. По итогам испытаний базовое покрытие выдержало 30 циклов без изменения своих характеристик. То есть ресурс работы базового покрытия с отражающим слоем Al толщиной 120 нм и с защитным слоем SiO<sub>2</sub> толщиной 180 нм составляет 30 лет.

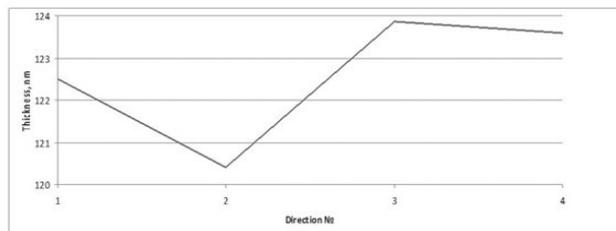
#### 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ.

В ОАО ЛЗОС была создана вакуумная установка для нанесения отражающих покрытий на крупногабаритные оптические детали диаметром до 4.0 м методом магнетронного распыления. Отработано базовое отражающее Al покрытие с защитным слоем из SiO<sub>2</sub>, для которого получены высокие результаты по равномерности - ±5% на диаметре 4 м, по механической прочности, адгезии и хорошие по оптическим параметрам. Проведены ускорен-



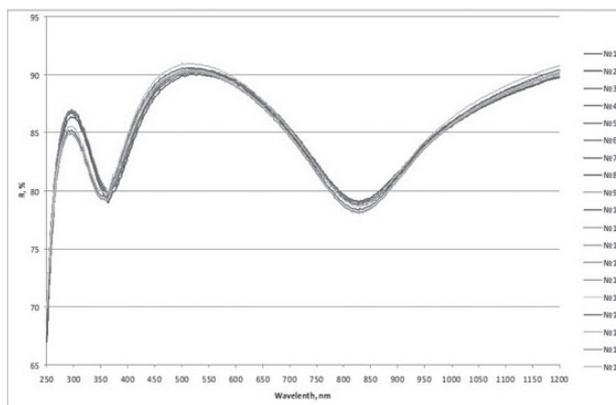
**Рисунок 8.**

**Распределение толщины слоя Al  
в радиальном направлении**



**Рисунок 9.**

**Распределение толщины слоя Al  
по радиусным направлениям**

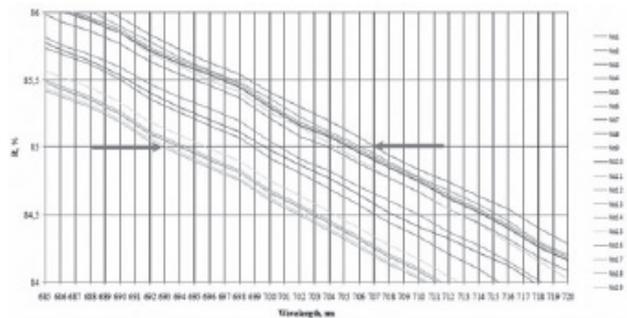


**Рисунок 10.**

**Спектральный коэффициент отражения  
базового покрытия Al+SiO<sub>2</sub>**

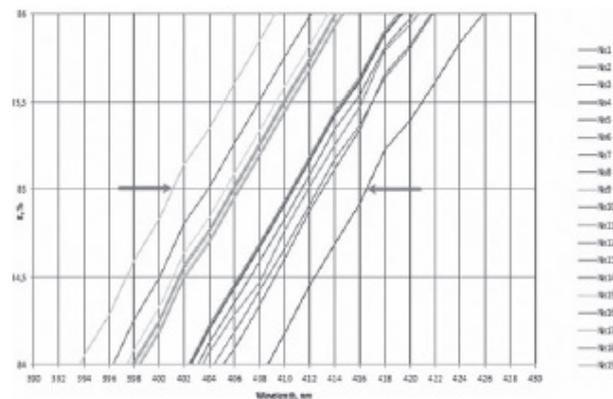
ные испытания базового покрытия, по результатам которых было определено, что срок эксплуатации такого покрытия составляет 30 лет.

Произведено нанесение базового покрытия на две детали диаметром 1150 мм: плоское зеркало и сферическое зеркало с радиусом сферы 34000 мм, и на асферическое зеркало диаметром 1120 мм. На всех трех зеркалах параметры покрытия соответствовали значениям, достигнутым при отработке нанесения базового покрытия. В ближайшем будущем планируется проведение работ по улучшению равномерности базового покрытия, а также нанесение на ряд деталей различного



**Рисунок 11.**

**Разброс спектральных кривых покрытия  
из-за неравномерности слоя SiO<sub>2</sub>  
в области спектра около 700 нм**



**Рисунок 12.**

**Разброс спектральных кривых покрытия  
из-за неравномерности слоя SiO<sub>2</sub>  
в области спектра около 400 нм**

диаметра – от 1900 мм до 2100 мм. Прорабатывается вопрос нанесения покрытия на детали диаметром 3190 мм и 4000 мм.

С вводом в эксплуатацию вакуумной установки для нанесения отражающих покрытий на крупногабаритные оптические детали методом магнетронного распыления ОАО ЛЗОС обладает полным – от варки стекла до нанесения покрытия - производственным циклом изготовления крупногабаритных оптических деталей диаметром до 4.0 м.

*Список литературы:*

1. M. Voccas ; T. Vucina ; C. Araya ; E. Vera ; C. Ahhee. Coating the 8-m Gemini telescopes with protected silver. Proc. SPIE 5494, Optical Fabrication, Metrology, and Material Advancements for Telescopes, 239 (September 24, 2004).
2. Alistair M McPherson, A. Born, W. Sutherland, J. Emerson, B. Little, P. Jeffers, M. Stewart, J. Murray, K. Ward. VISTA: Project Status. Proc. of SPIE Vol. 6267, 626707-12 (2006).

# КОМПЕНСАЦИЯ ДРОЖАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ В ТЕЛЕВИЗИОННЫХ КАМЕРАХ НА МНОГО-ПИКСЕЛЬНЫХ МАТРИЦАХ В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ

ГИНЗБУРГ Э.С., ПЛЕШКОВА Д.М.

ОАО «Швабе - Приборы», г. Новосибирск

E-mail: post@tochpribor.com

*Статья посвящена вопросу компенсации колебаний и дрожания изображения в телевизионной камере смещением изображения в видеопотоке в реальном времени с использованием метода сопоставления блоков. В статье приведены данные, полученные для четырехвыводной фотоприемной матрицы.*

**Ключевые слова:** стабилизация изображения, дрожание кадра, метод сопоставления блоков.

Для наблюдения за удаленными объектами видеокамеры устанавливаются на высокие мачты и на земле оператор наблюдает за изображением. Из-за ветра на высоте происходит движение мачты, в связи, с чем наблюдается колебание и дрожание изображения, и это усложняет работу оператора. Поэтому одним из требований к подобным системам является наличие механизма, позволяющего максимально снизить колебания и дрожание изображения. Одним из вариантов является использование гиросtabilизированной платформы. Другим вариантом является использование оптической стабилизации изображения. Но оба этих варианта приводят к существенному утяжелению и удорожанию системы наблюдения. Данная статья посвящена компенсации колебаний и дрожания изображения смещением изображения в видеопотоке.

Существуют следующие алгоритмы подхода к решению задачи компенсации дрожания изображения в видеопотоке. [1].

Компенсация движения производится по объектам, блокам фиксированного размера или кадру целиком. Чаще всего используется класс параллельных сдвигов с ограниченным максимальным сдвигом, хотя он может быть дополнен операциями поворота и масштабирования.

Наиболее распространенной мерой, по которой принимается искомое решение, является минимум суммы абсолютных разностей (Sum of Absolute Differences, SAD)

$$SAD = \sum_{(x,y) \in Bloc} |F_{cadr}(x,y) - F_{next}(x+u, y+v)|$$

и минимум суммы квадратов разностей (Sum of Squared Differences, SSD)

$$SSD = \sum_{(x,y) \in Bloc} [F_{cadr}(x,y) - F_{next}(x+u, y+v)]^2$$

где суммирование производится по всем точкам объекта компенсации (например, прямоугольного блока),  $F_{cadr}$  и  $F_{next}$  – яркость исходного и последующего кадра, соответственно, в точке  $(x,y)$ ,  $(u, v)$  – величина смещения кадра.

Наиболее популярные и устоявшиеся подходы к компенсации дрожания изображения: пиксельный метод, метод сопоставления блоков и полный перебор всех возможных значений векторов смещений.

## *Пиксельный метод*

Один из наиболее ранних методов компенсации движения [2]. Компенсация производится отдельно для каждого пикселя кадра, рассматриваемый класс преобразований – линейные сдвиги. Минимизируется обычно

суммарная ошибка компенсации для всего кадра (Displaced Frame Difference, DFD):

$$DFD(dx, dy, n) = \sum |F(x, y, n) - F(x + dx, y + dy, n - 1)|$$

где  $F(x, y, n)$  – яркость кадра номер  $n$  в точке  $(x, y)$ ,  $(dx, dy)$  – вектор смещения для точки  $(x, y)$ . Результатом алгоритма для текущего кадра с номером  $n$  будет такой набор векторов  $(dx_0, dy_0)$  для каждой точки кадра  $(x, y)$ , что

$$DFD(dx_0, dy_0, n) = \min DFD(dx, dy, n)$$

по всевозможным наборам  $(dx, dy)$ .

Подход основан на предположении, что яркость можно приблизить линейной функцией от положения точки в кадре. Это предположение справедливо только для сравнительно небольшой окрестности этой точки, что существенно снижает область применения данного метода и позволяет ему правильно оценивать лишь небольшие сдвиги.

Это ограничение можно преодолеть, оценивая не сам вектор сдвига, а его разность с некоторым вектором предсказания, который расположен ближе к искомому вектору, чем нулевой. В общем случае, когда движение может составлять десятки пикселей, вектор сдвига ищется с помощью итерационного алгоритма – на каждом шаге происходит уточнение найденного на предыдущем этапе значения. В качестве начального приближения можно взять вектор сдвига для этой же точки, найденный при обработке предыдущего кадра.

Этот метод имеет ряд серьезных недостатков, вследствие чего в настоящее время он представляет чисто теоретический интерес и практически нигде не используется. Основные его недостатки – высокая сложность (движение оценивается для каждого пикселя в отдельности), низкая точность (в силу несостоятельности основного предположения метода) и большой объем информации, описывающей движение (для каждого пикселя задается вектор смещения в виде пары целых чисел).

### Метод сопоставления блоков

Этот класс методов является логическим следствием предыдущего, устраняющим большую часть его недостатков, так как единицей компенсации в нем принят прямоугольный блок (обычно квадрат  $16 \times 16$  пикселей или меньшего размера). Движение также ищется в классе линейных смещений, поэтому описывается такое движение двумерным вектором смещения для каждого блока.

Основное предположение метода – за время, проходящее между двумя последовательными кадрами, объекты и их местоположение изменяются незначительно. Тогда в окрестности любой точки кадра это изменение с достаточно высокой степенью точности можно приблизить параллельным переносом этой окрестности на некоторый вектор. И в самом деле, подавляющее большинство обычных видеопоследовательностей удовлетворяют этому ограничению, за исключением участков резкой смены сцены, то есть характер движения объектов можно считать почти всюду непрерывным.

Принцип работы метода следующий:

- текущий кадр разбивается на непересекающиеся блоки одного размера  $B(x, y)$ ;
- для каждого блока  $B(x, y)$  в небольшой окрестности ищется наиболее «похожий» на него блок  $BP(x+u, y+v)$  в последующем кадре. «Похожесть» определяется выбранной метрикой, обычно SAD или SSD;
- вектор  $(u, v)$ , на котором достигается минимум выбранной функции ошибки, считается вектором смещения для данного блока.

В качестве функции ошибки компенсации чаще всего используется SAD для скомпенсированного блока, так как её вычисление проще реализуется.

Погрешности могут возникать при попадании блока на движущийся объект, поэтому, чем больше размер блока, тем точнее определяется перемещение кадра целиком.

Полный перебор [3]

Наилучшего качества приближения, то есть минимальной ошибки компенсации, может гарантировать полный перебор всех возможных значений векторов смещения из до-

Таблица 1.

Результаты опытных вычислений SAD и определения смещения блоков

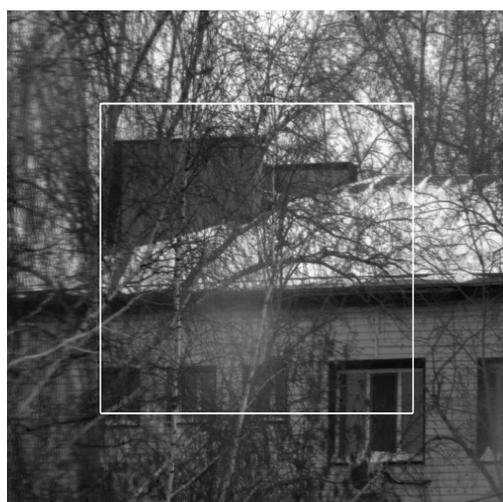
№ кадра в видеопоследовательности	Минимальная величина SAD для первого блока	Смещение кадра по отношению к предыдущему	Смещение кадра по отношению к нулевому
1	339715	(8,-10)	(8,-10)
2	319531	(-9,-15)	(-1,-24)
3	330356	(-11,-12)	(-12,-36)
4	300863	(-8,-9)	(-20,-45)
5	226222	(-9,9)	(-29,-36)
6	274128	(-11,0)	(-40,-36)

пустимой области с подсчётом ошибки компенсации для них и выбор того вектора, на котором достигается минимум ошибки [3]. Этот подход считается эталонным, и сравнение с ним является неотъемлемой частью любой работы, посвященной разработке нового алгоритма компенсации дрожания. Однако практическое его применение в потребительских продуктах не представляется возможным ввиду слишком большой вычислительной сложности.

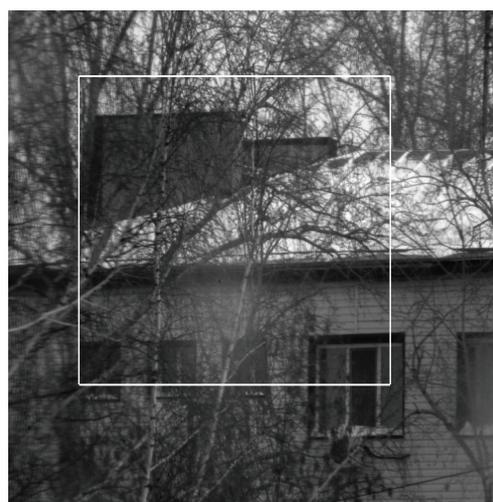
На современных многопиксельных фотоприемных матрицах с целью ускорения вывода изображения (повышения частоты кадров) используется два, четыре, восемь и т. д. выходов, что позволяет распараллелить процесс расчета смещения блоков. Таким образом, естественно получается метод сопоставления

блоков, при котором количество блоков равно числу выходов фотоприемной матрицы. При этом, несмотря на возникающие определенные вычислительные сложности, желательно выбирать блоки как можно большего размера. Это позволяет существенно снизить погрешность определения смещения кадра, вызванную наличием шумов на изображении и присутствием в кадре движущихся объектов.

Алгоритм сопоставления блоков был опробован на четырехвыводной фотоприемной матрице с форматом кадра 1024×768 пикселей. Каждый выход матрицы определяет вертикальный участок кадра размером 256×768 пикселей, которому сопоставляется блок размером 128×384 пикселей, соответствующего участка из предыдущего кадра. Вели-



а) Кадр № 0



б) Кадр № 6

Рисунок 1.

Отображаемое на экране изображение

чина межкадрового смещения вычисляется для векторов в окрестности  $\pm 16$  пикселей как сумма абсолютных разностей. В результате вычислений получаем матрицу  $32 \times 32$  значений SAD, в которой ищется минимальное значение и по нему определяется вектор смещения блока. Общее смещение кадра определяется как среднее смещений всех четырех блоков кадра. Результаты вычислений для шести последовательных кадров приведены в табл. 1.

Для отображения на экране телевизионной камеры выбирается изображение размером  $640 \times 480$  пикселей. Для нулевого кадра смещение изображения принимается равным  $(0,0)$ . На рис. 1 показано отображаемое на экране изображение в нулевом кадре и смещенное отображаемое изображение в кадре № 6.

#### *Список литературы:*

1. Кубасов Д., Ватолин Д. Обзор методов компенсации движения. Компьютерная графика и мультимедиа. Выпуск №3(2)/2005. <http://cgm.computergraphics.ru/content/view/76> (дата обращения: 19.12.2014)
2. G. de Haan. Progress in motion estimation for video format conversion. IEEE Transactions on Consumer Electronics Vol 46 No 3 Aug 2000 pp 449-450
3. Гришин С.В., Ватолин Д.С., Лукин А.С., Путилин С.Ю., Стрельников К.Н. Обзор блочных методов оценки движения в цифровых видеосигналах. Программные системы и инструменты. Тематический сборник №9, М.: Изд-во факультета ВМиК МГУ, 2008, стр.50-62.

# ХОЛОДНАЯ ПЛАЗМА ПРИ АТМОСФЕРНОМ ДАВЛЕНИИ КАК ЭФФЕКТИВНЫЙ ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ УПРОЧНЕНИЯ ОПТИЧЕСКОГО КОНТАКТА В ЛАЗЕРНЫХ ГИРОСКОПАХ

АЗАРОВА В.В., АКИШЕВ Ю.С., БЛАНК В.Д., ГОЛЯЕВ Ю.Д., ГОЛЯЕВА А.Ю., ГРУШИН М.Е.,  
КУЛЬНИЦКИЙ Б.А., ПЕТРЯКОВ А.В., СУХОВ Е.В., ТРУШКИН Н.И.

АО «Научно-исследовательский институт «Полюс» им. М.Ф.Стельмаха»

E-mail: azarova\_v\_v@mail.ru

*Соединение оптических деталей лазерных гироскопов основано на технологии оптического контакта. Эта технология подразумевает тщательную полировку контактирующих поверхностей и возможность их сближения на расстояния порядка десятков ангстрем. На таких расстояниях действуют силы межмолекулярного взаимодействия, способные обеспечить прочное сцепление контактирующих тел. В реальности на контактирующих поверхностях существуют различные пленки, которые ослабляют оптический контакт. В данной работе впервые показано, что обработка оптических деталей холодной плазмой аргона перед их посадкой на оптический контакт существенно улучшает сцепление изделий из ситалла и других стеклокерамических материалов.*

**Ключевые слова:** оптический контакт, холодная плазма, ситалл, лазерный гироскоп.

## ВВЕДЕНИЕ

Оптические детали лазерных гироскопов (ЛГ) изготавливаются из материалов с малым коэффициентом термического расширения, среди которых находятся ситалл, зеродур и клиакерам (Clearceram-Z) [1, 2]. При этом механически прочное и вакуумно-плотное соединение оптических деталей из указанных материалов в единое целое является одной из серьезных технологических проблем при изготовлении ЛГ, поскольку натекание в гироскоп таких примесей как кислород, водород и углеводороды [3] существенно ограничивает срок его службы. В настоящее время общепринятым методом соединения оптических деталей ЛГ является технология оптического контакта (ОК) [4-6]. Эта технология основана на контакте двух тщательно отполированных поверхностей твердых тел, сближенных

на расстояния порядка десятков ангстрем. На таких расстояниях действуют силы межмолекулярного взаимодействия, которые и обеспечивают прочное сцепление контактирующих тел.

В реальности после механической полировки на контактирующих поверхностях остаются/возникают различные пленки толщиной в несколько атомных слоев, которые ослабляют межмолекулярное взаимодействие двух поверхностей и, тем самым, ухудшают качество их оптического контакта. Как показала практика, традиционная «мокрая» химическая чистка полированных поверхностей не устраняет полностью эти пленки, в связи с чем была поставлена задача поиска новых методов обработки оптических поверхностей перед их посадкой на оптический контакт. В данной работе предложен новый метод «су-

хой» чистки полированных поверхностей, который может быть использован при сборке ЛГ непосредственно перед посадкой деталей на оптический контакт. Метод заключается в обработке оптических поверхностей струей холодной плазмы, формируемой газоразрядным источником плазмы на основе высокочастотного барьерного разряда в потоке аргона при атмосферном давлении. Заметим, что поверхностная модификация различных материалов холодной плазмой при атмосферном давлении используется давно [7 – 16], однако применение холодной плазмы для упрочнения оптического контакта деталей в ЛГ предложено нами впервые.

Наибольшее внимание в нашей работе уделено исследованию плазменного метода на примере формирования ОК для деталей, изготовленных из ситалла, хотя часть экспериментов была проведена и с клиакером. В экспериментах использовался ситалл марки СО - 115М, который является радио- и оптически прозрачным, а также термически- и химически стойким. Состав (в % по весу) исходной шихты, из которой сварен ситалл, является следующим:

$\text{SiO}_2 - 66,7\%$ ;  $\text{Al}_2\text{O}_3 - 20,9\%$ ;  $\text{Li}_2\text{O} - 4,2\%$ ;  
 $\text{TiO}_2 - 4,5\%$ ;  $\text{As}_2\text{O}_3 - 0,5\%$

Следует отметить, что информации об исходном составе шихты совершенно недостаточно, чтобы предсказать микроструктуру ситалла, т.е. состав кристаллической фазы, размер кристаллитов, их плотность в ситалле, соотношение между количеством кристаллической и аморфной фазы в ситалле, а также состав аморфной фазы. Причина в том, что на микроструктуру влияет не только исходный состав шихты, но и многие другие конкретные особенности процесса варки и охлаждения ситалла. В то же время ясно, что микроструктура ситалла будет влиять на поверхностные процессы, от которых может зависеть прочность оптического контакта. Чтобы ответить на вопрос о микроструктуре ситалла и процессах на его поверхности, мы использовали целый арсенал диагностик, характеризующих объем и поверхность ситалла. Перечень диагностик приведен в соот-

ветствующем разделе ниже. Повышение механической прочности ОК после плазменной обработки проверялось в специальных экспериментах, определяющих усилие, отрывающее прижатые детали друг от друга.

