ISSN: 2307-5767

КОНТЕНАНТ

Том 13, № 1, 2014

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Учредитель и издатель — Общественная академия «Контенант»

Издается с 2002 г.

СОДЕРЖАНИЕ

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ОПТИКЕ

Архипов С.А.
Конференция «Размерная стабильность материалов и конструкций оптических и оптико-электронных приборов». Краткий обзор 3

Ахметов Р.Н., Стратилатов Н.Р., Сторож А.Д., Шайда А.Н., Нонин А.С., Потапова Ю.В., Кудрявцев О.Б.
Проектирование адаптивного к действию градиентов температур размеростабильного корпуса космического телескопа 9

Галявов И.Р., Домнин А.В., Понин О.В, Шаров А.А.
Методы и средства контроля опто-технических характеристик высокоточных оптических систем 13

Понин О.В., Шаров А.А
Особенности производства объективов аппаратуры дистанционного зондирования земли 20

Вайнер Ю.А., Зорина М.В., Салащенко Н.Н., Торопов М.Н., Чхало Н.И.
Проблемы изучения шероховатости и формы сверхточных оптических поверхностей 25

ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

Козодеров В.В., Кондранин Т.В., Дмитриев Е.В.
Вычислительная система обработки данных гиперспектрального аэрокосмического зондирования 35

Дрига В.В., Колинько В.И.
Разработка методики оценки качества фотометрической информации в спутниковой астрономии 46

Заварзин В.И., Сауткин В.А.
Оценка проницающей способности приёмных каналов оптико-электронных средств спутниковой астрономии 50

ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ ВЫСОКОТОЧНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ

Карленко Б.В., Макаренко А.В., Поперенко Л.В.
Гониофотометрическая установка с возможностью поляризационных измерений на базе гониометра Г-5 57

СОДЕРЖАНИЕ
(продолжение)

Абдулкадыров М.А., Азербаев А.А., Баландин В.Ю., Белоусов С.П., Патрикеев Е.А., Семенов А.П., Шаров Ю.А.
Вакуумная установка для ионно-лучевой обработки поверхностей крупногабаритных оптических деталей 64

Гайнутдинов И.С., Гусев А.Г., Кольцов А.Ю., Хасанов А.М., Галиев А.Н.
Исследование влияния краевых эффектов на точность границ многозонных интерференционных покрытий (обмен опытом) ... 68

Гайнутдинов И.С., Сабиров Р.С., Азаматов М.Х.
Оптические покрытия для современных оптико-электронных приборов (обзор) 71

Гайнутдинов И.С., Азаматов М.Х., Нагимов И.Х., Кольцов А.Ю., Хасанов А.М., Галиев А.Н.
Разработка светосильных перестраиваемых узкополосных фильтров на видимый и ИК спектральные диапазоны 74

Филатов Ю.Д., Ковалев С.В.
Эффективность процесса высококачественной обработки деталей из неметаллических материалов для оптических и оптико-электронных приборов 77

Гречишников В.А., Петухов Ю.Е., Тарасов А.В., Романов В.Б., Домнин П.В., Чулин И.В., Юнусов В.В.
Исследование комбинированного инструмента с режущими пластинами оснащенными СТМ для обработки деталей оптических приборов..... 82

Гречишников В.А., Петухов Ю.Е., Тарасов А.В., Романов В.Б., Домнин П.В., Юнусов В.В., Чулин И.В.
Фреза с регулируемыми элементами из СТМ для обработки мерных пазов деталей оптики 88

НАУЧНЫЙ ПОИСК

Смирнов В.Л.
Реконструкция структуры зрительного восприятия человека на основе анализа произведений европейской живописи и графики 92

16-17 января 2014 года на базе ОАО «Красногорский завод им. С.А.Зверева» прошла научно-техническая конференция «Размерная стабильность материалов и конструкций оптических и оптико-электронных приборов»

КОНФЕРЕНЦИЯ «РАЗМЕРНАЯ СТАБИЛЬНОСТЬ МАТЕРИАЛОВ И КОНСТРУКЦИЙ ОПТИЧЕСКИХ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ». КРАТКИЙ ОБЗОР

АРХИПОВ С.А. - кандидиат технических наук

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

E-mail: arhipof@zenit-kmz.ru

16-17 января 2014 года на базе открытого акционерного общества «Красногорский завод им. С.А. Зверева» прошла научно-техническая конференция «Размерная стабильность материалов и конструкций оптических и оптико-электронных приборов». Выбранная тематика конференции связана с работами предприятия по созданию различных классов оптико-электронных приборов, в том числе для космических комплексов дистанционного зондирования Земли. Организаторами мероприятия выступили общественная научно-техническая академия «Контенант» и ОАО «Красногорский завод им. С.А. Зверева».

До начала конференции ее участники смогли ознакомиться с продукцией, выпускаемой ОАО «Красногорский завод им. С.А. Зверева» на организованной выставочной экспозиции, на которой были представлены: наблюдательный прибор с гироскопической стабилизацией и цифровой регистрацией изображения «Зенит ЦФР», бинокль со стабилизацией изображения влагозащищенный БСВ, лазерный дальномер-бинокль «Зенит LRB 7×40 S», дневные охотничьи прицелы ОП 4×20 ШУ и ПО 3-10×40, коллиматорные прицелы ПКМ 1×25, «Зенит ПКМ-А» и «Зенит ПКМ-А-01», ночные визиры «Зенит НВ-пьезо» и «Зенит НВ-202», ночные прицелы «НП-200», «НП-260» и «НП-400», в также фотообъективы МС АПО «Телезенитар-М» 2,8/135, МС «Гелиос 40-2», МС «Мир-20М», линейки объективов МС «Зенитар», киносъемочных объективов «Оптар» и другие изделия.

Конференцию открыл генеральный директор ОАО «Красногорский завод им. С.А. Зверева» А.П. Тарасов. В своем приветственном слове Александр Петрович отметил, что в настоящее время идет успешное развитие отечественной промышленности и, прежде всего, оптико-электронного направления. Наши заказчики требуют инноваций, новых технологий и изделий, которые воплотили бы в себе самые повышенные требования. В этой связи и наука, и промышленность прилагают большие усилия к тому, чтобы эти требования обеспечить. Научно-технические конференции дают возможность выстроить тесное науки и производства, наладить

конструктивное общение, обменяться мнениями, что позволяет всем участникам успешнее реализовывать задачи по созданию современных оптико-электронных и оптических приборов.

После выступления А.П. Тарасова гостей поприветствовал главный оптик ОАО КМЗ, президент академии «Контенант», доктор технических наук Богдан Николаевич Сеник: «Уважаемые участники и гости конференции! Самое главное в жизни человека, коллектива, общества - своевременное получение необходимой информации. Особенно важно это для нас - производителей продукции: быть в курсе мировых тенденций как по инновациям в конструкциях оптико-электронных приборов и комплексов, так и в технологиях, метрологии и всех других составляющих, обеспечивающих производственный процесс изготовления изделий. Важно не только располагать такой информацией, но и правильно ее анализировать и принимать все необходимые решения. Анализ полученной в ходе конференций информации позволяет продвигать науку и производство вперед. Экономика России сейчас на подъеме, необходимо восстанавливать отношения, выстроенные во времена Советского Союза, в постперестроечный период между предприятиями и организациями, работающими в области разработки и создания оптических и оптико-электронных изделий. Это возможно сделать, основываясь на принципе совместного общения. Наша академия - международная: организации России, Белоруссии и Украины активно вовлечены в ее работу, часть которой и составляют мероприятия, подобные сегодняшнему. Конференции способствуют консолидации оптического сообщества и укрепления всесторонних взаимоотношений с предприятиями РФ и ближнего зарубежья». По завершении своего выступления Богдан Николаевич пожелал участникам конференции успехов в решении фундаментальных проблем и прикладных задач в области оптико-электронного приборостроения, в воспитании нового поколения молодых ученых и инженеров.

Пленарное заседание началось с основательного доклада главного конструктора ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина» А.А. Моишеева «Проблемы обеспечения прецизионности крупногабаритных космических оптических конструкций». Прецизионность - свойство конструкции сохранять ее геометрических параметров при всех видах внешних воздействий. Однако, поскольку абсолютно неизменяемые конструкции в настоящее время создать невозможно, то при проектировании закладываются ограничения на величины деформаций, которые впрямую могут влиять на значения точностных параметров. При проектировании космических оптических приборов оптимизация конструктивно-технологических решений обеспечения прецизионности базируется на следующих рекомендациях:

- при выборе силовой схемы конструкции предпочтительна статически определимая, во многом определяющая размерную стабильность;

- разработать меры по минимизации воздействия внешних факторов на прецизионные конструкции;

- целенаправленный выбор конструкционных материалов, максимально реализующих физико-механические свойства с целью минимизации деформаций от внешних воздействий и не оказывающих негативных воздействий на оптические элементы прибора;

- введение в структуру прибора систем, позволяющих анализировать поведение конструкций под воздействием внешних факторов и корректировать параметры, определяющие его прецизионность;

- возможность применения специальных методик, оборудования и средств измерения, обеспечивающих наземную отработку прецизионных конструкций.

С содержательным докладом «Проектирование адаптивного к действию градиентов температур размеростабильного корпуса космического телескопа» выступил начальник ОКБ ФГУП ГНП РКЦ «ЦСКБ-Прогресс» А.Н. Шайда.

В современной космической технике при проектировании и создании космических телескопов, работающих при различных температурах, возникает расфокусировка за счет изменения размеров силового корпуса. Одним из путей уменьшения изменения размеров корпусов космических телескопов, обусловленного воздействием неравномерного поля температур, является использование конструктивных элементов,

выполненных из материалов с низким коэффициентом линейного расширения. Уменьшить температурные деформации можно также за счёт создания требуемого теплового режима, обеспечивающего снижение перепадов температур на корпус телескопа за счёт применения активных и пассивных средств обеспечения теплового режима. В докладе был раскрыт альтернативный способ снижения температурной расстраиваемости космического телескопа - изготовление силового корпуса в виде рамы из биметаллических пластин.

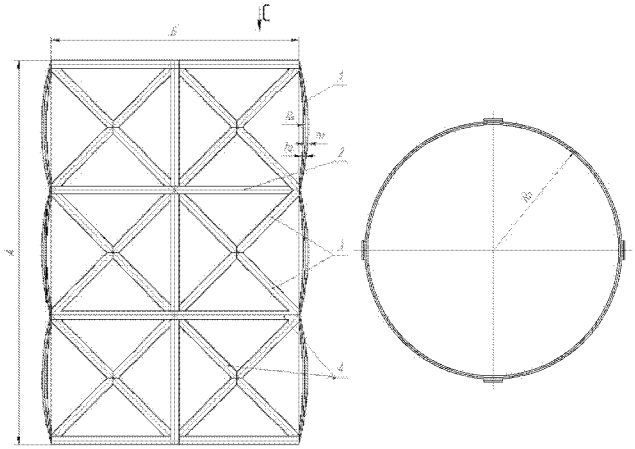


Рисунок 1.

Предлагается выполнять силовой корпус, состоящий из продольных, поперечных и диагональных криволинейных биметаллических пластин 1, 2, 3, соединенных между собой в узлах пересечения 4 (рис. 1). Учитывая, что корпус состоит из множества размеростабильных от действия температуры биметаллических пластин, то и в целом он будет размеростабильным по длине и по ширине. Применение в корпусе космического телескопа криволинейных биметаллических пластин позволяет уменьшить массу корпуса и повысить его термическую стабильность. Область применения предлагаемой конструкции не исчерпывается космической техникой. Простота, надежность, технологичность и низкая стоимость позволяют предположить, что данный подход может найти широкое применение во всех случаях, когда нужно создать конструкцию с минимальным изменением ее размеров от действия температур.

Обстоятельные, яркие доклады главного оптика М.А. Абдулкадырова «Технология изготовления высокоточных крупногабаритных облегченных асферических зеркал с высокой стабильностью формы поверхности» и ведущего инженера А.П. Семенова «Размерная стабильность зеркал из Астроситалла®» раскрыли высокий научный, международный уровень работ ОАО «Лыткаринский завод оптического стекла» по созданию крупногабаритных облегченных зеркал.

В ОАО «ЛЗОС» за последние два десятилетия разработаны компьютерно-управляемые методы обработки крупногабаритной астрономической и космической оптики, которые позволили изготовить зеркала для крупных российских и зарубежных телескопов. Российские проекты - «Стажер» (главное зеркало 3.12 м), «Персона», «Берет», «Карат», «Зеркало ДС», зарубежные проекты - сеть 17-ти телескопов LGOGT (Las Cumbres Observatory Global Telescope Network) с диаметром главных зеркал 1 м и вторичных диаметром 345 мм, телескоп TNT (Thai National telescope, Australia - Thailand) с главным зеркалом диаметром 2.4 м, зеркала телескопа DOT ARIES (Devasthal Optical Telescope, DOT, for Aryabhatta Research Institute of Observational Sciences, ARIES) с главным зеркалом диаметром 3.7 м и вторичным 980 мм, главное и вторичное зеркала обзорных телескопов VST (VLT Survey Telescope, 2.6 м, 0.9 м) и VISTA (Visible and Infrared Survey Telescope for Astronomy, 4 м и 1.2 м). Зеркала этих телескопов имеют значительную асферичность и высокую апертуру, что создает существенные трудности не только при обработке данных зеркал, но и при их контроле.

ОАО «ЛЗОС» с успехом использует оптический Астроситалл® для изготовления монолитных, облегченных, тонких и составных сегментированных зеркал. Точность изготовления геометрической структуры достигает величины 20 мкм на диаметре до 4000 мм. Астроситалл® в основном выпускается в заготовках, имеющих форму дисков, квадратных или прямоугольных пластин. При необходимости могут быть произведены заготовки нестандартных форм. Современное оборудование и инструмент позволяют создавать все основные геометрические формы заготовки, форму эллипса, многогранника и др.

Таблица1

Условия эксплуатации зеркала телескопа	Вид и характеристика воздействующего фактора	Продолжительность воздействия (сутки)
1. Макроклиматический район с сухим тропическим климатом	Повышенная температура плюс 70°С ± 2°С	13 суток
2. Закрытое помещение без искусственно регулируемых климатических условий	Относительная влажность 95% ± 3% при t=40°С ± 2°С	1 сутки
3. Неотапливаемое хранилище	Пониженная температура минус 60°С ± 2°С	1 сутки

могут выпускаться заготовки с заложенными сферическими и асферическими поверхностями с двух сторон заготовки.

Влияние длительных воздействий внешних условий на астрономические зеркала из Астроситалла® неоднократно проверялись после их эксплуатации в течение 20-30 лет, когда они возвращались на переполировку или замену отражающего покрытия. Контроль данных зеркал показал, что форма поверхности зеркал стабильна во времени и не изменяется в соответствии с требованиями спецификации.

Дополнительно были проведены исследования на влияние естественных условий внешней среды в процессе ускоренных испытаний, имитирующих воспроизведение климатических циклов эквивалентных определенному сроку эксплуатации - 50 лет. Состав одного годового климатического цикла эксплуатации по воздействующим факторам и длительность их воздействия приведен в таблице.

Продолжительность одного годового климатического цикла - 15 суток. Образец подложки зеркала подвергается воздействию 50-ти климатических циклов продолжительностью 15 суток каждый. Суммарное проведение испытаний: Т=(13+1+1)*50=750 суток.

Для проведения испытаний использовались заготовки диаметром 500 и 450 мм и толщиной соответственно 70 и 55 мм. Для них определялась форма отраженного волнового фронта и механические параметры деталей. Кроме того, испытаниям подвергались 20 образцов для измерения КТЛР (CTE) и образцы с отражающим покрытием.

Для измерения изменений КТЛР в процессе испытаний использовалась заготовка толщиной 250 мм. Образцы выбирались из верхнего и нижнего слоя по 10 штук. Длительность испытаний составила 40 циклов, соответствующих 40 годам.

По результатам данных испытаний можно сделать главный вывод:

- форма оптической поверхности не изменяется в пределах погрешности измерений СКО<6 нм,
- КТЛР также меняется в допустимых пределах. Погрешность измерений 5×10^{-9} C^{-1}.
- материал Астроситалл® СО-115М при деформациях с натяжениями в диапазоне от −10 МПа до +10 МПа и при воздействии температуры в диапазоне от −40 °С до +105 °С, остается упругим в пределах 10 нм $СКО_{поверхности}$.

В креативном докладе главного оптика Б.Н. Сеника "Размерная стабильность конструкций оптических модулей, изготовленных с использованием комплексной технологии глубокого оптического контакта" были показаны достижения ОАО "Красногорский завод им. С.А. Зверева по созданию одного из эффективных технологических методов получения высоких точностных и эксплуатационных параметров призменных сборок, необходимых для обеспечения предельно достижимых оптических параметров оптико-электронных систем - технологии глубокого оптического контакта (ГОК).

Метод ГОК - бесклеевой способ монолитного соединения полированных оптических элементов с сохранением геометрии и качества соединяемых поверхностей и точности в пределах ±1'' позиционирования оптических элементов, входящих в состав сборки, друг относительно друга. В качестве связующего слоя используется пленка двуокиси кремния (SiO_2) толщиной 135-150 нм, которая наносится химическим методом пиролиза или вакуумным методом ее нанесения

на одну из соединяемых поверхностей. Далее отдельные оптические элементы соединяются оптическим контактом и подвергаются термической обработке в определённых температурных режимах. Технология ГОКа в современных предприятиях, производящих прецизионные оптические элементы используется для соединения оптических элементов из однотипных оптических сред: силикатных стекол, ситалл, искусственного кварца, германия, других видов кристаллов. Важнейшим преимуществом соединения оптических элементов с использованием данной технологии является отсутствие каких-либо клеевых соединений, что в свою очередь позволяет использовать оптические модули даже в режимах жёсткого лазерного излучения, а так же для оптико-электронных комплексов, требующих высочайших точностных параметров в условиях экстремальных эксплуатационных нагрузок: резких перепадов температур в диапазонах – 65 +80 °С, повышенных вибрационных и ударных нагрузок. В докладе были подробно изложены результаты экспериментальных работ по изготовлению оптических модулей из искусственного кварца, проводимых на предприятии ОАО «Красногорский завод им. С.А. Зверева».

В заключительном докладе пленарного заседания (*докладчик автор*) «Обобщенные модели размерной стабильности и обеспечение размерной стабильности конструкций космической информационной оптики» на основе известных теорий параметрической надежности предложено обобщенное модельное описание размерной стабильности конструкций космической информационной оптики (ККИО). Предложенная обобщенная модель (ОМ) размерной стабильности ККИО:

1) позволяет с помощью ограниченного набора средств (механизмов, моделей воздействий, параметров состояния, входных параметров ККИО) обеспечить полное описание и учет разнообразных физических эффектов, протекающие в ККИО на различных стадиях ее жизненного цикла;

2) задает универсальную меру вклада каждого физического или конструкторского фактора в общий бюджет надежности;

3) развивает теорию проектирования/конструирования оптических и оптико-электронных приборов, позволяет от принципов проектирования перейти к моделированию возможных вариантов ККИО;

4) стимулирует Разработчика ККИО на исследования физических процессов, протекающих в ККИО;

5) стимулирует Заказчика на финансирование НИОКР по созданию новых материалов, технологических процессов для перспективных ККИО;

6) обеспечивает повышение качества и надежности принимаемых проектных решений.

Обобщенная модель позволяет провести достаточно полную классификацию способов обеспечения размерной стабильности ККИО, которые группируются по следующим направлениям:

- недопущение или сведение к минимуму возможных случаев запуска механизмов старения на стадии изготовления и пуска;
- уменьшение коэффициентов передачи в механизмах, с целью не допущения приближения текущего состояния ККИО к границам нормы;
- демпфирующие, защитные способы по внешним воздействиям;
- компенсационные способы по входным параметрам;
- компенсационные способы по выходным параметрам;
- способы построения структурных схем (резервирования) для повышения параметров надежности.

Указанные способы обеспечения размерной стабильности ККИО могут быть использованы на уровне материала, детали, соединения, узла, конструкции, прибора, а также могут рассматриваться как технологические, конструкторские или эксплуатационные решения.

После пленарных докладов начали свою работу секции конференции: «Проблемы размерной стабильности материалов, конструкций и приборов» и «Технологические проблемы размерной стабильности и формообразования». В зависимости от специфики трудовой и научной деятельности, участники мероприятия могли выбрать или конструкторское, или технологическое направление, предложенные организаторами.

Программой второго дня конференции было

предусмотрено продолжение работы секций. Согласно регламенту, по завершении очередного выступления участниками встречи обсуждались наиболее важные аспекты каждой презентации, слушатели задавали выступающим интересующие их вопросы по тем или иным пунктам докладов.

В общей сложности в течение двух дней были заслушаны 52 научных доклада представленные ведущими специалистами организаций РАН, учеными крупнейших университетов страны (МИИГАиК, МГТУ, ИТМО), представителями предприятий ракетно-космического комплекса и других научно-производственных предприятий России, Белоруссии и Украины.

Тезисы и презентации докладов размещены на сайте ОАО "Красногорский завод им. С.А. Зверева www.zenit-foto.ru

Участники конференции отметили высокий научно-технический уровень и практическую направленность заслушанных докладов, слаженную организацию конференции, активное участие в докладах и в организации конференции молодых специалистов.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ АДАПТИВНОГО К ДЕЙСТВИЮ ГРАДИЕНТОВ ТЕМПЕРАТУР РАЗМЕРОСТАБИЛЬНОГО КОРПУСА КОСМИЧЕСКОГО ТЕЛЕСКОПА

АХМЕТОВ Р.Н. - доктор технических наук, СТРАТИЛАТОВ Н.Р. - кандидат технических наук, СТОРОЖ А.Д. - кандидат технических наук, ШАЙДА А.Н., НОНИН А.С., ПОТАПОВА Ю.В., КУДРЯВЦЕВ О.Б.

Федеральное государственное унитарное предприятие Государственный научно-производственный ракетно-космический центр «ЦСКБ - Прогресс», г. Самара

E-mail: dartoleg007@mail.ru

Изложен метод проектирования размеростабильных корпусов космических телескопов, позволяющий получить простые и надежные корпуса космических телескопов адаптивные к действию градиентов температур.

Ключевые слова: размеростабильный корпус, криволинейная биметаллическая пластина, телескоп.

В современной космической технике при проектировании и создании космических телескопов, работающих при различных температурах, возникает термооптическая аберрация увеличения и расфокусировки оптической системы, за счет изменения размеров силового корпуса, связывающего оптическую систему.

Особенно актуальна эта задача при разработке корпусов космических телескопов дистанционного зондирования Земли.

Одним из путей уменьшения изменения размеров корпусов космических телескопов, обусловленного воздействием неравномерного поля температур, является использование конструктивных элементов, выполненных из материалов с низким коэффициентом линейного расширения, типа ИНВАР, $\alpha=0{,}8\cdot10^{-6}$ 1/°С, $\gamma=8{,}2$ г/см^3, высокотермостабильный композиционный материал на основе углепластиков типа КМУ-4Л, $\alpha=1\cdot10^{-6}$ 1/°С, $\gamma=1{,}6$ г/см^3.

Уменьшить температурные деформации можно также за счет создания требуемого теплового режима, обеспечивающего снижение перепадов температур на корпус телескопа за счет применения активных и пассивных средств обеспечения теплового режима [1].

Однако указанные способы уменьшения изменения размеров приводят к усложнению конструкции, снижению ее надежности и, как правило, к увеличению массы. Применение неметаллических материалов на основе углепластиков не позволяет в полной мере обеспечить достаточную геометрическую стабильность корпуса конструкции телескопа, поскольку эта характеристика напрямую зависит от значения коэффициента линейного расширения применяемого полимерного композитного материала, который является нестабильным, хотя имеет малую величину.

Таким образом, существует потребность в простом и надежном способе обеспечения размерной стабильности корпусов космических телескопов.

Рассматриваемый в настоящей статье метод проектирования адаптивных к действию градиентов температур корпусов телескопов апробирован в конструкциях КА ДЗЗ, разрабатываемых ГНПРКЦ "ЦСКБ-Прогресс".

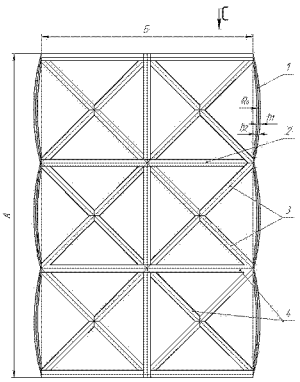


Рисунок 1

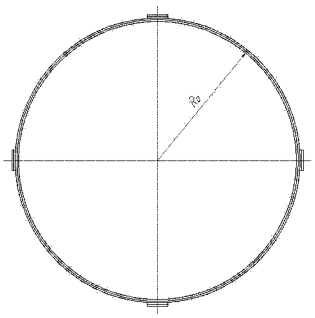


Рисунок 2

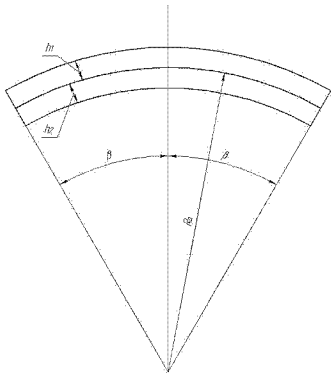


Рисунок 3

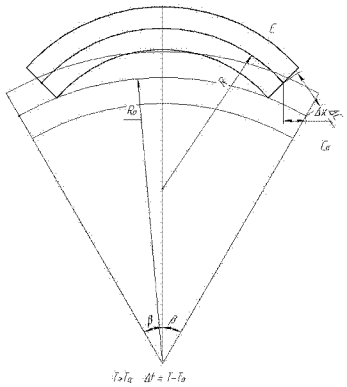


Рисунок 4

В перспективном космическом аппарате предполагается изготовление силового корпуса фотоприемного устройства (ФПУ ИК) и поворотного корпуса радиатора - излучателя в виде рамы из биметаллических пластин, что позволит снизить массу конструкции и для ФПУ ИК улучшить целевой параметр (разрешение).

На рис. 1, 2 изображен общий вид корпуса космического телескопа с высокой геометрической стабильностью по длине А и ширине Б при действии неравномерного поля температур.

Силовой корпус состоит из продольных, поперечных и диагональных криволинейных биметаллических пластин 1, 2, 3 соединенных между собой в узлах пересечения 4.

На рис. 3 изображен общий вид размеростабильной биметаллической пластины силового корпуса КТ.

На рис. 4, 5 изображен процесс деформирования размеростабильных биметаллических пластин от действия положительного и отрицательного перепадов температур соответственно.

На рис. 6, 7 изображен элементарный участок длиной d_x криволинейной биметаллической пластины.

Внешний слой каждой криволинейной биметаллической пластины 1, 2, 3 толщиной h_1 имеет коэффициент линейного расширения α_1 (например алюминиевый сплав АК4-1), называется активным в отличии от инертного слоя толщиной h_2 с меньшим коэффициентом линейного расширения α_2 (например титановый сплав ОТ-4). При действии положительного или отрицательного ($T>T_0$ или $T<T_0$) перепада температуры $t = T-T_0$ на биметаллическую пластину, она изгибается или расправляется изменяя нормальную кривизну поверхности $\frac{1}{R_0}$ (рис. 4, 5).

При этом её края удлиняются или укорачиваются по оси X на ΔX. Проекция деформации слоя

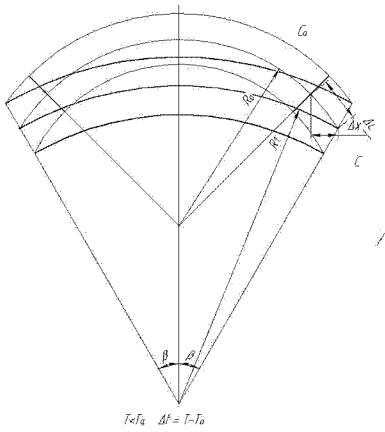


Рисунок 5

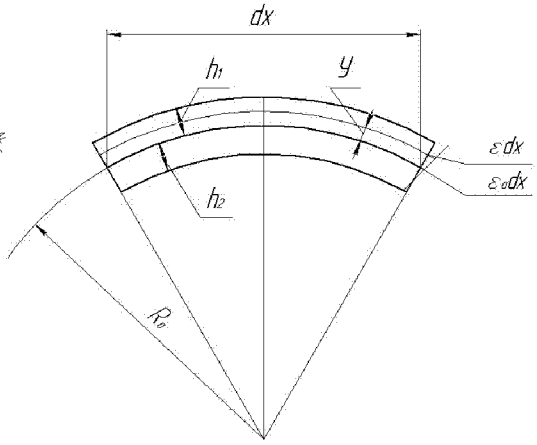


Рисунок 6

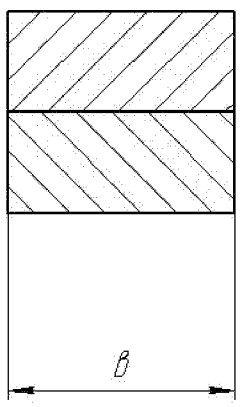


Рисунок 7.

спая от действия перепада температур равна ΔC_x, направлена в противоположную сторону и может быть равной ΔX.

Для определения значений ΔX и ΔC_x, выделим из криволинейной биметаллической пластины элементарный участок длиной d_x с номинальной кривизной $\frac{1}{R_0}$ (рис. 6).

Относительное удлинение волокна, отстоящего на расстоянии У от поверхности спая, складывается из двух величин. Из удлинения в спае ε_0 и удлинения обусловленного изгибом пластины,

$$\text{У} \cdot \left(\frac{1}{R} - \frac{1}{R_0} \right) \qquad (1.1)$$

где $\frac{1}{R}$ - новая кривизна.

Таким образом суммарное относительное удлинение волокна равно

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \text{У} \cdot \left(\frac{1}{R} - \frac{1}{R_0} \right) \qquad (1.2)$$

Напряжения от действия температуры t действующие в волокне расположенном на расстоянии У от поверхности спая для активного слоя толщиной пластины равно

$$\sigma_1 = E_1 \left[\varepsilon_0 + y \cdot \left(\frac{1}{R} - \frac{1}{R_0} \right) - \alpha_1 \cdot t \right], \qquad (1.3)$$

$$(0 \le \text{У} \le h_1)$$

для инертного слоя толщиной h_2 пластины равно

$$\sigma_2 = E_2 \left[\varepsilon_0 + y \cdot \left(\frac{1}{R} - \frac{1}{R_0} \right) - \alpha_2 \cdot t \right] \qquad (1.4)$$

$$(-h_2 \le \text{У} \le 0)$$

E_1, E_2 - модули упругости первого рода материалов слоев биметаллических пластин.

Нормальное усилие N и изгибающий момент M в сечении биметаллической пластины подверженной только тепловому воздействию равны нулю. Поэтому

$$N = \int_0^{h_1} \sigma_1 \cdot b \cdot dy + \int_{-h_2}^{0} \sigma_2 \cdot b \cdot dy = 0 \qquad (1.5)$$

$$M = \int_0^{h_1} \sigma_1 \cdot b \cdot y \cdot dy + \int_{-h_2}^{0} \sigma_2 \cdot b \cdot y \cdot dy = 0 \qquad (1.6)$$

здесь b - ширина биметаллической пластины.

Подставляя в выражение для N и M выражение для σ_1 и σ_2 и интегрируя, получим:

$$\varepsilon_0 (E_1 h_1 + E_2 h_2) - (\alpha_1 E_1 h_1 + \alpha_2 E_2 h_2) \cdot t + \left(\frac{1}{R} - \frac{1}{R_0} \right) (E_1 h_1^2 - E_2 h_2^2) = 0 \qquad (1.7)$$

$$\frac{1}{2} \varepsilon_0 (E_1 h_1^2 - E_2 h_2) - \frac{1}{2} (\alpha_1 E_1 h_1^2 + \alpha_2 E_2 h_2^2) \cdot t + \frac{1}{3} (E_1 h_1^3 - E_2 h_2^3) = 0 \qquad (1.8)$$

Исключая ε_0, определим изменение кривизны биметаллической пластины:

$$\frac{1}{R} - \frac{1}{R_0} = \frac{6t(\alpha_1 - \alpha_2)}{\frac{(E_1 h_1^2 - E_2 h_2^2)^2}{E_1 \cdot E_2 \cdot h_1 \cdot h_2 \cdot (h_1 + h_2)} + 4(h_1 + h_2)} \qquad (1.9)$$

Очевидно, что изменение кривизны будет наибольшим, если

$$E_1 \cdot h_1^2 = E_2 \cdot h_2^2 \qquad (1.10)$$

Биметаллические пластины 1, 2, 3 удовлетворяющие этому условию называются нормальными.

Тогда наибольшее изменение кривизны для нормальных биметаллических пластин 1, 2, 3 равно

$$\frac{1}{R} - \frac{1}{R_0} = \frac{3}{2} (\alpha_1 - \alpha_2) \cdot \frac{\text{t}}{\text{h}_1 + \text{h}_2} \qquad (1.11)$$

Зная изменение кривизны определим перемещение края пластины (точка С) (рис. 4, 5) за счет её изгиба, с помощью интеграла Мора,

$$\Delta X = -\int_l \left(\frac{1}{R} - \frac{1}{R_0} \right) M_1 \cdot ds \qquad (1.12)$$

где M_1 - изгибающий момент от единичной нагрузки, приложенной в направлении искомого перемещения точки С,

l - длина биметаллической пластины по дуге радиуса R_0.

Подставляя в выражение для ΔX выражение наибольшего изменения кривизны получим:

$$\Delta X = -\frac{3}{2}(\alpha_1 - \alpha_2)\frac{t}{h_1 + h_2}\int_0^{\beta} 1 \cdot$$

$$\cdot R_0^2[cos(\beta - \varphi) - cos\beta]\cdot d\varphi \qquad (1.13)$$

здесь β - угол полураствора криволинейной биметаллической пластины радиусом R_0.

Интегрируя данное выражение определим:

$$\Delta X = -\frac{3}{2}(\alpha_1 - \alpha_2)\frac{t \cdot R_0^2}{h_1 + h_2}(sin\beta - \beta cos\beta) \qquad (1.14)$$

Проекция деформации слоя спая на ось X при действии температуры t равна

$$\Delta Cx = (\alpha_1 \cdot h_1 + \alpha_2 \cdot h_2)\cdot\frac{t \cdot R_0 sin\beta}{h_1 + h_2} \qquad (1.15)$$

и направлена в противоположную сторону перемещения биметаллической пластины за счет ее изгиба (перемещение ΔX).

Таким образом из условия

$$\Delta X = \Delta Cx \qquad (1.16)$$

определим соотношение геометрических размеров нормальных биметаллических пластин и физико-механические характеристики применяемых материалов обеспечивающее равенство нулю перемещение краев пластин:

$$\frac{\alpha_1 \cdot h_1 + \alpha_2 h_2}{\alpha_1 - \alpha_2} = K \cdot R_0 (1 - \beta \mathrm{ctg}\beta) \qquad (1.17)$$

где K - коэффициент учитывающий упругость пластин корпуса в местах их соединения в узлах.

Для шарнирного соединения пластин можно принять $K = \frac{3}{2}$.

Определенный интерес представляет неметаллический корпус космического телескопа, в котором активный слой пластины толщиной h_1 с коэффициентом линейного расширения α_1 выполнен из стеклопластика, а инертный слой толщиной h_2 с меньшим коэффициентом линейного расширения α_2 из углепластика.

Поскольку корпус состоит из множества размеростабильных от действия температуры биметаллических пластин, то и в целом он будет размеростабильным по длине и по ширине.

Предложенный метод проектирования позволяет создать размерностабильный адаптивный к действию температур силовой корпус, обеспечивающий минимальную дефокусировку телескопа при действии температур.

Применение в корпусе космического телескопа криволинейных биметаллических пластин позволяет уменьшить массу корпуса и повысить его термическую стабильность.

Область применения предлагаемой конструкции не исчерпывается космической техникой. Простота, надежность, технологичность и низкая стоимость позволяют предположить, что данная конструкция может найти широкое применение во всех случаях, когда нужно создать конструкцию с минимальным изменением ее размеров от действия температур.

Список литературы:

1. *Фомин Г.Е.* Проектирование адаптивных к действию градиентов температур размеростабильных силовых конструкций летательных аппаратов [Текст]/ Фомин Г.Е., Шайда А.Н., Байкин В.Д./ Полет.-2000.-№06.-С.42-45.

2. *Ахметов Р.Н.* Проектирование, адаптивный к действию градиентов температур размеростабильной силовой фермы космического телескопа [Текст] / Ахметов Р.Н., Стратилатов Н.Р., Шайда А.Н., Максимов С.В. / Научно-технический сборник статей - 2012. - Выпуск 1. Космическая техника и вооружение. Днепропетровск: ГП "КБ "Южное".

3. *Биткин В.Е.* Особенности проектирования стержневых размеростабильных крупногабаритных космических конструкций [Текст]/Биткин В.Е., Сальников И.В., Шайда А.Н./ Сборник научно-технических статей по ракетно-космической тематике.-1991.-С.43-49.

4. *Фомин Г.Е.* Проектирование размерностабильных стержневых конструкций рефлекторов антенн, адаптивных к действию градиентов температур [Текст]/Фомин Г.Е., Шайда А.Н./ Сборник научно-технических статей по ракетно-космической тематике.-1991.-С.61-64.

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА КОНТРОЛЯ ОПТО-ТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЫСОКОТОЧНЫХ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

ГАЛЯВОВ И.Р., ДОМНИН А.В., ПОНИН О.В, ШАРОВ А.А. - **кандидат технических наук**

ОАО "Лыткаринский завод оптического стекла", Лыткарино, Московская обл.

E-mail: galyavov@lzos.ru, otd22@lzos.ru, ponin@lzos.ru

Описаны методы и измерительное оборудование, а так же программное обеспечение для анализа качества изображения высокоточных оптических систем, в том числе крупногабаритных.

Ключевые слова: метод, измерение, функция передачи модуляции, концентрация энергии.

При аттестации большинства оптических систем необходимо объективное получение количественных характеристик качества их изображения, которые могут быть определены по результатам анализа распределения освещённости в изображении элементарных объектов: точки, линии, края полуплоскости.

Использование современных достижений твердотельной высокоразрешающей видеотехники и компьютерной обработки изображения позволяет осуществить методику, которая на основе регистрации и анализа распределения освещенности в изображении типовых объектов, формируемом контролируемой оптической системой, обеспечивает возможность получения достоверной количественной информацию об основных характеристиках качества изображения.

Достаточно высокий возможный уровень автоматизации процесса измерения позволяет значительно упростить и ускорить процедуру измерения, повысить достоверность получаемых результатов.

Возможности современной вычислительной техники обеспечивают определение основных количественных характеристик качества изображения во всем интервале пространственных частот контролируемого объектива (функцию рассеяния линии или точки, функцию передачи модуляции (ФПМ), пограничную кривую) даже по данным одного измерения.

В настоящей работе описывается универсальная измерительная видеосистема анализа качества изображения оптических систем по различным критериям, созданная с использованием простых и экономичных устройств формирования цифрового изображения, которая может широко применяться в производственных условиях и использоваться в составе широкого класса контрольных оптических установок коллиматорного типа.

ОПТИЧЕСКАЯ СХЕМА И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ВИДЕОСИСТЕМЫ ДЛЯ СЛУЧАЯ КОНТРОЛЯ ФПМ

Структурная схема измерительной системы включает оптическую часть, систему анализа и преобразования видеоизображения и персональный компьютер. Схема оптической части комплекса показана на рис. 1. Источник излучения 1 с помощью конденсора 2 через светофильтры 3 освещает тест-объект 4, расположенный в фокальной плоскости коллиматорного объектива 5. Контролируемый объектив 6 формирует изображение тест-объекта 4, которое переносится микрообъективом 7 на чувствительную площадку ПЗС-видеокамеры 8.

Коэффициент масштабного преобразования (линейное увеличение β), которому подвергается формируемое контролируемым объективом изображение, определяется увеличением микрообъектива 7, которое должно выбираться с учетом условий минимизации погрешности измерения ФПМ.

При контроле объективов, работающих со сложным спектральным составом излучения, необходимо проводить измерения полихроматической ФПМ. В этом случае приобретает большое значение формирование рабочей спектральной характеристики оптической системы.

Формирование рабочей спектральной характеристики производится набором цветных светофильтров 3. Наряду с цветными светофильтрами могут использоваться также нейтральные светофильтры, которые служат для подбора оптимальной освещенности изображения тест-объекта в каждом конкретном случае.

Видеосигнал, формируемый ПЗС-видеокамерой, преобразуется в цифровую форму при помощи типовой платы оцифровки видеоизображения (видеофрэймграббера), встраиваемой в персональный компьютер, таким образом, информация о распределении освещенности в изображении тест-объекта может быть подвергнута программному анализу. Для работы измерительной видеосистемы используется оригинальное программное обеспечение, которое позволяет:

- производить визуализацию видеоизображения на экране монитора персонального компьютера с целью настройки системы и контроля её работы;
- вычислять основные количественные характеристики качества изображения контролируемой системы - пограничную кривую, функцию рассеяния линии, функцию рассеяния точки, функцию передачи модуляции;
- осуществлять запись цифровой информации об изображении на жестком диске для хранения с целью повторной или дополнительной обработки.

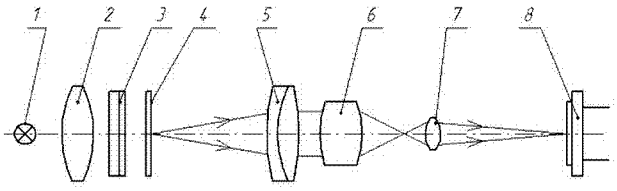


Рисунок 1.
Оптическая схема измерительной видеосистемы: 1 - источник излучения; 2 - конденсор; 3 - набор светофильтров; 4 - тест-объект; 5 - коллиматорный объектив; 6 - контролируемый объектив; 7 - микрообъетив; 8 - ПЗС-видеокамера

АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФПМ ПО ФУНКЦИИ РАССЕЯНИЯ ЛИНИИ

Если в качестве тест-объекта используется щель (дифракционная для контролируемой оптической системы), то изображение на приемнике в приближении идеальной измерительной системы является функцией линии рассеяния для контролируемой системы. Оптическая передаточная функция системы в этом случае может быть получена применением преобразования Фурье к функции линии рассеяния.

Для практического применения нас интересует лишь функция передачи модуляции, которая, во-первых, является абсолютной величиной ОПФ, а, во-вторых, нормируется относительно нулевой частоты). Кроме того, поскольку, как уже отмечалось, регистрация изображения производится с помощью дискретной структуры, вместо интеграла используется сумма (и интервал суммирования является конечным). Преобразовав также экспоненциальное выражение в тригонометрическое, получим следующую формулу для вычисления ФПМ [1]:

$$T(R') = \sqrt{\left[\frac{\sum_{i=1}^{i=N} \sin(2\pi R' L(i))}{\sum_{i=1}^{i=N} L(i)}\right]^2 + \left[\frac{\sum_{i=1}^{i=N} \cos(2\pi R' L(i))}{\sum_{i=1}^{i=N} L(i)}\right]^2},$$

где $L(i)$ - значения рассеяния функция линии; N - количество элементов в изображении линии рассеяния; R' - пространственная частота в плоскости изображения контролируемой ОС.

При практической реализации в формуле появляется еще один масштабный коэффициент, связанный с расстоянием между элементами.

Безусловно, в общем случае, дискретность выборки и конечность интервала вносят погрешность в определение ФПМ, поэтому ниже будут исследованы влияния этих факторов (как и некоторых других) при конкретных условиях измерения.

ИСТОЧНИКИ ПОГРЕШНОСТЕЙ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ФПМ

Для базового варианта установки, реализующего алгоритм определения ФПМ по функции рассеяния линии характерны следующие основные источники погрешностей:

- качество оптических элементов установки;
- конечные пределы интегрирования функции рассеяния линии;
- конечная ширина тест-объекта (щели);
- пространственная дискретность анализатора изображения;
- погрешность дискретизации функции рассеяния линии по уровням яркости;
- смещение нуля в изображении функции рассеяния линии, вызванное наличием фона и шумов приёмной системы;
- случайные шумы и флуктуации чувствительности анализатора (приёмника) и системы оцифровки изображения;
- нелинейность фотометрической характеристики приёмной системы;
- вибрации;
- погрешности настройки системы.

Рассмотрим пример экспериментальной оценки точности системы производственного контроля ФПМ объективов диаметром до 80 мм, подробно описанной в [2], которая производилась путём измерений ФПМ эталонной линзы по методике, рекомендованной в [3]. Результаты измерений ФПМ для осевой точки предмета в сравнении с теоретическими значениями ФПМ эталонной линзы для различных относительных отверстий линзы иллюстрируют графики на рис. 2.

Однако, поскольку используемая методика не позволяет аттестовать систему лучше, чем в 0,04 единицы контраста, то дополнительно было проведено сопоставление данных контроля, получаемых с помощью описанной измерительной системы и установки Odeta-V (производство Бельгия). В качестве исследуемого использовался объектив прибора ночного видения с относительным отверстием 1:1 и фокусным расстоянием 40 мм. Результаты сравнения показаны на графике рис. 3. Из графика видно, что расхождение результатов не превышает 0,02 единиц контраста.

АППАРАТУРНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ФПМ

Результаты проведённых теоретических исследований положены в основу измерительной аппаратуры, созданной для решения задач контроля при производстве компонентов оптических систем космической съёмки и астрономических телескопов.

В частности, внедрена система контроля ФПМ крупногабаритных объективов с расширенным диапазоном измерения на элементной базе более высокого класса (рис 4), характеристики которой представлены в табл. 1.

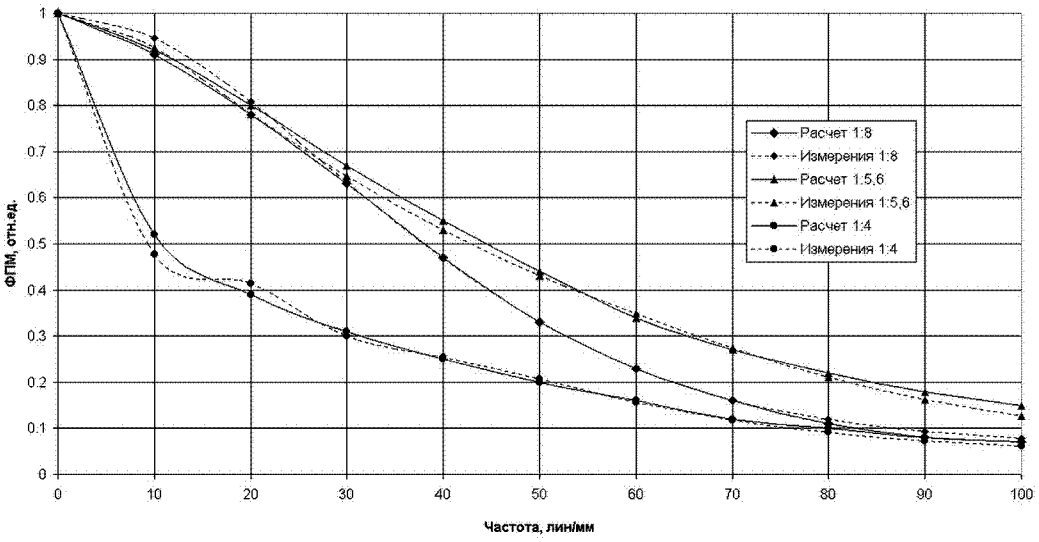


Рисунок 2.
Результаты измерения ФПМ эталонной линзы

Таблица 1.
Характеристики системы контроля ФПМ крупногабаритных объективов

Максимальный диаметр контролируемого объектива	500 мм
Коллиматор	Зеркальный f'=15 000 мм
Источник излучения	Лампа накаливания 12 В, 100 Вт
Приёмник излучения	Охлаждаемая ПЗС-матрица 1/2" 1388x1038 элементов
Разрядность АЦП	12 бит
Микрообъектив	АПО 20x0,65
Максимальная частота в пространстве изображений контролируемой системы	100 лин/мм
Погрешность измерения	0,05 единиц контраста

КОНТРОЛЬ ФПМ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ В ШИРОКОМ ИНТЕРВАЛЕ ТЕМПЕРАТУР

Для проверки параметров качества изображения объективов в широком интервале температур использована установка контроля функции передачи модуляции, оснащённая специально разработанной термо-камерой, в которую помещается контролируемый объектив. Блок-схема установки показана на рис. 5.

Контролируемый объектив 2 размещён между коллиматорным блоком 1 и блоком приёма и анализа изображения 6 контрольной установки в термокамере 3, обеспечивающей необходимую температуру объектива в процессе измерений. Тепловая изоляция термокамеры обеспечивает температурную стабильность измерительных элементов установки контроля, независимо от температуры внутри термокамеры. Входное окно 4 термокамеры расположено в параллельном пучке и не влияет на ход лучей в объективе. В качестве выходного окна камеры, расположенного в сходящемся пучке лучей, использован имитатор защитного стекла приёмника изображения, которое является неотъемлемой частью оптической системы.