### ИСТОЧНИК ХОЛОДНОЙ ПЛАЗМЫ ПРИ АТМОСФЕРНОМ ДАВЛЕНИИ

В экспериментах использовался малогабаритный цилиндрический плазменный источник, внешний вид которого изображен на рисунке 1. Струя холодной плазмы получалась в результате продува аргона сквозь разрядную зону между цилиндрическими электродами, расположенными внутри плазменного источника. В качестве газового разряда использовался электрический разряд переменного тока, т.е. барьерный разряд с частотой синусоидального напряжения 100 кГц и амплитудой  $4 \div 5$  кВ. Электрическая мощность, потребляемая разрядом, была небольшой и составляла всего  $5 \div 7$  Вт. Скорость плазменной струи на выходе из источника составляла 20 м/с.

Как видно из рис. 1, плазменная струя, истекающая в свободное пространство, является достаточно тонкой (около 1 мм), но когда струя ударяет в обрабатываемое изделие, то она сильно растекается по его поверхности. Таким образом, тонкая струя плазмы обрабатывает поверхность по площади, намного превышающей ее собственное исходное сечение.

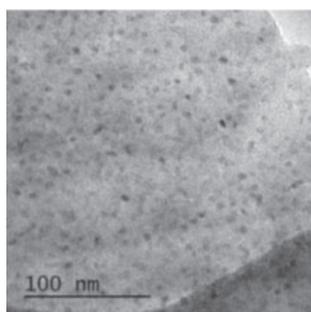


Рисунок 1.

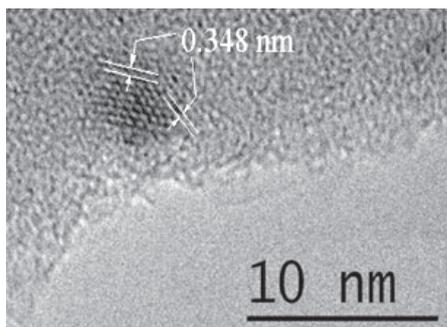
*Внешний вид источника и плазменной струи, свободно истекающей в окружающий воздух и растекающейся по поверхности обрабатываемого изделия*

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ МИКРОСТРУКТУРЫ СИТАЛЛА

Нами были проведены исследования по выяснению соотношения между аморфной и кристаллической фазами ситалла, а также по идентификации кристаллической фазы. Электронно-микроскопические исследования выполнены на приборе JEM-2010, оборудованном EDS приставкой. На рис. 2 приведена фотография скола, на которой мелкозернистый фон соответствует аморфной фазе, а крупные темные зерна соответствуют кристаллической фазе. Размер крупных зерен-кристаллов варьируется от 5 до 10 нм. В целом ситалл выглядит достаточно изотропным. Видно, что объем ситалла в основном заполнен мелкозернистой аморфной фазой - именно исключительная мелкозернистость является причиной многих ценных свойств ситалла. Кристаллическая фаза довольно однородно распределена в ситалле, но занимает



а)



б)

Рисунок 2.

Фотографии свежего скола ситалла, полученные просвечивающим электронным микроскопом.

а) Темные пятна - кристаллические частицы  $\text{LiAl}(\text{SiO}_3)_2$  в аморфной матрице; б) Кристаллическая частица  $\text{LiAl}(\text{SiO}_3)_2$  в мелкозернистой аморфной матрице. Угол между плоскостями (101) и (111) равен  $45.33^\circ$

лишь несколько процентов от его объема. Для идентификации структуры кристаллитов был выполнен рентгено-структурный анализ скола ситалла. Полученная дифрактограмма представлена на рис. 3, которая получена на дифрактометре PANanalytical Empyrean.

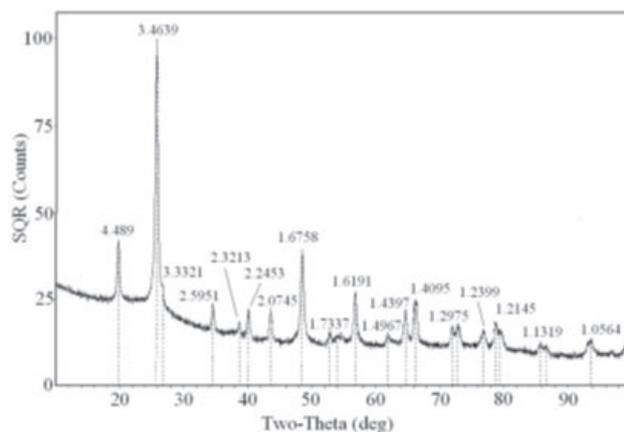


Рисунок 3.

Дифрактограмма ситалла, полученная

на дифрактометре PANanalytical Empyrean.

Цифры сверху пиков показывают межплоскостные расстояния в ангстремах в кристаллитах ситалла в зависимости от Брэгговского угла

В результате анализа было установлено, что кристаллическая фаза соответствует кристаллу  $\alpha$ -сподумена, имеющего химическую формулу  $\text{LiAl}(\text{SiO}_3)_2$ . Кристаллический сподумен формируется при варке ситалла из  $\text{Li}_2\text{O}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и  $\text{SiO}_2$  со следующим стехиометрическим составом:  $(\text{Li}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2)$ . Инициатором кристаллизации (или катализатором) является  $\text{TiO}_2$ , который в небольших количествах специально добавляется в состав шихты. Мелкозернистая аморфная матрица состоит в основном из  $\text{SiO}_2$  и в первом приближении может рассматриваться как аморфный кварц. В таком случае, механизм Ван-дер-Ваальсовского сцепления гладких поверхностей ситалл-ситалл, ситалл-кварц и кварц-кварц может быть идентичным.

## ИЗМЕНЕНИЕ СОСТАВА ПЛЕНКИ НА ПОВЕРХНОСТИ СИТАЛЛА ПОД ДЕЙСТВИЕМ ПЛАЗМЫ

Элементный состав пленки на поверхности ситалла до и после плазменной обработки измерялся Оже-спектроскопией с исполь-

зованием Оже-анализатора Riber OPC-200. Методом Оже-спектроскопии определяются усредненные атомные концентрации элементов на верхнем слое поверхности толщиной около 3-5 нм. Результаты измерений состава поверхности при разных временах обработки ситалла холодной аргоновой плазмой представлены на рис. 4.

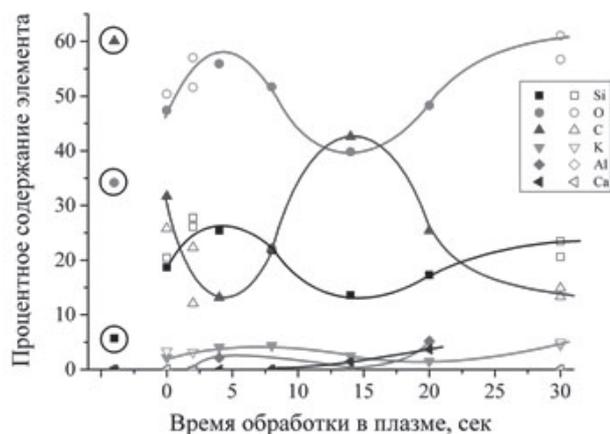


Рисунок 4.

*Процентное содержание химических элементов на поверхности ситалла до и после плазменной обработки. Значки в кружках показывают содержание Si, O и C, измеренное на поверхности ситалла до его химической чистки. Содержание элементов при времени плазменной обработки  $t=0$  соответствует измерениям, полученным с образцом ситалла после его химической чистки*

На рис. 4 обращает на себя внимание большое содержание углерода на поверхности ситалла, хотя углерода нет в исходном химическом составе ситалла. Возможное объяснение этого феномена состоит в существовании некоего двух-стадийного процесса, первая стадия которого связана с физической адсорбцией  $\text{CO}_2$ , содержащегося в воздухе, а вторая — с химическим связыванием углерода на поверхности ситалла. Окончательное исследование истинной причины обнаруженного эффекта еще предстоит.

Из рис. 4 видно, что химическая чистка снижает содержание углерода, но еще больший эффект по снижению углерода дает плазменная обработка. В то же время зависимость содержания углерода и других элементов носит немонотонный характер от време-

ни обработки плазмой. Можно отметить, что уменьшение содержания углерода приводит к росту содержания кислорода и кремния (и наоборот, увеличение содержания углерода приводит к уменьшению содержания кислорода и кремния).

#### ВЛИЯНИЕ ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ НА МЕХАНИЧЕСКУЮ ПРОЧНОСТЬ ОК

Результаты испытаний ОК ситалловых и клиакеромовых образцов на механическую прочность представлены на рис. 5 и 6. На этих рисунках результаты приведены для оптимального времени обработки образцов плазмой.

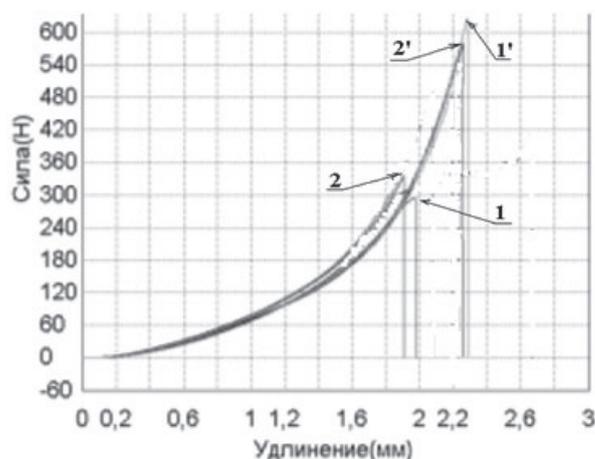


Рисунок 5.

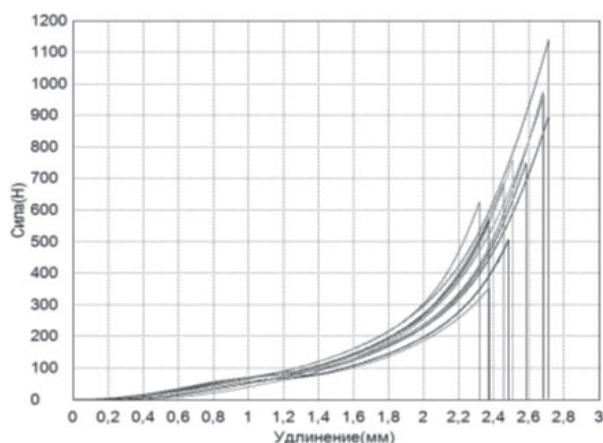
*Результаты испытаний механической прочности оптического контакта контрольных (1, 2) и обработанных плазмой (1', 2') ситалловых (1, 1') и клиакеромовых (2, 2') образцов. Резкий спад кривых соответствует механическому отрыву прижатых друг к другу образцов. Графики отражают силы сцепления для образцов, не подвергавшихся термообработке после плазменной обработки*

На рис. 5 представлены результаты механических испытаний для образцов, не подвергавшихся термообработке после плазменной обработки. Как видно из этого рисунка, обработка поверхностей контактирующих деталей ЛГ холодной плазмой аргона в атмосфере воздуха позволяет существенно увеличить прочность оптического контакта по сравнению с контрольными образцами, подвергавшимися только «мокрой» химической чистке. Контрольные образцы ситалла и клиакерама

отрывались друг от друга при силе, равной примерно 300 Н. Наилучшие результаты получены при времени плазменной обработки около 5с. При этом прочность оптического контакта увеличилась в 2.12 раза для изделий из ситалла и в 1.72 раза - для изделий из клиакерама. Оптимальное время плазменной обработки коррелирует с временем на рисунке 4, при котором атомное содержание кремния и кислорода на поверхности максимально, а содержание углерода минимально.

При длительной обработке плазмой (более 30 секунд) наблюдается снижение силы сцепления обработанных поверхностей, хотя концентрации атомов Si и O в верхних слоях такие же высокие, как и при оптимальной плазменной обработке. Возможная причина этого эффекта связана с разрыхлением плазмой верхних слоев ситалла и клиакерама за счет их эрозии. Эрозия проявляется как раз при больших временах плазменной экспозиции, она может создать шероховатость контактирующих поверхностей и, тем самым, уменьшить силы межмолекулярного сцепления.

Нами проведены также эксперименты по влиянию термообработки на прочность ОК



**Рисунок 6.**

*Результаты испытаний механической прочности оптического контакта контрольных и обработанных плазмой ситалловых и клиакеромовых образцов. Резкий спад кривых соответствует механическому отрыву прижатых друг к другу образцов. Графики отражают силы сцепления для образцов, подвергавшихся термообработке после плазменной обработки*

образцов, подвергшихся плазменной обработке. Полученные результаты механических испытаний представлены на рис. 6.

Как видно из рис. 6, суммарное действие холодной плазмы и термообработки существенно увеличивает механическую прочность оптического контакта образцов из ситалла и клиакерама - в некоторых случаях почти в 3 раза по сравнению с контрольными образцами, обработанными только «мокрой» химией и которые характеризуются силой сцепления около 400 Н. Причем существенное увеличение прочности оптического контакта получается не только для родственных пар ситалл-ситалл и клиакерам-клиакерам, но также и для смешанной пары ситалл-клиакерам.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненных работ установлена микроструктура ситалла марки СО-115М и выяснен тип кристалла, формирующего кристаллическую фазу в аморфной матрице, т.е. кристаллическая фаза соответствует кристаллу  $\alpha$ -сподумена, имеющего химическую формулу  $\text{LiAl}(\text{SiO}_3)_2$ . Мелкозернистая аморфная матрица состоит в основном из  $\text{SiO}_2$  и в первом приближении может рассматриваться как аморфный кварц.

Показано, что кратковременная обработка ситалла и клиакерама холодной плазмой аргона позволяет существенно повысить прочность ОК для этих материалов. Плазменная технология не требует больших затрат и большого пространства для ее развертывания в реальном производстве, поскольку источник плазмы является малогабаритным и мобильным. Данная технология обеспечивает высокую скорость обработки деталей ЛГ, малое энергопотребление, не требует использования химически агрессивных жидкостей и является экологически безопасной.

Полученные результаты позволяют рекомендовать холодную плазму аргона при атмосферном давлении в качестве эффективного инструмента для новой технологии упрочнения оптического контакта деталей, используемых при сборке лазерных гиро-

скопов. Кроме того, плазменная технология может быть использована не только в целях упрочнения ОК деталей ЛГ, но и в более широких целях для модификации поверхностей различных материалов, особенно термически нестойких.

*Список литературы:*

1. В.В. Азарова, Ю.Д. Голяев, И.И. Савельев. Зеemanовские лазерные гироскопы. Квантовая электроника, 2015, 45 :2, 171–179. (V V Azarova, Yu D Golyaev and I I Saveliev, “Zeeman laser gyroscopes”, Quantum Electron. 2015, 45, 171).

2. «Performance evaluation of the Honeywell GG1308 miniature ring laser gyroscope» by M.F. Vimmins and L.D. Gallop, Defence research establishment Ottawa, report no. 1166, 1993

3. «RF CLEANNING-RING LASER GYRO» by Gary D. Babcock and Fredrick Vescial, Autonetics Division of Rockwell international Corporation, TECHNICAL REPORT AFAL-TR-73-190, 1973.

4. Обреимов И.В., Трехов Е.С., Оптический контакт полированных стеклянных поверхностей, «ЖЭТФ», 1957, т. 32, в. 2, с. 185.

5. Дерягин Б.В., Кротова Н.Л., Смилга В.П., Адгезия твердых тел, М., 1977.

6. Золотарёв В.М. и др. Исследование механизма контактного взаимодействия плоских поверхностей диэлектриков, «ФТТ», 1978, т. 20, №1, с.177.

7. Occihiello E., Morra M., Morini G., Garbassi F. Oxygen-plasma treated polypropylene interfaces with air, water, and epoxy resins: Part I. Air and water, «J Appl Polym Sci», 1991; vol. 4, p. 551.

8. Гильман А.Б., Драчев А.И., Кузнецов А.А., Лопухова Г.В., Потапов В.К. Действие разряда постоянного тока на свойства и структуру полиимидных пленок, «ХВЭ», 1997, т. 31, №2, с. 141.

9. Akishev Yu, Napartovich A, Trushkin N, Grushin M. Novel AC and DC non-thermal plasma sources for cold surface treatment of polymer films and fabrics at atmospheric pressure, «Plasmas Polym», 2002; vol.7, p. 261.

10. Akishev Yu.S., Trushkin N.I., Temmerman E., Leys C., Versshuren J. Surface Modification With a Remote Atmospheric Pressure Plasma: DC Glow Discharge and Surface Streamer Regime, “J. Phys. D: Appl. Phys.”, 2005, vol. 38, pp. 505.

11. Акишев Ю.С., Грушин М.Е., Карванова Ю.А., Трушкин Н.И., Ярославцев А.Б. Диффузионные свойства мембран МК-40 с поверхностью, модифицированной обработкой плазмой, “Вестник МГПУ (Естественные науки)”, 2008, т.2, в.24, С 126.

12. Akishev Yu., Grushin M., Dyatko N., Kochetov I., Napartovich A., Trushkin N., Tran Minh Duc and Descours S. Studies on cold plasma–polymer surface interaction by example of PP- and PET-films, “J. Phys. D: Appl. Phys.”, 2008, vol. 41, 235203.

13. Buyle G., Schneider J., Walker M., Akishev Y., Napartovich A., Perucca M. Systems for Surface Treatment, In: Plasma Technology for Hyperfunctional Surface. Food, Biomedical and Textile Applications. 2010, (Ed. H Rausher, M. Perucca, G Buyle), WILEY-VCH, Verlag, GmbH&Co. KGaA, Weinheim, 400 p, pp. 33-62.

14. Akishev Y., Grushin M., Dyatko N., Kochetov, Napartovich A., Trushkin N. Physics and Chemistry of Nonthermal Plasma at Atmospheric Pressure Relevant to Surface Treatment, In: Plasma Technology for Hyperfunctional Surface. Food, Biomedical and Textile Applications. 2010, (Ed. H Rausher, M. Perucca, G Buyle), WILEY-VCH, Verlag, GmbH&Co. KGaA, Weinheim, 400 p, pp. 295-332.

15. Akishev Yu. S., Grushin M.E., Drachev A.I., Karalnik V.B., Petryakov A.V. and Trushkin N.I. On Hydrophilicity Ageing of PP and PET Films Induced by Ultraviolet Radiation and Hydrogen Atoms, “The Open Plasma Physics Journal”, 2013, vol. 6, (Suppl 1: M4) 19-29.

16. Акишев Ю.С., Гильман А.Б., Грушин М.Е., Драчев А.И., Каральник В.Б., Петряков А.В., Трушкин Н.И. Изменение во времени поверхностных свойств полимеров, модифицированных в плазме, «Химия и химическая технология», 2012, т. 55, в.4, с.42.

# ЛАЗЕРНЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ ХАРАКТЕРИСТИК АТМОСФЕРНЫХ АЭРОЗОЛЬНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ

ИВАНОВ С.Е., ФЕДОТОВ Ю.В., ГОРОДНИЧЕВ В.А., БЕЛОВ М.Л., ФИЛИМОНОВ П.А.

НИИ Радиоэлектроники и лазерной техники Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана

E-mail: gorod@bmstu.ru, ekomonit@bmstu.ru, belov@bmstu.ru, ivanov\_serгей2@mail.ru

*В статье описаны результаты разработки лазерного измерителя характеристик атмосферных аэрозольных неоднородностей, работающего на длине волны излучения 0,532 мкм. Приведены характеристики блоков лазерного измерителя и описана блок-схема алгоритма обработки результатов измерений. Представлены примеры типичного лазерного эхо-сигнала, обратно рассеянного атмосферой, и пространственно-временного распределения коэффициента вариации объемного коэффициента обратного рассеяния атмосферы. Результаты измерений показывают, что размер регистрируемых аэрозольных неоднородностей в среднем составляет величину ~ 4 м, а коэффициент вариации ~ 4-5%.*

**Ключевые слова:** лазер, атмосфера, характеристики аэрозольных неоднородностей.

## ВВЕДЕНИЕ

Разработка лазерных систем, предназначенных для работы в условиях земной атмосферы, требует наличия достоверной информации о состоянии атмосферы. Аэрозольные лидары, предназначенные для оперативного мониторинга атмосферы, позволяют дистанционно определять характеристики атмосферного аэрозоля и облачных образований в атмосфере [1-6].

На сегодняшний день большинство аэрозольных лидаров измеряет средние характеристики атмосферы. Однако, научный и практический интерес представляют и характеристики атмосферных аэрозольных неоднородностей.

Данная статья посвящена разработке лазерного измерителя характеристик атмосферных аэрозольных неоднородностей. Такая задача представляет интерес для ряда практических задач (см., например, [7]).

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Поскольку лазерный измеритель потенциально может быть использован как в стац-

онарной, так и в бортовой аппаратуре, то для него предпочтительно выбрать твердотельный лазер. Из твердотельных лазеров наилучшими энергетическими характеристиками при высокой частоте повторения импульсов обладает лазер на иттрий-алюминиевом гранате, активированном ионами неодима. С точки зрения энергетических характеристик и дальности зондирования предпочтительнее использовать вторую (0,532 мкм) гармонику этого лазера (см., например, [8]).

Ниже приводится описание разработанного лазерного измерителя характеристик атмосферных неоднородностей, использующего вторую гармонику лазера на иттрий-алюминиевом гранате, и примеры полученных экспериментальных данных.

## МАКЕТ ЛАЗЕРНОГО ИЗМЕРИТЕЛЯ ХАРАКТЕРИСТИК АТМОСФЕРНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ, РАБОТАЮЩЕГО НА ДЛИНЕ ВОЛНЫ 0,532 МКМ

На рис. 1 представлена структурная схема макета лазерного измерителя, работающего на длине волны 0,532 мкм.