Процедура контроля состоит из следующих основных этапов:

- принудительный нагрев объектива в камере до максимальной рабочей температуры;
- контроль функции передачи модуляции объектива при максимальной рабочей температуре объектива, определение положения плоскости наилучшей установки;
- естественное охлаждение объектива в камере до нормальной температуры (+20°С).
- контроль функции передачи модуляции объектива при нормальной температуре, определение положения плоскости наилучшей установки;
- принудительное охлаждение объектива в камере до минимальной рабочей температуры;
- контроль функции передачи модуляции объектива при минимальной рабочей температуре, определение положения плоскости наилучшей установки;
- естественный нагрев объектива в камере до нормальной температуры (+20°С).
- контроль функции передачи модуляции объектива при нормальной температуре, определение положения плоскости наилучшей установки;

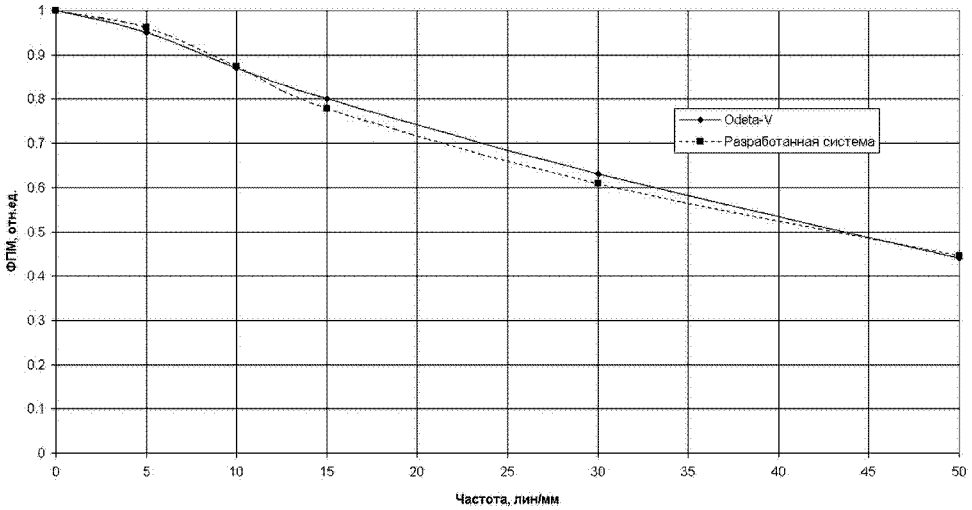


Рисунок 3.
Результаты измерения ФПМ объектива f' = 40 мм, 1:1

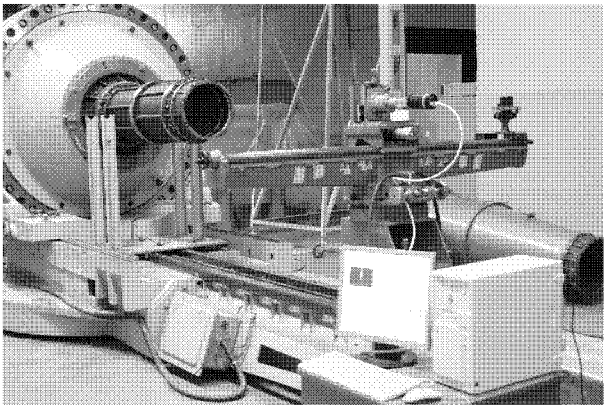


Рисунок 4.
Система контроля ФПМ крупногабаритных объективов

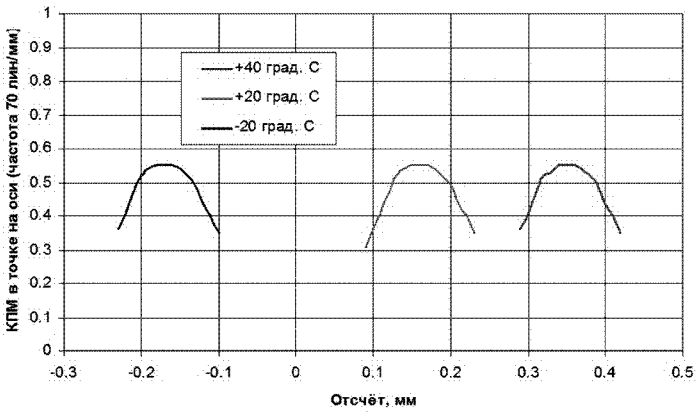


Рисунок 6.
Исходные результаты измерения ФПМ объектива

- сопоставление и анализ результатов измерений при различных температурах, вычисление смещения плоскости наилучшей установки в диапазоне рабочих температур.

Применение этой системы, в частности, позволило выявить ошибки в термооптическом расчёте одного из разработанных объективов на этапе его автономных испытаний (график на рис. 6) и скомпенсировать их, изменив конструкцию объектива (результат - на графике рис. 7).

ПРИМЕНЕНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ВИДЕОСИСТЕМЫ ДЛЯ ЗАДАЧ ИЗМЕРЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ЭНЕРГИИ В КРУЖКЕ ЗАДАННОГО ДИАМЕТРА

Качество изображения оптических систем, работающих по точечным объектам, часто оценивается концентрацией энергии в кружке рассеяния.

В настоящей работе описана измерительная система, принцип работы которой используется авторами в производственной практике уже более 10 лет, и которая в настоящее время получила новое развитие за счёт применения более совершенной элементной базы и повышения степени автоматизации измерительного процесса.

Рассматриваемая система с точки зрения оптической схемы полностью повторяет устройство, приведённое на рис. 1, при этом она имеет ряд особенностей:

- высокая степень автоматизации процесса измерения;
- использование оригинальных программных алгоритмов, в том числе, обеспечивающих дополнительные функции настройки параметров измерения и детального анализа полученных цифровых изображений;

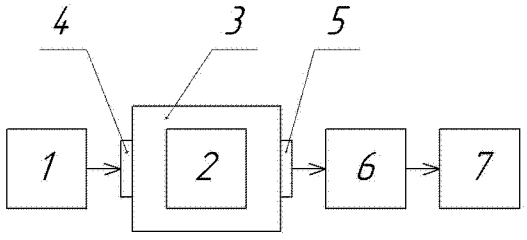


Рисунок 5.
Блок-схема установки контроля ФПМ объективов в широком диапазоне температур: 1 - коллиматорный блок; 2 - контролируемый объектив; 3 - термокамера; 4 - входное окно термокамеры; 5 - имитатор защитного стекла приёмника изображения, служащий выходным окном термокамеры; 6 - блок приёма и анализа изображения; 7 - компьютер

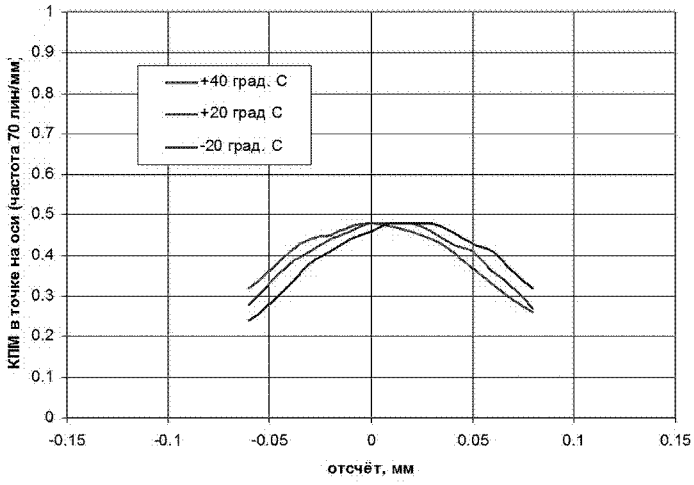


Рисунок 7.
Результаты измерения ФПМ объектива изменённой конструкции

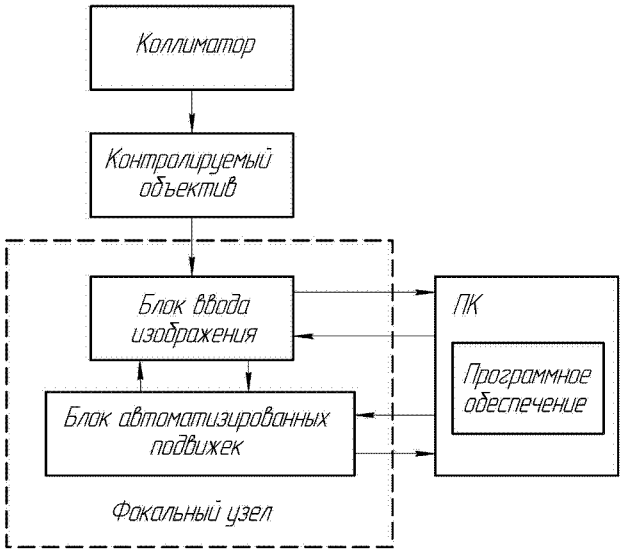


Рисунок 8.
Структурная схема системы для измерения концентрации энергии

- непрерывная синхронизация оборудования с программой.

Функциональное взаимодействие основных элементов системы иллюстрирует структурная схема (рис. 8).

Элементы 1-5 оптической схемы, показанной на рис.1, включены в коллиматор, а элементы 7-8 в блок ввода изображения.

Фокальный узел прибора устанавливается на линейке фокальной плоскости универсальной оптической скамьи. Изменение положения плоскости анализа осуществляется блоком автоматизированных подвижек, который представляет собой прецизионную направляющую на шариковой винтовой передаче, перемещаемую с помощью шагового двигателя с функцией дробления шага.

Ввод-вывод информации с блока ввода изображения и блока автоматизированных подвижек осуществляется через персональный компьютер под управлением разработанного программного обеспечения.

Интерфейс программы представляет собой набор вкладок для управления измерением, захватом и анализом цифровых изображений, а так же последующим автоматическим созданием протокола измерения. Внешний вид окна программы показан на рис. 9.

Управление записью цифровых изображений осуществляется на вкладке "Камера", сама же запись может проходит в двух режимах:

- ручной захват - по одному кадру;
- автоматический захват со съемкой серии кадров.

В автоматическом режиме так же настраиваются параметры синхронизации блока ввода изображения и блока автоматизированных подвижек, а также количество снимаемых кадров на каждом шаге двигателя при изменении фокусировки. Обработка нескольких кадров, зарегистрированных в одной позиции фокального узла, позволяет существенно уменьшить погрешность, вносимую вибрациями.

Через вкладку "Измерение КЭ" программы осуществляется управление процессом измерения концентрации энергии. Она включает в себя поле для ввода обязательных данных (диаметр кружка рассеяния, масштаб (увеличение) микрообъектива, уровень вычитаемого значения фона), а так же три режима работы с полученными кадрами:

- ручной режим;
- автоматическая обработка одиночного кадра;
- автоматическая обработка нескольких кадров.

В ручном режиме измерения (рис. 10) имеется возможность управлять положением кружка, в котором оценивается концентрация энергии, стрелками на клавиатуре. Квадрат показывает область сканирования при включении автоматических режимов.

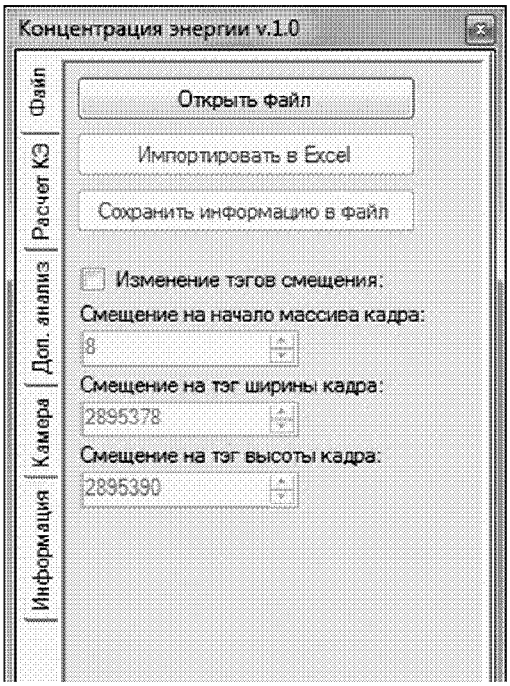


Рисунок 9.
Внешний вид окна программы

Рисунок 10.
Вид окна изображения при измерении концентрации энергии в ручном режиме

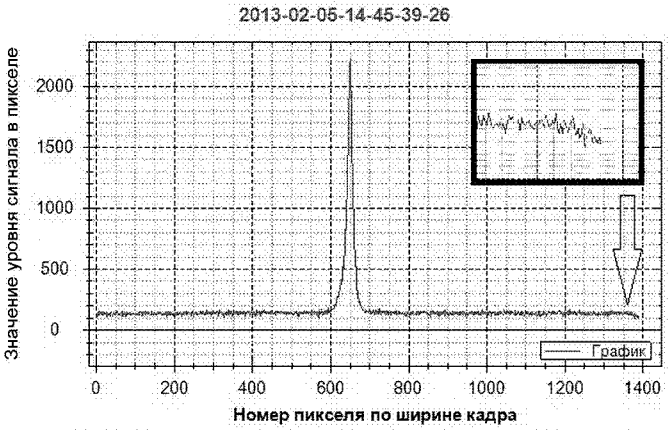


Рисунок 12.
Вид окна программы при выводе гистограммы сигнала

Положение области сканирования определяется автоматически. Размер этой области можно изменять, изменяя значение коэффициента увеличения области сканирования. Ограничение данной области необходимо для оптимизации времени обработки кадров в автоматических режимах. В верхнем левом углу окна программы (в первой строке) расположена информация о положении центра области сканирования в кадре (координаты cx и cy). Вторая строка показывает координаты последнего нажатия левой кнопки мыши, а третья строка содержит информацию об уровне сигнала в пикселе, имеющем эти координаты. Последняя же строка отображает значение концентрации энергии в текущем положении области контрольного кружка (в процентном отношении).

На вкладке "Доп. анализ" можно вывести график (гистограмму) сигнала и шумов по любой горизонтальной линии кадра (рис. 11). Это полезно для анализа шумов, а также для определения "завалов" чувствительного слоя матрицы видеокамеры, что позволяет исключить их из области анализа.

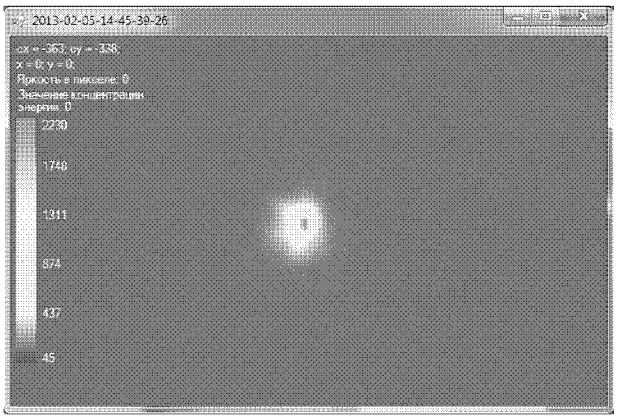


Рисунок 11.
Вид окна изображения при включенной опции цветного представления

По результатам анализа такого графика настраивается ширина и положение полос для расчета среднего и максимального значений фона.

На вкладке "Информация" после открытия файла отображается подробная информация о параметрах цифрового изображения, таких как количество и уровень сигнала в самых ярких пикселях кадра, значение среднего и максимального уровня фона и некоторая другая информация.

Вопросы анализа погрешности определения концентрации энергии при использовании данной системы в настоящей работе не рассматриваются. Эта тема требует отдельного освещения, и будет рассмотрена в следующих работах.

Список литературы:

1. *Креопалова Г.В., Пуряев Д.Т.* Исследование и контроль оптических систем. М.: Машиностроение. 1978. 224 с.

2. *Шаров А.А., Галявов И.Р., Понин О.В., Кулеш В.П.* Измерительная видеосистема для производственного испытания объективов по функции передачи модуляции // В сб. "Оптико-электронные системы визуализации и обработки оптических изображений" / Под ред. д.т.н. Тарасова В.В. и д.т.н. Якушенкова Ю.Г. Выпуск 2. М.: ЦНИИ "Циклон", 2007. С.76-82.

3. Устройства для измерения функции передачи модуляции съемочных объективов. Метод поверки, ОСТ 3-2635-82.

ОСОБЕННОСТИ ПРОИЗВОДСТВА ОБЪЕКТИВОВ АППАРАТУРЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

ПОНИН О.В., ШАРОВ А.А - кандидат технических наук

ОАО "Лыткаринский завод оптического стекла", Лыткарино, Московская обл.

E-mail: ponin@lzos.ru, otd22@lzos.ru

Описаны объективы для съёмочной аппаратуры дистанционного зондирования Земли, в частности для отечественного космического аппарата "Ресурс П", изготовленные ОАО "Лыткаринский завод оптического стекла". Приводятся основные характеристики созданных объективов. Рассматриваются особенности сборки и юстировки данных систем.

Ключевые слова: коэффициент передачи модуляции, юстировка, аберрация.

Современная аппаратура, предназначенная для съёмки земной поверхности из космоса с высоким и средним разрешением, использует уникальные высокоразрешающие объективы. Уникальность этих объективов определяется как значительными габаритами (диаметр линз 500 мм и более), так и чрезвычайно высокими требованиями к качеству изображения.

С 1972 года ОАО "Лыткаринский завод оптического стекла" (ЛЗОС) серийно выпускает крупногабаритные линзовые объективы (КГЛО) для аппаратуры космической съёмки с диаметром входного зрачка от 200 до 700 мм и с фокусным расстоянием от 1000 до 4000 мм.

С начала 1970-х годов по настоящее время сменилось несколько поколений оптических систем при постепенном росте светосилы и качества изображения, определяемого, прежде всего, уровнем расчётных аберрационных и технологических потерь. В частности, если в ахроматических объективах первых поколений (типа "Телегоир") аберрационные потери по полю составляли 40...45%, то в современных КГЛО с апохроматической коррекцией типа "Апо-Марс" и "Актиний" аберрационные потери не превышают 15%. То же касается и технологических потерь. Возможность технической реализации таких систем обеспечена как применением новых оптических стекол с особыми свойствами, так и совершенствованием технологии производства.

На сегодняшний день на заводе накоплен значительный опыт и создана уникальная научно-производственная база, обеспечивающая полный технологический цикл изготовления КГЛО, начиная от стекловарения до сборки, юстировки и испытания объектива.

Среди работ ЛЗОС следует выделить создание оптических систем для съёмочной аппаратуры космического аппарата (КА) "Ресурс П".

В частности, для аппаратуры детальной съёмки КА "Ресурс П" на ОАО ЛЗОС изготовлен модернизированный ГОИ им. С.И. Вавилова КГЛО типа "Актиний" с фокусным расстоянием 4000 мм и улучшенными оптическими характеристиками (рис. 1).

Одним из преимуществ объектива является сравнительно широкое поле зрения (5, 4 градуса), в пределах которого должно быть обеспечено значение коэффициента передачи модуляции (КПМ) не хуже 0,2 в 6 различных спектраль-

ных интервалах в диапазоне от 0,45 до 0,9 мкм.

Для комплекса широкозахватной мультиспектральной аппаратуры КА "Ресурс П" на ОАО ЛЗОС созданы короткофокусный (фокусное расстояние 40 мм, относительное отверстие 1:6, поле зрения 60°) и среднефокусный (фокусное расстояние 200 мм, относительное отверстие 1:3, поле зрения 13°). Подробное описание и характеристики объективов приведены в работе [1]. Эти объективы представлены на рис. 2

Одной из основных особенностей данных систем является термонерасстраиваемость, которая достигается как подбором соответствующих марок оптических материалов, так тонкой коррекцией термооптических аберраций и температурной дефокусировки осуществляется подбором сочетания температурных коэффициентов линейного расширения оправ линз и корпуса объектива, который производится по результатам испытаний.

Для проверки качества оптических систем создана аппаратура измерения функции передач модуляции, позволяющая контролировать оптические системы с диаметром входного зрачка до 700 мм. Для систем с диаметром входного зрачка до 100 мм реализована возможность измерения КПМ в широком диапазоне температур.

Применение оптической системы (ОС) в аппаратуре дистанционной съёмки требует формирования этой системой изображения высокого качества, близкого к дифракционному пределу. Каждая подобная система является по-своему уникальным изделием, как по размерам, так и по качеству изображения. Для линзовых ОС данного класса необходимо в изготовленной системе обеспечить среднеквадратическое отклонение волнового фронта (СКО ВФ) на уровне $0{,}05\lambda$ в точке на оси и $0{,}07...0{,}10\lambda$ на краю поля.

Столь высокие требования обусловливают необходимость поиска в процессе сборки и юстировки наиболее оптимальной конфигурации оптической системы с учётом реальных отклонений параметров оптических деталей и характеристик материалов от номинальных значений.

В технической документации ОС, как правило, нормируются интегральные характеристики качества изображения, такие как фотографическая разрешающая способность, значение коэффициента передачи модуляции на рабочих пространственных частотах и т.п. Однако, непосредственно на основе анализа этих характеристик не представляется возможным выработать конкретные рекомендации по компенсации по-

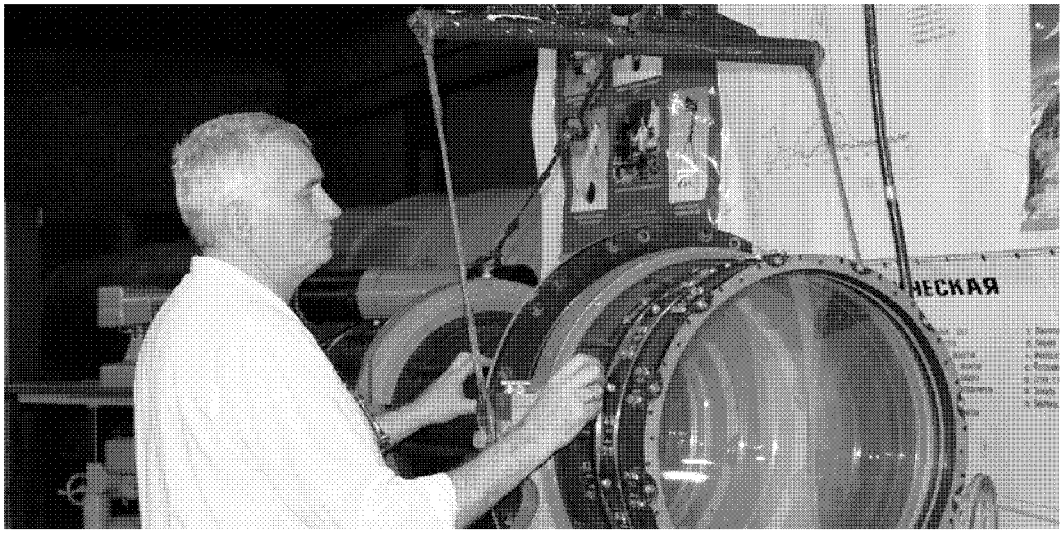


Рисунок 1.
Модернизированный объектив типа «Актиний»
для аппаратуры детальной съёмки космического аппарата «Ресурс П»

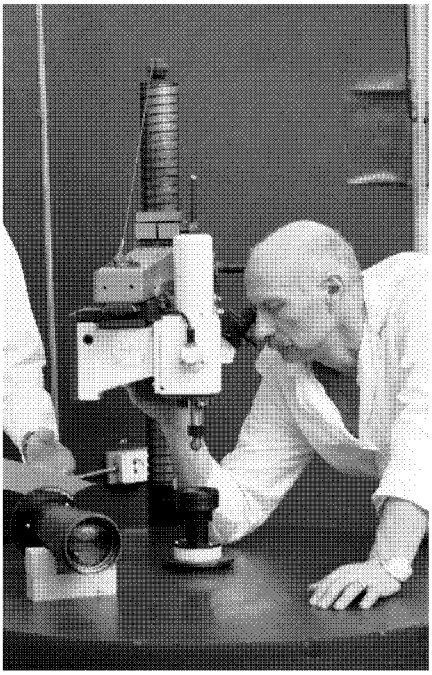


Рисунок 2.
Объективы для комплекса широкозахватной мультиспектральной аппаратуры космического аппарата «Ресурс П» в процессе их сборки

грешностей изготовления и сборки юстировкой оптической системы.

Юстировочные рекомендации можно получить на основе анализа данных контроля аберраций изготовленной оптической системы. Такие данные могут быть получены при измерении волновых аберраций ОС интерференционным методом.

Обработка систем интерферограмм, снятых для различных точек поля при различных ориентировках оптической системы позволяет построить достаточно полную модель реальной оптической системы [2]. По этой модели определяют величину и вклад погрешностей, не нарушающих осевой симметрии оптической системы, а также величину и ориентацию погрешностей децентрировки, ошибок испытательной аппаратуры, весовые деформации и т.п.

Получение информации о двумерном распределении деформаций волнового фронта позволяет осуществить автоматизированную оценку отдельных параметров (составляющих) полной деформации волнового фронта, таких, как величина и угол ориентации астигматической ошибки, комы, коэффициентов зональных ошибок [3].

Астигматизм в данной точке поля ОС может быть вызван астигматической аберрацией осесимметричной системы (расчётный астигматизм), децентрировкой поверхностей (децентрировочный астигматизм), остаточными ошибками формообразования, а также пережатиями линз в оправах и неоднородностью стекла (т.н. собственный астигматизм линз). Кроме того, при проведении измерений в схеме интерферометра Тваймана-Грина необходимо учитывать астигматизм эталонных зеркал (астигматизм контрольной схемы).

Ошибки типа комы в данной точке поля системы могут быть вызваны остаточной аберрацией осесимметричной системы и децентрировкой поверхностей. Кроме того, может присутствовать и кома, вызванная неидеальной настройкой схемы контроля.

Применяемая методика анализа обеспечивает возможность разделения указанных типов ошибок, основываясь на различном характере их изменения в пределах поля изображения. Для того, чтобы разделить составляющие астигматизма необходимо произвести измерение и анализ волнового фронта в центре поля изображения и, как минимум, в двух точках поля, расположенных симметрично относительно центра. Кроме того, для выделения астигматизма контрольной схемы необходимо провести дополнительное измерение волнового фронта в центре поля при повороте объектива вокруг своей оси.

Составляющие комы могут быть разделены на основе тех же измерений.

Анализ зональной ошибки направлен на выбор метода её компенсации, для чего исследуются величина и относительный вклад составляющих сферической аберрации различных порядков со статистической оценкой значимости соответствующих коэффициентов.

Анализ деформаций волнового фронта позволяет объективно оценить качество изображения, формируемое оптической системой, установить его соответствие расчёту, выявить отклонения, приводящие к снижению качества изображения и определить меры, необходимые для компенсации этих отклонений.

В современном оптико-механическом производстве нашли применение следующие основные методы компенсации, позволяющие минимизировать величины ошибок волнового фронта реальной ОС:

1. Метод взаимного разворота оптических элементов.

Позволяет взаимно скомпенсировать влияние собственного астигматизма оптических деталей, децентрировок оптических элементов. Метод активно применяется как на этапе предварительной комплектации оптической системы по результатам контроля фактически изготовленных оптических деталей, так и на этапе доводки. Частично возможно снизить влияние местных ошибок волнового фронта. В работе [4] приведена методика вычисления углов разворота оптических элементов из условия минимума среднеквадратической ошибки волнового фронта.

2. Метод компенсации ошибок оптической системы с использованием малых изменений воздушных промежутков и децентрировок компонентов.

Метод основан на использовании таблицы влияния параметров оптической системы. С помощью воздушных промежутков можно скомпенсировать аберрации осесимметричной системы или т.н. "расчётные" ошибки, такие как астигматизм, кома, сферическая аберрация третьего порядка, кривизна поля изображения. В [5] описан дифференциальный метод компенсации аберраций оптической системы малыми изменениями ее параметров, предполагающий линейную зависимость между параметрами и аберрациями при малых величинах изменений конструктивных параметров оптической системы.

Данный метод реализован в программе SWODKA, разработанной в ГОИ им. С.И. Вавилова. Программа SWODKA внедрена на ОАО "ЛЗОС" и длительное время используется для доводки высокоразрешающих оптических систем. Накоплен огромный статистический материал успешного применения данного программного обеспечнеия.

Изменение параметров изготовленной оптической системы технологически сложно, поскольку требует разборки объектива, прецизионного внесения требуемых корректировок и сборки объектива с сохранением остальных параметров системы без изменения. Метод позволяет из всего множества параметров находить те, изменение которых наиболее эффективно для компенсации установленных отклонений.

Исходными данными для работы программы являются составляющие регулярных ошибок волнового фронта, определённые в результате анализа измеренного волнового фронта системы и таблицы влияния параметров на аберрации, которые составляются на этапе проектирования конкретной ОС.

3. Метод создания корректора волнового фронта на одной из поверхностей оптической системы, иначе называемый также методом "ретуши".

Этот прием применяется тогда, когда основным фактором, приводящим к ухудшению качества изображения оптической системы, являются нерегулярные местные ошибки либо осесимметричные зональные ошибки высших порядков, которые не могут быть исправлены с применением двух предыдущих методов. Сущность метода заключается в том, чтобы придать одной из поверхностей системы такой профиль, который позволил бы скомпенсировать общую ошибку волнового фронта системы. Теоретически данный метод позволяет скомпенсировать все ошибки волнового фронта в одной произвольной точке поля. Возможно также рассчитать профиль корректора и выбрать его положение в оптической системе таким образом, чтобы обеспечить оптимальную компенсацию остаточных аберраций по всему полю зрения объектива.

На ОАО ЛЗОС за последние годы освоена и успешно применяется, в частности, при изготовлении оптических поверхностей крупногабаритных астрономических зеркал технология автоматизированного формообразования поверхностей [6, 7].

Метод автоматизированного формообразования применим для формирования поверхности любого заданного профиля, в том числе поверхностей с заданной зональной ошибкой высших порядков или с нерегулярными местными ошибками, необходимыми для создания корректоров волнового фронта. При этом процесс автоматизированного формообразования позволяет целенаправленно достигать заданного профиля поверхности, занимает значительно меньше времени, более точен и свободен от субъективных факторов.

Для определения профиля оптической поверхности-корректора, который позволяет наилуч-

шим образом скомпенсировать ошибки ОС необходимо построить математическую модель системы. При этом ставится задача представления результатов моделирования в виде, удобном для их исполнения с учетом особенностей технологии автоматизированной обработки.

Практическим примером эффективности использования метода автоматизированного формообразования корректора волнового фронта является выполненный на ОАО ЛЗОС процесс доводки крупногабаритного фотографического линзового объектива, качество которого после сборки и проведения оптимизации традиционными технологическими приемами не соответствовало требованиям технических условий. Анализ результатов проведенного интерференционного контроля объектива показал, что наиболее значительный вклад в общую ошибку волнового фронта объектива вносит сферическая аберрация высших порядков, которая не может быть устранена изменением воздушных промежутков. При этом остаточная среднеквадратическая деформация волнового фронта объектива в точке на оси составляла 0,09...0,14λ.

Требуемая теоретическая форма волнового фронта, который необходимо получить, была рассчитана для вогнутой поверхности линзы диаметром 180 мм и радиусом кривизны 662,2 мм из стекла ТК21. Для данной поверхности рассчитывался профиль требуемого волнового фронта, который был нормирован на профиль отраженного волнового фронта для контроля формы поверхности из радиуса кривизны в отраженном свете.

Среднеквадратическая деформация волнового фронта объектива после установки линзы-корректора и повторного центрирования составила для точки на оси 0,04...0,06λ, для точек поля 0,08...0,12λ.

Кроме описанных выше КГЛО, на ОАО ЛЗОС отработана технология производства ряда других высокоточных оптико-механических компонентов для аппаратуры ДЗЗ. В частности для аппаратуры МСУ-МР и для аппаратуры МСУ-ГС метеоспутников "Метеор-М" и "Электро-Л" изготовлены блоки сканирующих зеркал, отвечающих за развёртку изображения в системе. С учётом специфики данных компонентов, которая состоит в сочетании высоких требований к оптическому качеству с необходимостью обеспечения точного механического движения зеркала, разработаны специализированные стенды, позволяющие контролировать и обеспечивать указанные параметры.

Используя созданную современную технологическую базу производства оптических систем аппаратуры ДЗЗ, ОАО ЛЗОС выпускает целый ряд оптических систем различного назначения. В частности, производятся крупногабаритные зеркально-линзовые объективы диаметром до 750 мм для наземных систем исследования небесных объектов в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне спектра.

Список литературы:

1. *Понин О.В., Архипова Л.Н., Демидова Е.А., Тарабукин В.В., Шаров А.А.* Апохроматические термонерасстраиваемые объективы для широкозахватной мультиспектральной космической съёмки // Оптический журнал, №4, 2013 с 40-42.

2. *Грамматин А.П., Ган М.А.* Математическое моделирование оптических систем на стадии разработки и изготовления. // ОМП 1989, №1 с.9-12.

3. *Ган М.А., Котов В.В., Устинов С.И.* Анализ деформаций волновых фронтов реальных оптических систем. / ОМП 1984, №5, с.17-20.

4. *Агурок И.П.* Вычисление оптимальных углов разворота нескольких компонентов при сборке оптических систем. // ОМП, 1982, №11, с.21.

5. *Ган М.А., Устинов С.И.* Компенсационный метод доводки оптических систем. // ОМП, 1987, №11, с. 25.

6. *Савельев А.С., Семёнов А.П., Катагаров Ф.К. и др.* Программа для автоматизированной доводки крупногабаритных оптических деталей малым инструментом. // ОМП, 1985, №10, с.35-37.

7. *Абдулкадыров М.А., Белоусов С.П., Игнатов А.Н., Патрикеев А.П. и др.* Изготовление крупногабаритной оптики наземного и космического базирования. // Труды международной академии "Контенант" "Формообразование оптических поверхностей". Том 1. М.: Изд. Контенант, 2005, с.171-209.

ПРОБЛЕМЫ ИЗУЧЕНИЯ ШЕРОХОВАТОСТИ И ФОРМЫ СВЕРХТОЧНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

ВАЙНЕР Ю.А., ЗОРИНА М.В., САЛАЩЕНКО Н.Н. - доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН, ТОРОПОВ М.Н., ЧХАЛО Н.И. - доктор физико-математических наук

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт физики микроструктур Российской академии наук, г. Нижний Новгород

E-mail: vainer@ipm.sci-nnov.ru, mzor@ipm.sci-nnov.ru, salashch@ipm.sci-nnov.ru, toropov@ipm.sci-nnov.ru, chkhalo@ipm.sci-nnov.ru

http://sciyo.com/articles/show/title/manufacturing-and-investigating-objective-lens-for-ultrahigh-resolution-lithography-facilities.

В работе рассматриваются основные проблемы и ограничения современных методов характеризации поверхности. Сообщается об исследованиях и разработках, проводимых в ИФМ РАН по развитию "первопринципных" методов изучения шероховатости и формы сверхгладкой и сверхточной оптики. Приводятся наиболее интересные данные по шероховатостям подложек, изготовленных на различных предприятиях. Показано, что в России имеется технологии мирового уровня полирования плавленого кварца, ситалла и Zerodur.

Ключевые слова: шероховатость, форма, аберрация, нтерферометрия.

ВЕДЕНИЕ

В последнее время наблюдается возрастающий интерес к сверхточной и сверхгладкой оптике, востребованной в микроэлектронике (проекционная литографии на длинах волн 193 и 13,5 нм), рентгеновской астрономии Солнца, для контроля за околоземным пространством в вакуумном ультрафиолетовом диапазоне и др. В частности, в связи с прогрессом в технологии напыления многослойных рентгеновских зеркал диапазон длин волн, в котором возможно создание высокоотражающих зеркал нормального падения, расширился до 3 нм [1]. Короткие длины волн накладывает жесткие требования на шероховатость поверхности оптических элементов и аберрации оптических систем. Необходимым условием изготовления оптики нового поколения является наличие соответствующей метрологической базы. Поэтому, актуальными задачами являются анализ реальных возможностей традиционных подходов, модернизация существующих и разработка новых методов.

В данной работе рассматриваются основные проблемы и ограничения современных методов характеризации поверхности, в том числе и широко используемых ведущими производителями оптики. Сообщается об исследованиях и разработках, проводимых в ИФМ РАН по развитию, так называемых, "безэталонных" методов изучения шероховатостей и формы поверхностей сверхгладкой и сверхточной оптики, основанных на "первых принципах". На основе сотен тестов приводятся, на наш взгляд, наиболее интересные данные по шероховатостям подложек из плавленого кварца, ситалла и Zerodur, изготовленных на различных предприятиях.

1. ТРЕБОВАНИЯ К ПОВЕРХНОСТЯМ И АБЕРРАЦИЯМ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ ДИФРАКЦИОННОЕ КАЧЕСТВО ИЗОБРАЖЕНИЙ

Практика показала, что при анализе требований к поверхностям и аберрациям оптических систем наиболее адекватным является подход, разделяю-

щий влияние на изображение шероховатостей с различными латеральными размерами [2]. Формализм этого подхода основан на измерении так называемой $PSD(\nu)$ (power spectral density) функции шероховатостей, представляющей собой распределение шероховатостей по спектру пространственных частот ν с латеральными размерами $1/\nu$, лежащими в диапазоне от диаметра зеркала, до долей длины волны. Интеграл от этой функции дает эффективную шероховатость поверхности.

По характеру влияния на качество изображения разделают низкочастотные (латеральные размеры 1 мм - 1 м), среднечастотные (1 мкм - 1 мм) и высокочастотные (менее 1 мкм) шероховатости. Низкочастотные шероховатости, как правило, приводят к искажению изображения как целого, например, круги изображаются эллипсами. Высокочастотные шероховатости практически не влияют на качество изображения, а приводят к увеличению рассеянного фона и снижению освещенности изображения.

Наибольший эффект на разрешающую способность оказывают среднечастотные шероховатости, так как рассеяние на них приводит к размытию краев изображений [2]. Причем размытие пропорционально $(\sigma_m/\lambda)^2$, где σ_m - эффективная шероховатость в среднечастотном диапазоне, выраженная в виде корня квадратного из среднеквадратического отклонения профиля поверхности от среднего (*r.m.s.*) и λ - длина волны излучения. В частности, из этого соотношения следует, что при освоении коротких длин волн необходимым условием является, как минимум, пропорциональное уменьшение σ_m. Например, для востребованной в проекционной нанолитографии длины волны 13,5 нм $\sigma_m \leq 0{,}2$ нм.

Согласно критерию Марешаля для обеспечения изображения дифракционного качества волновая аберрация не должна превышать 1/14 рабочей длины волы [3]. Например, для λ=13,5 нм с учетом 6 зеркал в проекционном объективе и независимого характера ошибок, требования к точности формы единичных зеркала составляют менее $\sigma_l \leq 0{,}4$ нм. При работе на еще более коротких длинах волн, например на длине волны 6,7 нм, рассматриваемой как кандидат для нанолитографии будущего [4], требования к шероховатостям смещаются в субангстремную область.

В заключении следует отметить, что подобные требования предъявляются не только к оптике будущего, но и уже к современным системам литографии на длинах волн 248 и 193 нм, а так же к оптике лазерных гироскопов. Требования вытекают из большого числа оптических элементов в проекционном объективе и предельно низким допустимым светорассеянием при однократном отражении.

2. ПРОБЛЕМЫ ИЗМЕРЕНИЙ ШЕРОХОВАТОСТИ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Традиционно для измерений шероховатости оптических поверхностей используются атомно-силовая (АСМ) и оптическая интерференционная микроскопия белого света (ОИМ). К "первопринципным" методам относится методика диффузного рассеяния рентгеновского излучения (ДРРИ). В данном разделе рассмотрим основные проблемы и реальные возможности, которые предоставляет каждый из методов.

Общее описание шероховатости подробно приведено в [5,6]. Отметим, лишь, что для этого используются функция спектральной мощности шероховатостей $PSD(\nu)$, характеризующая вклад частоты в общую шероховатость поверхности, и представляющая собой Фурье-преобразование автокорреляционной функции шероховатостей. В данной работе используются соотношения, выведенные для изотропных поверхностей, а это - практически все материалы, представляющие интерес для сверхточной оптики. При этом эффективная шероховатость определяется как интеграл

$$\sigma_{eff}^2 = \int_{\nu_{\min}}^{\nu_{\max}} PSD(\nu) d\nu , \qquad (1)$$

где ν_{min} и ν_{max} минимальная и максимальная пространственные частоты, соответственно.

2.1. Атомно-силовая микроскопия

Общепринятым и наиболее достоверным методом изучения шероховатости оптических поверхностей является АСМ. Рассмотрим частотные ограничения этого метода. На рис. 1 приведены АСМ изображение суперполированной кварцевой подложки, кадр 30×30 мкм^2 и его сечение. Как видно из рисунков на поверхности наблюдается волна с периодом 15 мкм и амплитудой 0,5 нм. Эффективная шероховатость по всему кадру со-

ставляет 0,3 нм. Однако если измерить неровности вдоль огибающей волны, то шероховатость будет менее 0,1 нм. Появление этой волны связано не с топологией поверхности, т.к. при повороте на 90° измеряемая карта поверхности не изменяется, а с нелинейностью движения иглы (пьезосаннера) АСМ.

В случае, если бы измерялись кадры, например 5×5 или 10×10 мкм^2, то склон волны был бы вычтен, как наклон поверхности по отношению к оси зонда, и кадр отражал бы топологию поверхности. Таким образом, строго говоря, при изучении сверхгладких оптических поверхностей АСМ может использоваться для измерений в ограниченном диапазоне пространственных частот шероховатостей, максимальная граница которого определяется размером зонда (или шагом сканирования), а минимальная - нелинейностью сканера. Характерный диапазон пространственных частот, измеряемых АСМ, составляет 10^{-1}-10^{2} мкм$^{-1}$ (латеральные размеры 10^{1}-10^{4} нм). Рабочий диапазон может быть расширен в область средних частот, вплоть до 10^{-2} мкм$^{-1}$, однако при этом результаты измерений завышаются из-за вклада нелинейности сканера, см. рис. 1.

Другая проблема АСМ возникает при изучении кривых поверхностей. Существующие приборы позволяют изучать фактически только плоские поверхности. Проблема заключается в том, что для сохранения субатомного разрешения высот шероховатостей диапазон вертикального перемещения зонда в процессе сканирования не должен превышать Δz=1 мкм. В случае наклона поверхности по отношению к оси зонда, диапазон возможного латерального сканирования уменьшается. Например, при наклоне 3° размер кадра не может превышать 20×20 мкм^2. Реальная оптика имеет локальные наклоны поверхности к оси на порядок больше. Таким образом, для адекватного применения АСМ стол для исследуемых образцов должен представлять собой гониометр с двухкоординатным сканированием в плоскости X,Y и наклонами φ и θ вокруг этих осей. Так как на рынке такие приборы отсутствуют, то приходится использовать нестандартные схемы измерений, например установку головки АСМ на образец, что приводит к большому влиянию вибраций на результаты измерений и риску повреждения подложек, или разрабатывать специальные гониометры, не в полной мере интегрированные в прибор. Для частичного решения этой проблемы в ИФМ РАН создается стенд, оснащенный измерительной АСМ головкой и одноосным гониометром для наклона оптики в пределах ±30°.

2.2. Оптическая интерферометрия белого света

В последнее время широкое распространение для изучения шероховатости получила интерферометрия белого света [7]. Часто этот метод рассматривают как естественное продолжение АСМ, а задача аттестации сверхгладких оптических поверхностей считается решенной. В ряде работ, например [2, 8], показано хорошее совпадение данных измерений шероховатости, полученных различными методами, на основании чего делается вывод об адекватности данной методики.

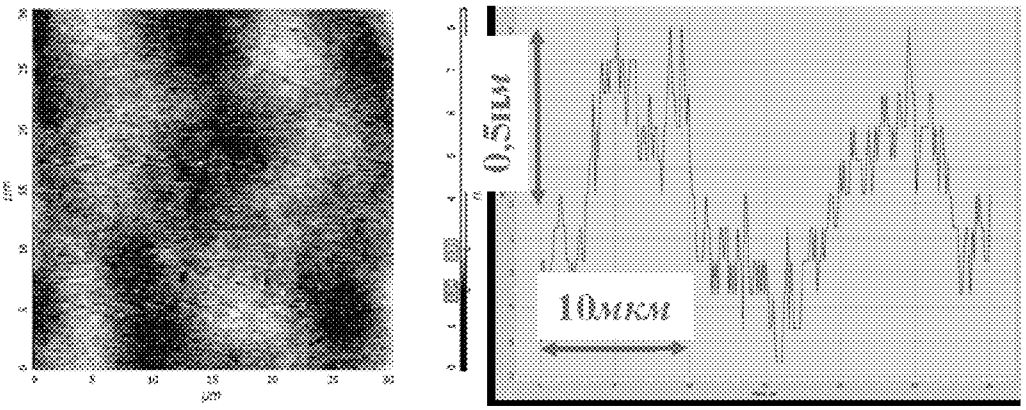


Рисунок 1.
АСМ изображение, кадр 30х30 мкм^2, слева, и его сечение, справа, полученные для суперполированной кварцевой подложки

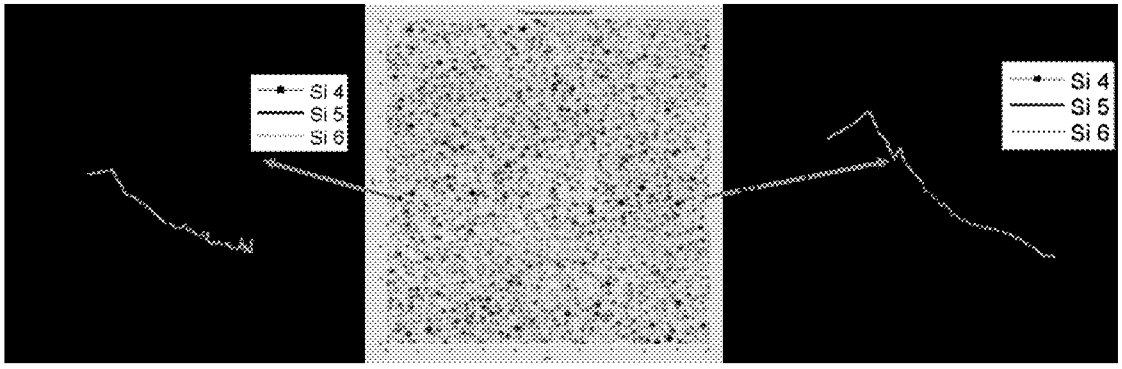


Рисунок 2.

PSD функции шероховатостей 3-х образцов кремния, измеренные с помощью АСМ (слева) и ОИМ Talysurf CCI 2000 (справа). Шероховатость у образца №4 отличается на порядок, в то время как по данным ОИМ все образцы идентичны.

На рис. 2 слева приведены измеренные с помощью АСМ *PSD* функции трех кремниевых образцов. Образец 4 был подвергнут травлению ионами аргона при таких условиях, когда на его поверхности появились поры, четко видные на АСМ изображении, так же в несколько раз увеличилась шероховатость. Однако ОИМ Talysurf CCI 2000 (графики справа) показывает для всех образцов идентичные *PSD* функции.

Полученный результат так же подтверждается в совместном эксперименте авторов и Rigaku Innovative Technologies на примере изучения образцов суперполированного плавленого кварца. На рис. 3 кривая 1 соответствует измерениям, сделанным в ИФМ РАН с помощью АСМ и ДРРИ. Кривые 2-8 - *PSD* функции, измеренные с помощью ОИМ ZYGO (3-8) и АСМ (2) в Rigaku Innovative Technologies. Кривые 3-8 получены с помощью различных объективов. Видно, что результаты измерений АСМ и ДРРИ в обеих лабораториях прекрасно совпадают друг с другом, в то время как интерферометрические измерения, сделанные на одном и том же приборе, с одним и тем же эталоном, но с различными объективами, сильно различаются. Из рисунка видно, что только при частотах менее 10^{-2} мкм$^{-1}$ можно ожидать совпадение ДРРИ и АСМ с данными ОИМ. Таким образом, ОИМ не обеспечивает адекватных измерений суперполированных подложек в полной мере.

Как было показано в [6] основными причинами неадекватности метода является большая шероховатость эталона, для Talysurf CCI 2000 составила около 0,8 нм, и, по-видимому, нелинейность пьезо-сканнера, вклад которой был хорошо заметен в АСМ, где перемещение не превышало 1 мкм. Еще одним источником ошибок ОИМ, по аналогии с [9], может являться прохождение рабочего и эталонного фронтов через оптические элементы, где набираются неконтролируемые ошибки.

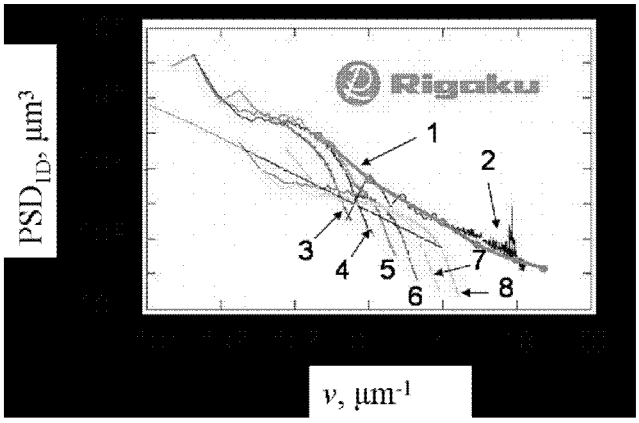


Рисунок 3.

PSD функции суперполированной подложки из плавленого кварца, измеренные в ИФМ РАН (1) и в Rigaku Innovative Technologies (2-8) различными методами: 1 - ДРРИ и АСМ, 2 - АСМ; ОИМ Zygo с объективами: 3 - 1.25х; 4 - 2.5х; 5 - 5х ; 6 -10х; 7 - 20х ; 8 - 40х

2.3. Диффузное рассеяние рентгеновского излучения

В [5] была развита теория и получены соотношения, позволяющие напрямую получать PSD функцию по измеренной угловой зависимости интенсивности ДРРИ. Схема ДРРИ эксперимента с обозначением основных геометрических параметров приведена на рис. 4.