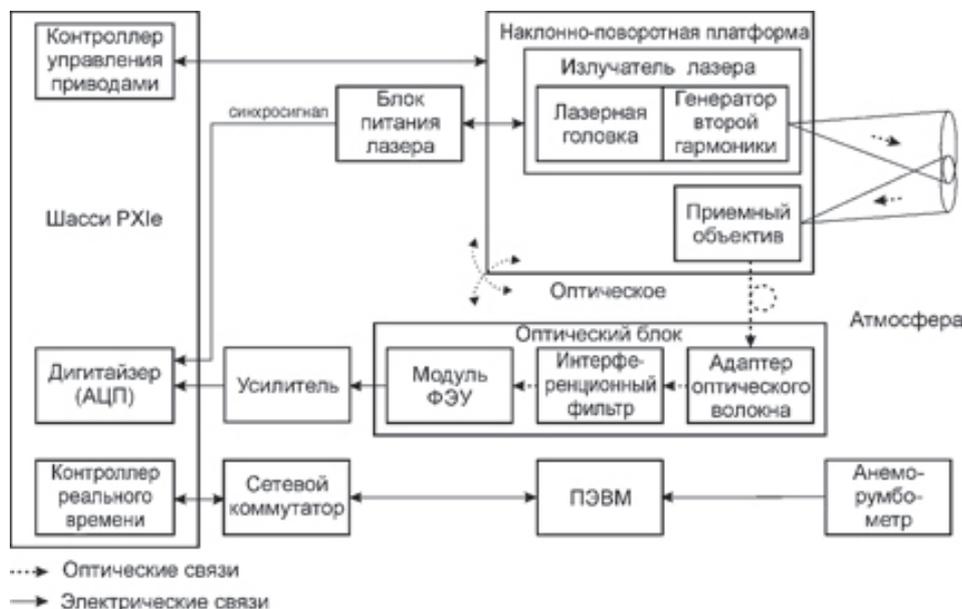


Рисунок 1.

Структурная схема лазерного измерителя, работающего на длине волны 0,532 мкм

В качестве источника излучения в измерителе используется импульсный твердотельный Nd:YAG лазер с полупроводниковой накачкой и модуляцией добротности EKSPANL204. Данный лазер имеет сменные модули генерации гармоник, что позволяет получить разную длину волны лазерного излучения: 1,064; 0,532; 0,355; 0,266 мкм. Для получения излучения использовался модуль генерации второй гармоники, позволяющий получить излучение на длине волны 0,532 мкм.

Конструктивно лазер выполнен в виде блока питания, включающего в себя также полупроводниковый лазер накачки, и излучателя

лазера, состоящего из лазерной головки, генерирующего излучение на длине волны 1,064 мкм, и сменного модуля генератора гармоник.

Основные характеристики лазера EKSPANL204 с модулем генератора второй гармоники приведены в табл. 1 [9].

В качестве приемного объектива в лазерном измерителе использовался зеркальный объектив СТ фирмы СОЛАР Лазерные Системы. Данный объектив реализован по схеме Кассегрена и имеет разъем SMA-905 для присоединения оптоволокну. Основные характеристики объектива СТ приведены в табл. 2 [10].

Для обеспечения возможности совме-

Таблица 1.

Основные характеристики лазера EKSPANL204 с модулем генератора второй гармоники

Параметр	Значение
Длина волны, мкм	0,532
Энергия импульса, мДж	2
Длительность импульса (полная ширина на полувысоте), нс	7
Частота повторения импульсов, Гц	10-500
Диаметр пучка, мм	0,8
Расходимость излучения (полный угол по уровню $1/e^2$ ), мрад не более	3

Таблица 2.

Основные характеристики объектива СТ фирмы СОЛАР Лазерные Системы

Параметр	Значение
Фокусное расстояние, мм	285
Относительное отверстие	1:4,4
Диапазон фокусировки, м	$\infty..3,5$
Поле зрения $2\omega$ при использовании оптоволоконна диаметром 600 мкм	2 мрад

ния оптических осей приемного объектива и лазерного излучателя, объектив установлен на юстировочной платформе, позволяющей менять наклон и поворот объектива относительно лазера.

Излучение от приемного объектива транспортируется по оптическому волокну в оптический блок.

Оптический блок служит для спектральной селекции полезного сигнала и преобразования оптического излучения в электрический сигнал. Адаптер оптического волокна формирует параллельный пучок необходимый для эффективной работы интерференционного фильтра.

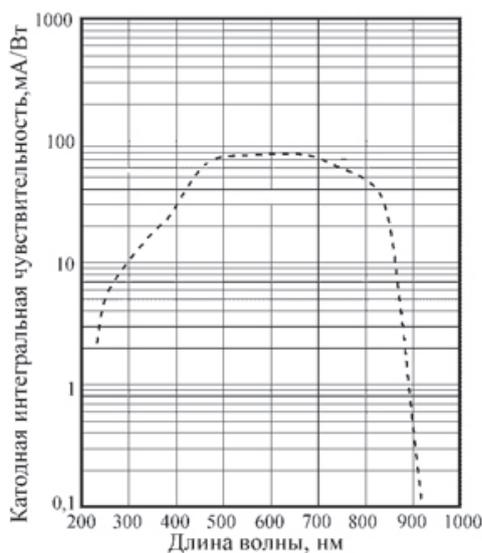
В качестве интерференционного фильтра использовался фильтр фирмы THORLABS

FL-532-1 [11]. Параметры фильтра:

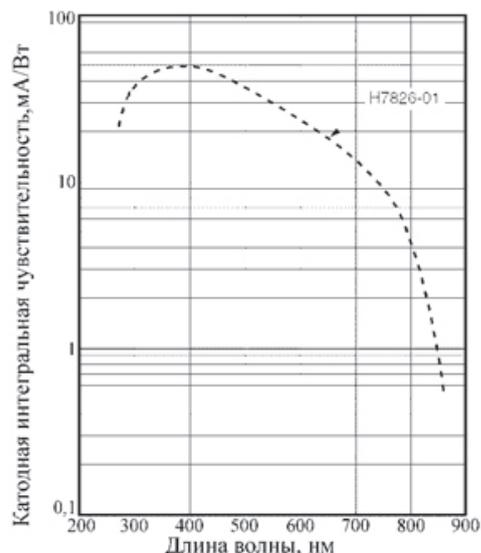
- центральная длина волны - 532 нм
- спектральная ширина по уровню 0.5 - 1 нм
- коэффициент пропускания - 0.4
- световой диаметр - 20 мм

В качестве приемника излучения использовались ФЭУ Hamamatsu H10721-20 и Hamamatsu H7826-013 [12,13].

Данные ФЭУ имеют в своем составе высоковольтный источник питания для динодов, что существенно упрощает работу с фотоприемником и повышает его надежность. Спектральные зависимости катодной чувствительности к световому потоку для ФЭУ Hamamatsu H10721-20 и Hamamatsu H7826-01 приведены ниже на рис. 2 а и 2 б соответственно.



а)



б)

Рисунок 2.

Спектральная зависимость катодной чувствительности ФЭУ

Для получения сигнала уровень, которого достаточен для работы АЦП, к выходу ФЭУ подключается усилитель широкополосный усилитель Hamamatsu C5594.

Система регистрации сигналов и управления макетом лазерного измерителя была реализована с использованием архитектуры PXI (PCI Extensions for Instrumentation – расширение шины PCI для контрольно-измерительной аппаратуры) [14]. PXI - модульная платформа, предназначенная для построения многофункциональных контрольно-измерительных систем, испытательного оборудования, систем автоматизации и т.д.

В настоящее время архитектура PXI поддерживает также и шину PCI Express, что позволяет реализовывать системы со скоростью передачи данных до 6 Гбайт в каждом направлении.

Для управления приводами наклонно поворотной платформы используется модуль NIPXI 7332.

Для преобразования аналоговых сигналов в цифровую форму в макете лазерного измерителя использовались модули высокоскоростных АЦП – дигитайзеров. В макете применялись модули NIPXI-5124, NIPXI-5154, NI PXIe-5162.

Характеристики применяемых дигитайзеров приведены ниже в табл. 3 [15-17].

Общее управление, тематическая обработка сигналов, отображение и сохранение результатов осуществляется на ПЭВМ, ра-

ботающей под управлением ОС Windows. Графический интерфейс пользователя также реализован в программном обеспечении, установленном на ПЭВМ.

Взаимосвязь между ПЭВМ и контроллером реального времени NIPXIe-8102 RT осуществляется по интерфейсу Gigabit Ethernet. Сетевой коммутатор позволяет подключать несколько узлов сети Ethernet.

Программное обеспечение макета лазерного измерителя разработано в среде графического программирования NI LabVIEW 2012, позволяющей быстро и высокоэффективно создавать гибкие, легко изменяемые приложения [18,19].

Блок-схема алгоритма обработки результатов измерений представлена на рис. 3.

Для хранения результатов измерений использовался формат Technical Data Management Streaming (TDMS) [20]. Позволяющих сохранять данные с высокой скоростью и хранить в одном файле и результаты измерений, и данные описывающие условия проведения эксперимента.

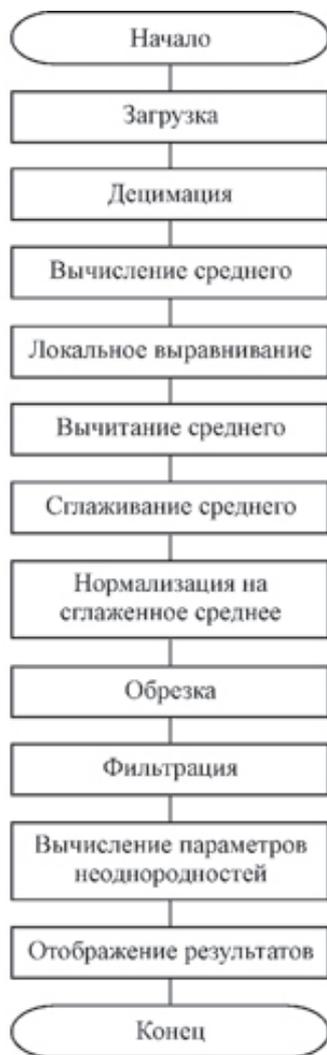
На этапе загрузки из TDMS файла считываются реализации сигнала обратного рассеяния, а также условия проведения эксперимента.

На этапе децимации из загруженных реализаций обратного рассеяния формируется двухмерное поле принятого сигнала. Затем путем децимации с усреднением из этого поля устраняется избыточность.

**Таблица 3.**

**Характеристики дигитайзеров NIPXI-5124, NIPXI-5154, NI PXIe-5162**

Параметр	Значение		
	NIPXI-5124	NIPXI-5154	NI PXIe-5162
Максимальная частота дискретизации, ГГц	0,2	2	5
Максимальная полоса, ГГц	0,15	1	1,5
Аналоговое разрешение, бит	12	8	10
Входной импеданс, Ом	50/1·10 <sup>9</sup>	50/1·10 <sup>9</sup>	50/1·10 <sup>9</sup>
Время нарастания/спада при входном импедансе 50 Ом, нс	2,4	0,428	0,320
Среднеквадратичное значение шума при входном импедансе 50 Ом и при диапазоне 2 В, мВ	1,02	14,2	5,6



**Рисунок 3.**

**Блок-схема алгоритма обработки результатов измерений**

На следующем этапе рассчитывается средняя величина реализации сигнала обратного рассеяния. Для этого каждая строка двумерного поля принятого сигнала (соответствующая определенной величине временной задержки – дальности) усредняется.

На этапе локального выравнивания устраняется влияние колебания энергии импульса лазерного излучения.

Затем из каждой реализации принятого сигнала вычитается средняя величина реализации сигнала обратного рассеяния.

На этапе сглаживания среднего средняя величина реализации сигнала обратного рассеяния аппроксимируется сглаживающим кубическим сплайном.

На следующем этапе каждая реализация

принятого сигнала нормируется на величину сглаженного среднего.

Полученное двумерное поле принятого сигнала обрезаются по дальности, при этом отсекается начальный участок, в котором сигнал отсутствует из-за раннего старта АЦП, и отсекается конечный участок, в котором величина сигнала недостаточна из-за большой дальности.

Полученное двумерное поле сигнала фильтруется. На следующем этапе вычисляются параметры неоднородностей атмосферы. Полученные результаты отображаются и при необходимости сохраняются.

### **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗМЕРЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК АТМОСФЕРЫ НА ДЛИНЕ ВОЛНЫ 0,532 МКМ**

Экспериментальные измерения аэрозольных характеристик атмосферы на длине волны 0,532 мкм проводились с помощью созданного макета. Измерения проводились в летне-осенний период 2014 г.).

Пример реализации зарегистрированного сигнала обратного рассеяния представлен на рис. 4, пример зарегистрированного и обработанного поля неоднородностей атмосферы - на рис. 5.

На рис. 4 приведен пример реализации эхосигнала, обратно рассеянного атмосферой, при лазерном зондировании одиночным импульсом.

На рис. 5 приведен типичный пример пространственно-временного распределения коэффициента вариации объемного коэффициента обратного рассеяния атмосферы (коэффициент вариации определяется как отношение среднеквадратического отклонения объемного коэффициента обратного рассеяния к среднему значению объемного коэффициента обратного рассеяния). Здесь по оси абсцисс отложено расстояние до лидара, а по оси ординат – время регистрации лидарного сигнала.

Для рис. 5 окно сглаживания по времени равнялось 0,6 с, по дальности - 0,9 м. Данные измерения проведены при облачной погоде, метеорологическая дальность видимости больше 10 км.

Экспериментальные данные за период измерений показывают, что среднее значение коэффициента вариации аэрозольных не-

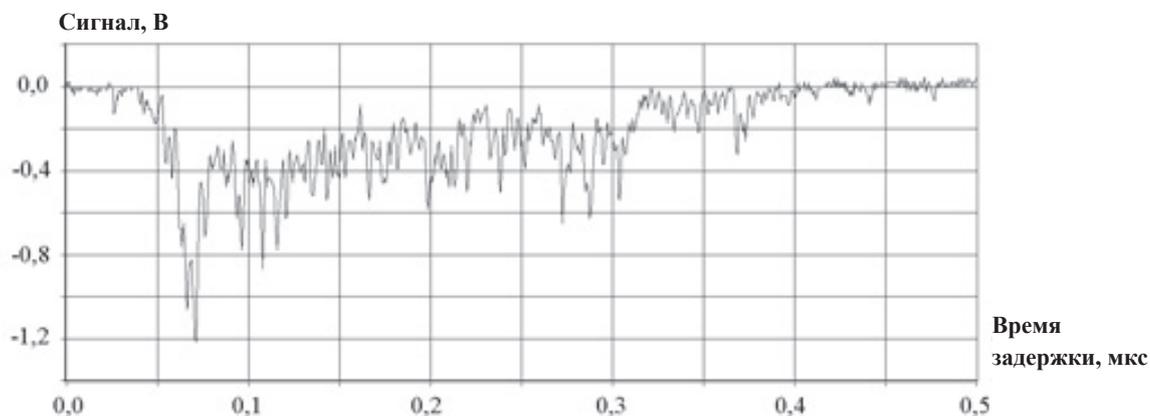


Рисунок 4.

Пример реализации зарегистрированного эхо-сигнала, обратно рассеянного атмосферой

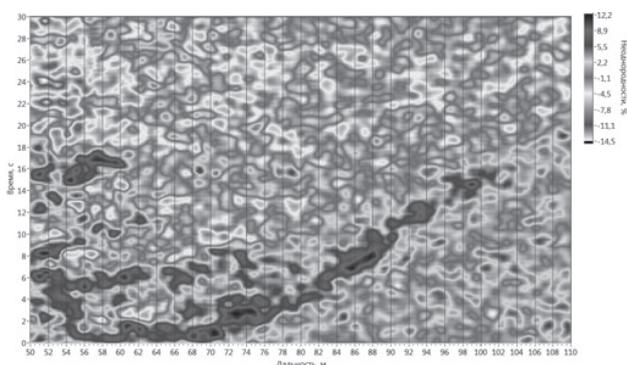


Рисунок 5.

Пример пространственно-временного распределения коэффициента вариации

однородностей на длине волны 0,532 мкм составило величину 4-5%, а средний размер неоднородностей 4 м.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Описан разработанный лазерный измеритель характеристик атмосферных аэрозольных неоднородностей, работающий на длине волны излучения 0,532 мкм. Приведены характеристики блоков лазерного измерителя и описана блок-схема алгоритма обработки результатов измерений. Представлены примеры типичного лазерного эхо-сигнала, обратно рассеянного атмосферой, и пространственно-временного распределения коэффициента вариации объемного коэффициента обратного рассеяния атмосферы. Результаты измерений показывают, что размер регистрируемых аэрозольных неоднородностей в среднем составляет величину ~ 4 м, а коэффициент вариации ~ 4-5%.

#### Список литературы:

1. Аэрозольный лидар CATS. Режим доступа: [http://www.laserportal.ru/content\\_956](http://www.laserportal.ru/content_956) (дата обращения 20.02.2015).
2. Лазерное зондирование атмосферы. Режим доступа: <http://astro.bsu.edu.ru/lidar.htm> (дата обращения 20.02.2015).
3. Бурлаков В.Д., Долгий С. И., Невзоров А.В. Трехчастотный лидар для зондирования микроструктурных характеристик стратосферного аэрозоля // Приборы и техника эксперимента. 2010. № 6. С. 125–130.
4. Алексеев В.А., Ляш А.Н., Першин С.М. Лидарный мониторинг тектонической активности в Тамани по выбросам аэрозолей. Отработка метода. Режим доступа: <http://www.iki.rssi.ru/earth/trudi/v-06.pdf> (дата обращения 20.02.2015).
5. Волков Н.Н. Выбор параметров многоволнового аэрозольного лидара для дистанционного зондирования атмосферы. Отработка метода. // Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики, 2012, № 1 (77), С. 7-9.
6. Лазерные лидарные комплексы. Режим доступа: <http://www.adventspb.ru/science/6/> (дата обращения 20.02.2015).
7. Козинцев В.И., Иванов С.Е., Белов М.Л., Городничев В.А. Лазерный метод приближенного измерения мгновенной скорости и направления ветра // Оптика атмосферы и океана. 2013. Е. 26. № 5. С. 381–384.
8. Иванов С.Е., Филимонов П.А., Белов М.Л., Городничев В.А., Михайловская М.Б. Сравни-

тельный анализ дальности зондирования ветрового корреляционного лидара в УФ, видимом и ближнем ИК спектральных диапазонах // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2014. № 2. Режим доступа: <http://technomag.bmstu.ru/doc/696580.html> (дата обращения 20.03.2015).

9. NL200 series laser datasheet. Режим доступа: <http://www.ekspla.com/wp-content/uploads/2011/05/nl200-series-nanosecond-q-switched-diode-pumped-laser.pdf> (дата обращения 20.02.2015).

10. Аксессуары для сбора излучения и ввода в волокно. Режим доступа: <http://solarlaser.com/ru/products/optii-i-aksesuary/aksesuary-dlya-sbora-izlucheniya-i-vvoda-v-voлокно/> (дата обращения 20.02.2015).

11. Thorlabs. Режим доступа: <http://thorlabs.com/> (дата обращения: 13.03.2012)

12. Hamamatsu. Photosensor module H7826-01. Режим доступа: <http://www.hamamatsu.com/jp/en/product/category/3100/3003/3044/H7826-01/index.html> (дата обращения 20.02.2015).

13. Hamamatsu. Photosensor module H10720-20. Режим доступа: <http://www.hamamatsu.com/jp/en/product/category/3100/3003/3044/H10720-20/index.html> (дата обращения 20.02.2015).

14. Головастов А. Стандарт PXI — технология и оборудование для построения контрольно-измерительных систем // Компоненты и технологии. 2012. N. 3. С. 132–138.

15. 150 MHz, 200 MS/s, 12-Bit Digitizers - Data Sheet - National Instruments. Режим доступа: <http://sine.ni.com/ds/app/doc/p/id/ds-242/lang/ru> (дата обращения 20.02.2015).

16. 2 GS/s High-Speed Digitizers: Optimized for Automated Test - Data Sheet - National Instruments. Режим доступа: <http://sine.ni.com/ds/app/doc/p/id/ds-253/lang/ru#header0> (дата обращения 20.02.2015).

17. NI PXIe - 5162 - Data Sheet - National Instruments. Режим доступа: <http://sine.ni.com/ds/app/doc/p/id/ds-480/lang/ru> (дата обращения 20.02.2015).

18. Тревис Д. LabVIEW для всех. М.: ДМК Пресс; Прибор Комплект, 2005. 544 с.

19. LabVIEW System Design Software. Режим доступа: <http://www.ni.com/labview/> (дата обращения 20.02.2015).

20. The NI TDMS File Format [Online].- Режим доступа: <http://www.ni.com/white-paper/3727/en/> (accessed: 04.04.2015).

# МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЛИЧЕСТВЕННОГО СОСТАВА ГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ ИЗ МНОГОСПЕКТРАЛЬНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ, УСТОЙЧИВЫЙ К ВЫБРОСАМ СИГНАЛА

В.А. ГОРОДНИЧЕВ, М.Л. БЕЛОВ, Т.К. АНТОНЮК, Л.Н. ЕРЕМЕНКО

НИИ Радиоэлектроники и лазерной техники Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана

E-mail: gorod@bmstu.ru, belov@bmstu.ru, ekomonit@bmstu.ru.

*Показано, что использование робастной оценки в задаче определения концентраций газов из многоспектральных лазерных измерений стационарных многокомпонентных газовых смесей с перекрывающимися спектрами поглощения газов позволяет в условиях выбросов измеряемого сигнала уменьшить в несколько раз погрешность определения концентраций компонент газовых смесей.*

**Ключевые слова:** лазер, газоанализ, многокомпонентные смеси, выбросы сигнала, робастный метод.

## ВВЕДЕНИЕ

Лазерные методы являются наиболее перспективными для оперативного дистанционного и локального газоанализа загрязнений атмосферы [1-3].

В настоящее время одной из проблем, возникающих при использовании лазерных методов газоанализа, является неустойчивость результатов определения количественного состава газов при контроле многокомпонентных смесей. Это вызывает необходимость применения специальных алгоритмов обработки результатов лазерных измерений.

Для многокомпонентных газовых смесей при решении задачи определения концентраций газов из результатов многоспектральных лазерных измерений могут быть эффективно использованы методы решения некорректных математических задач (см., например, [2,3]). Эти методы позволяют по данным одиночных (на каждой из длин волн зондирования) измерений восстанавливать концентрации газов в многокомпонентных газовых смесях.