Не вдаваясь в подробности, приведем лишь применяемые на практике соотношения. PSD функция получается из угловой зависимости интенсивности диффузного рассеяния непосредственно из результатов эксперимента (без априорных предположений о ее форме) благодаря пропорциональной зависимости между индикатрисой рассеяния и PSD функцией. Если излучение с длиной волны λ падает под скользящим углом θ_0 на поверхность, характеризующуюся корреляционной длиной a, то ширины индикатрисы рассеяния $\Phi(\theta,\varphi)$ в перпендикулярных направлениях θ и φ могут быть оценены как $\delta\theta \sim \lambda/\pi a \cdot \sin\theta_0$ и $\delta\varphi \sim \lambda/\pi a$. Для рентгеновского излучения, в силу $\theta_0 \ll 1$, это означает $\delta\varphi \ll \delta\theta$. В эксперименте угловой размер детектора в азимутальном направлении $\Delta\varphi$ существенно превышает $\delta\varphi$, т. е. интегрирование сигнала рассеяния по щели происходит автоматически, что соответствует измерению одномерной индикатрисы $\Pi(\theta) = \int_0^{2\pi} \Phi(\theta,\varphi)d\varphi$, связанной с одномерной PSD функцией следующими соотношениями

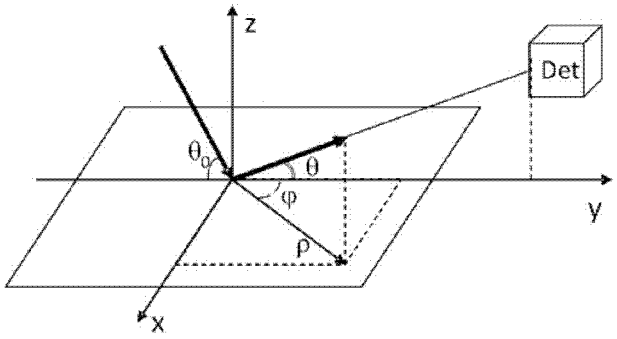


Рисунок 4.
Диффузное рассеяние рентгеновского излучения. Геометрия задачи

$$\Pi(\theta) = \frac{|\pi(1-\varepsilon)t(\theta_0)t(\theta)|^2}{2\lambda^3 \sin\theta_0 \sqrt{\cos\theta\cos\theta_0}} PSD_{1D}(\nu),$$
$$\nu = |\cos\theta - \cos\theta_0| / \lambda. \qquad (2)$$

где ε - диэлектрическая проницаемость материала подложки на длине волны λ, $t(\theta)$ френелевские коэффициенты прохождения

$$t(\theta) = \frac{2\sin\theta}{\sin\theta + \sqrt{\varepsilon - \cos^2\theta}} \qquad (3)$$

Ограничения метода в низкочастотной области связаны с ненулевой шириной пучка и щели детектора, делающими невозможным отделение сигнала рассеяния от зеркально отраженного. В высокочастотной области ограничения определяются соотношением сигнал-шум, то есть динамическим диапазоном прибора, и, разумеется, качеством поверхности. Более шероховатая поверхность рассеивает сильнее. При измерениях на λ=0,154 нм эти границы составляют: $\nu_{min} \sim 10^{-2}$ мкм$^{-1}$, $\nu_{max} \sim$3-5 мкм$^{-1}$.

В подавляющем большинстве случаев наблюдается хорошее совпадение данных ДРРИ и АСМ, в тех областях спектра, где эти методы пересекаются. Расхождение наблюдается только в случае, когда на подложке имеется нарушенный слой, который приходит к дополнительному ДРРИ на объемных неоднородностях [10].

Основным недостатком традиционного метода ДРРИ является невозможность его применения для изучения кривых поверхностей, что связано с малым углом падения на образец θ_0 (критический угол полного внешнего отражения на длине волны 0,154 нм составляет 0,2-0,3°). Использование более длинных волн, например 13,5 нм, позволяет изучать кривые поверхности. Недавно в лаборатории удалось получить динамический диапазон измеряемых интенсивностей ДРРИ на уровне 10^8-10^9. И все таки из-за большого размера зондового пучка не удалось расширить измеряемый диапазон в область средних частот более, чем позволяет АСМ [11].

Завершая этот параграф, следует отметить, что при аттестации оптических поверхностей мы не используем метод ОИМ, а в качестве критерия достоверности принимаем совпадение данных измерений, полученных методами ДРРИ и АСМ.

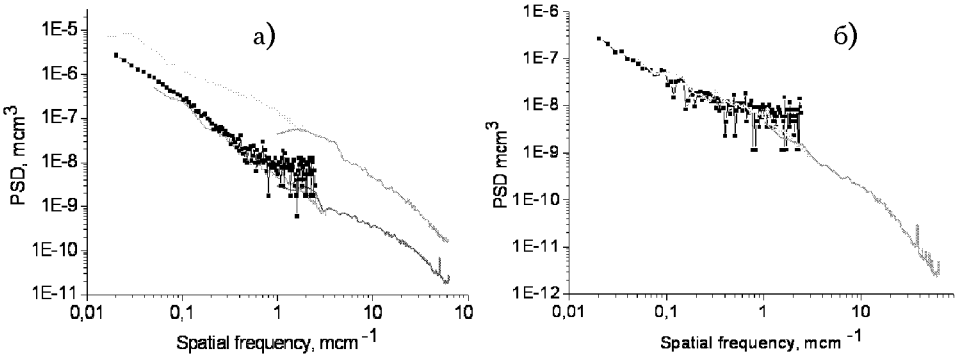


Рисунок 5.
PSD функции кварцевых подложек, изготовленных в ФИ РАН им. П.Н. Лебедева - a) и в компании General Optics, США - b)

2.4. Изучение шероховатости подложек от различных производителей

С помощью разработанных методов было проведено тестирование сотен подложек от различных производителей. Приведем несколько, на наш взгляд наиболее интересных результатов. На рис. 5 приведены спектральные плотности мощности шероховатостей подложек из плавленого кварца, изготовленных в ФИАН им. П.Н. Лебедева, рис. 5a) и в компании General Optics, США, 5b). Верхние кривые на рис. 5a) соответствуют стандартной глубокой шлифовке-полировке. На этой стадии полирования у всех отечественных производителей эффективная шероховатость составляет θ_{eff}=1,2-1,5 нм. После применения химико-механической полировки, стандартной технологии, применяемой при изготовлении кварцевых пластин для микроэлектронной промышленности, PSD функции заметно упали, а эффективная шероховатость составила θ_{eff}=0,36 нм. Шероховатость подложки от General Optics составляет θ_{eff}=0,26 нм. Однако после дополнительной полировки ионами ксенона шероховатость наших подложек падает до уровня 0,2-0,24 нм, и, таким образом, с точки зрения шероховатости поверхности отечественные технологии полирования кварца не уступают зарубежным аналогам.

На рис. 6 приведены данные по шероховатостям подложек из Zerodur, изготовленных в Edmund Optics и И.Л. Струлей в ОАО "Композит", г. Королев. Как видно из рисунка уровень полирования примерно одинаков. При полировании подложек из Zerodur отечественный результат немного уступает Edmund Optics (0.57 нм, вместо 0,53 нм), однако при полировании ситалла, наоборот, результат лучше, θ_{eff}=0,49 нм. В целом, как и в случае с кварцем, можно отметить, что отечественные технологии полирования ситалла и Zerodur не уступают зарубежным аналогам, при этом шероховатость подложек из керамик оказалась примерно в 1,5 раза хуже, чем при полировании кварца.

Интересные результаты были получены на ситалловых подложках, предоставленных из "Полюс", Москва. Шероховатость образцов, сильно различалась. От 0,3 нм, что является рекордными величинами, до 0,9 нм. По нашему мнению, на предприятии существует передовая технология полирования ситалла, однако из-за проблем с контролем, по нашим данным используется ОИМ Zygo, наблюдается столь сильная невоспроизводимость результатов.

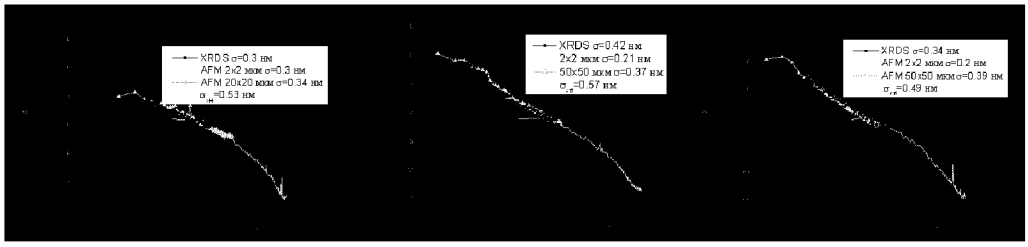


Рисунок 6.
PSD функции подложек из Zerodur, изготовленных в Edmund Optics - a), И.Л. Струлей в Композите - b) и из ситалла, И.Л. Струля, - c)

3. ИНТЕРФЕРОМЕТРИЯ С ДИФРАКЦИОННОЙ ВОЛНОЙ СРАВНЕНИЯ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ФОРМЫ И АБЕРРАЦИЙ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Традиционно для изучения формы оптических поверхностей и аберраций оптических систем используется интерферометры, чаще всего Физо. Эти интерферометры гарантируют высочайшую воспроизводимость измерений, лучше $\lambda/1000$, однако, из-за наличия эталонных поверхностей, а так же прохождения света через оптические элементы, абсолютная точность измерений формы не превышает $\lambda/30$-50 [12]. Для решения этой проблемы в ИФМ РАН развивается интерферометрия с дифракционной волной сравнения (ИДВС). Суть метода заключается в том, что эталонная волна формируется в результате дифракции плоской монохроматической волны на "малом" отверстии.

В настоящее время в ряде лабораторий имеются подобные интерферометры. В них в качестве источника эталонной сферической волны используются либо кор одномодового оптического волокна с хорошо отполированным торцом, на который нанесено полупрозрачное отражающее покрытие [13], либо субмикронные отверстия в металлической пленке (pin-hole) [14]. В силу большого диаметра кора, более 2 мкм, основным недостатком первого типа интерферометра является сильная неоднородность интенсивности сферической волны и маленькая рабочая апертура. Интерферометр на основе pin-hole имеет лучшую однородность эталонной волны, однако аберрации первичной оптики, с помощью которой лазерное излучение фокусируется на pin-hole, отрицательно сказываются на качестве эталонного фронта. Более того, в [15] показано, что из-за частичного прохождения света через края отверстия, вторичные волны набирают дополнительные набеги фаз, что приводит к аберрациям волнового фронта. Этот эффект так же снижает рабочую апертуру интерферометра.

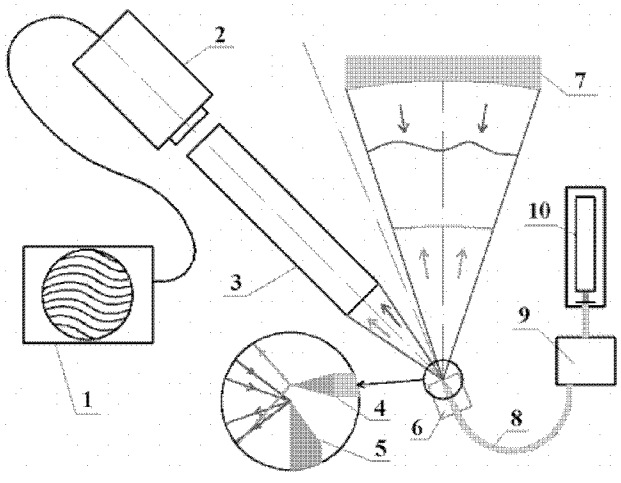


Рисунок 7.
Базовая оптическая схема ИДВС. 1 - компьютер, 2 - CCD камера, 3 - наблюдательная система, 4 - ВИСВ, 5 - плоское зеркало, 6 - стол, 7 - исследуемая поверхность, 8 - волокно, 9 - оптический блок с делителем пучка и поляризационным контроллером, 10 - лазер

Для решения этих проблем в ИФМ РАН был предложен и разработан источник эталонной сферической волны на основе одномодового оптического волокна с зауженной до субволновых размеров выходной апертурой (ВИСВ) [16]. Качество дифрагированной волны определяется в классическом опыте Юнга по интерференции света от двух источников. Эксперименты показали, что благодаря выпуклой форме источника, апертура неаберрированной части волны выросла более чем в 2 раза, по сравнению с традиционным отверстием в плоском экране.

Так как на уровне нано- и суб- нанометровых точностей гравитационное поле Земли уже искажает форму оптических элементов, то на основе этого источника в ИФМ РАН разработана линейка интерферометров, позволяющих изучать детали и системы с вертикальной и горизонтальной ориентацией оптической оси. При этом в вертикальном интерферометре рабочие поверхности детали ориентируются так, как они будут установлены в приборе. Интерферометрическая часть установлена в корпусе, позволяющем производить откачку до давления 10^{-2} мм рт.ст.

Базовая оптическая схема и фотография горизонтального интерферометра приведены на рис. 7 и 8. Работа интерферометра по рис. 7 происходит следующим образом. Излучение лазера 10 заводится в одномодовое волокно. Далее свет, распространяясь по волокну, попадает в оптический блок 9, содержащий оптоволоконный делитель пучка и двухканальный поляризационный котроллер. В поляризационном контроллере благодаря изгибным механическим напряжениям на выходе ВИСВ 4 устанавливается линейная поляризация излучения, что обеспечивает максимальный контраст ин-

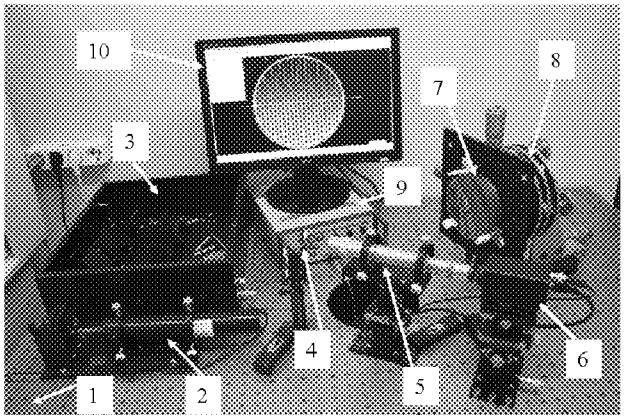


Рисунок 8.
Фотография интерферометра: 1 - виброизолирующий стол; 2 - лазер с системой заводки излучения в оптоволокно; 3 - оптический блок с поляризационным контроллером на 2 канала и с оптоволоконным делителем пучка; 4 - ВИСВ с пьезо-модулятором; 5 - наблюдательная система; 6 - CCD камера; 7 - исследуемый образец; 8 - стол для образца; 9 - контроллер пьезо-привода; 10 - монитор компьютера

терференционной картины. Оптоволоконный делитель пучка позволяет разделить исходный пучок на два когерентных, что востребовано, например, при изучении аберраций линз и объективов. В результате дифракции света на выходе оптоволокна (диаметр свободной от металлизации области около 0,2 мкм) в пространстве распространяется волна, чья фазовая поверхность представляет собой "идеальную" сферу. Часть фронта от ВИСВ попадает на исследуемую поверхность 7, другая же часть - в наблюдательную систему 3. Отраженный от исследуемой поверхности рабочий фронт фокусируется на плоское зеркало 5. Отразившись от плоского зеркала он попадает в наблюдательную систему, где интерферирует с эталонным сферическим фронтом. Интерферограмма регистрируется с помощью CCD камеры 2 и обрабатывается специальной программой FPro на компьютере 1. После усреднения по нескольким измерениям восстанавливается двумерная карта отклонений поверхности от ближайшей сферы.

В интерферометре применяются два лазера: He-Ne (длина когерентности около 30 м) и Nd:YAG, 2-я гармоника, длина когерентности несколько метров. Преимущество зеленого лазера - большая точность измерений.

Благодаря применению оптоволоконных технологий и малым размерам ВИСВ и CCD камеры, интерферометрическая часть может быть легко встроена в оптический прибор, например, в литограф, для окончательной настройки и аттестации проекционного объектива.

Для аттестации различных оптических элементов и систем с помощью интерферометра со сферической волной сравнения были разработаны схемы, о которых подробнее можно узнать в [6,17].

Интерферометр не требует применения корректоров волнового фронта при изучении вогнутых сферических и слабо асферических (как правило, отклонение от ближайшей сферы до 1 мкм) поверхностей, объективов и эллипсоидов. В первом случае используется базовая схема. В случае объектива используются два ВИСВ, установленные в плоскостях предмета и изображения. При изучении эллипсоидов ВИСВ помещаются в его фокусы. Для изучения формы плоской поверхности в качестве корректора волнового фронта можно использовать предварительно аттестованную сферическую поверхность. Для изучения выпуклых поверхностей дополнительно, между ВИСВ и исследуемой деталью устанавливается объектив, преобразующий расходящийся сферический фронт в сходящийся. Изучения аберраций телескопов с помощью ИДВС производится в автоколлимационной схеме, с использованием отражения от плоской, предварительно аттестованной, поверхности [6].

Более сложная ситуация наблюдается при изучении сильно асферических поверхностей. Практика показала, что в большинстве случаев при изучении вогнутой асферики корректор волнового фронта представляет собой толстую выпукло-вогнутую линзу со сферическими поверхностями. Для выпуклой асферики - лучше использовать вогнутое асферическое зеркало. Описанные в работе интерферометры уже применяются в ИФМ РАН. С их помощью впервые в России разработан проекционный объектив с асферическими поверхностями 6-го порядка (отклонение от сферы около 7 мкм) для нанолитографии на длине волны 13,5 нм. Объектив имеет аберрации $r.m.s. < 2$ нм [1], сделана эталонная сферическая поверхность с числовой апертурой NA=0,25 и отклонением от сферы $r.m.s. = 0{,}6$ нм [18]. Приборы используются при создании рентгеновских телескопов для изучения Солнца, которые должны обеспечивать пространственное разрешение на поверхности менее 100 км.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье описаны исследования и разработки ИФМ РАН в области метрологии шероховатости и формы оптических поверхностей. Авторы хотели обратить внимание на следующие основные моменты.

Во-первых, существуют серьезнейшие проблемы с адекватной метрологией шероховатостей оптических поверхностей. Несмотря на широкое распространение, ОИМ не обеспечивает адекватного измерения шероховатости сверхгладких поверхностей. Разработчики аппаратуры, где требуются атомарно-гладкие оптические поверхности, должны это учитывать и при аттестации использовать, как минимум АСМ, а лучше дополнить эти измерения данными ДРРИ. При этом надо четко понимать, что для прецизионного изучения кривых поверхностей требуются специализированные АСМ с гониометром.

Нерешенной до конца проблемой является адекватное измерение шероховатостей в диапазоне латеральных размеров 15-1000 мкм, так как АСМ уже не работает, ОИМ - в узком интервале, а ДРРИ может применяться только для плоских образцов. В настоящее время мы изучаем возможность использования для этих целей ИДВС.

Во-вторых, в ИФМ РАН разработана линейка ИДВС, обеспечивающих субнанометровую точность измерений формы поверхностей и аберраций оптических систем. Благодаря применению оптоволоконных технологий они обладает предельно малыми размерами и могут быть встроен в большинство оптических приборов для контроля аберраций. Разработаны методики измерений основных типов оптических элементов и систем.

В-третьих, приведенные данные по шероховатостям подложек от различных производителей показывают, что в России имеются технологии полирования мирового уровня. Наилучшие результаты получены при полировании плавленого кварца. Шероховатости подложек из ситалла и Zerodur уступают кварцевым более чем в 1,5 раза. Эти исследования выявили и другую проблему, сильную невоспроизводимость результатов у отечественных производителей. По нашему мнению это, главным образом, связано с недостаточно адекватным подходом при аттестации шероховатостей подложек. В частности ни один из известных нам производителей не использует АСМ для конечной аттестации элементов, что, на наш взгляд, является недопустимым в современных условиях.

В заключении авторы выражают благодарности Министерству науки и образования России, ЦКП "Физика и технологии микро- и наноструктур" при ИФМ РАН, ФИ РАН им. П.Н. Лебедева и ЦНИИмаш за частичное финансирование работ. Работа так же поддержана грантами РФФИ 14-02-00549, 13-02-97098, 13-02-97045.

Список литературы:

1. *Барышева, М.М.* Прецизионная изображающая многослойная оптика для мягкого рентгеновского и экстремального ультрафиолетового диапазонов /М.М. Барышева, А.Е. Пестов, Н.Н. Салащенко, М.Н. Торопов, Н.И. Чхало // Успехи физических наук. - т.182. - № 7. - 2012. - С.727-747.

2. *Dinger U.* Mirror substrates for EUV lithography: progress in metrology and optical fabrication technology / Dinger, U., Eisert, F., Lasser, H., Mayer, M., Seifert, A., Seitz, G., Stacklies, S., Stickel, F.-J., Weiser, M. // Proc. SPIE. - 2000. - v. 4146. - p. 35-46.

3. *Борн М.* Основы оптики / М. Борн, Э. Вольф. Пер. с англ. // М.: Наука. - 1973. - Изд.2.

4. *Glushkov D.* Multilayer mirror and lithographic apparatus / D. Glushkov, V.Y. Banine, L.A. Sjmaenok, N.N. Salashchenko, N.I. Chkhalo // WO 10091907 A1. 19.08.2010.

5. *Asadchikov V.E.* Application of X-ray scattering technique to the study of supersmooth surfaces / V.E. Asadchikov, I.V. Kozhevnikov, Yu.S. Krivonosov Yu.S., R. Mercier, T.H. Metzger, C. Morawe, E. Ziegler / / Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. - 2004. - v. 530. - p575-595.

6. *Barysheva M.M.* Mirrors with a Sub-Nanometer Surface Shape Accuracy / M.M. Barysheva, N.I. Chkhalo, A.E. Pestov, N.N. Salashchenko, M.N. Toropov, M.V. Zorina // Fundamentals of Picoscience, Ed. Klaus D . Sattler, CRC Press - 2013. Print ISBN: 978-1-4665-0509-4. -p. 595-615.

7. *Blunt R.* White light interferometry - a production worthy technique for measuring surface roughness on semiconductor wafers // CEMANTECH Conference, Vancouver, Canada. - 2006. April 24-27. - p.59-62.

8. *Azarova V.V.* Measuring the roughness of high-precision quartz substrates and laser mirrors by angle-resolved scattering / V.V. Azarova, V.G. Dmitriev, Yu. N. Lokhov, and K.N. Malitskii // Journal of Optical Technology. - 2002. - v. 69 is. 2. - p. 125-129.

9. *Салащенко Н.Н.* Физические ограничения точности измерений интерферометров с дифракционной волной сравнения / Н.Н. Салащенко, М.Н. Торопов, Н.И. Чхало. // Известия РАН. Серия физическая. - 2010. - т.74. №1. - с. 62-65.

10. *Barysheva M.M.* Problem of roughness detection for supersmooth surfaces / M.M. Barysheva, B.A. Gribkov, Yu. A. Vainer, M.V. Zorina, A.E. Pestov, Yu. Ya. Platonov, D.N. Rogachev, N.N. Salashchenko, N.I. Chkhalo // Proc. SPIE. - 2011. -.v. 8076. -p. 80760M-1-10.

11. *Барышева М.М.* Применение мягкого рентгеновского излучения для исследования сверхгладких оптических поверхностей и многослойных элементов / М.М. Барышева, Ю.А. Вайнер, Б.А. Грибков, М.В. Зорина, А.Е. Пестов, Н.Н. Салащенко, Н.И. Чхало, А.В. Щербаков // ЖТФ.- 2013. -т. 83. в. 9. -с. 134-142.

12. Website Zygo Corporation.// http:// www.zygo.com

13. *Sommargren G.E.* Diffraction methods raise interferometer accuracy / G.E. Sommargren // Laser Focus World.-1996. - v. 8, -p. 61-71.

14. *Otaki K.* Development of the point diffraction interferometer for extreme ultraviolet lithography: Design, fabrication, and evaluation / K. Otaki, K.. Ota, I. Nishiyama, et al. // J. Vac. Sci. Technol B. - 2002. - v. 20. is. 6. - p. 2449-2458.

15. *Chkhalo N.I.* A plane wave diffraction on a pinhole in a film with a finite thickness and real electrodynamic properties / N.I. Chkhalo, I.A. Dorofeev, N.N. Salashchenko, M.N. Toropov, // Proc. SPIE. - 2008, - v. 7025, - p.702507 (7p).

16. *Chkhalo N.I.* A source of a reference spherical wave based on a single mode optical fiber with a narrowed exit aperture / N.I. Chkhalo, A.Yu. Klimov, V.V. Rogov, N.N. Salashchenko, M.N. Toropov // Rev. Sci. Instrum. - 2008. - V.79. - P.033107.

17. *Клюенков Е.Б.* Измерение и коррекция формы оптических элементов с субнанометровой точностью / Е.Б. Клюенков, А.Е. Пестов, В.Н. Полковников, Д.Г. Раскин, М.Н. Торопов, Н.Н. Салащенко, Н.И. Чхало // Российские нанотехнологии. - 2008. - Т.3.№9-10. - с. 116-214.

18. *Chkhalo N.I.* Manufacturing and Investigating Objective Lens for Ultrahigh Resolution Lithography Facilities / N.I. Chkhalo, A.E. Pestov, N.N., Salashchenko and M.N. Toropov // Lithography, Michael Wang (Ed.), - 2010. - ISBN: 978-953-307-064-3, INTECH, Available from: http:// sciyo.com/articles/show/title/manufacturing-and-investigating-objective-lens-for-ultrahigh-resolution-lithography-facilities.

ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНОГО АЭРОКОСМИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

КОЗОДЕРОВ В.В. - **доктор физико-математических наук, КОНДРАНИН Т.В.** - **доктор физико-математических наук, ДМИТРИЕВ Е.В.** - **кандидат физико-математических наук**

Музей землеведения МГУ имени М.В.Ломоносова
Московский физико-технический институт (государственный университет)
Институт вычислительной математики РАН

E-mail: vkozod@mes.msu.ru, kondr@kondr.rector.mipt.ru, yegor@mail.ru

В предлагаемой вычислительной системе обработки данных самолётного зондирования высокого спектрального и пространственного разрешения отработаны основные элементы распознавания природно-техногенных объектов на основе съёмок с помощью гиперспектральной аппаратуры разработки НПО "Лептон". Показаны основные этапы реализации вычислительной системы и примеры решения рассматриваемых прикладных задач.

Ключевые слова: обработка гиперспектральных изображений, вычислительная система.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие приложений гиперспектрального аэрокосмического зондирования состоит не только в создании соответствующей аппаратуры, наземных комплексов приёма и обработки данных, но и в разработке нового программно-алгоритмического обеспечения современных интеллектуальных систем извлечения полезной информации из исходных данных (data mining). Существующие средства обработки данных дистанционного зондирования, поставляемые в основном зарубежными фирмами, задействуют стандартные вычислительные операции: цветокодирование изображений; классификация объектов; построение гистограмм распределения разных классов объектов по относительным градациям исходных яркостей; подсчет площадей, занятых разными классами и т.п.

Следует упомянуть об определённой иллюзии, что стандартное программное обеспечение можно использовать как "черный ящик" для любых приложений. Однако на практике это не так. При классификации изображений с высоким спектральным разрешением важнейшим этапом является решение задачи оптимизации спектральных каналов. При определении продуктивности растительного покрова требуется построение эмпирических зависимостей между вегетационными индексами, либо структурными параметрами, определяемыми на основе данных дистанционного зондирования, с биологическими параметрами. Эти задачи на сегодняшний день находятся в процессе научного обсуждения. Также следует отметить, что получаемая информационная продукция, как правило, ориентирована на использование определенных систем дистанционного зондирования. При переходе к аппаратуре с другими характеристиками обычно требуется изменение алгоритма обработки.

Таким образом, наибольшую перспективу представляют собой системы с открытым программным кодом, реализованные на популярных в научном сообществе языках программирования. Создаваемая оригинальная вычислительная сис-

тема обработки данных гиперспектрального зондирования разрабатывается в первую очередь для обработки данных отечественной гиперспектральной аппаратуры производства НПО "Лептон", г. Зеленоград. Лётные испытания аппаратуры проводятся силами специалистов Тверского государственного университета.

На данном этапе создан макет такой системы, которая получила название Hyperspectral Data Processing System (HyperDPS). Исходные данные аппаратуры представляются в специализированном формате WSP, который позволяет независимым образом поблочно записывать различные информационные потоки, поступающие в процессе съёмки.

Система реализована на базе языка программирования Matlab и может быть адаптирована для работы в операционных системах Windows XP/Vista/7 и Linux. Также существует возможность оптимизации используемых вычислительных процедур для многопроцессорных компьютеров.

Новизна принятых научно-технологических решений доказана патентом Российской Федерации на способ распознавания образов природно-техногенных объектов и оценки параметров их состояния по гиперспектральным данным аэрокосмического зондирования [1]. В государственном реестре Российской Федерации зарегистрированы также отдельные компьютерные программы, реализующие разработанные новые подходы к обработке данных гиперспектрального зондирования [2-4].

ОСНОВНЫЕ ЭТАПЫ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

Процесс обработки данных с помощью системы HyperDPS включает в себя следующие основные этапы.

1. Преобразование исходных данных.

На данном этапе можно выделить отдельные потоки из исходного файла в WSP-формате и преобразовать их в одно из стандартных представлений. Таким образом могут быть получены уровни сигнала ПЗС матрицы, калиброванные гиперспектральные изображения, информация о приборе и условиях съемки, данные таймера, GPS информация. Специализированный формат WSP был разработан для решения следующих задач: 1) объединения нескольких потоков данных, поступающих одновременно, и записи их в один файл; 2) обеспечения совместимости файлов WSP и программного обеспечения при добавлении или исключении потоков данных. Калиброванные данные представляют собой значения спектральной плотности энергетической яркости (СПЭЯ, Вт/(см^2 мкм стер)), представленные в виде бинарных файлов, записываемых в порядке по каналам и по кадрам (для обеспечения быстрого считывания различных слоев информации). "Сырые" данные в виде уровней аналого-цифрового преобразователя (АЦП) содержат дополнительно так называемые "темновые" каналы гиперспектрометра, по которым можно получить представление об изменениях собственного шума ПЗС матрицы в процессе съемки. Предусмотрена возможность программного биннинга спектральных каналов. Данная операция позволяет сделать спектральное разрешение прибора более равномерным и улучшить соотношение "сигнал/шум" в коротковолновых каналах аппаратуры.

В информацию о приборе входят калибровочная матрица, центральные длины волн и разрешение спектральных каналов. Эта информация может быть представлена как в текстовом формате, так и в специализированном формате Matlab. GPS информация сохраняется в структуре языка Matlab. Эта информация может быть преобразована в системе HyperDPS в стандартный формат KML, который понимают современные стандартные ГИС, в частности, Google Earth или SASGIS. Информация о треке и значения таймера сохраняются в текстовом виде.

2. Коррекция и трансформация данных.

На данном этапе осуществляется препроцессинг калиброванных гиперспектральных данных. Реализована методика параметрической и непараметрической коррекции полос канальных изображений. Полосы могут возникать вследствие микро-загрязнений спектральной щели, незначительных нарушений юстировки и эффекта виньетирования. Радиационная коррекция позволяет в автоматическом режиме определить возможные сдвиги линии поглощения кислорода (762 нм) при наличии на сцене зелёной растительности. Трансформация данных включает в себя

объединение и отбор спектральных каналов, нормализацию данных на соответствующие интегральные значения СПЭЯ, преобразование спектров к максимальной "насыщенности", редукцию пространственного разрешения и выбор прямоугольной подобласти исходного изображения.

3. На этапе географической привязки каждому пикселю гиперспектрального изображения сопоставляется значение географической координаты. Также может производиться сшивка смежных самолётных треков гиперспектрального зондирования. Здесь следует отметить, что координатная привязка данных гиперспектрального аэрозондирования является одной из основных задач их обработки. На сегодняшний день для решения данной задачи были разработаны различные подходы, реализованные в виде программного обеспечения для персональных компьютеров. Среди них следует выделить основные системы, которые нашли наибольшее научно-практическое применение:

- ENVI (ENvironment for Visualizing Images) - программный инструмент для визуализации, коррекции и анализа аэрокосмических изображений, разработанный корпорацией ITT (Болдер, США);

- ArcGIS - семейство программных продуктов (ArcView, ArcEditor, {ArcInfo: ArcMap ArcGlobe, ArcScene} и т.д.), используемых для создания, управления, анализа и визуального представления пространственных данных (в том числе ортотрансформация и координатная привязка), разработанных компанией ESRI (Редландс, США);

- MapINFO (Basic, Professional) - мощный программный картографический инструмент, разработанный корпорацией MapInfo (Нью-Йорк, США);

- ERDAS Imagine - растровый редактор, предназначенный для обработки данных дистанционного зондирования, разработанный компанией ERDAS Inc (США).

Указанные программные решения являются коммерческими продуктами и характеризуют продвижение мирового научно-технического сообщества в этом направлении. Создавая оригинальную систему обработки данных гиперспектрального зондирования, целесообразно использовать их опыт в этой части создания программной среды.

4. Этап визуализации позволяет просмотреть все канальные изображения сканируемой поверхности, построить синтезированные трехканальные изображения, в том числе RGB, построить двумерные графики СПЭЯ отдельных пикселей. Открываются возможности предварительного визуального сопоставления гиперспектральной информации с имеющимися картами зондируемой территории и спектральными базами данных.

5. Реализована возможность оконтуривания интересующих нас районов и выделения соответствующей спектральной информации. Данный этап позволяет создавать базы данных, необходимые для обучения алгоритмов распознавания объектов по спектральным признакам.

6. Пространственный и спектральный анализ данных. Распознавание объектов.

Данный этап содержит разрабатываемые процедуры тематической обработки. Здесь включены процедуры анализа гиперспектральных изображений, основанные на методах иерархической и оптимизационной кластеризации. Результатом данного анализа является разбиение исходного изображения на области, в которых спектры пикселей являются наиболее схожими в выбранной метрике. Кластерный анализ не требует априорной информации в виде множества пар элементов пространств признаков и наименований объектов. Интерпретация результатов подразумевает сопоставление с имеющейся картографической продукцией.

Пространственный анализ включает в себя процедуры выявления сегментов изображений со схожими текстурами. Для его реализации используются различного рода фильтры растровых изображений, представленных в градациях серого, алгоритмы выявления граней и идентификации односвязных областей. Для обработки выбираются каналы, в которых интересующие нас объекты имеют высокий взаимный контраст. Результаты пространственного анализа используются для автоматизации установки априорных вероятностей распознаваемых классов.

Спектральный анализ состоит в идентифика-

ции каждого пикселя обрабатываемого гиперспектрального изображения как принадлежащего одному из рассматриваемых объектов или лежащего в числе прочих. Идентификация производится на основе сравнения характерных особенностей СПЭЯ как функции длины волны. Реализованы возможности бинарной и многоклассовой классификации. Первая позволяет разделить пиксели на категории "объект" - "окружение", вторая же позволяет идентифицировать несколько объектов на фоне прочих объектов. Результаты бинарной и многоклассовой классификаций могут не иметь полного однозначного соответствия. Результаты бинарной классификации, как правило, более подвержены ошибкам ложной тревоги и обычно используются для уточнения границ объектов, оконтуриваемых для создания обучающего спектрального ансамбля. Результаты многоклассовой классификации являются конечным выходным продуктом решения задачи распознавания. Итогом данного этапа является распознавание природно-техногенных объектов по спектральным и текстурным признакам.

Для сегментов, классифицированных как "лесная растительность", проводится восстановление характеристик биологической продуктивности. Вначале решается обратная задача взаимодействия солнечного излучения с природными средами, в результате чего восстанавливаются проекционные характеристики лесного полога. Далее на основе параметризаций восстанавливаются биомасса фракций и чистая первичная продукция углерода.

Пример работы системы HyperDPS представлен на рис. 1. Методология создания пользовательского интерфейса состоит в построении максимально удобных и интуитивно понятных компоновок управляющих элементов для каждой из описанных выше задач. На рис. 1 дана компоновка для этапа визуализации гиперспектральных данных одной из обрабатываемых сцен. Пользователь имеет возможность построить RGB изображение в стандартном базисе или указать свой, настроить цветовой баланс, яркость и контрастность, масштабировать изображение и анализировать гистограмму цветовых яркостей.

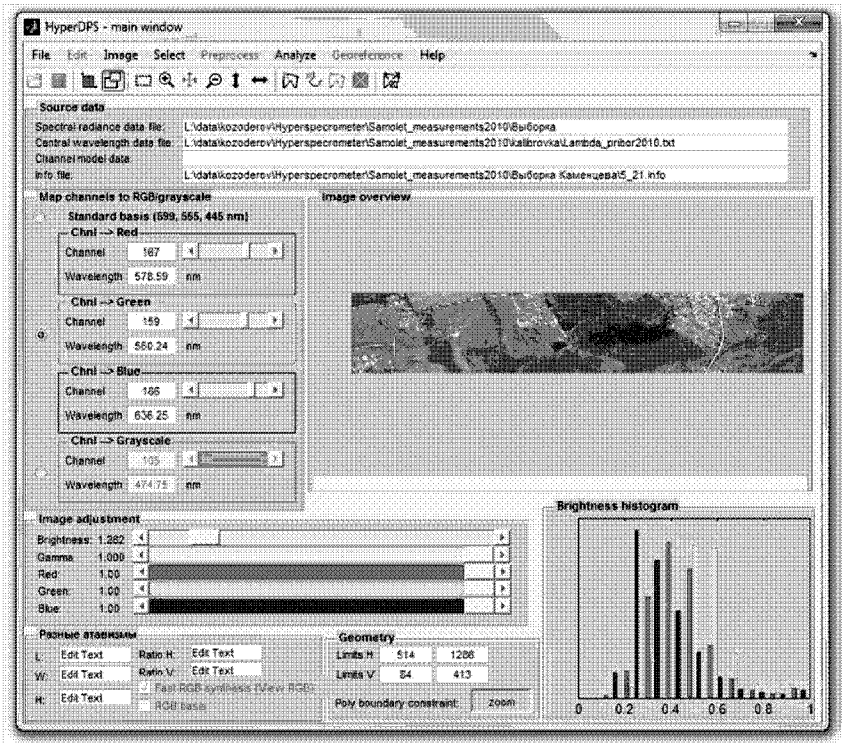


Рисунок 1.
Система HyperDPS в режиме отображения синтезированного RGB изображения одного из тестовых участков Тверской области

ФОРМИРОВАНИЕ БАЗЫ ДАННЫХ СПЕКТРАЛЬНЫХ ОБРАЗОВ ОБЪЕКТОВ

Важный подготовительный этап обработки данных гиперспектрального зондирования - получение информации о регистрируемых спектрах при обучении используемого классификатора (вычислительной процедуры) по тестовым выборкам для последующей экстраполяции полученных ансамблей данных на все элементы обрабатываемого изображения. Формирование базы данных спектральных образов объектов проиллюстрируем на примере двух участков облёта тестовой территории: с преобладанием лесных экосистем разного породного состава и с преобладанием открытой водной поверхностью (река Волга). Речь идёт о том, что создаваемые базы данных распознавания природно-техногенных объектов по спектральным признакам зависят от информационных свойств используемой аппаратуры гиперспектрального зондирования. Типичная процедура распознавания состоит из оконтуривания "объектов интереса" (заданных классов объектов), визуализации спектров внутри этих классов с нахождением среднего спектра и его меры изменчивости и использовании заданной функции для реализации процедуры обучения, увязывающей используемый набор спектральных признаков и объём обучающей выборки. Процедура визуализации спектров способствует наглядному отображению оконтуренной области (её принято называть "регионом").

RGB - синтезированные изображения рис. 2 характеризуют каждый из двух отмеченных тестовых участков. Первое изображение представлено цифровой матрицей размером 5000 x 500 пикселей выбранной территории самолётной съёмки (а). Второе изображение дается матрицей 1600 x 500 пикселей практически в то же время съёмки (б). Приведем единичные спектры и ансамбли спектров природных объектов, полученных для данной сцены, с указанием их местоположений (цифры по горизонтали и вертикали).

На рис. 3а показано исходное изображение с помеченным на нем регионом, относящимся к средневозрастному дубу; выделен спектр отдельного пикселя, характеризующего освещённую крону (координаты X и Y характеризуют этот пиксель), и показан ансамбль спектров внутри помеченного региона. Приведённые на рис. 3а данные демонстрируют, что для выбранного объекта (как и для большинства других широколиственных пород деревьев) характерно относительно равномерное поведение спектра в области длин волн 400-500 нм. Измерения в дан-

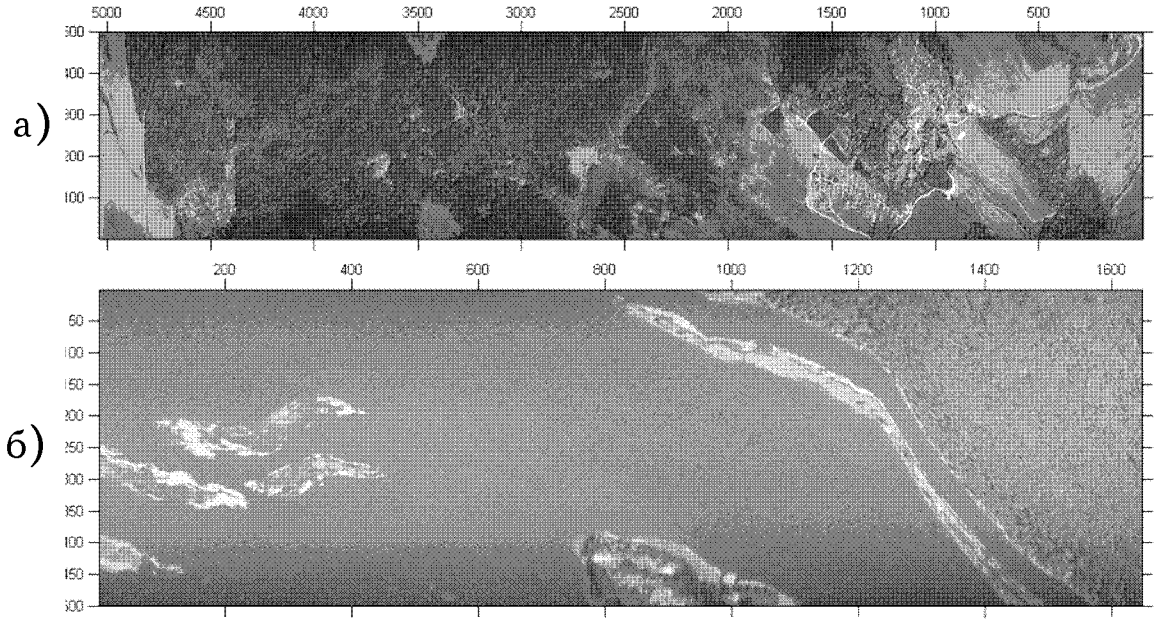


Рисунок 2.
RGB-синтезированные изображения двух участков:
с преимущественно лесной растительностью (а)
и с преимущественно открытой водной поверхностью (б)

ном диапазоне имеют существенные высокочастотные колебания, которые обусловлены шумом ПЗС матрицы прибора. Это происходит из-за того, что спектральные каналы в данном диапазоне достаточно узкие (порядка 0.5-1 нм) и, при выбранном времени накопления, измеряемый сигнал не достаточно сильно отличается от "уровня черного". Выбрать большее время накопления для данной аппаратуры не представляется возможным, поскольку при этом произойдет насыщение сигнала в ближнем инфракрасном диапазоне. Как видно из данных рис. 3а, при переходе к длинам волн 550 нм имеет место достаточно резкое возрастание спектров. Характерный минимум в красной области соответствует поглощению солнечного излучения хлорофиллом, основным пигментом фотосинтезирующей растительности. Другой существенный минимум в ближней инфракрасной области (935 нм) соответствует поглощению водяным паром атмосферы. Вообще следует отметить, что локальные узкие минимумы, присутствующие в ближнем инфракрасном диапазоне обусловлены искажающим влиянием атмосферы, а не вариациями отражательной способности объекта.

Спектры елового выдела, приведенные на рис. 3б, выявляют характерный дополнительный локальный максимум в области длин волн около 450 нм. Для еловой кроны также характерно более интенсивное поглощение солнечного излучения в ближнем инфракрасном диапазоне. Значительно возрастает разброс спектров по интегральной величине. Важно отметить, что последнее является отличительной особенностью хвойных деревьев. Действительно, для деревьев с плотной кроной и крупными листьями значительная часть солнечного излучения отражается от поверхности кроны и не претерпевает многократного рассеяния во внутрикроновом пространстве. Напротив, для хвойных деревьев характерно более глубокое проникновение в крону. При этом более сильное поглощение света усиливается при многократном рассеянии. При наличии информации об интенсивности падающего излучения и локальном состоянии атмосферы данный фактор является существенным для успешного разделения лиственных и хвойных пород деревьев.

Данные рис. 3в дают представление о спектрах песчаного грунта. Участок на рис. 3в соответствует небольшому карьеру. Растительность присутствует, но в небольшом количестве, так что полоса поглощения хлорофилла не проявляется. Имеющаяся изменчивость спектров в основном обусловлена изменениями яркости грунта.

Зарегистрированные спектры для двух типов водной поверхности (стоячая вода, рис. 3г и проточная вода, рис. 3д) отличаются уменьшением амплитуды этих спектров в коротковолновой области в сравнении со спектрами грунтов, но эти амплитуды в данной области сравнимы с теми, которые характерны для лиственной и хвойной растительности. Данные рис. 3г и рис. 3д относятся к изображениям рис. 2а (рыбные пруды) и рис. 2б (река Волга), соответственно. Между собой спектры рис. 3г и рис. 3д отличаются тем, что амплитуда спектра воды в пруду начинается с величин 0.12-0.16 Вт/(см^2 мкм стер)) на длине волны 400 нм, в то время как эта амплитуда для воды в реке стартует фактически с нуля на данной длине волны. При этом вода в пруду, обозначая колебания спектров при переходе в длинноволновую область, демонстрирует убывание амплитуды спектров лишь в 4 раза на длинах волн 900-1000 нм. В речной воде спектры убывают до минимальных значений уже при длинах волн менее 900 нм, т.е. спектры проточной воды в реке носят более резкий характер в сравнении со спектрами стоячей воды прудов.

На рис. 3е для сравнения приведены спектры водных растений (скоплений фитопланктона, просвечивающихся на мелководье реки), характерных для изображения рис. 2б. Можно видеть, что эти спектры близки к спектрам рис. 3а иллюстрируемого примера широколиственных лесов. Но заметны и отличия: более резкое изменение амплитуды спектров в коротковолновых каналах (максимум на длине 550 нм на рис. 3е в 1.5 раза больше в сравнении с аналогичным максимумом на рис. 3а); минимальные значения этих величин в полосе хлорофилла близки между собой.

Для сравнения на рис. 3ж показаны спектры для травянистых растений рис. 3а сухих местообитаний. Из сравнения этих данных следует,

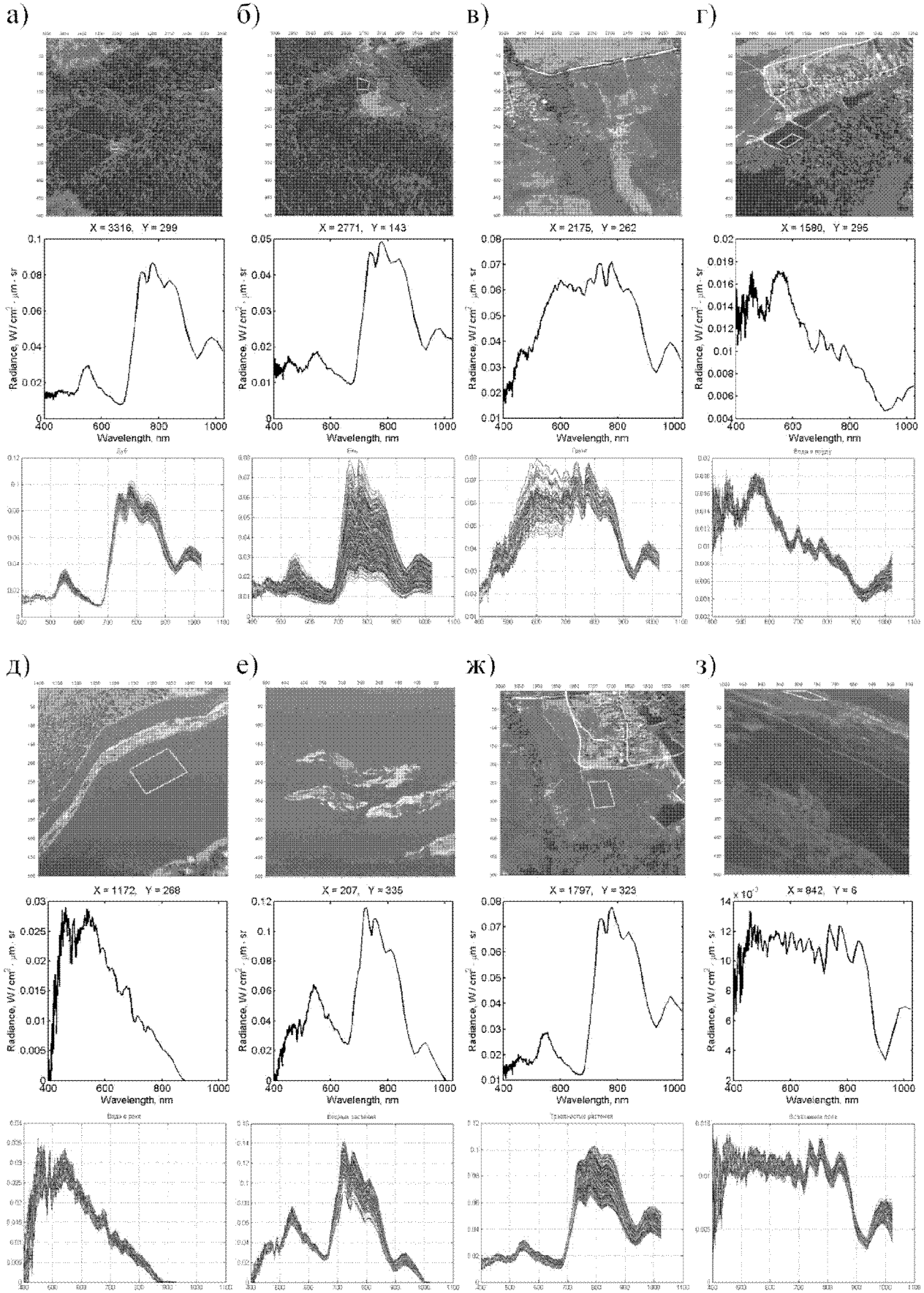


Рисунок 3.

Изображения частей самолётных треков, спектры отдельного пикселя из оконтуренной области и ансамбль спектров внутри этой области. Объекты: освещённая крона средневозрастного дуба (а); зрелая ель (б); песчаный карьер (в); водная поверхность пруда (г); водная поверхность реки Волга (д); водоросли (е); луговая трава (ж); распаханная почва (з)

что в длинноволновой области (длины волн более 700 нм) спектры травянистых сообществ и водорослей на водной поверхности реки меньше различаются, чем в коротковолновой области (400-600 нм).

Заканчивая обсуждение созданной базы данных спектральных образов разных объектов, приведем пример рис. 3з спектров распаханной почвы. Распределение спектральной яркости в этом случае достаточно равномерное во всем рассматриваемом спектральном диапазоне. Минимум в ближнем инфракрасном диапазоне связан с искажающим влиянием атмосферы. В целом изменения общей яркости достаточно незначительны, однако в диапазоне 400-550 нм присутствуют существенные биения амплитуды, которые скорее всего связаны с низким уровнем сигнала в этой области (с шумами аппаратуры).