Ниже рассматривается задача лазерного газоанализа многокомпонентных стационарных

газовых смесей, для которых существует возможность проведения серии измерений на каждой длине волны.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Из многочисленных лазерных методов газоанализа наиболее универсальными и широко используемыми являются абсорбционный и оптико-акустический методы. Для этих методов количественное измерение концентраций компонент в газовой многокомпонентной смеси может быть реализовано путем проведения многоспектральных измерений.

Если качественный состав газовой смеси известен, то измерение концентраций компонент смеси может быть проведено с использованием перестраиваемого по длине волны источника лазерного излучения, путем регистрации поглощения излучения анализируемой газовой смесью для определенного набора спектральных каналов измерения.

Для определенности будем считать, что анализируемая газовая смесь содержит  $N$  газовых компонент и измерения проводятся на  $M$  длинах волн, а ширина линий генерации лазера много меньше ширины линий поглощения анализируемых газов. Тогда задача



измерений на каждой длине волны можно использовать гораздо более простой метод определения концентраций газов - метод наименьших квадратов (МНК), основанный на минимизации суммы квадратов некоторых функций от искомым переменных.

Пусть  $c_j^l$  - концентрация  $j$ -ой газовой компоненты смеси определенная (стандартным методом решения системы (1) линейных алгебраических уравнений) по результатам  $l$ -ого измерения,  $n$  - количество измерений

в серии,  $\hat{c}_j$  - оценка концентрации  $j$ -ой газовой компоненты смеси определенная методом наименьших квадратов.

Введем функцию невязки  $E(d)$

$$E(d) = \sum_{l=1}^n [c_j^l - \hat{c}_j]^2 \quad (3)$$

Значение  $\hat{c}_j$ , минимизирующее функцию  $E(d)$ , будет искомым оценкой концентрации  $j$ -ой газовой компоненты смеси, определенной методом наименьших квадратов.

Оценки, полученные методом наименьших квадратов, являются эффективными, если погрешности измерений распределены по нормальному закону. Однако на практике часто нормальность закона распределения погрешностей нарушается. Нарушения нормальности закона распределения могут приводить к значительной потере эффективности оценок, полученных методом наименьших квадратов [10,11].

Особенно большая потеря эффективности оценок, полученных методом наименьших квадратов, происходит при наличии даже небольшой доли выбросов.

Поэтому актуальной является разработка метода определения количественного состава стационарных газовых смесей, устойчивого к выбросам измеряемого сигнала.

#### МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЛИЧЕСТВЕННОГО СОСТАВА СТАЦИОНАРНЫХ ГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ, УСТОЙЧИВЫЙ К ВЫБРОСАМ СИГНАЛА

При наличии выбросов измеряемого сигнала необходимо применять робастные (устой-

чивые) методы оценивания [10,11], позволяющие значительно снизить влияние больших выбросов и получить приемлемую оценку искомым величин.

Существуют разные робастные методы оценивания [10,11]. Запишем функцию невязки  $E(d)$  в более общем (чем формула (3)) виде

$$E(d) = \sum_{l=1}^n \rho(c_j^l - \hat{c}_j), \quad (4)$$

Здесь  $\rho(x)$  - выпуклая, симметричная, положительная функция.

Общий подход к выбору функции  $\rho(x)$  основан на том, что оценка доставляющая минимум функции невязки (4), должна «не портить» измерения в случае отсутствия выбросов и обладать устойчивостью к большим выбросам.

Одной их наиболее эффективных таких функций  $\rho(x)$  является следующая: функция [12]:

$$\rho(x) = \arctg|x| \quad (5)$$

Численное нахождение самой робастной оценки (при решении задачи минимизации) можно осуществить любыми стандартными методами.

#### МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Для оценки эффективности робастного метода определения количественного состава газовых смесей из многоспектральных лазерных измерений, использующего функцию  $\rho(x)$  (5), было проведено математическое моделирование. Моделирование проводилось для газовых смесей с числом компонент от 2 до 6.

Считалась, что газовая смесь стационарная и для определения количественного состава газов в смеси проводится  $n$  измерений ( $n$  задавалось от 2 до 6). Концентрации газов

при единичных измерениях  $c_j^l$  находились стандартным методом решения матричного уравнения (2) (с помощью обратной матрицы). Для нахождения концентраций газов по измерениям использовалась функция невязки (5).

Найденные значения концентраций газов

$\tilde{c}_j$  сравнивались с исходными (заданными) значениям концентраций  $c_j$  и определялась погрешность определения концентраций газов:

$$\delta_j = \frac{|c_j - \tilde{c}_j|}{c_j} .$$

На рисунках 1-3 приведены примеры результатов математического моделирования для шестикомпонентной смеси этилен-фреон-12-гидразин-аммиак-метанол-этилакрилат.

Шум измерения задавался с пуассоновским распределением, моделирующим редкие выбросы, с параметром распределения  $\lambda = 0,1$ .

Измеряемый сигнал  $\tilde{y}_k$  в  $k$ -ом спектральном канале моделировался как:

$$\tilde{y}_k = y_k(1 + a\xi_k) ,$$

где

$y_k$  - сигнала в случае отсутствия шума измерения;

$a$  - вес (в величине сигнала) пуассоновского шума  $\xi_k$  (моделирование проводилось при  $a = 0,25$ ).

Для контроля количественного состава смеси были использованы следующие спектральные каналы измерения: 10P14, 10P10, 10R18, 10R22, 10P22, 10P28, 10R6, 10R12, 9P14, 9P20, 9R14, 9R22 (они соответствуют дискретно перестраиваемому по длине волны лазеру на углекислом газе [3]). Концентрации газов задавались равными:  $10^{-4}$ ;  $2 - 4,6 \cdot 10^{-3}$ ;  $3 - 8 \cdot 10^{-3}$ ;  $4 - 8,5 \cdot 10^{-3}$ ;  $5 - 6,6 \cdot 10^{-3}$ ;  $6 - 9,2 \cdot 10^{-3}$ . Число измерений  $n$  полагалось равным 6.

На рис. 1-3 приведены средние (по серии из 1000 шумовых реализаций) погрешности  $\delta$  (в процентах) определения концентрации компонент газовой смеси.

На рис. 1-3: столбец 1 соответствует восстановленной концентрации стандартным методом решения матричного уравнения (2) для единичного измерения; столбец 2 - стандартному методу решения с последующим усреднением по двум измерениям; столбец 3 - стандартному методу решения с последующим усреднением по четырем измерениям; столбец 4 - стандартному методу решения с последующим усреднением по шести измерениям; столбец 5 - методу наименьших

квадратов по шести измерениям; столбец 6 - методу, использующему функцию невязки (5) по результатам 6 измерений.

Для этилена (рис. 1) ошибки наибольшие, так как его концентрация много меньше (на порядок и более) концентрации других газов смеси. На рисунках 2 и 3 приведены, соответственно, погрешности определения концентрации фреона-12 и этилакрелата. Погрешности определения концентрации других газов еще меньше.

На рис. 4-6 приведены примеры аналогичные (приведенным на рисунках 1-3) результаты математического моделирования для шума измерения с нормальным распределением. Измеряемый сигнал  $\tilde{y}_k$  в  $k$ -ом спектральном канале моделировался как:

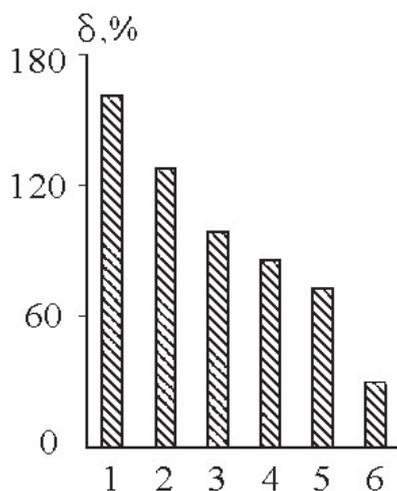
$$\tilde{y}_k = y_k(1 + \xi_k) ,$$

Для шума измерения среднее значение полагалось равным, а относительное среднеквадратическое отклонение - 0,03.

Анализ рисунков 1-6 показывает, что использование функции  $\rho(x)$  (5) позволяет существенно (в разы) снизить (по сравнению с усреднением и методом наименьших квадратов) погрешность определения концентрации газовых компонент при пуассоновском законе распределения шума (в условиях выбросов измеряемого сигнала). В тоже время в случае отсутствия выбросов измеряемого сигнала функция  $\rho(x)$  (5) не вносит дополнительных существенных погрешностей. При небольшом шуме измерения с нормальным законом распределения погрешности определения концентрации газов для функции  $\rho(x)$  (5) лишь немного (порядка 20-25 %) увеличиваются по сравнению с усреднением и методом наименьших квадратов.

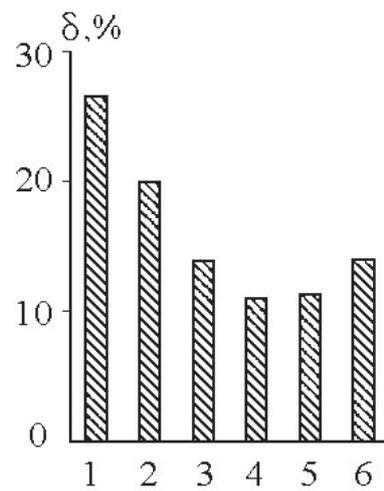
#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в статье рассмотрена задача количественного анализа состава многокомпонентных стационарных газовых смесей, для которых существует возможность проведения серии измерений на каждой длине волны. Результаты математического моделирования показывают, что использование робастной оценки, основанной на использо-



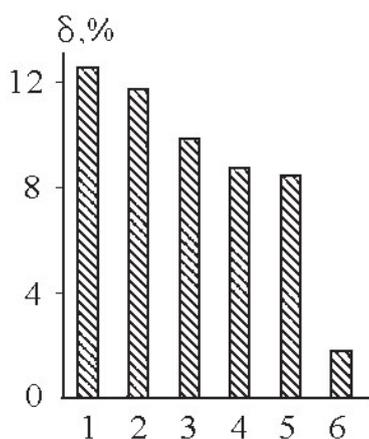
**Рисунок 1.**

*Погрешности определения концентрации этилена при шуме с пуассоновским распределением*



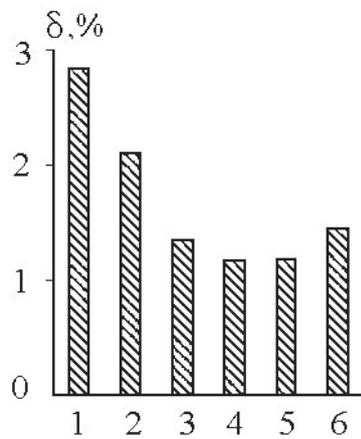
**Рисунок 4.**

*Погрешности определения концентрации этилена при шуме с нормальным распределением*



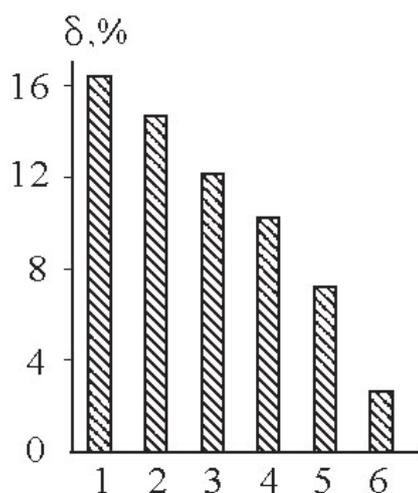
**Рисунок 2.**

*Погрешности определения концентрации фреона-12 при шуме с пуассоновским распределением*



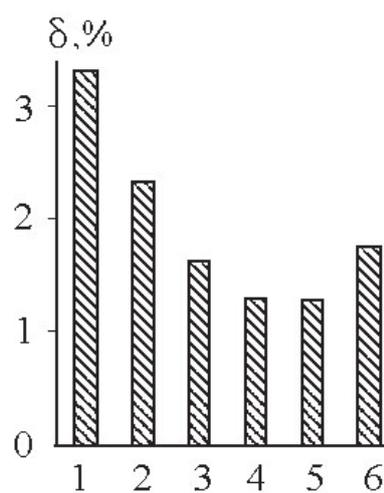
**Рисунок 5.**

*Погрешности определения концентрации фреона-12 при шуме с нормальным распределением*



**Рисунок 3.**

*Погрешности определения концентрации этилакрилата при шуме с пуассоновским распределением*



**Рисунок 6.**

*Погрешности определения концентрации этилакрилата при шуме с нормальным распределением*

вании для невязки функции  $\rho(x) = \arctg|x|$ , позволяет в условиях выбросов изменяемого сигнала уменьшить в несколько раз погрешность определения концентраций компонент газовых смесей.

*Список литературы:*

1. Лазерная оптико-акустическая спектроскопия межмолекулярных взаимодействий в газах / Ю.Н. Пономарев, Б.Г. Агеев, М.В. Зигрист, В.А. Капитанов, Д. Куртуа, О.Ю. Никифорова. Томск: МГП «РАСКО», 2000. 200 с.

2. Основы количественного лазерного анализа / В.И. Козинцев, М.Л. Белов, В.А. Городничев, Ю.В. Федотов. М.: Из-во МГТУ, 2006. 464 с.

3. Козинцев В.И., Белов М.Л., Городничев В.А., Федотов Ю.В. Лазерный оптико-акустический анализ многокомпонентных газовых смесей. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2003. 352 с.

4. Существующие подходы к решению некорректных задач. Режим доступа: <http://relbook.narod.ru/2004/02.htm> (дата обращения 20.03.2015).

5. Engl H.W., Hanke M., Neubauer A. Regularization of Inverse Problems, Kluwer, Dordrecht, 1996.

6. Neubauer A. Inverse and Ill-Posed Problems. 2008. Режим доступа: <http://www.impan.pl/BS/Arch/2008/08NeubauerCourse.pdf> (дата обращения 20.11.2014).

7. Еременко Л.Н., Козинцев В.И., Городничев В.А. Метод байесовских оценок в задаче лазерного газоанализа // Известия вузов. Физика. 2008. №9. С. 29-35.

8. Городничев В.А. Методы восстановления концентраций газов для задачи лидарного контроля газовых загрязнителей атмосферы // Биомедицинская радиоэлектроника. 2003. №9. С.52-56.

9. Катаев М.Ю., Бойченко И.В. Программное и методическое обеспечение задач лидарного зондирования атмосферы. Томск:STT, 2007. 246 с.

10. Крянев А.В., Лукин Г.В. Математические методы обработки неопределенных данных. М.: Физматлит, 2003. 212 с.

11. Крянев А.В. Лукин Г.В. Метрический анализ и обработка данных. М.: Физматлит, 2010. 280 с.

12. Тырсин А.Н. Робастный метод построения зависимостей по экспериментальным данным. Режим доступа: <http://www.vniitf.ru/rig/konfer/8zst/s6/6c5.pdf>. (дата обращения 20.03.2015).

# КОНТРОЛЬ СТРЕССОВЫХ СОСТОЯНИЙ РАСТЕНИЙ ПРИ ВОЗБУЖДЕНИИ ФЛУОРЕСЦЕНЦИИ В УФ СПЕКТРАЛЬНОМ ДИАПАЗОНЕ

ГОРОДНИЧЕВ В.А., БЕЛОВ М.Л., БОЛВАЧЕВ В.В., НАЗАРОВ В.В.

НИИ Радиоэлектроники и лазерной техники Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана

E-mail: gorod@bmstu.ru, belov@bmstu.ru, ekomonit@bmstu.ru.

*Проведен анализ спектров лазерно-индуцированной флуоресценции здоровой растительности и растительности, находящейся в стрессовом состоянии, при возбуждении флуоресценции в УФ спектральном диапазоне. Показано, что использование для возбуждения лазерно-индуцированной флуоресценции излучения в УФ области спектра и регистрация флуоресцентного излучения в двух узких спектральных диапазонах с центральными длинами волн 680 и 740 нм позволяет надежно обнаруживать стрессовые состояния растительности. Идентифицирующим фактором для стрессовых состояний растений является отношение интенсивностей флуоресцентного излучения на длинах волн 680 и 740 нм.*

**Ключевые слова:** лазерный метод, флуоресценция, растения, обнаружение стрессовых состояний.

## ВВЕДЕНИЕ

Недостаточный уровень питательных веществ, наличие антропогенных загрязнений в почве или неблагоприятные внешние условия приводит к стрессовым состояниям растений и к невозможности их нормального роста. Такие стрессовые состояния растений сложно распознать на ранних стадиях по внешнему виду растения, поэтому важна разработка методов и приборов их раннего обнаружения.

Эффективным дистанционным или неконтактным методом обнаружения стрессовых состояний растительности является метод, основанный на регистрации флуоресценции при возбуждении ее излучением в ультрафиолетовом или видимом спектральных диапазонах.

К настоящему времени накоплены экспериментальные данные по спектрам флуоресценции различных видов здоровой растительности и растительности в различных стрессовых состояниях: недостаточная или

избыточная влажность; механические повреждения; низкие или высокие температуры; недостаток питательных веществ; недостаток освещенности; засоление почвы; загрязнение почвы нефтепродуктами; повышенная кислотность почвы; использование пестицидов, гербицидов, инсектицидов и др. (см., например, [1-5])

Эти экспериментальные данные были получены на разной аппаратуре, при длинах волн возбуждения в широком диапазоне от 266 до 630 нм. Однако, с точки зрения безопасности (прежде всего для глаз) интерес представляет именно ультрафиолетовый (УФ) диапазон.

Использование лазерных приборов всегда связано с определенной опасностью для человека. Основное вредное воздействие лазерное излучение оказывает на сетчатку глаза, причем хрусталик (и глазное яблоко), действуя как дополнительная фокусирующая оптика, существенно повышает концентрацию энергии на сетчатке. Диапазон длин волн вредного воздействия на сетчатку глаза

составляет от 0,38 до 1,4 мкм. Лазерное излучение с длинами волн менее 0,38 мкм и свыше 1,4 мкм воздействует на передние среды глаза и является более безопасным, чем лазерное излучение с длинами волн 0,38 – 1,4 мкм [6].

В пределах спектрального диапазона с длинами волн менее 0,38 мкм наибольший интерес представляют длины волн не сильно отличающиеся (в сторону больших длин волн) от 300 нм (при уменьшении длины волны от 380 до 300 нм фоновое излучение резко уменьшается). Для длин волн меньших 300 нм фоновое излучение практически отсутствует, однако здесь сильно увеличивается поглощение озоном. Поэтому одним из перспективных лазерных источников для возбуждения флуоресценции является импульсный азотный лазер с длиной волны излучения 337 нм.

Данная статья посвящена разработке лазерного флуоресцентного метода контроля состояний растений при возбуждении флуоресценции в УФ спектральном диапазоне с длиной волны 0,337 мкм. Такая задача представляет практический интерес для мониторинга состояния растений по результатам дистанционных измерений на безопасной для глаз длине волны излучения.

#### АНАЛИЗ СПЕКТРОВ ФЛУОРЕСЦЕНЦИИ РАСТЕНИЙ НАХОДЯЩИХСЯ В НОРМАЛЬНОМ И СТРЕССОВОМ СОСТОЯНИИ

Для разработки лазерного флуоресцентного метода контроля состояний растений при возбуждении флуоресценции в УФ спектральном диапазоне был сформирован (на основе существующих экспериментальных работ) банк спектров флуоресценции. В банке данных записаны экспериментально измеренные спектры флуоресценции листьев пшеницы, клевера, картофеля, томатов, огурцов, риса, табака, сахарной свеклы, хлопка, кукурузы, сои, листьев деревьев (кедра, дуба, тополя, клена, ели, различных видов сосны, вишни и др.) для длин волн возбуждения 320, 337, 340, 355 и 360 нм.

Для примера на рисунках 1-4 показаны ха-

рактерные спектры флуоресценции здоровой растительности и растительности в различных стрессовых состояниях. На рисунках показана спектральная зависимость интенсивности флуоресценции в относительных единицах.

На рис. 1, 2 приведены характерные спектры флуоресценции здоровой растительности. На рисунке 1 – лист клевера для длины волны возбуждения флуоресценции 337 нм [7], на рисунке 2 - лист тополя для длины волны возбуждения флуоресценции 355 нм [8].

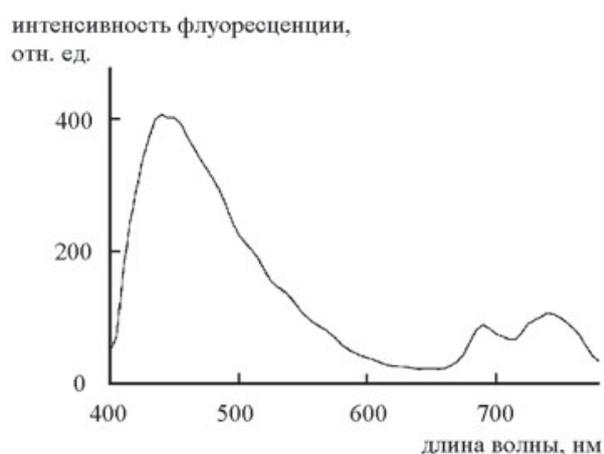


Рисунок 1.

*Спектры лазерно-индуцированной флуоресценции листа клевера в нормальном состоянии*

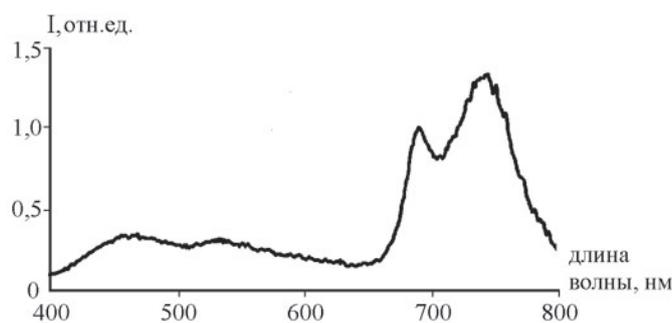


Рисунок 2.

*Спектры лазерно-индуцированной флуоресценции листа тополя в нормальном состоянии*

Из рис. 1, 2 хорошо видно, что для растений в нормальном состоянии имеет два максимума – в области ~ 680 нм и в области ~ 740 нм. При этом для большинства растений в нормальном состоянии отношение  $R_{680/740}$

интенсивностей флуоресценции на длинах волн 680 нм и 740 нм меньше 1.

На рис. 3, 4 приведены спектры флуоресценции растительности как в нормальном состоянии (кривая 1), так и в стрессовом состоянии (кривая 2). На рисунке 3 – пшеница для длины волны возбуждения флуоресценции 355 нм, стресс вызван внесением в почву кадмия [9], на рисунке 4 - лист кукурузы для длины волны возбуждения флуоресценции 360 нм, стресс вызван отсутствием азотных удобрений в почве [10].

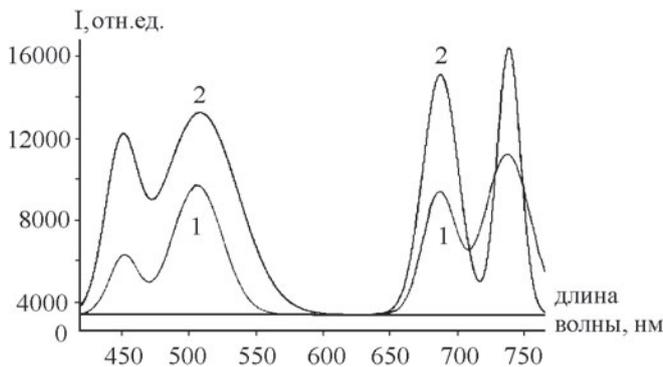


Рисунок 3.

*Спектры лазерно-индуцированной флуоресценции пшеницы в нормальном и стрессовом состояниях*

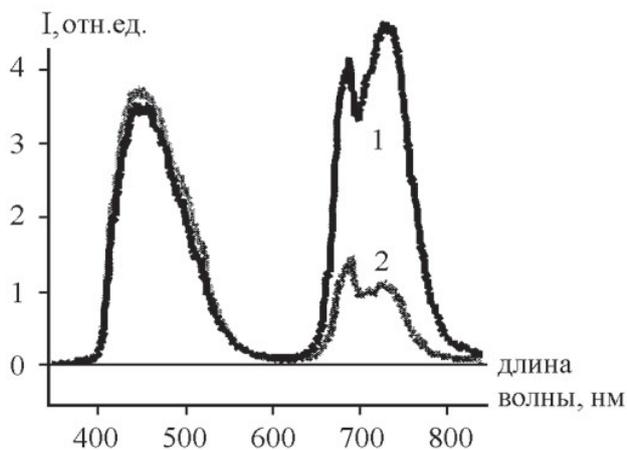


Рисунок 4.

*Спектры лазерно-индуцированной флуоресценции листа кукурузы в нормальном и стрессовом состояниях*

Из рис. 3, 4 хорошо видно, что для растений в стрессовом состоянии характерно увеличение отношения интенсивности флуоресценции на длинах волн 680...690 к интенсивности флуоресценции на длинах волн 730...740 нм.

Таким образом, поскольку спектры флуоресценции здоровой растительности отличаются от спектров флуоресценции растительности в стрессовых ситуациях, это дает возможность обнаруживать стрессовые состояния растительности путем регистрации спектра флуоресценции.

#### **ОПРЕДЕЛЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ ДИАПАЗОНОВ РЕГИСТРАЦИИ ФЛУОРЕСЦЕНТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ СТРЕССОВЫХ СОСТОЯНИЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ**

Для цели оперативного дистанционного контроля состояния растений не подходит флуориметр, регистрирующий спектр флуоресценции в широком спектральном диапазоне. Такой флуориметр хорош для научных исследований, для работы в лаборатории и т.п. Его несомненные достоинства имеют и обратную сторону: он сложен, дорог, требует высококвалифицированного персонала (как для работы с флуориметром, так и для обработки и анализа данных измерений).

Для штатного контроля состояния растений при дистанционных измерениях требуется менее дорогой и сложный лазерный измеритель, не требующий высококвалифицированного персонала. Естественным вариантом такого измерителя является прибор, регистрирующий флуоресцентное излучение на нескольких длинах волн и проводящий автоматически обработку данных измерений в масштабе времени близком к реальному.

Анализ наиболее перспективных длин волн регистрации флуоресцентного излучения и исследование вероятности правильного обнаружения стрессовых состояний растительности проводилось методом математического моделирования.

При математическом моделировании использовались экспериментальные спектры флуоресценции (в диапазоне длин волн 600..800 нм) растительности, находящейся в нормальном и стрессовом состояниях.

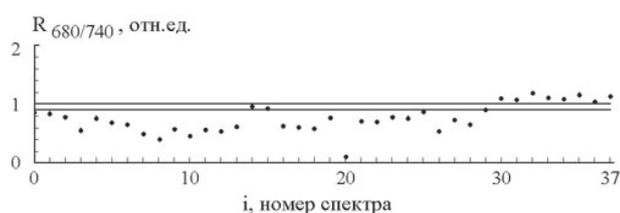
Исследовались вероятности правильного обнаружения и ложных тревог при использовании одного идентифицирующего признака (позволяющего определять состояние

растения – растение в нормальном или в стрессовом состоянии). В качестве идентифицирующего признака использовалось отношение интенсивностей флуоресценции на двух длинах волн

$$R_{\lambda_1/\lambda_2} = \frac{I(\lambda_1)}{I(\lambda_2)},$$

где  $I(\lambda)$  - значение интенсивности флуоресценции на длине волны  $\lambda$ .

Вероятности правильного обнаружения и ложных тревог существенно зависят от выбора конкретных длин волн  $\lambda_1, \lambda_2$ .



**Рисунок 5.**

**Отношение для спектров растений**

На рис. 5 показаны отношения  $R_{680/740}$  для экспериментальных спектров флуоресценции растений. Каждая точка на рисунке соответствует одному из спектров. Номера спектров с 0 по 29 соответствуют растениям в нормальном состоянии, а номера спектров с 30 по 37 - растениям в стрессовом состоянии. Прямые линии на рисунке 5 соответствуют значениям  $R_{680/740} = 0,9$  и  $R_{680/740} = 1$ .

Результаты математического моделирова-

ния вероятностей правильного обнаружения и ложных тревог для идентифицирующих признаков  $R_{680/740}$  в условиях шума измерения приведены в табл. 1.

В таблице приведены вероятности правильного обнаружения стрессовых состояний растений (вероятности принятия решения о наличии стрессовых состояний растений, когда они действительно имеют место) и ложных тревог (вероятности принятия решения о наличии стрессовых состояний растений, когда их в действительности нет) при разной величине относительного среднеквадратического значения шума измерения (при моделировании использовались  $10^4$  шумовых реализаций).

Для принятия решения об обнаружении стрессовых состояний растений использовались пороговые алгоритмы принятия решений. В табл. 1 приведены результаты математического моделирования для идентифицирующего признака  $R_{680/740}$  и порога равно-го 0,95 (если идентифицирующий признак  $R_{680/740}$  меньше 0,95, то растение находится в нормальном состоянии; если  $R_{680/740}$  больше 0,95 - на растение действует некоторый стрессовый фактор).

Результаты математического моделирования на основе экспериментальных спектров флуоресценции, приведенные в Таблице 1 и на рисунке 5, показывают, что флуоресцентный метод, основанный на возбуждении

**Таблица 1.**

**Результаты математического моделирования для идентифицирующего признака  $R_{680/740}$**

Ср.кв. значение шума, %	Вероятность правильного обнаружения, %	Вероятность ложных тревог, %
4	99,70	2,73
6	97,65	3,52
8	94,59	4,45
10	89,94	5,33
12	86,43	5,82

флуоресценции в ультрафиолетовой области спектра и регистрации флуоресцентного излучения в двух узких спектральных диапазонах с центральными длинами волн 680 и 740 нм позволяет надежно обнаруживать стрессовые состояния растительности.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ спектров флуоресценции и результаты математического моделирования показывают, что флуоресцентный метод, основанный на возбуждении флуоресценции в ультрафиолетовой области спектра и регистрации флуоресцентного излучения в двух узких спектральных диапазонах с центральными длинами волн 680 и 740 нм позволяет надежно обнаруживать стрессовые состояния растительности.

#### Список литературы:

1. Grishaev M.V., Sal'nikova N.S. A Setup for Remote Recording of the Spectrum of Laser-Induced Fluorescence from Crowns of Woody Plants // *Instruments and Experimental Techniques*. 2010. Vol. 53. No 5. P. 746–749.

2. Лабораторные и лидарные измерения спектральных характеристик листьев березы в различные периоды вегетации / А.В. Афонасенко, А.И. Иглакова, Г.Г. Матвиенко, В.К. Ошлаков, В.Е. Прокопьев // *Оптика атмосферы и океана*. 2012. Т. 25. № 3. С. 237–243.

3. Panneton B., Guillaume S., Roger J.M., Samson G. Discrimination of Corn from Monocotyledonous Weeds with Ultraviolet (UV) Induced Fluorescence // *Applied Spectroscopy*. 2011. Vol. 65. No 1. P. 10-19.

4. Plant abiotic stress diagnostic by laser induced chlorophyll fluorescence spectral analysis of *in vivo* leaf tissue of biofuel species / A.S. Gouveia-Neto,

E.A. da Silva, P.C. Cunha, R.A. Oliveira-Filho, L.M. H. Silva, E.B. da Costa, T.J.R. Câmara, L.G. Willadino // *Proc. of SPIE*. 2010. Vol. 7568. P. 75680G-1 - 75680G-8.

5. Федотов Ю.В., Булло О.А., Матросова О.А., Белов М.Л., Городничев В.А. Экспериментальное исследование лазерного флуоресцентного метода контроля стрессовых состояний растений, вызванных наличием загрязнителей в почве // *Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн.* 2013. № 5. Режим доступа: <http://technomag.edu.ru/doc/565060.html> (дата обращения 01.09.2013).

6. Лазерная безопасность. Общие требования безопасности при разработке и эксплуатации лазерных изделий. ГОСТ 31581-2012. М.: Стандартинформ, 2013.

7. Chappelle E.W., McMurtrey III J.E., Kim M.S. Identification of the Pigment Responsible for the Blue Fluorescence Band in the Laser Induced Fluorescence (LIF) Spectra of Green Plants, and the Potential Use of This Band in Remotely Estimating Rates of Photosynthesis // *Remote Sensing of Environment*. 1991. Vol. 36. P. 213-218.

8. Saito Y. Laser-induced fluorescence spectroscopy technique as a tool for field monitoring of physiological status of living plants // *Proc. of SPIE*. 2007. Vol. 6604. P. 66041W-1- 66041W-12.

9. Mishra K.B., Gopal R. Study of laser-induced fluorescence signatures from leaves of wheat seedlings growing under cadmium stress // *Gen. Appl. Plant Physiology*. 2005. Vol. 31 (3-4). P. 181 – 196.

10. Nutrient Stress Of Corn Plants: Early Detection And Discrimination Using A Compact Multiwavelength Fluorescent Lidar / G. Samson [et al.] // *EARSeL eProceedings*. 2000. No 1. 4153. P. 214-223.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПОЛИРОВАНИЯ СФЕРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ОПТИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ МЕТОДОМ «КРУГОВОЙ ОСЦИЛЛЯЦИИ»

ВАСИЛЬЕВА С.Н., ГРИМАЛЮК М.В., ЛОМАКИН Ю.В., ПОДОБРЯНСКИЙ А.В.

АО «НПО «Оптика»

E-mail: teopt@npooptica.ru

*В статье рассматривается вопрос создания оборудования для реализации техпроцесса полирования сферических исполнительных поверхностей оптических деталей с «круговой осцилляцией» верхнего звена и его преимущества по сравнению с традиционной технологией полирования поверхностей оптических деталей методом притира на классических станках типа шлифовально-полировальных с возвратно-качательным осцилляционным движением оси поводка.*

**Ключевые слова:** полирование, тонкое шлифование, исполнительные сферические поверхности оптических деталей, осцилляция, круговая осцилляция, поводок, траектория, верхнее звено, метод притира.

Современное оптическое производство прецизионной оптики характеризуется мелкосерийностью и многономенклатурностью.

Операции предварительного и тонкого шлифования проводятся, в основном, на станках с ЧПУ в жестких осях кольцевым, в т.ч. комбинированным алмазным инструментом, обеспечивающим соответствующие требования рабочего чертежа геометрические и точностные параметры оптических деталей (ОД) [1].

Одной из задач процесса полирования является сохранение точности исполнительных поверхностей ОД, полученной при шлифовании.

Процесс полирования по трудоемкости занимает обычно в 2÷5 раз больше времени, чем шлифование [2]. Время полирования при всех прочих равных условиях, в основном, зависит от величины рабочего давления на единицу обрабатываемой поверхности, относительной скорости между инструментом и

деталью, траектории осцилляционного движения оси поводка верхнего звена (детали или инструмента) и направления рабочего давления.

Традиционные способы полирования сферических поверхностей ОД на существующих отечественных станках типа шлифовально-полировальных (ШП) и полировально-доводочных (ПД) реализуют различные движения оси поводка верхнего звена [3].

1. Схема с возвратно-колебательным движением поводка (рис. 1).

Ось поводка всегда расположена параллельно оси шпинделя.

Недостатки способа:

- рабочее давление направлено не по нормали (кроме соосного положения) к обрабатываемой поверхности, что создает несимметричную эпюру распределения рабочего давления;
- наличие реверса поводка инструмента

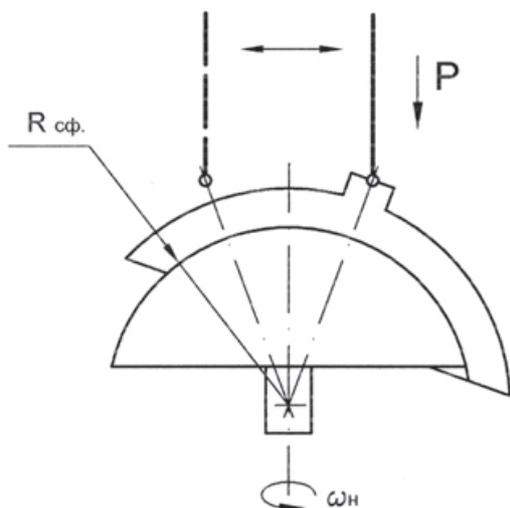


Рисунок 1.

*Возвратно-колебательное движение*

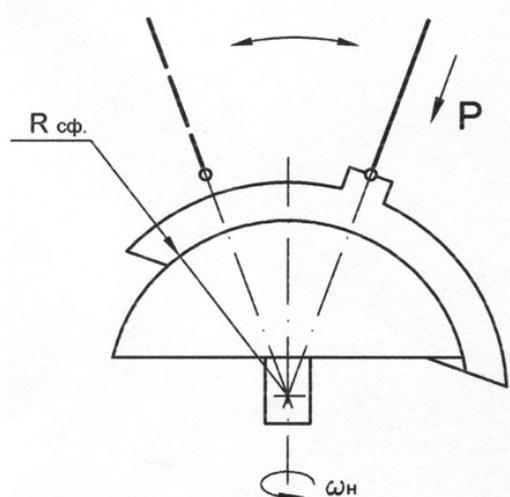


Рисунок 2.

*Возвратно-качательное движение*

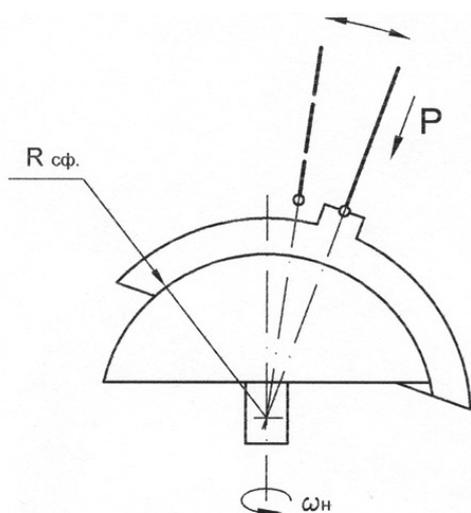


Рисунок 3.

*Асимметричное осцилляционное движение поводка*

(детали) создает опрокидывающий момент в крайних его положениях;

- прохождение поводком соосного с нижним шпинделем положения, при котором деталь и инструмент вращаются практически с одинаковой угловой скоростью, т.е. относительная скорость между ними отсутствует.

2. Схема с симметричным возвратно-качательным движением поводка вокруг центра обрабатываемой сферической поверхности (рис. 2).

Недостатки этого способа:

- наличие реверса при осцилляции поводка;
- наличие соосного положения оси поводка и оси шпинделя.

3. Схема с асимметричным осцилляционным движением поводка (рис. 3).

Практически этот способ аналогичен предыдущему, только сектор качания поводка расположен с одной стороны относительно оси шпинделя.

4. Схема (рис. 4), реализованная в созданном полировальном станке мод. ЗП-50К.

По данной схеме ось поводка вместе с деталью и инструментом совершают плавное безинерционное конусообразное движение с вершиной конуса в центре обрабатываемой сферической поверхности. Рабочее давление направлено по нормали к обрабатываемой сферической поверхности [4].

Вращение шпинделя осуществляется от электродвигателя с возможностью включения и отключения вращения шпинделя на любой позиции при помощи электромагнитных муфт. Частота вращения шпинделя разбита на девять ступеней в диапазоне от 6,25 до 34,7 с<sup>-1</sup> (от 375 до 2085 об/мин). Ось поводка головки (верхнее звено) совершает конусообразное осцилляционное движение с вершиной в центре обрабатываемой сферической поверхности. Зона осцилляции расположена с одной стороны относительно оси шпинделя и не имеет с ней в процессе обработки соосного положения, при котором деталь и инструмент практически вращаются с одинаковой угловой скоростью (относительная скорость между ними равна нулю). Амплитуду и зону осцилляции устанавливают с уче-

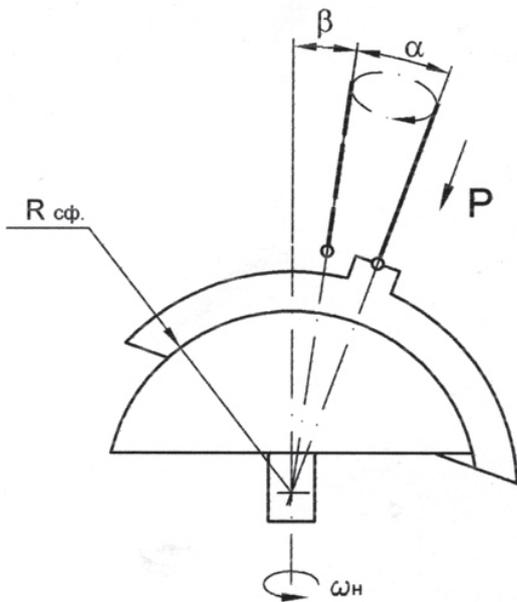


Рисунок 4.

*Конусообразное движение с вершиной конуса в центре обрабатываемой сферы*

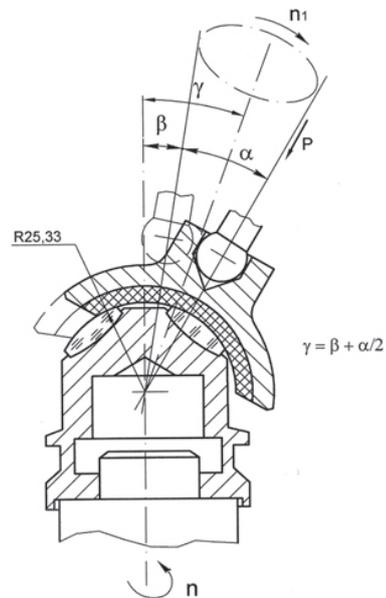


Рисунок 6.

*Зоны осцилляции верхнего звена*

том геометрических размеров и параметров обрабатываемой детали. Рабочее давление направлено вдоль оси поводка по нормали к обрабатываемой сферической поверхности в любом положении поводка.

На рис. 5 представлены схемы полирования сферических ОД в блоках на созданном станке мод. ЗП-50К,

где:  $\alpha$  – амплитуда конусообразной траектории (осцилляции) оси поводка (градус);

$\beta$  – минимальный угол между осями шпинделя и поводка (градус);

$\gamma$  – расположение зоны осцилляции относительно оси шпинделя (градус);

$n$  – частота вращения шпинделя ( $c^{-1}$ );

$n_1$  – частота осцилляции поводка ( $c^{-1}$ );

$P$  – рабочее усилие (Н).

Исследования процессов полирования проводились по трем вариантам технологических процессов.

*Вариант 1.* Обработка трехлинзового блока с относительной высотой  $H/R = 0,85$  при различных значениях амплитуды и зоны осцилляции верхнего звена (рис. 6).

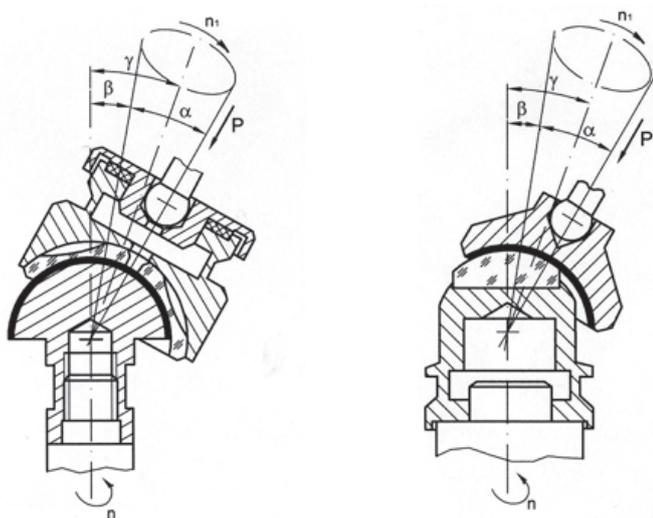


Рисунок 5.