Сводный рис. 4 характеризует спектральный ход всех перечисленных объектов с добавлением спектров полностью затенённых объектов. На рис. 4 приведены исходные значения СПЭЯ выделенных групп объектов и эти же значения, нормированные на интегральную яркость каждой группы. Такое нормирование необходимо для распространения собранной базы данных на объекты других сцен, полученных с использованием рассматриваемой гиперспектральной аппаратуры.

Из сравнения данных рис. 4 следует, в частности, общее представление о разделимости выбранных объектов по спектральным признакам. Полученные результаты показывают, что такие разнородные объекты, как вода, почва и растительность, имеют очевидные отличия в их спектральном ходе. Более значительные трудности

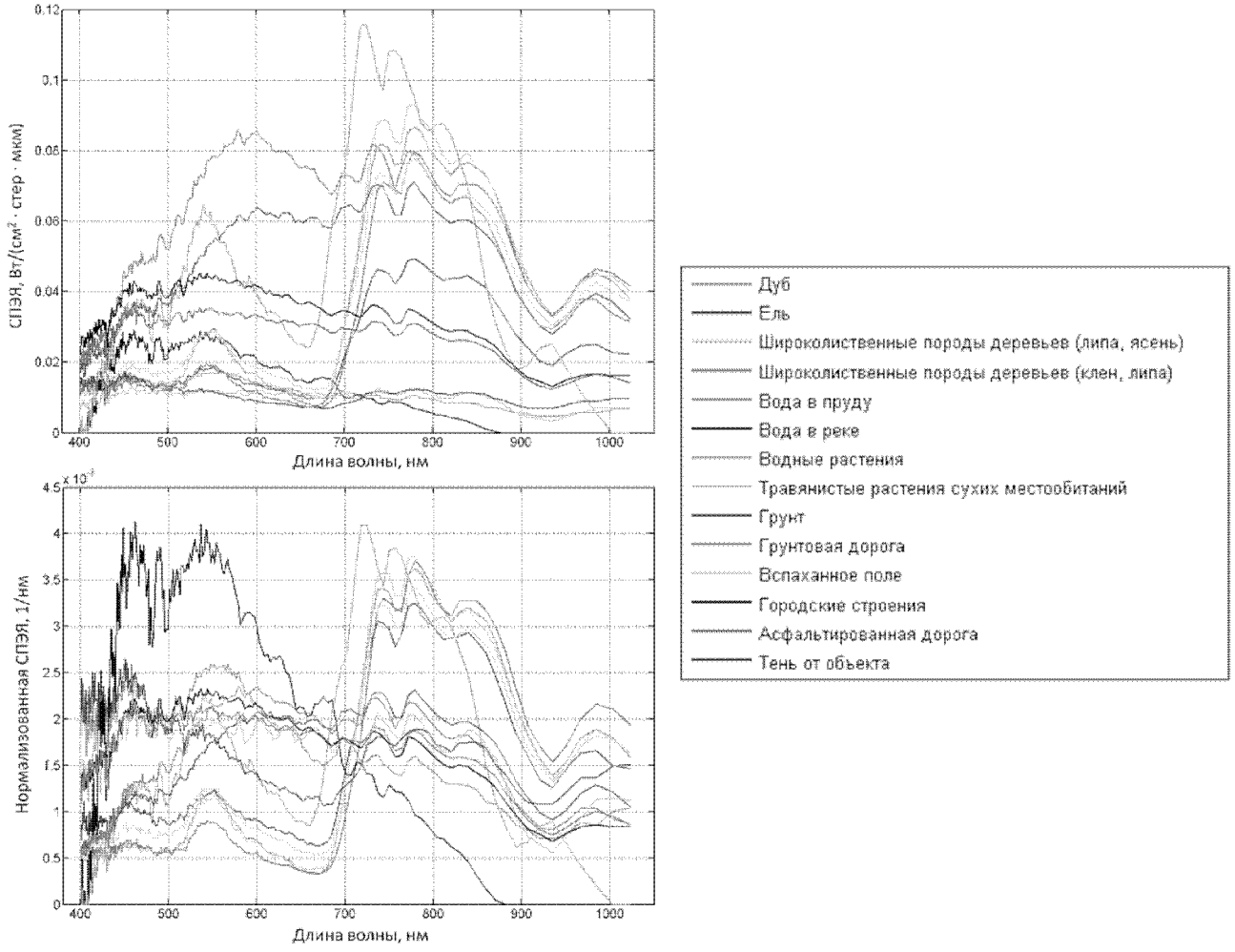


Рисунок 4.

Характерные распределения исходных величин СПЭЯ иллюстрируемых объектов; словесное описание 14 выбранных объектов рассматриваемых сцен; величины СПЭЯ для спектров, нормированных на их интегральные значения для соответствующих объектов

можно предвидеть при разделении различных типов лесной растительности. В нормированных спектрах эффект затенения до некоторой степени устраняется, что позволяет проводить сравнение спектров по форме. При этом следует учитывать, что спектр части одного объекта, затенённой другим объектом, может иметь существенные отличия по форме по сравнению со спектрами освещённой части объекта.

РАСПОЗНАВАНИЕ ЛЕСНОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ ПО ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНЫМ ДАННЫМ ВЫСОКОГО ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ

Распознавание по спектральным признакам основывается на вычислительных процедурах разделения заданных априори классов в многомерном признаковом пространстве. Для изображений высокого пространственного разрешения требуется также контекстуальное распознавание текстур. Контекст характеризуется воздействием соседних пикселей. Например, объект "лесная растительность определенного породного состава" относится к одному классу до тех пор, пока не появится граница с другим объектом. При массовой обработке гиперспектральных изображений "свечение" отдельных пикселей заданного класса может восприниматься как шум, учет контекста в этом случае приводит к повышению общей точности распознавания, но отдельно стоит задача обнаружения таких специфических объектов. Аналогично "всплески" в спектральном ходе отдельных пикселей (каждый спектр пикселя формируется с помощью весовых функций составных элементов объектов - end-members) относительно окружающего фона могут использоваться для обнаружения таких объектов по спектральным признакам с учётом отношений "сигнал/шум" аппаратуры.

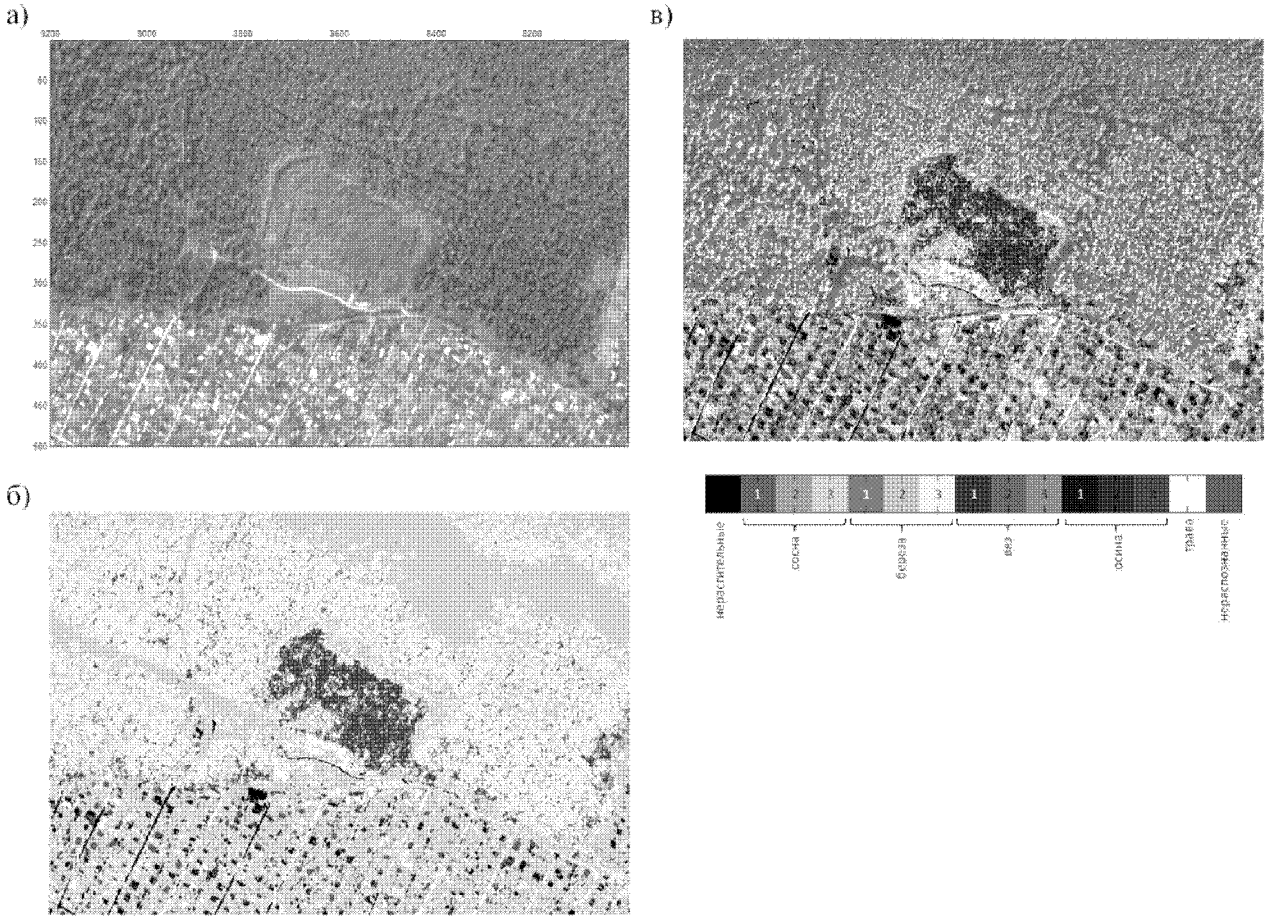


Рисунок 5.

Исходное RGB-синтезированное изображение (а) и результаты его распознавания без разделения исходных пикселей, относящихся к лесному покрову, на освещённые и затенённые части (б) и с учётом этих затенений в виде трёх градаций (в): 1 - полностью затенённые участки кроны, 2 - наполовину освещённые и затенённые участки кроны, 3 - полностью освещённые участки кроны

Изображения лесного полога имеют характерную текстуру, которую составляют перемежающиеся освещённые и затенённые участки крон, а также межкроновые просветы. СПЭЯ отражённого излучения освещённых участков определяется в основном оптическими свойствами кроны, текущими атмосферными условиями и высотой Солнца. При этом гиперспектральная аппаратура обеспечивает достаточно хорошее соотношение "сигнал/шум".

Отражение затенёнными участками крон происходит гораздо более сложным образом. Здесь начинает играть роль многократное рассеяние света внутри кроны и спектральные свойства подстилающей поверхности. Кроме того, уровень сигнала ниже, так что влияние собственной шумовой составляющей аппаратуры на формирование СПЭЯ регистрируемого излучения более существенно, чем для пикселей освещённой части кроны.

Была организована специальная лётно-полевая кампания с целью распознавания древостоев одного породного состава, но различного возраста при наличии освещённых и затенённых пикселей на гиперспектральных изображениях высокого пространственного разрешения. Выделы на тестовой территории состояли в основном из сосны и берёзы с присутствием осины. Наибольшее разрешение по возрасту получилось для сосновых древостоев (14 возрастных градаций). В итоге проведения этой части исследования были получены зависимости СПЭЯ от возраста для сосняков и березняков.

Иллюстрируемая на рис. 5 сцена тестовой территории содержит смешанные леса с преобладанием сосны, берёзы и осины, дорожную сеть и территорию садового товарищества. Размер изображения 500 x 1200 пикселей. На рис. 5а представлено RGB-синтезированное изображение, на котором отдельные каналы входят со стандартными весами, принятыми в цифровой колориметрии. На большей части иллюстрируемого фрагмента преобладают березняки, в правой его части - сосняки, в нижней части видны садовые участки, а в центре - осиновые насаждения.

На рис. 5б представлены результаты распознавания породного состава лесной растительности на этом изображении по спектральным признакам. Можно видеть тонкие детали сцены, трудно различимые на исходном синтезированном изображении. Это пример распознавания породного состава в случае, как если бы все деревья были одинаково освещены Солнцем. Ещё более точное распознавание на рис. 5в обеспечивается отмеченным разделением полностью освещённых, полностью затенённых и частично затенённых пикселей. На нижнем рисунке показаны эти 3 градации яркости: 1- затенённая часть кроны, 2 - полуосвещённая, 3 - освещённая. Цветовая шкала соответствует нижнему рисунку. Породный состав деревьев на территории садового товарищества скорее всего ошибочен, поскольку в обучающей базе данных отсутствовала информация о СПЭЯ плодовых деревьев и кустарников. Здания выделяются как нераспознанные объекты, но при необходимости можно произвести дообучение используемого классификатора (вычислительной процедуры), включив эти объекты в общую схему распознавания.

Можно сделать общий вывод, что предлагаемая методика в совокупности с данными самолётной гиперспектрометрии открывают новые возможности распознавания особенностей распределения породного состава и возраста лесных экосистем. При этом используются современные достижения в области физико-математических и технических наук, а также данные наземных обследований выбранной территории для обоснования точности разрабатываемых методов, алгоритмов и расчётных программ обработки гиперспектральных изображений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Создаваемая вычислительная система обработки данных гиперспектрального самолётного зондирования реализует следующие основные этапы: преобразование исходных данных в соответствии с выбранным форматом их отображения при съёмке; коррекция и трансформация данных; географическая привязка; визуализация; пространственный и спектральный анализ данных; распознавание природно-техногенных объектов. Разработан макет аппаратно-программной системы получения и обработки данных самолётного гиперспектрального зондирования на базе аппаратуры производства НПО "Лептон"

и предлагаемой вычислительной системы HyperDPS. Показано формирование базы данных спектральных образов соответствующих объектов. Приведены примеры распознавания лесной растительности разного породного состава и возраста с учётом освещённых и затенённых пикселей, формирующих заданный класс объектов. Целевая функция решаемой прикладной задачи - повышение точности распознавания заданной совокупности классов. Перспективы приложений разработанной системы обработки данных гиперспектрального зондирования в возможности её применения для нужд региональных служб лесного хозяйства.

Исследования проводятся при финансовой поддержке грантов РФФИ 11-07-00382, 11-07-12006_офи_м и ФЦП "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России" на 2009-2013 годы.

Список литературы:

1. *Козодеров В.В.* Способ распознавания образов природно-техногенных объектов и оценки параметров их состояния по гиперспектральным данным аэрокосмического зондирования. Патент на изобретение №2422858. Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 27 июня 2011 г.

2. *Дмитриев Е.В., Каменцев В.П., Каркач А.С., Козодеров В.В.* Программа первичного анализа гиперспектральных изображений и построения обучающих выборок. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2011616810. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 1 сентября 2011 г.

3. *Дмитриев Е.В., Каменцев В.П., Козодеров В.В.* Программа извлечения и коррекции потоковых данных гиперспектрометров производства НПО Лептон. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2013610097. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 9 января 2013 г.

4. *Дмитриев Е.В., Каменцев В.П., Козодеров В.В.* Программа пакетной трансформации гиперспектральных изображений и ансамблей обучающих выборок. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2013610102. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 9 января 2013 г.

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ФОТОМЕТРИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ В СПУТНИКОВОЙ АСТРОНОМИИ

ДРИГА В.В. - **кандидат технических наук,** **КОЛИНЬКО В.И.** - **кандидат технических наук**

Воронежский государственный университет инженерных технологий
ОАО "Красногорский завод им. С.А.Зверева"

E-mail: kolinko@zenit-kmz.ru

В статье рассмотрены вопросы разработки методики оценки качества фотометрической информации, получаемой оптико-электронными средствами спутниковой астрономии. Предложенные методики основаны на положениях теории вероятностей, математической статистики и многокритериального анализа.

Ключевые слова: космические объекты, спутниковая астрономия, фотометрирование.

ВВЕДЕНИЕ

Мониторинг космических объектов (КО), находящихся на орбитах в околоземном космическом пространстве, возможен с помощью оптических или оптико-электронных астрономических средств на основе получения по наблюдаемым КО и радиометрической (фотометрической) и астрометрической информации.

Качество фотометрической информации определяет возможность и достоверность определения различных свойств КО, включаемых в базу данных по результатам проведенного мониторинга. Оценка качества информации может быть осуществлена с помощью методик, основанных на использовании теории вероятностей, положений математической статистики и многокритериального анализа. В статье рассмотрены вопросы разработки методики оценки качества получения фотометрической информации о КО оптико-электронными средствами спутниковой астрономии.

ПОЛУЧЕНИЕ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫМИ СРЕДСТВАМИ ФОТОМЕТРИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О КО

Основными источниками получения фотометрической и астрометрической информации по космическим объектам в околоземном космическом пространстве являются оптические и оптико-электронные астрономические средства (ОЭС), принимающие пассивно рассеиваемое космическим объектом солнечное излучение. Блеск, создаваемый КО, зависит от его характеристик (размера, формы, отражательных характеристики поверхности, параметров движения относительно центра масс) и условий его наблюдения - расстояния до КО, коэффициента пропускания атмосферы и взаимного расположения Солнца, КО и ОЭС.

Космический объект простой геометрической формы создает в апертурной плоскости фотометра освещенность [1]:

$$E_{KA} = \frac{E_C \cdot S(\Theta) \cdot \rho \cdot \tau_a}{\pi \cdot R_{KO}^{\ 2}}, \qquad (1)$$

где E_C - солнечная постоянная, т.е. освещенность, создаваемая Солнцем в окрестностях Земли и равная 135000 люкс;

$S(\Theta)$- видимая освещённая площадь КА, зависящая от фазового угла Θ;

ρ- коэффициент отражения поверхности объекта;

τ_a- коэффициент пропускания атмосферы;

R_{KO} - расстояние от оптико-электронного средства до КО.

Если КО имеет сложную форму, то создаваемую

мая им освещенность будет зависеть от величины видимых освещенных площадей всех составных частей его конструкции и соответствующих им коэффициентов отражения.

Единицей измерения визуального блеска КО в спутниковой астрономии является звездная величина, которая рассчитывается на входе оптической системы на основании измеренного значения создаваемой КО освещенности по формуле:

$$m_{KO} = -14^{m},18 - 2{,}5 \cdot \lg E_{KA}. \qquad (2)$$

Однако, в результате движения КО по орбите и относительно центра масс, а также суточного и годового движения Солнца, блеск КО будет изменяться. В этом случае, при его фотометрировании формируется фотометрическая кривая или функция блеска $m_{KO}(t)$, получаемая на основе первичной обработки измерений единичных значений блеска КО в заданный интервал времени с заданным периодом дискретизации. Она характеризует зарегистрированное во времени изменение отраженного КО светового солнечного излучения.

В процессе фотометрирования реальные сигналы претерпевают искажения, обусловленные как факторами детерминированного характера, допускающие их компенсацию (изменение уровня сигнала, влияние нелинейностей тракта регистрации), так и факторами, имеющими стохастическую природу (шумы тракта, фотоприемника и т.д.).

Обработка фотометрических сигналов (ФМС) может состоять в определении фотометрических признаков КО и включать два этапа (рис. 1):

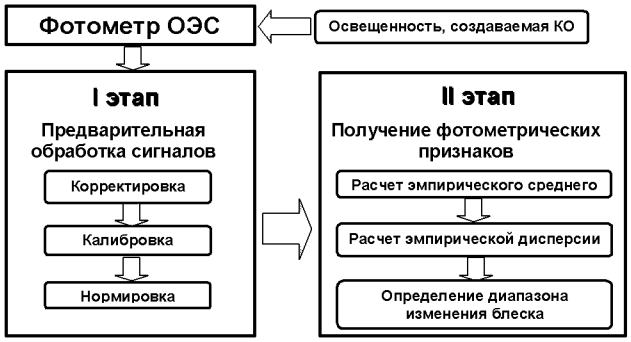


Рисунок 1.
Последовательность и содержание этапов первичной и вторичной обработки измеренных значений фотометрических сигналов

1. Предварительную обработку ФМС (исключение детерминированных и стохастических факторов).

2. Определение фотометрических признаков, обеспечивающее расчет статистических характеристик ФМС.

Предварительная обработка осуществляется на **первом этапе** и включает корректировку, калибровку и нормировку измеренных значений ФМС [2, 3].

Корректировка измеренных значений ФМС заключается в исключении влияния срывов измерения, попадания в поле зрения ярких звезд и т.д.

Калибровка состоит в минимизации искажений сигналов за счет нелинейности фотометра и прозрачности атмосферы.

Нормировка обеспечивает приведение сигнала к стандартным условиям наблюдения (например, заданные дальность наблюдения, зенитный угол, фазовый угол освещения) и нормирование сигнала по собственному максимальному значению. Приведение фотометрического сигнала к стандартным условиям наблюдения предполагает устранение зависимости блеска от расстояния до КО, состояния атмосферы во время наблюдения и фазового угла, определяемого взаимным положением Солнца, КО и ОЭС.

Нормированные и фильтрованные сигналы, полученные на этапе предварительной обработки, являются исходной информацией для получения фотометрических признаков (второго этапа).

Второй этап обработки фотометрической кривой предназначен для получения признаков КО, которые могут использоваться при формировании базы данных мониторинга. В качестве признаков выберем следующие статистические характеристики: среднее значение блеска, среднеквадратическое отклонение изменения блеска, максимальное и минимальное значения блеска, период изменения блеска.

Представив функцию блеска $m(t)$ рядом дискретных значений ординат с постоянным шагом dt и усредняя значения этой реализации вдоль оси абсцисс по времени, получим оценку математического ожидания случайной функции блеска:

$$\overline{m}_{np} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} m_{np_i} \qquad (3)$$

где n - число дискретных значений ординат.

Она является интегральной характеристикой величины отражающей поверхности и может характеризовать средний размер КО.

Усредняя квадраты отклонений функции от этого среднего, получим приближенное значение дисперсии:

$$D_m = \frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}\left[m_{np_i} - \overline{m}_{np}\right]^2 \qquad (4)$$

Дисперсия блеска D_m является характеристикой разброса амплитуды отраженного сигнала и определяет изменение блеска КО в зависимости от его конфигурации и возможных ракурсов относительно точки наблюдения и положения Солнца.

Важным информационным признаком КО служит диапазон изменения блеска Δm КО на интервале времени фотометрирования. Например, резкое изменение блеска за время фотометрирования может свидетельствовать о том, что объект имеет участок поверхности с зеркальным отражением и т. д. Диапазон изменения блеска КО определяется по формуле:

$$\Delta m = m_{np_{\max}} - m_{np_{\min}} \qquad (5)$$

Величина периода функции блеска $m_{np}(t)$ может свидетельствовать о характере движения КО относительно собственного центра масс.

Фотометрические признаки КО, как наиболее информативные, используются в качестве индивидуальных различительных признаков КО при формировании базы данных по результатам проведенных наблюдений и мониторинга. При этом возникает необходимость оценки качества получаемых фотометрических реализаций.

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ИЗМЕРЕНИЯ И ПЕРВИЧНОЙ ОБРАБОТКИ ФОТОМЕТРИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

Оценка качества измеренных ОЭС значений блеска КО может быть проведена с помощью методики, включающей следующие четыре этапа:

построение по измеренным значениям ФМС кривой блеска;

приведение кривой блеска к стандартному виду;

графический анализ измеренных и приведенных значений блеска;

статистический анализ результатов измерений.

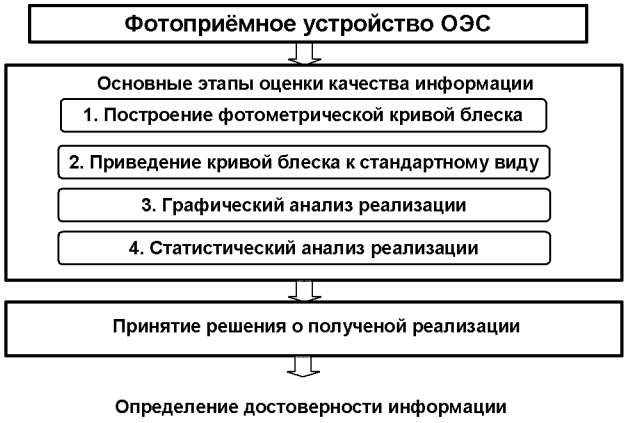


Рисунок 2.

В общем виде возможная последовательность оценки качества ФМР показана на рис. 2.

На первом этапе из множества имеющихся фотометрических реализаций выбираются реализации, удовлетворяющие условиям равенства времени фотометрирования и периода дискретизации измеряемого сигнала.

Полученные измерения представляются в виде кривой блеска измеренных значений ФМС.

На втором этапе с помощью процедуры нормировки обеспечивается приведение измеренных значений ФМС к стандартным условиям наблюдения и нормирование сигналов по собственному максимальному значению.

На третьем этапе с помощью процедуры группировки рассчитываются значения интервальных, накопленных, относительных и накопленных относительных частот значений блеска наблюдаемых КО. В предположении нормального закона распределения значений блеска для выбранных интервалов рассчитываются значения теоретических ожидаемой и накопленной частот, ожидаемое число попаданий значений блеска в выбранные интервалы, а также величины отклонения измеренных и теоретических частот [4].