*Схема полирования сферических ОД в блоках на станке мод. ЗП-50К*

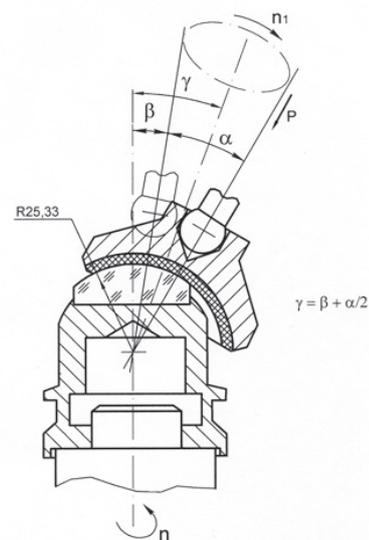


Рисунок 7.

*Обработка в один переход*

*Вариант 2.* Обработка в один переход однолинзового блока с относительной высотой  $H/R = 0,17$  (искусственная одиночка), сознательно создавая более сложные условия его полирования, что на практике не применяется (рис. 7).

*Вариант 3.* Обработка однолинзового блока с относительной высотой  $H/R = 0,17$  в три перехода. Съём припуска осуществляется тремя последовательно расположенными полировальными инструментами (рис. 7).

В процессе обработки ОД из каждой партии (было обработано 1800 линз) подвергались контролю на величину съема припуска через каждую минуту полирования до получения требуемых точностей формы и класса чистоты обрабатываемой поверхности линз.

По результатам контроля проведена математическая обработка полученных результатов, что позволило сделать следующие выводы.

*По варианту 1:*

Наиболее производительным является процесс полирования при  $\alpha = 20^\circ$ ,  $\beta = 15^\circ$ ,  $\gamma = 25^\circ$ . То есть, при максимальном угле между осями шпинделя и поводка ( $\alpha + \beta = 35^\circ$ ) наилучшим является процесс при наибольшем угле  $\beta = 15^\circ$ . Время полирования составило 7 минут.

Таким образом, зона расположения осей шпинделя и поводка, близкая к соосному, является непроизводительной, так как блок и инструмент вращаются практически с одинаковой угловой скоростью, при которой отсутствует относительная скорость между ними.

Время полирования блоков на станке модели ЗП-50К по сравнению с существующими технологическими процессами на станках серийных моделей полировальных (П) и ШП меньше в 1,5 – 1,8 раза.

*По варианту 2:*

Чем больше угол  $\beta$  между осями шпинделя и поводка и больше угол  $\gamma$  расположения зоны осцилляции относительно оси шпинделя, тем меньше время полирования до получения требуемых точности формы и класса чистоты обработанной поверхности линзы.

Время полирования искусственных и есте-

ственных однолинзовых блоков с относительной высотой меньше 0,25 в два раза больше, чем при обработке блоков с тремя линзами.

*По варианту 3:*

После первого и второго переходов обрабатываемая поверхность линзы имеет допустимые отклонения стрелки кривизны и формы;

После третьего перехода получалась требуемая по чертежу точность формы и класс чистоты обработанной линзы.

В процессе полирования на каждом переходе проводился контроль отклонений стрелки кривизны и формы сферической поверхности полировальных инструментов. Радиус кривизны инструментов оставался в пределах допустимых значений при 100 обработанных блоках, после чего требовалась правка сферической поверхности инструментов. Всего при обработке всей партии блоков проводились две правки инструментов, то есть стойкость полировального инструмента при полировании в три перехода в 25-30 раз выше, чем при обработке этих же блоков в один переход. Время полирования при этом на 30% меньше.

По итогам проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

Осуществляемое на станке осцилляционное движение оси поводка по конусообразной траектории с вершиной в центре обрабатываемой сферической поверхности ОД верхнее звено (блок или инструмент) совершает плавное круговое безинерционное движение, что обеспечивает благоприятные условия для полирования сферических ОД. Настройка станка позволяет изменять амплитуду осцилляции, а также смещать зону осцилляции, исключая соосное положение осей поводка и шпинделя.

Выявлены следующие существенные преимущества при полировании ОД по сравнению с существующими технологическими процессами полирования:

- сокращение машинного времени полирования ОД 1,5-1,8 раза;
- повышение выхода годных деталей по точности формы поверхности на 10 – 15%;
- увеличение стойкости полировального

инструмента (сохранение формы инструмента без правки) не менее, чем в 2 раза;

Наилучшие результаты получаются при обработке деталей (блоков) с относительной высотой  $H/R = 0,25 - 0,9$ , а при обработке одиночных линз с относительной высотой меньше 0,25 следует применять полирование в три перехода.

При трехпереходной обработке ОД стойкость полировального инструмента повышается в десятки раз, что позволит осуществить автоматизацию процесса полирования.

#### *Список литературы:*

1. *Ардамацкий А.Л.* Алмазная обработка оптических деталей. Л.: Машиностроение, 1978.
2. *Окатов М.А.* Справочник технолога-оптика. СПб.: Политехника, 2004.
3. *Зубаков В.Г., Семибратов М.Н., Штандель С.К.* Технология оптических деталей. М.: Машиностроение, 1985.
4. *Озеров К.П., Зацепин В.С., Сонин В.А.* Станок для обработки сферических поверхностей // А.С. №592577. Бюл. изобр.1978. №6.

# МОДУЛЬНЫЙ ПОДХОД К РАЗРАБОТКЕ КОМПЛЕКСНОЙ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ИНСТРУМЕНТОВ

ГРЕЧИШНИКОВ В.А., АКСЮТИН П.А., ЖИВОДРОВ О.Г., РОМАНОВ В.Б., ТАРАСОВ А.В.

Московский Государственный Технологический Университет «СТАНКИН»

E-mail: Stankin@gmail.com

*В статье рассмотрены принципы разработки архитектуры программ для комплексного проектирования инструмента.*

**Ключевые слова:** архитектура, модуль, параметры, интерфейс.

Системы автоматизированного проектирования (САПР) в настоящее время являются одним из наиболее эффективных средств повышения производительности инженерного труда и научной деятельности, а также сокращения сроков и улучшения качества разработок. Современный мир стремится к получению и использованию всё более новых совершенных изделий, а растущая конкуренция рынка заставляет производителей выпускать новые качественные оригинальные изделия промышленности во всё более короткие сроки. Это означает, что весь, так называемый, жизненный цикл изделия должен занимать всё меньшие интервалы времени.

Известно, что частичная автоматизация зачастую не дает ожидаемого повышения эффективности функционирования предприятий. Поэтому предпочтительным является внедрение интегрированных САПР, автоматизирующих все основные этапы проектирования изделий. Дальнейшее повышение эффективности производства и повышение конкурентоспособности выпускаемой продукции возможно за счет интеграции систем проектирования, управления и документооборота. Более подробно принцип работы САПР описан в публикациях посвящённых комплексному проектированию [1].

Разработка архитектуры программ для комплексного проектирования требует гибкого подхода, это связано с большим объёмом разнородной информации, которой приходится оперировать.

Для разработки такого программного комплекса использован модульный подход. Его суть заключается в грамотной декомпозиции программы, т.е. разделения решаемой задачи на подзадачи (модули). В модули следует выделять комплекс проблем, требующих единого подхода, например:

- расчётный модуль (модуль, производящий основные расчёты);
- модуль взаимодействия с базой данных (модуль, выполняющий основные запросы и выборки к базе данных);
- модуль взаимодействия со сторонними программами (модуль, позволяющий работать с программами T-Flex CAD, AutoCAD, SolidWorks и другими);
- модуль, реализующий пользовательский интерфейс (модуль, реализующий отображение всех элементов программы для конечного пользователя).

Рассмотрим подробнее возможные пути реализации конкретных модулей.

Расчётный модуль представляет собой комплекс программ, реализующий методики

проектирования инструмента, в основу которых положен поэлементный метод проектирования [2]. В этом модуле также учтены особенности программной разработки: определены допустимые границы значений параметров, тип хранимых значений, возможность переопределения параметров расчёта в методиках для получения результатов расчёта в конкретных условиях проектирования и конструирования.

Модуль взаимодействия с базой данных (БД). В настоящее время практически все программные продукты оперируют большими объемами информации. Это приводит к проблеме ее грамотного хранения, оптимизации и возможности быстрого извлечения данных для решения конкретных задач. Она решается путем создания БД, которые применяются для хранения, упорядочивания, быстрого поиска и представления информации пользователю. Модуль взаимодействия с БД реализован несколькими программными методами: запросы SQL, хранимые процедуры, триггеры. При разработке данного модуля учтен тот факт, что наибольшей эффективности можно добиться при обеспечении автономности данного модуля, т.е. все операции по получению изменению и записи данных должны выполняться без связи с остальными частями программы, возвращая только результат. Это обеспечивает скорость работы, а также улучшает возможности по доработке серверной части программы. База данных может работать как вместе с системой, так и как отдельно, с целью использования полученных с ее помощью параметров в других программах.

Модуль взаимодействия со сторонними программами. Взаимодействие со сторонними программами является важной частью программного комплекса, так как позволяет пользователю собирать всю необходимую для работы над проектом информацию в одном месте, а также обмениваться данными и проводить расчёты и построения в системах САД. Взаимодействие между программами осуществляется путем библиотек API или

встроенными режимами экспорта/импорта данных в системе.

Модуль, реализующий пользовательский интерфейс, осуществляет связь между пользователем и программной частью. Интерфейс имеет важное значение для любой программной системы и является неотъемлемой ее составляющей, ориентированной, прежде всего, на конечного пользователя. Именно через интерфейс пользователь судит о прикладной программе в целом; более того, часто решение об использовании прикладной программы пользователь принимает по тому, насколько ему удобен и понятен пользовательский интерфейс. Вместе с тем, трудоемкость проектирования и разработки интерфейса достаточно велика. По оценкам специалистов в среднем она составляет более половины времени реализации проекта. Актуальным является снижение затрат на разработку и сопровождение программных систем или разработка эффективного программного инструментария. Интерфейс реализован визуальном языке программирования Delphi. При разработке интерфейса учтены потребности пользователя в получении данных, имеющих хорошую организованность и понятность. Так же имеется возможность для пользователя производить настройку интерфейса по своему усмотрению.

Проработка архитектуры является основной задачей, возникающей при разработке комплекса автоматизированного проектирования инструмента. Системный подход к этой задаче позволяет создать надежный и быстрый комплекс, способный решать задачи проектирования режущего инструмента с гибкой системой настроек методик и программного обеспечения.

#### *Список литературы*

1. Гречишников В.А., Тарасов А.В., Живодров О.Г. «Комплексное проектирование режущего инструмента»/ Известия Тульского государственного университета. 2013. №8. С. 164
2. Лашиев С.И., Юликов М.И. «Проектирование режущей части инструмента с применением ЭВМ», «Машиностроение», М, 1980, 208с.

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИНТЕГРАЛЬНОГО КОЭФФИЦИЕНТА ПРОПУСКАНИЯ ОБЪЕКТИВОВ ТЕПЛОВИЗИОННЫХ СИСТЕМ В УСЛОВИЯХ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО КОНТРОЛЯ

ОСИПОВИЧ И.Р.

ПАО «Красногорский завод им. С.А. Зверева»

E-mail: igro@zenit-kmz.ru

*Предложен способ определения интегрального коэффициента пропускания объективов по дискретным значениям, полученным для отдельных длин волн. Это удобно при производственном контроле объективов тепловизионных систем, когда изготовление необходимых светофильтров затруднено, а иногда невозможно.*

**Ключевые слова:** объектив, коэффициент пропускания, спектральная характеристика.

Тепловизионные системы в настоящее время стали неотъемлемой частью прицельно-навигационных комплексов самолетов, вертолетов, а также бронетанковой техники. Все большее применение находят тепловизионные системы и в других областях: охранные системы, медицинская аппаратура, системы наружного наблюдения, аппаратура метеорологических спутников. Становится очевидной тенденция роста доли таких систем в номенклатуре продукции предприятий.

Для обеспечения высоких энергетических параметров тепловизионных приборов, напрямую влияющих на дальность их применения, важной задачей становится обеспечение максимально возможного коэффициента пропускания применяемых в них объективов, на который влияют не только используемые оптические материалы, но и, в очень значительной мере, состав и качество наносимых покрытий.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Контроль коэффициента пропускания объективов тепловизионных систем является более сложной задачей, чем в видимом или ближнем инфракрасном (ИК) диапазонах [1, 2]. Если в видимой или ближней ИК области спектра рабочий диапазон легко может быть выделен набором светофильтров или специ-

ально изготовленными полосовыми фильтрами, то в области спектра объективов тепловизионных систем (наиболее употребительны 3-5 мкм и 8-12 мкм) это является проблематичным, более сложным технологически, и доступным не каждому предприятию. К тому же здесь ограничен и более специфичен выбор материалов. Поэтому в условиях производства контроль пропускания тепловизионных объективов осуществляется на отдельных длинах волн, выделяемых при помощи монохроматора, являющегося частью контрольного оборудования. На выходе мы имеем набор отдельных значений коэффициентов пропускания для выбранных длин волн  $\tau(\lambda)$ .

В тоже время для оценки качества объектива тепловизионного прибора важно знать интегральный коэффициент пропускания в рабочем спектральном диапазоне.

Если известно спектральное пропускание объектива  $\tau(\lambda)$ , то его интегральный коэффициент пропускания  $\tau$  в диапазоне длин волн  $\lambda_1 \div \lambda_2$  определяется по известной формуле [3]:

$$\tau = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_{i\ddot{o}i}(\lambda) S_{i\ddot{o}i}(\lambda) \tau(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_{i\ddot{o}i}(\lambda) S_{i\ddot{o}i}(\lambda) d\lambda} \quad (1)$$

где  $\Phi_{\text{отн.}}(\lambda)$  и  $S_{\text{отн.}}(\lambda)$  – относительные спектральная плотность потока излучения и чувствительности фотоприемника соответственно.

Данная формула является точной и позволяет однозначно учесть спектральный состав излучения и спектральную характеристику фотоприемника, с которыми работает контролируемый объектив.

Поскольку функции  $\Phi_{\text{отн.}}(\lambda)$  и  $S_{\text{отн.}}(\lambda)$ , входящие в (1) – это чаще всего экспериментально полученные зависимости (существующие в виде таблиц и графиков), определение  $\tau$  по формуле (1) требует большого объема вычислений и в условиях производства является неудобным и трудоемким, особенно в случае роста объемов выпуска или если для контроля используется неавтоматизированное оборудование.

Часто применяемое в условиях производства прямое усреднение значений  $\tau(\lambda)$  или их интегрирование без учета  $\Phi_{\text{отн.}}(\lambda)$  и  $S_{\text{отн.}}(\lambda)$ , или, по крайней мере, без учета приемника не всегда дают достоверный результат, поскольку спектральные характеристики излучения и чувствительности фотоприемника в измерительной установке и в изделии (в реальных условиях эксплуатации) могут и не совпадать.

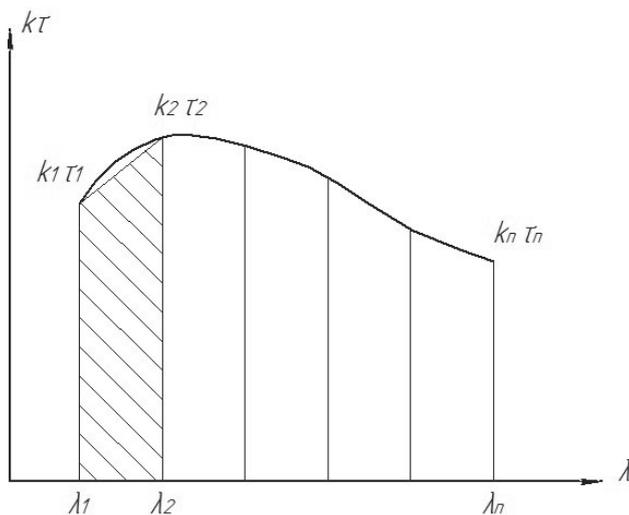


Рисунок 1.

Расчетная схема для определения интегрального пропускания

Считаем, что спектральные характеристики излучения объектов в условиях эксплуатации и чувствительности фотоприемника в изделии нам известны.

Допустим, что в ходе производственного контроля объектива были получены значения коэффициентов пропускания на отдельных длинах волн  $\tau_1(\lambda), \tau_2(\lambda), \tau_3(\lambda) \dots \tau_n(\lambda)$ , где  $n$  – количество значений. Для облегчения интегрирования значения коэффициентов пропускания снимаем на длинах волн, равноотстоящих друг от друга на величину  $\Delta\lambda$ .

Фотометрический интеграл в знаменателе формулы (1) не содержит функции пропускания и может быть вычислен отдельно. Для дальнейших преобразований обозначим его  $I_0$ . Известную часть выражения в числителе формулы (1) обозначим  $k(\lambda) = \Phi_{\text{отн.}}(\lambda) S_{\text{отн.}}(\lambda)$ , тогда формула (1) примет вид

$$\tau = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} k(\lambda) \tau(\lambda) d\lambda}{I_0} \quad (2)$$

С учетом выше сделанных допущений раскрываем интеграл в выражении (2), заменяя интегрирование суммированием при помощи метода трапеций в соответствии с расчетной схемой рис. 1:

$$\tau = \frac{1}{I_0} \left[ \frac{1}{2} (k_1 \tau_1 + k_2 \tau_2) \Delta\lambda + \frac{1}{2} (k_2 \tau_2 + k_3 \tau_3) \Delta\lambda + \dots + \frac{1}{2} (k_{n-1} \tau_{n-1} + k_n \tau_n) \Delta\lambda \right],$$

где  $k_1 \dots k_n, \tau_1 \dots \tau_n$  – дискретные значения функций для длин волн  $\lambda_1 \dots \lambda_n$ , взятые с интервалом  $\Delta\lambda$ .

Преобразовывая полученное выражение, получаем:

$$\tau = \frac{\Delta\lambda}{I_0} \left[ \frac{1}{2} k_1 \tau_1 + k_2 \tau_2 + \dots + k_{n-1} \tau_{n-1} + \frac{1}{2} k_n \tau_n \right]$$

Другими словами, интегральный коэффициент пропускания можно выразить через дискретные отсчеты с помощью простого ряда, коэффициенты которого могут быть подготовлены заранее:

$$\tau = \sum_{i=1}^n \zeta_i \tau_i \quad (3)$$

где

$$\zeta_i = \begin{cases} \frac{k_i \Delta \lambda}{2I_0}, i = 1; n \\ \frac{k_i \Delta \lambda}{I_0}, i = 2 \dots n-1 \end{cases}$$

Практика показывает, что  $\tau(\lambda)$ ,  $\Phi_{\text{отн.}}(\lambda)$  и  $S_{\text{отн.}}(\lambda)$ , – это обычно плавные кривые, и для задач производственного контроля достаточно обрабатывать 5-7 отсчетов  $\tau_i$ . В этом случае погрешность определения интегрального пропускания по сравнению с формулой (1) не превышает 0,005; что в абсолютном большинстве случаев достаточно.

Строго говоря, данная методика работает и для оптических систем, предназначенных для других спектральных диапазонов.

## ВЫВОДЫ

За счет того, что трудоемкие расчеты с численным интегрированием выполняются один раз для каждого из объективов, предлагаемая методика определения интегрального коэффициента пропускания по измеренным дискретным значениям позволяет заметно упростить вычисления, сведя их в ходе производственного контроля к элементарным вычислительным операциям.

### Список литературы:

1. Креопалова Г.В., Лазарева Н.Л., Пуряев Д.Т. Оптические измерения. - М.: Машиностроение, 1987. - 264 с.
2. Курт В.И., Павлюков А.К. Способ измерения коэффициента пропускания объективов, - Патент РФ №2422790.
3. Г. Шрёдер, Х. Трайбер. Техническая оптика. - М.: Техносфера, 2006 – 424 с.

*Примечание: эта статья в журнале № 1 - 2015 г. размещена с ошибками и потому печатается повторно. Редакция приносит извинения автору.*

# ТЕХНОЛОГИЯ НАНЕСЕНИЯ СЕТОК МЕТОДОМ ПРОЖИГАНИЯ ЛАЗЕРОМ, ЗАПОЛНЕНИЯ ЗАПУСКОМ, НАНЕСЕНИЯ РИСУНКА НА МЕТАЛЛИЧЕСКОМ ПОКРЫТИИ И ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВРЕЖДЕНИЙ СТЕКЛЯННОЙ ПОДЛОЖКИ

ДЬЯКОВА И.И., ЛЕЛЯНОВ А.Б., БАБИН С.А., БЕССМЕЛЬЦЕВ В.П., ДОСТОВАЛОВ А.В.

ОАО «Швабе - Приборы», г. Новосибирск

Институт автоматки и электрометрии СО РАН, г. Новосибирск

E-mail: post@tochpribor.com, adviser@iae.nsk.su

*В статье рассмотрена технология и оборудование для нанесения на стеклянной подложке прицельных знаков по результатам НИР. Основное внимание уделено технологии, которая не заслуженно мало используется в оптическом приборостроении.*

**Ключевые слова:** прицельное устройство, лазерная абляция, фемтосекундный лазер.

В последнее время характерно повышение технических требований для стрелкового оружия: расширение диапазона работы прицельных устройств (оптическое прицельное устройство совместно с коллиматорным), увеличение дальности прицеливания, применение прицельного устройства с возможностью быстрого переключения увеличения при переносе стрельбы с ближних дистанций на средние.

Данные требования приводят к необходимости проектирования и изготовления многофункциональных прицельных знаков, а именно прицельных знаков, работающих при смене оптического увеличения, имеющих разную ширину штриха, сочетающих в себе характеристики оптических и коллиматорных прицельных элементов.

Традиционными технологиями получения изображения рисунка на стекле являются:

- метод получения изображения травлением органического защитного покрытия (воск) на стекле с последующим запуском;
- метод получения изображения фотолитографией по металлическому слою (хром, алюминий, серебро).

К технологическим процессам нанесения изображения рисунка предъявляются следующие требования:

- обеспечение точности воспроизведения изображения элементов (ширины штрихов, диаметра отверстия, их расположения, допустимые отклонения этих величин);
- обеспечение оптических характеристик (спектральных коэффициентов пропускания и отражения подложек, постоянства оптических характеристик в зависимости от условий эксплуатации, стабильности во времени);
- чистоты поверхности.

При использовании метода получения изображения травлением защитного покрытия минимальная ширина штриха составляет 4,0 – 10,0 мкм с допуском  $\pm 2,0$  мкм.

При использовании метода получения изображения фотолитографией по металлическому слою, ширина штриха составляет 1,25 мкм и зависит от используемого фоторезиста и точности изготовления фотошаблона.

Данные методы не позволяют получить изображение на стекле для современных прицелов, имеющих особые требования к изображению.

Технология нанесения сеток методом лазерной абляции [1], заполнения запуском, нанесения рисунка на металлическом покрытии объединяет две традиционные технологии получения изображения рисунка на стекле в два этапа.

*Первый этап:* получение рисунка абляцией лазером поверхности стеклянной подложки с последующим запуском с целью получения изображения для оптического прицела,

*Второй этап:* нанесение изображения методом абляции лазером металлического слоя (хром, алюминий, серебро в зависимости от требований к коэффициенту пропускания оптической системы) с целью получения изображения для коллиматорного прицела. Металлический слой наносится после выполнения первого этапа. При этом, поскольку порог абляции металла ниже, чем у стекла, возможно, выполнить удаления тонкого слоя металла без повреждения поверхности стекла.

Технология нанесения рисунка сеток методом лазерной абляции даёт возможность получать изображение шкал, имеющих разную ширину штрихов, что невозможно получить традиционным методом гравировки по защитному покрытию (воск) и последующим травлением.

Технологический процесс заключается в создании штрихов заданной ширины согласно требованию чертежа с глубиной, равной соотношению 1:4 глубины к ширине штриха для обеспечения достаточной глубины штриха, необходимой для заполнения запуском, предотвращающей его выкрашивание.

С целью совмещения рисунка, наносимого по металлическому слою, вне световой зоны создаются установочные реперные метки, по которым на втором этапе проводится выставление положения точки фокусировки лазерного излучения для выполнения требования смещения двух рисунков с требуемым допуском.

Работа выполнялась на технологическом комплексе высокоточной фемтосекундной модификации материалов. Комплекс состоит из лазерного излучателя марки PHAROS

6 W, высокоточного позиционера ABL100 фирмы Aerotech. Система обратной связи между блоками управления лазером и драйвером позиционера позволяет проводить процесс модификации по строго заданным траекториям перемещения образца.

Фемтосекундный лазер, воздействующий на обрабатываемый материал лазерным излучением в виде очень коротких (1 фемтосекунда =  $10^{-15}$  секунды), сжатых импульсов позволяет достичь высокого уровня плотности энергии. Именно использование фемтосекундных импульсов позволяет локализовать область воздействия и избежать образования сколов и трещин в области модификации стекла [2].

На первом этапе работ были проведены эксперименты по записи методом лазерной абляции поверхности образца согласно чертежам заказчика.

Длина волны излучения, длительность импульса, частота следования импульсов, мощность подбирались конкретно для получения требуемых параметров. Фокусировка излучения осуществлялась с помощью асферической линзы. При этом ширина штриха составляла величину 0,02 и 0,035 мм, погрешность изготовления составила менее 0,004 мм.

На втором этапе работ после заполнения запуском и нанесения защитного покрытия в центральной области образца было удалено металлическое покрытие без повреждения стекла.

Параметры излучения отличаются от параметров лазерной абляции на поверхности стекла, что обусловлено более низким порогом абляции металла.

Центрировка образца выполнялась по заранее нанесенным меткам на областях вне защитного покрытия.

Система управления технологическим комплексом построена на ЧПУ и имеет 2 степени свободы по осям X и Y. Программируя работу комплекса из графического редактора CorelDraw, AutoCAD, LaserCUT гарантируется безошибочное выполнение задания. При повторной абляции стекла нужно только нажать «START» чтобы начать работать, т.

к. задание записывается в память технологического комплекса.

Режимы лазерной абляции варьируются в зависимости от марки стекла и зеркального металлического покрытия.

Прицельное приспособление – совокупность оптического  $4^x$  -  $6^x$  кратного прицела (для точного распознавания цели на средних и дальних дистанциях) и коллиматорного  $1^x$  кратного прицела позволяет использование его в прицелах для ближнего боя и для дистанционного ведения стрельбы, быстро менять прицельное приспособление в условиях перехода от одной дистанции к другой.

Достоинствами сетки, сочетающей в себе коллимационную марку прицеливания и оптическую шкалу, являются:

- светящаяся прицельная коллимационная марка остаётся невидимой со стороны цели, её видит только стрелок;

- позволяет точно и быстро навести оружие на цель на ближних дистанциях;

- предоставляет при коллиматорной марке возможность перемещения головы и глаза в больших пределах, не теряя из вида прицельную марку и цель;

- позволяет при стрельбе по подвижной цели легко делать упреждение;

- параллакс при коллиматорной марке не превышает 1-2 угловых минут в крайних участках зоны видимости марки, что соизмеримо с разрешающей способностью глаза, и не оказывает влияния на точность стрельбы;

- с применением оптического прицела, возможно, одновременно наблюдать цель и прицельно-дальномерную шкалу, не требуя постоянной перестройки зрения;

- быстро переключающееся увеличение обеспечивает тактическое преимущество при переносе стрельбы с ближних дистанций на средние, использующих разные оптические увеличения;

- позволяет вести стрельбу в вечернее и утреннее время.

Рекомендуется применять конструкцию сеток с использованием двухступенчатой технологии нанесения рисунка (нанесение штрихов методом лазерной абляции стеклянной подложки и нанесение рисунка лазерной абляции металлического зеркального слоя) в изделиях, сочетающих в себе систему оптического прицела и коллиматорного (имеющего светящуюся центральную точку или центральный знак (пика)) по аналогии с прицелами канадской фирмы «Elcan Optical Technologies».

В целях увеличения коэффициента пропускания, рекомендуется в качестве зеркального покрытия применять серебряное покрытие либо другое, имеющее высокий коэффициент отражения.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ (проект № 2012-218-03-004).

#### *Список литературы:*

1. *Markillie G. A. J., Baker H. J., Villarreal F. J., and Hall D. R.* Effect of vaporization and melt ejection on laser machining of silica glass micro-optical components // *Applied Optics*. 2002. vol. 41. no 27. pp. 5660–7.

2. *Lenzner M., Krüger J., Kautek W., and Krausz F.* Precision laser ablation of dielectrics in the 10 - fs regime // *Applied Physics A*. 2000. vol. 371. no. 1999, pp. 369–371.

# АСФЕРИКА-КОМПЛЕКС – ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ ОПТИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ ДИАМЕТРОМ до 3000 мм ДИФРАКЦИОННОГО КАЧЕСТВА. Часть I

ГОРШКОВ В.А., КУЗНЕЦОВ С.А.

АО «НПО «Оптика»

E-mail: optikal@nprooptica.ru

*Разработка новых технологий автоматизированного формообразования, создание нового станочного и метрологического оборудования для новейших оптико-электронных систем. Рассмотрены компьютерные технологии автоматизированного формообразования оптических элементов различных размеров. Определен состав автоматизированного комплекса для различных методов обработки поверхностей и метрологического измерения обрабатываемых поверхностей.*

*Разработана блок-схема алгоритма автоматизированного формообразования поверхностей оптических элементов. Определены технические характеристики интерферометра для обеспечения контроля поверхностей.*

**Ключевые слова:** новые технологии автоматизированного формообразования, компьютерные технологии, интерферометрический контроль, технологические программы, компьютеризированный станок.

В период 2013÷2015 гг. АО «НПО «Оптика» и ОАО «ЛЗЭС» осуществляли совместную разработку по НИОКР «Разработка технологий и создание оборудования для автоматизированного формообразования и контроля оптических поверхностей дифракционного качества».

Целью работы являлась разработка новых технологий автоматизированного формообразования, создание нового станочного и метрологического оборудования, позволяющего получить новейшие оптико-электронные системы дистанционного зондирования Земли, лазерные космические системы поражения, наземные системы астрономических исследований и приборов нового поколения гражданского и двойного назначения.

При выполнении НИОКР ставились задачи:

- создание компьютерной технологии автоматизированного формообразования поверхностей оптических деталей дифракционного качества диаметром 250÷3000 мм методами ионного, магнитореологического и химико-

механического комплексного воздействия на обрабатываемую поверхность, имеющих точностные параметры по отклонению формы в пределах  $\lambda/80 \div \lambda/100$  ( $\lambda=0,6328$  мкм) и шероховатости поверхности в пределах  $5 \div 10$  нм;

- создание нового класса станочного и метрологического оборудования, реализующего различные физические принципы обработки оптических поверхностей дифракционного качества;

- разработка конструкторской документации на опытные образцы метрологического оборудования;

- разработка конструкторской документации на компьютеризированные опытные образцы станков для магнитореологического и химико-механического автоматизированного формообразования оптических поверхностей дифракционного качества;

- разработка документации на технологию магнитореологического и химико-механического автоматизированного формообразования опти-

ческих поверхностей дифракционного качества;

- разработка универсальных программ управления технологическими процессами формообразования;

- изготовление и испытание опытных образцов станков для химико-механического и магнитореологического формообразования и опытных образцов для контроля поверхности в процессе формообразования;

- разработка методики измерений формы оптической поверхности на различных этапах формообразования.

Конечными результатами реализации технологий будут:

- создание уникальной компьютерной технологии автоматизированного формообразования любых оптических элементов диаметром 250÷3000 мм дифракционного качества с отклонениями формы и шероховатости поверхности в нанометровом диапазоне для оптико-электронных систем различного назначения;

- создание нового класса современного станочного и метрологического оборудования на базе разрабатываемой технологии;

- создание технологического автоматизированного комплекса для формообразования оптических элементов, в т.ч. асферических и внеосевых, диаметром 250÷3000 мм на базе разработанного оборудования;

- производство уникальных оптических элементов дифракционного качества для оптико-электронных систем различного назначения.

Данная технология, позволяющая достичь дифракционных параметров асферических компонентов, является основным вкладом в возможность достижения необходимого технического уровня оптико-электронных систем.

Основными сегментами отечественного и международного рынков при реализации разрабатываемых продукции и технологий являются:

- научная аппаратура с применением высоко разрешающей оптики дифракционного качества.

- оптико-электронные системы наземного и космического базирования (лидары, телескопы, пеленгаторы);

- высокоразрешающие оптические системы передачи-приема изображений, в том числе для микроэлектроники;

- оптико-электронные приборы для дистанционной передачи высокоэнергетического излучения в различных диапазонах спектра.

Во всех указанных сегментах наблюдается устойчивый рост как по спросу на указанные виды продукции, так и по увеличению сложности аппаратуры, уменьшения массогабаритных параметров, увеличению показателей точности формы, величины шероховатости применяемых оптических компонентов, увеличению их апертуры, величин асферичности и градиента асферичности.

Разрабатываемая комплексная автоматизированная технология формообразования асферических поверхностей (ТЕСАФ), в том числе внеосевых оптических деталей с комбинированным воздействием различных методов формообразования на обрабатываемую поверхность, показана на рис. 1.

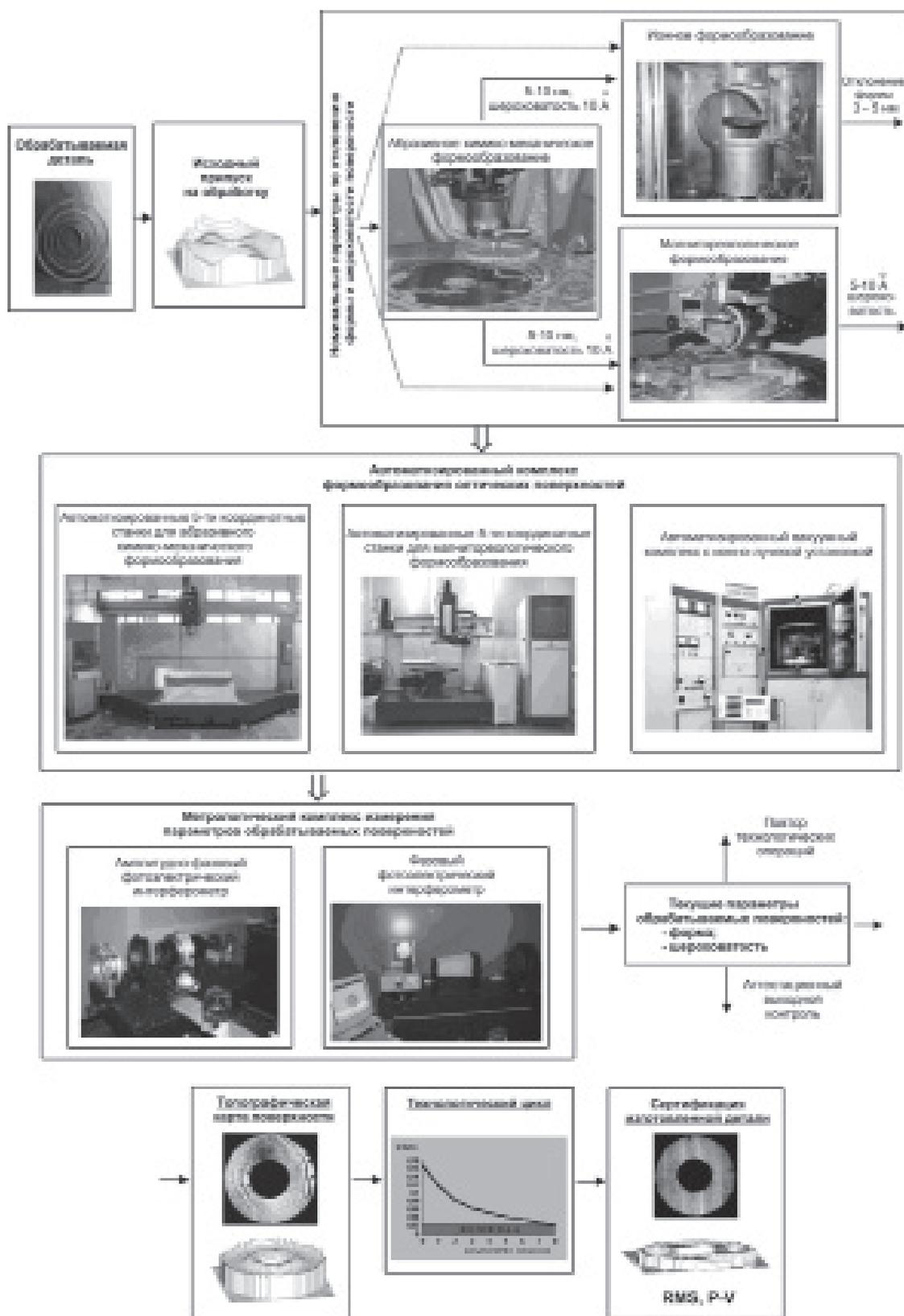
Оптическая деталь поступает для обработки в автоматизированный Комплекс, состоящий из комплексно-интегрированного оборудования для абразивной, магнитореологической и ионной обработки поверхности.

Обрабатываемая исходная поверхность оптической детали контролируется интерферометром амплитудного или фазового типа, по результатам контроля определяется припуск на дальнейшую обработку. Величина припуска может составлять от единиц до сотен микрометров, в связи с чем на этой стадии применяются интерферометры видимого и инфракрасного диапазонов.

Для достижения номинальных параметров формы и шероховатости поверхностей в диапазоне 3÷5 нм (отклонения формы) и 5÷10 Å (шероховатость поверхности) оптическая деталь проходит от одной до трех стадий последующих технологических циклов:

- абразивную химико-механическую обработку на автоматизированных станках для снятия основного припуска методом управляемого шлифования и полирования обработанной поверхности с достижением максимально возможных требований по отклонению формы и шероховатости поверхности (5÷10 нм – отклонения формы, 10 Å – шероховатость);

- дальнейшее формообразование поверхно-



**Рисунок 1.**  
**Технологическая программа ТЕСАФ**

сти (при необходимости) для достижения отклонений формы поверхности в  $3 \div 5$  нм (ионное формообразование) и достижения минимальных значений шероховатости до  $5 \div 10 \text{ \AA}$  (магнитореологическое формообразование).

Возможно комбинированное использование указанных методов для достижения одного из необходимых параметров (формы или шероховатости). Технологические операции магнитореологического и абразивного формообразования осуществляются на вновь разработанном оборудовании, в совокупности представляющем из себя автоматизированный комплекс с едиными технологическими и управляющими программами.

Контроль обрабатываемой поверхности осуществляется интерференционными средствами с использованием амплитудно-фазового и фазового методов обработки интерферограмм.

Блок-схема алгоритма автоматизированного формообразования асферических поверхно-

стей оптических элементов показана на рис. 2.

В ходе выполнения НИОКР созданы:

компьютеризированный станок модели АПД-3000 для автоматизированного формообразования и доводки асферических поверхностей оптических деталей диаметром до 3000 мм методом многопозиционной локальной обработки и пространственно-временного принципа формообразования (рис. 3), в состав которого входят:

- станина;
- стойки;
- стол;
- траверса;
- каретка;
- шпиндель;
- насадка;
- электрооборудование;
- пневмооборудование;
- кабелеукладчик.

Технические характеристики станка приведены в табл. 1;

**Таблица 1.**  
**Технические характеристики станка АПД-3000**

Наименование параметра	Величина параметра
Диаметр ОД, мм	от 500 до 3000
Наибольшая высота ОД, мм, не более	400
Отношение диаметра ОД к радиусу кривизны, не более	0,4
Количество управляемых координат, ед.	6
Наибольшее перемещение по координате X (ход каретки), мм	1800
Наибольшее перемещение по координате Z (ход салазок), мм	200
Наибольший угол наклона оси шпинделя, град	15
Наибольшая величина сканирования по координате Y, мм	$\pm 40$
Скорости линейных перемещений по координатам X, Z, мм/мин	от 2,4 до 800
Угловая скорость наклона шпинделя, рад/с (град/с)	от 0,0002 до 0,1 (от 0,012 до 6)
Частота вращения планшайбы стола, $\text{с}^{-1}$ (об/мин)	от 0,00045 до 0,1 (от 0,027 до 6)
Частота вращения шпинделя полировального инструмента, $\text{с}^{-1}$ (об/мин)	от 0,16 до 4 (от 10 до 250)
Усилие нагрузки на инструмент, Н (кГс)	от 3,92 до 245 (от 0,4 до 25)
Амплитуда плоскокругового движения полировального инструмента, мм	от 0 до 35
Свободный ход поводков насадки, мм, не менее	20
Допуск позиционирования по линейным координатам, мм	0,5
Допуск позиционирования по угловым координатам, град	0,2
Допуск торцевого биения планшайбы на диаметре 500 мм, мм	0,25
Допуск радиального биения центрирующего отверстия планшайбы, мм	0,1
Установленная мощность электродвигателей, кВт	14
Габаритные размеры станка без шкафов управления, мм	4200×1600×2800
Масса станка без шкафов управления, кг	7000



– отдельные узлы компьютеризированного станка модели АПД-1000МР для магнитореологического и химико-механического автоматизированного формообразования и доводки асферических поверхностей оптических деталей методом многопозиционной локальной обработки и пространственно-временного принципа формообразования с достижением точностных параметров по отклонению формы в пределах  $\lambda/60 \dots \lambda/80$  ( $\lambda = 0,6328$  мкм) (рисунки 4, 5, 6, 7,8), в состав которых входят:

- станина;
- стол;
- каретка;
- шпиндель;
- насадка;

- электрооборудование;
- пневмооборудование;
- кабелеукладчик;
- модуль магнитореологический (ММР);
- автономная система управления ММР.

Технические характеристики станка приведены в табл. 2;

– прибор интерференционного контроля модели ПИК-АС для обеспечения контроля формы сферических и асферических поверхностей второго и более высоких порядков с использованием индивидуальных нуль-корректоров, устанавливаемых в рабочую ветвь интерферометра (рис. 9), в состав которого входят:

- оптико-механический блок (БОМ) со стационарным расположением двух встроен-

**Таблица 2.**

**Технические характеристики станка АПД-1000 МР**

Наименование параметра	Величина параметра
Диаметр ОД, мм	от 250 до 1000
Наибольшая высота ОД, мм, не более	200
Отношение диаметра ОД к радиусу кривизны, не более	0,5
Количество управляемых координат, ед.	6
Наибольшее перемещение по координате X (ход каретки), мм	1050
Наибольшее перемещение по координате Z (ход салазок), мм	300
Наибольший угол наклона оси вращения планшайбы стола, град	45
Скорости линейных перемещений по координатам X, Z, мм/мин	от 1,2 до 800
Угловая скорость наклона планшайбы стола, рад/с (град/с)	от 0,0002 до 0,2 (от 0,012 до 12)
Частота вращения планшайбы стола, $c^{-1}$ (об/мин)	от 0,00045 до 0,25 (от 0,027 до 15)
Частота вращения шпинделя полировального инструмента, $c^{-1}$ (об/мин)	от 0,08 до 4 (от 5 до 250)
Амплитуда плоскокругового движения полировального инструмента, мм	от 0 до 20
Свободный ход поводков насадки, мм, не менее	20
Допуск позиционирования по линейным координатам, мм	0,5
Допуск позиционирования по угловым координатам, град	0,2
Допуск торцевого биения планшайбы на диаметре 500 мм, мм	0,25
Допуск радиального биения центрирующего отверстия планшайбы, мм	0,1
Установленная мощность электродвигателей, кВт	8,3
Габаритные размеры станка без шкафов управления, мм	2000×1100×1900
Масса станка без шкафов управления, кг	1500

ных лазеров с длиной волны  $\lambda_1 = 632,8$  нм и  $\lambda_2 = 532$  нм;

- комплект сменных объективов 1:2, 1:3, 1:6 для  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ ;
- кронштейн с диагональным зеркалом;
- устройство цифровой регистрации оптических изображений (цифровая камера);
- видеоконтрольное устройство;
- компьютер с периферией (монитор, «мышь», принтер) в качестве блока регистрации, обработки и документирования выходной информации;

Технические характеристики интерферометра приведены в табл. 3;

– инфракрасный интерферометр модели ИКИ-10,6 для обеспечения контроля погрешности формы шлифованных и полированных

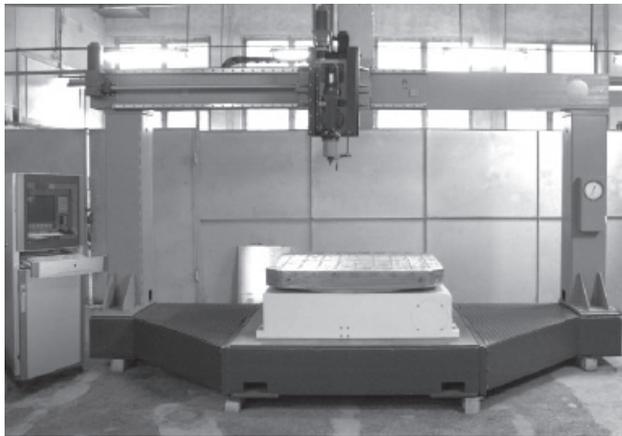
вогнутых сферических и асферических поверхностей с большими отклонениями от ближайшей сферы (более 100 мкм) с апертурой  $A \leq 1:2$ , а также для исследования волновых фронтов, формируемых объективами оптико-электронных изделий, работающих в инфракрасной области спектра (рис. 10), в состав которого входят:

- оптико-механический блок (БОМ);
- лазер LCS-T-11 с источником питания;
- лазер LCD-3А с источником питания;
- фотоприемник JR118 с источником питания.
- комплект сменных объективов 1:3, 1:6;
- устройство цифровой регистрации оптических изображений (цифровая камера);
- видеоконтрольное устройство;

Таблица 3.

Технические характеристики прибора интерференционного контроля мод. ПИК-АС

Наименование параметра	Величина параметра
Длина волны излучения лазера: $\lambda_1$ , нм $\lambda_2$ нм	632,8 532
Мощность лазерного излучения, мВт, не менее	10,0
Режим работы	неравноплечий (с опорным волновым фронтом)
Комплект сменных объективов с относительным отверстием рабочей ветви для $\lambda_1$ и $\lambda_2$	1:2, 1:3, 1:6
Диаметр параллельного пучка лучей в рабочей ветви, мм	20
Среднее квадратическое значение погрешности измерений, не более	$\lambda/100$ ( $\lambda=632,8$ нм)
Вид получаемой информации о контролируемой поверхности	- визуальное наблюдение интерференционной картины; - интерферограмма на видеоконтрольном устройстве
Габаритные размеры (без крышки): длина, мм ширина, мм высота, мм	770 850 440
Масса, кг, не более	75
Средний срок службы, лет, не менее	5
Допустимые вибрации в месте установки прибора не должны превышать величин: амплитуда, мкм частота, Гц	3-5 3-5



*Рисунок 3.*

*Компьютеризированный станок мод. АПД-3000*

- компьютер с периферией (монитор, «мышь», принтер) в качестве блока регистрации, обработки и документирования выходной информации;

Технические характеристики интерферометра приведены в табл. 4.

В настоящее время завершены работы по сборке, монтажу, отладке станков АПД-3000, АПД-1000МР, сборке, юстировке интерферометров ПИК-АС и ИКИ-10,6, проведен поиск и оптимизирован состав магнито-реологической жидкости производства АО «НПО «Оптика».

*Таблица 4.*

*Технические характеристики инфракрасного интерферометра мод. ИКИ-10,6*

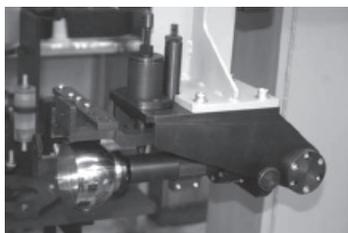
Наименование параметра	Величина параметра
Длина волны излучения лазера: LCS-T-11, $\lambda_1$ , мкм LCD-3A, $\lambda_2$ , мкм	0,532 10,6
Мощность лазерного излучения, Вт, не менее: LCS-T-11 LCD-3A,	$7 \cdot 10^{-3}$ 3,0
Режим работы	неравноплечий (с опорным волновым фронтом)
Относительное отверстие объектива рабочей ветви	1:3, 1:6
Диаметр параллельного пучка лучей в рабочей ветви, мм	20
Приборная погрешность (на волновом фронте): размах, не более среднеквадратическое отклонение, не более	$\lambda/10$ $\lambda/50$
Вид получаемой информации о контролируемой поверхности	интерферограмма на видеоконтрольном устройстве
Габаритные размеры: длина, мм, не более ширина, мм, не более высота, мм, не более	1000 800 550
Масса, кг, не более	85
Средний срок службы, лет, не менее	5
Допустимые вибрации в месте установки прибора не должны превышать величин: амплитуда, мкм частота, Гц	3-5 3-5



**Рисунок 4.**  
*Магнитореологическая головка*



**Рисунок 5.**  
*Шпиндель станка*



**Рисунок 6.**  
*Магнитореологический модуль*



**Рисунок 7.**  
*Модуль подготовки  
магнитореологической жидкости*

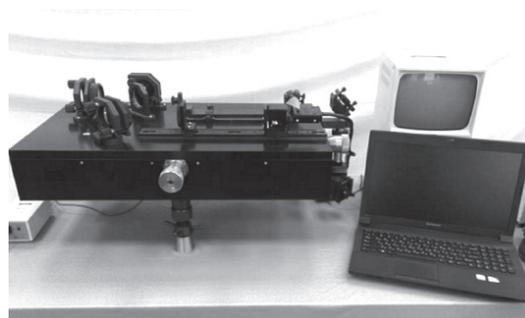
Результаты комплексного исследования разработанного оборудования будут представлены в части 2 настоящей статьи.

*Список литературы:*

1. А.С. Савельев, В.А. Горшков. Способ исследования сопротивления стекол оптических деталей истиранию при полировании. // А.с. № 1458173. Бюл. изобр. 1989. №6, С.



**Рисунок 8.**  
*Узлы и блоки станка АПД-1000МР  
(траверса, каретка, магнитореологической модуль,  
основание)*



**Рисунок 9.**  
*Прибор интерференционного контроля  
мод. ПИК-АС*



**Рисунок 10.**  
*Инфракрасный интерферометр мод. ИКИ-10,6*

2. Материалы фирмы Zeeko Ltd (Великобритания) | 4 Vulcan Court | Vulcan Way | Coalville Leicestershire | LE67 3FW | United Kingdom | [www.zeeko.co.uk](http://www.zeeko.co.uk)

3. Ю.Б. Лямин. Автоматизированные станки с компьютерным управлением по 5-ти координатам для формообразования высокоапертурных поверхностей крупногабаритных зеркал. //Оптический журнал. 2011. т.78. №4. С. 21-24

## ИСТОРИЯ БРЕНДА «ЗЕНИТ» И ЕГО БУДУЩЕЕ

ТИТОВ Е.И.

*Лауреат государственной премии  
в номинации Промышленный дизайн*

**E-mail:** djek-p@yandex.ru

Для начала - справка из Википедии:

**Бренд** - (англ. *brand*, [brænd] – клеймо) – торговая марка, которая в представлении потребителя имеет определённые характерные ценные свойства и атрибуты.

Бренд символизирует какие-либо определённые качества продукта или характеристики самого производителя продукта. Для этого бренд должен быть узнаваем, как правило, права на его использование защищают юридически.

**Ребрендинг** – активная маркетинговая стратегия; включает комплекс мероприятий по изменению бренда (как компании, так и производимого ею товара), либо его составляющих: названия, логотипа, слогана, визуального оформления, с изменением позиционирования. Проводится в русле изменения концептуальной идеологии бренда. Это подразумевает, что в компании (продукте) произошли довольно существенные изменения.

Рестайлинг и репозиционирование бренда – составные части процесса ребрендинга. Удачный ребрендинг позволяет компании выйти на новый уровень развития, привлечь внимание новых клиентов и увеличить лояльность существующих.

Анализ проводимых ребрендингов ведущими компаниями мира в области фототехники и объективостроения наглядно демонстрирует широкую палитру мероприятий, однако ни один бренд (логотип) не претерпел скольких существенных изменений в своем графическом исполнении. Напротив, ряд фирм с целью усиления своих позиций на рынке фото-

техники, привлекают и широко используют ранее не принадлежавшие им бренды (Коника-Минольта), не говоря о выпуске контрафактной продукции под чужим брендом. Так в 90-е годы появились зеркальные фотоаппараты «Зенит» азиатского происхождения, конструкция от «Минольты», а на щитке логотип «Зенит». Зарубежные и отечественные потребители, проявляя большой интерес к фототехнике и объективам из Красногорска, в большинстве случаев дают им высокие оценки качества и надежности (см. интернет-форумы). И это понятно. Техноинторг на протяжении многих десятилетий поставлял более половины выпуска фотоаппаратов «Зенит» и объективов к нему в 72 страны мира. Этой организацией был настолько хорошо налажен сбыт продукции с маркой «Зенит» за рубежом, что ее дефицит остро ощущал отечественный рынок. Поэтому, по решению советского правительства, в 80 –е годы для нужд отечественного рынка в Белоруссии в г. Вилейка был построен новый завод. На нем с помощью специалистов из Красногорска было освоено производство зеркальной камеры «Зенит ТТЛ». А в составе производственного объединения «Красногорский завод» на Валдае был построен завод по производству объективов для фотоаппаратов «Зенит». Таким образом, в Советский период фотоаппараты «Зенит» разрабатывались на Красногорском заводе и выпускались преимущественно на нем и лишь с 1980 по 1988 годы ряд моделей на базе Зенит ТТЛ производились еще и на БелОМО в Вилейке.

На многих сайтах, в интернете, пишут: *«Если вспоминать самые популярные фотоаппараты Советского Союза, то на ум сразу приходят «Зоркий» и «Смена». Но самой успешной была серия фотокамер «Зенит». Этот бренд был настолько популярным, что под ним продолжали выпускаться фотоаппараты даже в первые годы 21 века, когда рынок заполонила цифровая продукция из Японии»* (2).

Или, *«В Барселонском зоопарке одно время жила горилла-альбинос. Это была долгая история: барселонцы собирали деньги для выкупа детеныша-альбиноса, который потом 40 лет жил в зоопарке, и умер (...). В зоопарке есть музей, посвященный белой горилле, и там, среди экспонатов, фотоаппарат Зенит, принадлежавший биологу, который занимался судьбой белой гориллы в Африке. «Неубиваемый» фотоаппарат, не требующий ухода - так его аттестовал экскурсовод на наш вопрос - почему «Зенит»?»*(3).

Интерес к истории и настоящему бренду «ЗЕНИТ» от КМЗ до настоящего времени огромен. Поиск информации только на тему «история бренда «ЗЕНИТ КМЗ» выдает более 250 неповторяющихся ссылок на интернет-материалы (статьи, сообщения и т.п.) о камерах Зенит (1). Существует большой рынок продаж камер «Зенит», «Зоркий», «Горизонт», фотоснайперов и объективов Красногорского завода, в который вовлечены и крупнейшие интернет-магазины, в том числе и такие торговые интернет-площадки, как *e-bay, ozon и др.*

*Еще в 70-е годы многие фотолюбители в различных странах мира обратили внимание на фотографические качества советской оптики: цветопередачу, объемность получаемых изображений и высокую разрешающую способность у отдельных штатных объективов «Гелиос-44» к фотоаппарату «Зенит». Японский фотолюбитель перебрал свой объектив «Гелиос-44» и получил около 100 лин/мм по центру, что более чем в два раза превышает требования технических условий. Через некоторое время на Валдайском заводе ввели технологическую сортировку объективов, и, таким образом, появился модельный ряд объективов «Гелиос 44».*

Интересно, что увлечение потребителей ретротехникой не как раритетом или артефактом середины XX века и по сей день не исчезает. Мы знаем о фирме «Ломографии» (Австрия), которая успешно использует интерес определенной части потребителей к ретропродукции, позволяющей реализовывать творческие задачи, используя достаточно простые ее конструкции. Возможность все делать самому: определять и устанавливать выдержку и диафрагму, более широко участвовать в творческом процессе съемки (имеется в виду поиск собственных творческих решений в процессе, а не подбор готовой программы), используя все возможности техники, находящейся в их руках. А когда при этом получаются блестящие, высокохудожественные результаты, то оператор испытывает глубокие чувства морального и духовного удовлетворения от этого процесса. Кстати, показателен сам бренд «Ломографии». В основе бренда австрийской фирмы лежит бренд популярной модели советской компакт-камеры «ЛОМО-компакт» Ленинградского оптико-механического объединения.

Если маркетинг новых товаров с брендом «ЗЕНИТ» связывать с ретропродукцией, полагаясь на качества и свойства продукции, которые, как говорилось выше, определяли любовь потребителей, и, тем не менее, просто продолжать выпускать былую технику, то рассчитывать на широкий успех явно не стоит. Значит, нужно искать другие решения. Например, создать новую технику для широкого потребителя с теми же свойствами: простота, качество, надежность и привлекательная цена. Тогда, в случае успеха, логотип «ЗЕНИТ» получит второе дыхание. И слоган: «Марка, проверенная временем!» - как никогда, будет работать в пользу завода, усиливая его бренд. Сейчас этот лозунг связан с достаточно узким кругом потребителей

Современный мир развивается чрезвычайно динамично, новая продукция как стремительно возникает, так и быстро исчезает с прилавков магазинов. Для устойчивого бизнеса необходимо учитывать и это обстоятельство. А значит и ребрендинг логотипа

должен отражать идеи маркетинговой стратегии. А выбор маркетинговой стратегии на основе плодотворных технических идей и прогнозируемого будущего - прерогатива руководителей предприятия, холдинга, находящихся в русле реальных технико-экономических условий с одной стороны, требований и чаяний потребителя - с другой.

Следовательно изменение бренда должно соответствовать концепции развития производства товаров по намеченным планам и рыночной политике таким образом, чтобы увеличить прибыль, доходы производителя

через максимальное удовлетворение ожиданий потребителя.

*Для справки:* В советские времена ребрендинг марки «ЗЕНИТ», повлекший изменения начертаний логотипов предприятия, осуществлялся неоднократно и по разным причинам: как результат административных решений, так и по рыночным законам.

Ниже приводится таблица изменений начертаний логотипа.

В таблице приведена лишь часть изменений (задача подробного рассмотрения этого вопроса не стоит).

*Таблица 1.  
Изменения начертаний логотипа  
Красногорского механического завода им. С.А. Зверева*

<b>Призма Дове</b>	
	Первоначальный (с 1942 года) знак завода (исходный знак имел в своём составе изображение серпика и молота с пятиконечной звездой – над призмой Дове <sup>®</sup> ). Им в годы ВОВ маркировались изделия военного назначения, которые выпускал завод. Объективы, выпущенные для комплектования камер других предприятий (производства завода Арсенал), могли маркироваться только заводской маркой ЗОРКИЙ.
	Призма Дове с колды лучи через неё. Знак использовался с 1949 года.
	Призма Дове с колды лучи через неё. Современный вид эмблемы.
	Полный современный эмблема предприятия с логотипом в латинском начертании
<b>Логотип ЗЕНИТ</b>	
	Различные варианты начертания логотипа «ЗЕНИТ» – «ZENIT». «Разрезной» шрифт (в настоящее время не используется)
	Современное начертание

Кроме того, с 2000-х годов по настоящее время действует «слоган»: «Наша оптика на Земле и в Космосе!».

А вот как выглядит палитра продукции Красногорского завода в период с 1959 года по 2005 год (см. таблицу 2). В таблицу попали лишь те модели фототехники суммарный выпуск которых был более 25 тыс. штук, за весь период их производства.

На вопрос, поставленный в заглавии, ответу, конечно же, ребрендинг нужен. Он давно назрел. И он нужен не только для товаров широкого потребления, но и гражданской и специальной продукции КМЗ. Другое дело, как его осуществить. Без хорошо спланированной маркетинговой и производственной стратегии элементы ребрендинга можно создавать только исходя из интуиции. А это уже - особая история и другие результаты.

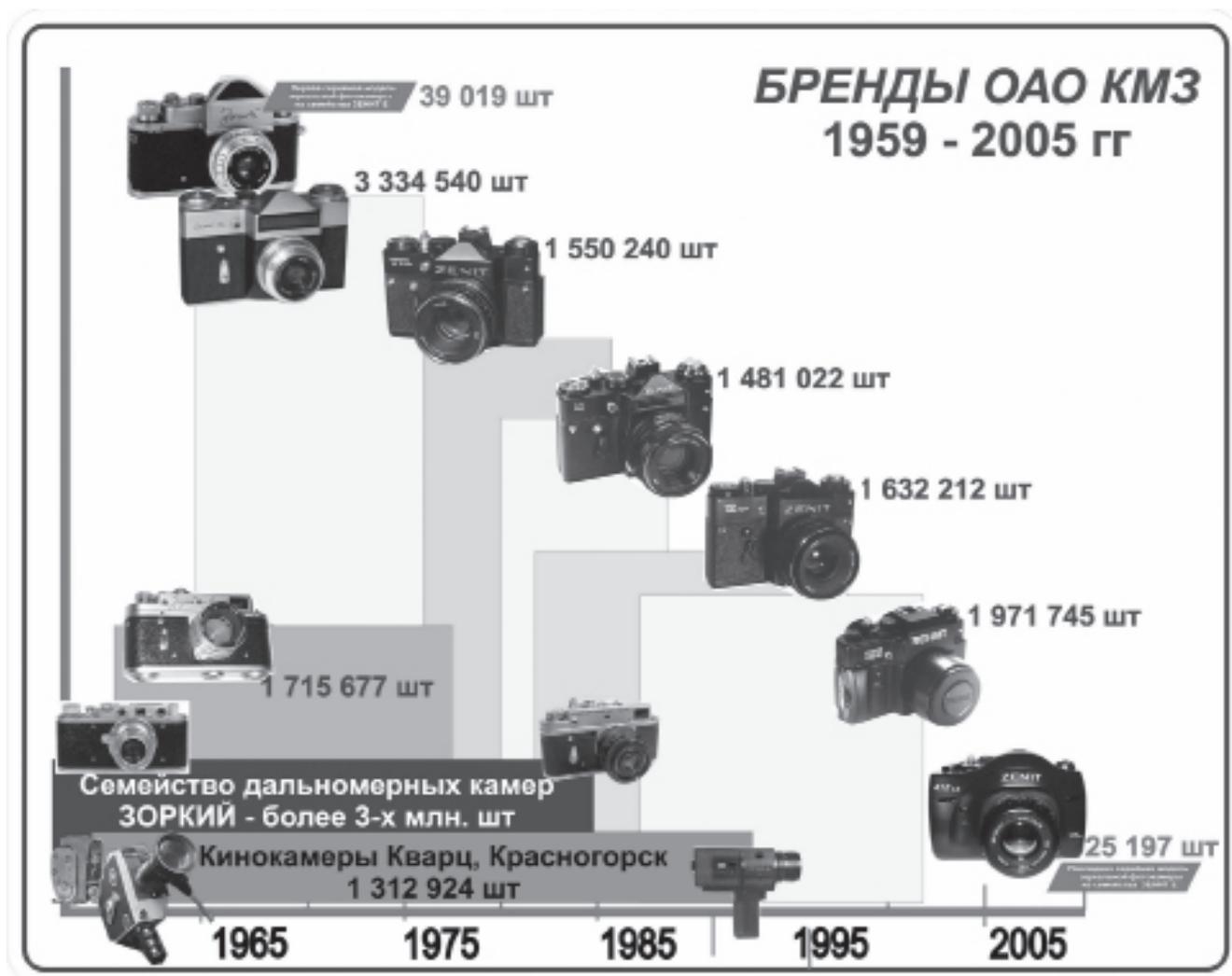
Рынок, как указывалось выше, хорошо помнит фотоаппараты «ЗЕНИТ» и объективы «ГЕЛИОС» из Красногорска, в тоже время он знает, что у нас нет современной цифровой фототехники для массового потребителя. В 20 веке фотоаппараты «ЗЕНИТ» были чрезвычайно популярны в основном по двум причинам:

- самая дешевая зеркальная камера с качественной оптикой,
- самая простая, надежная и неприхотливая камера, способная выполнять свои функции не зависимо от состояния или наличия источников питания и климатических условий. Она хорошо выдерживала как транспортные так и ресурсные испытания даже в сравнении с именитыми марками.

А объективы «ГЕЛИОС»:

- высококачественная оптика (качественное

Таблица 2.



оптическое стекло и просветление),

- особые фотографические свойства (рисунок, цветопередача и т.п.).

Если смотреть с этих позиций, то КМЗ пока не предлагает того, чего ждет рынок – технически и технологически современных зеркальных фотоаппаратов «ЗЕНИТ», обладающих оригинальной и в тоже время простейшей системой управления, «неубиваемой» камерой с высочайшей степенью надежности и, может быть, автономности, особым качеством получаемых снимков, при этом по низкой цене.

Учитывая вышеизложенное, наша задача сохранить самое лучшее, что было в легендарном бренде, его сильные стороны. Если поставить задачу реализовать выше приведенные свойства в новой продукции, в новом, современном наполнении, с высоким качеством и надежностью и правильной ценой, тем чем ранее и отличалась продукция с мар-

кой «ЗЕНИТ» от всех прочих конкурентов, то можно ожидать возвращение бренда «ЗЕНИТ» к традиционному потребителю. Главное, чтобы он поверил: «ЗЕНИТ» вернулся!

*Список литературы:*

1. История развития и описание моделей фотоаппаратов Зенит. [http://zenith-foto.blogspot.ru/2011/02/blog-post\\_742.html](http://zenith-foto.blogspot.ru/2011/02/blog-post_742.html) (Zenit)<http://savok.name/480-zenit.html>, История фотоаппаратов Зенит (ZENIT)
2. История фотоаппаратов Зенит <http://hostingkartinok.com/foto/zenit/>
3. Солнце в Зените. Фотоаппарат Зенит <http://22-91.ru/sovetskie-brendy-i-torgovye-marki-sssr/2/solnce-v-zenite-fotoapparat-zenit.html>
4. Логотипы советских оптических заводов и немного истории производства советских фотокамер. <http://evtifeev.com/3175-logotipy-sovetskix-opticheskix-zavodov-i-nemnogo-istorii-fotokamer.html>
5. <http://www.zenitcamera.com/qa/qa-logos.html>
6. Википедия.