На четвертом этапе рассчитываются эмпирическое среднее и выборочная дисперсия (СКО) измеренных значений ФМС и проверяется гипотезы о нормальном законе распределения значений блеска КО с заданными параметрами.

Проверка гипотез осуществляется с помощью критериев согласия Колмогорова-Смирнова и Пирсона (критерий согласия Хи-квадрат).

При использовании критерия Колмогорова в качестве меры расхождения между теоретическим

и эмпирическим распределениями используется максимальное значение абсолютной величины разности между эмпирической функцией распределения $F_n(x)$ и соответствующей теоретической функцией распределения $F(x)$:

$$D = \max\left|F_n(x) - F(x)\right|. \qquad (6)$$

Согласно теореме Колмогорова, D (наибольшая величина уклонения эмпирической функции от теоретической) имеет порядок $c/\sqrt{n}$.

Таким образом, если взять величину

$$\lambda = \sqrt{n}\cdot\left|F_n(x) - F(x)\right| \qquad (7)$$

в качестве меры расхождения между теоретическим и эмпирическим распределением (статистику критерия Колмогорова), можно использовать тот факт, что при больших n она имеет распределение Колмогорова.

В отличие от критерия Колмогорова, по критерию Колмогорова-Смирнова сравниваются две эмпирические функции распределения.

Статистика Колмогорова-Смирнова имеет вид

$$\lambda' = \sqrt{\frac{n_1 \cdot n_2}{n_1 + n_2}} \cdot \max\left|F_{n_1}(x) - F_{n_2}(x)\right| \qquad (8)$$

где $Fn_1(x)$ и $Fn_2(x)$ - эмпирическая функция распределения, построенная по двум выборкам объемов n_1 и n_2.

При $n_1>50$ и $n_2>50$ статистика λ' имеет распределение Колмогорова.

При этом вид функции распределения значений блеска КО может быть принят на основе анализа внешнего вида построенных гистограмм, а её параметры определены по эмпирическим данным.

Поэтому в качестве второго критерия проверки гипотезы о законе распределения значений блеска используется критерий согласия Пирсона, в котором эти особенности учитываются путем уменьшения числа степеней свободы.

При использовании критерия Пирсона в качестве меры расхождения принимается величина χ^2, которая вычисляется следующим образом

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^{m} \frac{(n_i - np_i)^2}{np_i}; \qquad (9)$$

где n - объем выборки;

p_i - вероятность принять значение x_i;

n_i - эмпирические частоты для значения x_i.

Число степеней свободы равно $k = m - r - 1$, где m - число слагаемых в сумме (интервалов группировки вариационного ряда), r - число параметров теоретического распределения, вычисленных по экспериментальным данным.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предлагаемая методика основана на положениях теории вероятностей, математической статистики и многокритериального анализа. Методика предполагает исключение влияния срывов измерения блеска КО, попадания в поле зрения ярких звезд, минимизацию искажений за счет нелинейности фотоприемника и прозрачности атмосферы, приведение фотометрического сигнала к стандартным условиям и последующую статистическую обработку фотометрической информации по приведенным выше алгоритмам.

В последующем методика требует отработки и оценки ее качества по реальной информации, которую предполагается получать при проведении фотометрирования КО оптическими средствами института астрономии Российской академии наук. Кроме того, в методике целесообразно учитывать показатели качества и надежность работы фотометрической аппаратуры ОЭС. Данные вопросы являются предметом дальнейших исследований.

Список литературы:

1. *Курышев В.И.* Оптические наблюдения космических объектов. Учебное пособие. - М.: МО СССР, 1973.

2. *Здор С.Е., Широков В.Б.* Оптический поиск и распознавание. - М.: Наука, 1973.

3. Астрономический календарь. Постоянная часть. Отв. редактор П.И.Бакулин. - М: Наука, 1973.

4. *Вентцель Е.С.* Теория вероятностей: Учебник для студ. Вузов- 9-е изд., стер. - М.: издательский центр "Академия", 2003.

5. Надежность и эффективность в технике: Справочник: В 10 т./ Ред. совет: В.С. Авдуевский (пред.) и др. - М.: Машиностроение, 1989. - Т.3: Эффективность технических систем / Под общ. ред. В.М.Уткина. - 376 с.

ОЦЕНКА ПРОНИЦАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ПРИЕМНЫХ КАНАЛОВ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ СПУТНИКОВОЙ АСТРОНОМИИ

ЗАВАРЗИН В.И. - **доктор технических наук,** **САУТКИН В.А.** - **кандидат технических наук**

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

E-mail: sautkin@zenit-kmz.ru

В статье рассмотрены методики оценки универсальной характеристики оптико-электронных средств спутниковой астрономии - проницающей способности и ее связь с характеристиками средф распространения излучения и параметрами приемного оптико-электронного канала.

Ключевые слова: космическое пространство, мониторинг, звездные величины, фотоприемник, проницающая способность.

ВВЕДЕНИЕ

Интенсивное освоение околоземного космического пространства привело к необходимости правового регулирования деятельности человечества в космосе. Правовое регулирование космической деятельности требует наличия организованной системы и средств для её мониторинга.

Под мониторингом космического пространства понимают комплекс организационных и технических мероприятий, обеспечивающих наблюдение за космическим пространством, измерение характеристик космических объектов и ведение информационной базы об обстановке в космосе.

В настоящее время на орбитах вокруг Земли находятся около 10 000 искусственных спутников Земли и около 100 000 космических объектов (КО), представляющих собой фрагменты запуска и осколки КО размером от единиц метров до сантиметров (так называемый "космический мусор") [1, 2].

Сложившаяся космическая обстановка и заселенность околоземного космического пространства требуют постоянного совершенствования технических средств мониторинга. В качестве последних применяются средства, основанные на различных физических принципах. К ним относятся радиолокационные, радиотехнические, квантово-оптические и оптические средства. В последние десятилетия широкое распространение получили оптико-электронные средства спутниковой астрономии, решающие важную задачу пассивной оптической локации космоса [2].

К несомненным достоинствам оптико-электронных средств (ОЭС) относятся большая дальность действия, высокая точность измерений, относительная простота построения, высокая информативность и оперативность работы. Одной из наиболее важных характеристик ОЭС является проницающая способность, устанавливающая зависимость дальности действия и точности измерений КО от оптических характеристик поверхности КО, условий наблюдения КО, параметров среды пропускания оптического излучения, параметров приемной оптической системы, преобразователя "свет-сигнал", устройств обработки сигналов и других параметров.

1. ЗВЕЗДНЫЕ ВЕЛИЧИНЫ. БЛЕСК КО

В астрономии принято оценивать блеск удаленных небесных объектов в звездных величинах m [3]. Исторически это связано с субъективной оценкой блеска звезд древними астрономами наивным методом сравнения - с помощью органов зрения.

Субъективное ощущение блеска объективно соответствует величине светового потока, которую звезда создает у поверхности Земли на площадке, перпендикулярной световому потоку. Позже был сформулирован психо-физиологический закон Вебера-Фихнера, согласно которому раздражение

растет в геометрической прогрессии, а ощущение возрастает в арифметической прогрессии.

Для выражения освещенности от звезды в астрономии применяется логарифмическая шкала звездных величин.

На основе такого подхода австрийский астроном Погсон в 1859 г. предложил формулу:

$$m - m_0 = -2{,}5121\lg\frac{E}{E_0}\ , \qquad (1.1)$$

где m, m_0 - выраженный в звездных величинах блеск соответственно сравниваемой и эталонной звезд, E и E_0 - освещенности, создаваемые сравниваемой и эталонной звездами.

Блеск точечного объекта за пределами атмосферы, создающего на горизонтальной площадке на поверхности Земли освещенность, равную 1 лк, составляет минус 14,18 звездных величины (или - 14^m,18).

Между освещенностью E и соответствующей звездной величиной объекта m, создающего данную освещенность на поверхности Земли при стандартном коэффициенте интегрального пропускании атмосферы в зените $\tau_a = 0{,}766$ существует зависимость [3, 4]:

$$m = -14^m{,}18 - 2{,}5\lg E\,. \qquad (1.2)$$

За пределами земной атмосферы блеск объекта составит

$$m = -13^m{,}89 - 2.5\lg E\ . \qquad (1.3)$$

Космические объекты на ночном небе наблюдаются как точечные объекты - звезды. Поэтому блеск КО также оценивают в звездных величинах m.

Принцип пассивной оптической локации применительно к ОЭС заключается в следующем. Космический объект при движении по орбите вокруг Земли освещается Солнцем (рис. 1).

Солнечный световой поток пассивно рассеивается поверхностью космического объекта, в том числе и в направлении точки наблюдения А на поверхности Земли (рис. 2). Приемная оптическая система формирует в фокальной плоскости на светочувствительной площадке приемника излучения изображение участка звездного неба и КО, которое преобразуется в электрический сигнал цифрового формата.

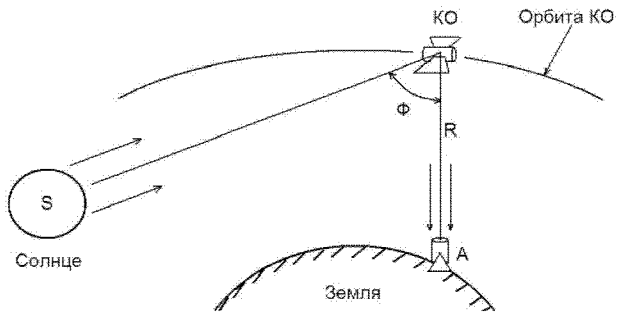


Рис. 1. Наблюдение КО с помощью ОЭС

Полученный электрический сигнал поступает в устройство предварительной цифровой обработки, в котором по заданному критерию качества происходит выделение полезного сигнала на фоне внутренних и внешних шумов фотоприемника и измерение параметров сигнала.

Оценим освещенность от КО, находящегося на расстоянии R от точки наблюдения на поверхности Земли (рис. 1) и освещенного Солнцем под фазовым углом ϕ (угол между направлением линий визирования от КО на Солнце и от КО на наблюдателя), с помощью следующего выражения:

$$E_c = \frac{E_0\, S(\phi)\, \rho\, \tau_a}{\pi\, R^2}\ , \qquad (1.4)$$

где E_0 - солнечная постоянная, т. е. освещенность, создаваемая Солнцем в окрестностях Земли и равная 135000 *лк* , $S(\phi)$ - видимая наблюдателем освещенная площадь КО, зависящая от фазового угла, ρ - интегральный коэффициент отражения поверхности объекта, τ_α - интегральный коэффициент пропускания атмосферы.

Полагая, что КО имеет вид сферы диаметром 1 *м* с коэффициентом отражения и принимая в

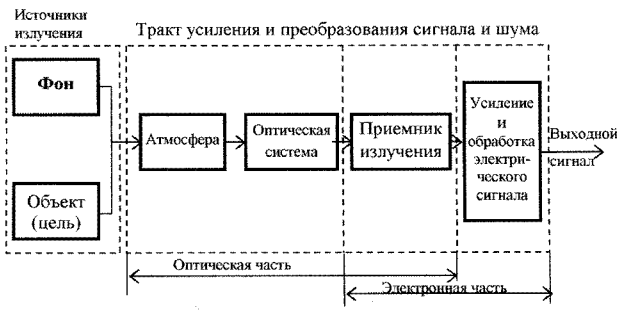


Рис. 2. Структурная схема ОЭС

качестве стандартных условий фазовый угол $\phi = \frac{\pi}{2}$ и пропускание атмосферы $\tau_a = 0{,}765$, выражая R в километрах, после подстановки выражения (1.4) в (1.3) и соответствующих преобразований можно получить приближенное выражение для блеска КО:

$$m = -8^m + 5\lg R . \qquad (1.5)$$

С помощью этого выражения можно получить оценки блеска космических объектов на высотах орбит КО от нескольких сотен до десятков тысяч километров может лежать в диапазоне примерно от 2^m до 16^m.

Звезды и КО с такой величиной блеска уверенно наблюдаются оптическими и оптико-электронными астрономическими инструментами [2].

2. ПРОНИЦАЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ ПРИЕМНОГО КАНАЛА ОЭС

Оптико-электронные средства мониторинга околоземного космического пространства в процессе работы могут решать различные задачи. Например, выделять точечные объекты (звезды и КО) на фоне внутренних и внешних шумов в приемном канале, выделять на фоне звездного узора космические объекты и определять их угловое положение на небесной сфере, проводить фотометрирование КО и получать оценку блеска, решать другие задачи мониторинга.

Качество решения задач может оцениваться с помощью различных критериев: вероятности правильного обнаружения и ложной тревоги, интенсивности ложных тревог, величине отношения "сигнал-шум", точности угловых измерений и фотометрирования КО и другим [3, 5, 6]. Они применимы для приемных каналов ОЭС, содержащих любые типы преобразователей "свет-сигнал".

Одной из наиболее важных и универсальных характеристик приемного канала ОЭС является проницающая способность - предельная звездная величина (блеск) КО, сигнал от которого на выходе приемного канала ОЭС обнаруживается и (или) измеряется с заданным качеством.

Универсальность проницающей способности как основной характеристики ОЭС подтверждается тем, что выражение для проницающей способности связывает параметры, характеризующие излучение, с параметрами приемной оптической системы, преобразователя "свет-сигнал" и устройства обработки выходного сигнала.

Выражение для проницающей способности ОЭС является эквивалентом понятия "формула оптической локации" [3].

2.1. Проницающая способность фотометрического канала ОЭС

В фотометрическом канале ОЭС применяются фотоприемники, работающие в режиме счета фотонов. Оба потока можно считать случайными пуассоновскими потоками. Характерной особенностью пуассоновского потока является тот факт, что дисперсия числа фотонов или электронов, зарегистрированных на определенном интервале времени, равна среднему числу частиц [5, 6].

Для обнаружения сигнала с заданным отношением "сигнал-шум" необходимо, чтобы среднее число сигнальных фотоэлектронов N_c , зарегистрированных на интервале накопления $t_н$, превысило число шумовых флуктуаций фотоэлектронов (среднеквадратическое отклонение) в ψ раз.

$$N_c \geq \Psi \sqrt{N_c + N_ф + N_ш} \ , \qquad (2.1)$$

где $N_ф$ - дисперсия числа электронов, обусловленных фоном, $N_ш$ - дисперсия числа электронов, обусловленных внутренними шумами фотоприемника, ψ - отношение "сигнал-шум".

Для оценки проницающей способности ОЭС можно предположить, что шумовые флюктуации определяются только внешним фоном, то есть $N_ф >> N_ш$ и $N_ф >> N_c$.

Условие выделения оптического сигнала с заданным отношением "сигнал-шум" при этом может быть записано в виде

$$N_c \geq \Psi \sqrt{N_ф} . \qquad (2.2)$$

Оценим среднее число сигнальных и фоновых электронов, эмитировавших с элемента разрешения фотоприемника за интервал времени накопления $t_н$, предполагая, что линейный размер элемента разрешения фотокатода согласован с линейным размером кружка рассеяния $d_{кр}$ объектива приемной оптической системы ОЭС.

Представим объектив ОЭС (рис. 3) в виде эквивалентной линзы диаметром $D_{вх}$ с фокусным

расстоянием f' , угловым полем зрения 2ω, угловым разрешением ε и интегральным коэффициентом пропусканием τ_0, собирающей световое излучение от КО в фокальной плоскости в кружке рассеяния диаметром $d_{кр}$ и площадью $S_{кр}$. В фокальной плоскости расположен фотоприемник с линейным размером $l_{фк}$.

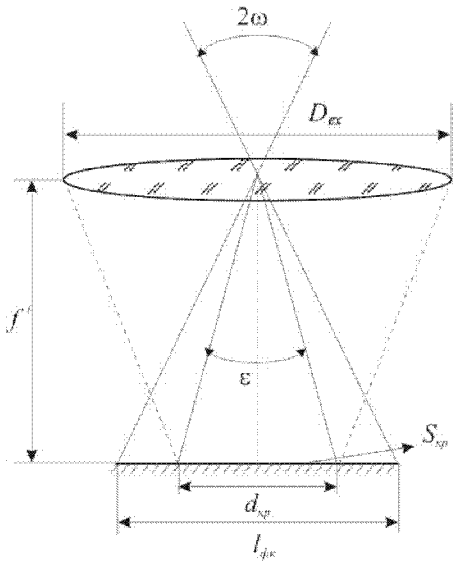


Рис. 3. Эквивалентная схема объектива ОЭС

Оценим среднее число сигнальных фотоэлементов N_c, эммитированных с элемента разрешения за время накопления $t_н$:

$$N_c = E_c \left(\frac{D_{вх}}{d_{кр}} \right)^2 \tau_0 \frac{qk}{h\nu} S_{кр} t_н \ , \qquad (2.3)$$

где E_c - освещенность, создаваемая КО в плоскости входного зрачка объектива, *лк*, k - коэффициент использования световой энергии фотоприемником или электромеханический эквивалент света (для приближенных расчетов можно полагать, что он такой же, как у человеческого глаза, т.е. $\frac{1}{683} \ \frac{Вт}{лм}$), $h\nu$ - энергия светового кванта (например, при $\lambda = 0.555$ мкм), Дж, q - квантовая эффективность фотоприемника.

Оценим число фоновых фотоэлектронов, эмитируемых с элемента разрешения, через яркость фона ночного неба и телесный угол $\Delta\Omega$, соответствующий разрешающей способности оптической системы:

$$N_ф = L_ф \Delta\Omega \left(\frac{D_{вх}}{d_{кр}} \right)^2 \tau_0 \frac{q E_c k}{h\nu} S_{кр} t_н \ , \qquad (2.4)$$

где $L_Ф$ - яркость внешнего фона, $\frac{кд}{м^2}$; $\Delta\Omega$ - телесный угол, соответствующий разрешающей способности оптической системы:

$$\Delta\Omega = \frac{S_{кр}}{f'^2} \ . \qquad (2.5)$$

Подставляя (2.3) и (2.4) с учетом (2.5) в выражение (2.2), после соответствующих преобразований получаем выражение

$$E_c \frac{D_{вх}}{d_{кр}\Psi} \sqrt{\frac{\tau_0 \, k \, q \, t_н}{h\nu}} \geq \sqrt{L_Ф} \qquad (2.6)$$

Освещенность E_c и яркость фона $L_Ф$ связаны с звездными величинами блеска КО m и яркости фона $m_Ф$ выражениями [3]:

$$m = -14^m,18 - 2,5 \lg E_C ,$$
$$m_Ф = 12^m,39 - 2,5 \lg L_Ф .$$

Выразив E_C и $L_Ф$ через m и $m_Ф$ в выражении (2.6) и после преобразований получаем выражение для проницающей способности оптико-фотометрического канала ОЭС:

$$m_{пр} \leq 2,5 \lg \left(\frac{D_{вх}}{d_{кр}\Psi} \sqrt{\frac{\tau_0 \, k \, q \, t_н}{h\nu}} \right) + 0,5 m_ф - 20^m,38 . \qquad (2.7)$$

Учитывая, что угловая разрешающая способность приемной оптической системы определяется как $\frac{d_{кр}}{f'} = \varepsilon$, выражение для проницающей способности ОЭС $m_{пр}$ можно представить в следующем виде:

$$m_{пр} \leq 2,5 \lg \left(\frac{D_{вх} f'}{\varepsilon \Psi} \sqrt{\frac{\tau_0 k \, q \, t_н}{h\nu}} \right) + 0,5 m_ф - 20^m,38 \qquad (2.8)$$

Формула (2.8) представляет зависимость проницающей способности ОЭС от входных величин освещённостей, создаваемых КО и фоновым излучением ночного неба, параметров приемной оптической системы, преобразователя "свет-сигнал" и отношения "сигнал-шум", обеспечивающего требуемые значения характеристик обнаружения или точности измерения.

2.2. Проницающая способность телевизионного канала ОЭС

С учётом характеристик оптической системы и фотоприемника при приёме сигнала от наблюдаемого КО среднее число фотоэлектронов на выходе канала можно определить с помощью выражения [4]:

$$N_c = E_c B\, t_н \frac{\left(\pi \frac{d_{эл}^2}{4}\right)}{\pi\, d_{кр}^2}, \qquad (2.9)$$

где E_c - освещённость от КО в апертурной плоскости оптической системы ОЭС, равная

$$E_c = 10^{-\left(\frac{13^m 89 + m}{2,5}\right)}; \qquad (2.10)$$

m - блеск КО, выраженный в звёздных величинах; B - параметр, описывающий прием и преобразование светового потока в поток фотоэлектронов в приемном канале ОЭС:

$$B = \left(\pi \frac{D_{вх}^{\,2}}{4}\right) k \left(\frac{\lambda}{h\,c}\right) \tau_0\, q; \qquad (2.11)$$

$d_{эл}$ - диаметр считывающего луча телевизионного фотоприемника; $d_{кр}$ - диаметр кружка рассеяния, формируемого оптической системой; $D_{вх}$ - диаметр входного зрачка оптической системы; k - электромеханический эквивалент света; $\frac{h\,c}{\lambda}$ - энергия кванта света на длине волны λ; τ_0- интегральный коэффициент пропускания светового потока приемной оптической системой; q - интегральный коэффициент квантовой эффективности фотоприемника.

Аналогичным образом получим выражение для среднего числа фотоэлектронов на выходе фотоприемника при воздействии на вход распределённого фонового светового потока, обусловленного яркостью ночного неба $L_ф$

$$N_ф = L_ф B\, t_н \frac{\pi}{4}\left(\frac{d_{эл}}{f'}\right)^2 \qquad (2.12)$$

где f' - заднее фокусное расстояние объектива оптической системы.

Среднее число фотоэлектронов аддитивной смеси полезного сигнала и фонового излучения представим зависимостью

$$N_{c+ф} = N_c + N_ф. \qquad (2.13)$$

Для представления зависимости величины проницающей способности ОЭС от характеристик оптической системы введём следующие обозначения:

$\Theta_М$ - мгновенное поле зрения приемной оптической системы, определяемое отношением

$$\Theta_M = 2\, arctg\left(\frac{d_{эл}}{2f'}\right); \qquad (2.14)$$

$\varepsilon\lambda$ - угловое разрешение оптической системы, зависящее от длины волны λ, диаметра входного зрачка оптической системы $D_{вх}$ и коэффициента аберраций $k_{АБ}$:

$$\varepsilon_\lambda = \frac{1,22\lambda}{D_{вх} k_{АБ}}; \qquad (2.15)$$

Для проведения последующего анализа также введем обозначения:

D - вероятность правильного обнаружения;

$Ф(u_D)$- интеграл вероятности правильного обнаружения;

u_D - аргумент интеграла вероятности правильного обнаружения;

u_F - аргумент интеграла вероятности для ложной тревоги;

индексы - cur, тр - действующие и требуемые значения параметров;

$\psi_{тр}$, ψ_{cur} - отношение "сигнал-шум" требуемое и действующее, обеспечивающего обнаружение минимального блеска КО с заданным значением условной вероятности правильного обнаружения; $N_{пор}$ - пороговое значение среднего числа фотоэлектронов на выходе фотоприемника для заданных величин вероятностей правильного обнаружения D и ложных тревог F.

С учётом введенных обозначений действующее (текущее) значение отношения сигнал/шум можно представить в виде:

$$\Psi_{cur} = \frac{E_c}{2}\sqrt{\frac{B\, t_н}{E_c + L_ф\, \pi\, \varepsilon_\lambda^{\,2}}}\,\frac{\Theta_M}{\varepsilon_\lambda}. \qquad (2.16)$$

Для оценки текущего значения величины условной вероятности правильного обнаружения дей-

ствующему отношению сигнал/шум ψ_{cur} на выходе фотоприемника можно поставить в соответствие действующее (текущее) значение величины аргумента функции Лапласа [5,6].

Тогда с учетом зависимостей:

$$D_{cur} = 1 + \Phi(u_{D_{cur}})$$

$$u_D = \frac{N_{c+\phi} - N_{пор}}{\sqrt{N_{c+\phi}}},$$

$$\Psi_{TP} = u_{D_{тр}} + \frac{u_{F_{тр}}}{\sqrt{\frac{N_{c_{тр}}}{N_\phi} + 1}}; \qquad \Psi_{cur} = \frac{N_c}{\sqrt{N_{c+\phi}}} \quad (2.17)$$

действующее (текущее) значение величины аргумента функции Лапласа будет иметь вид:

$$u_{D\,cur} = \Psi_{cur} - \frac{u_{F_{тр}}}{\sqrt{\frac{N_c}{N_\phi} + 1}} \qquad (2.18)$$

Таким образом, на основе оценки u_{Dcur} на любой момент обнаружения КО при уровне входного светового потока, которому соответствует значение отношения "сигнал/шум" ψ_{cur}, можно определить величину вероятности принятия правильного решения о наличии КО в поле зрения приемного канала ОЭС:

$$D_{cur} = 1 + \Phi(u_{D_{cur}}). \qquad (2.19)$$

Для обнаружения КО с заданным качеством требуется выполнить условие:

$$\Psi_{cur} \geq \Psi_{тр}$$

$$\frac{E_c}{2}\sqrt{\frac{B\,t_н}{E_c + L_\phi\,\pi\,\varepsilon_\lambda^{\,2}}}\,\frac{\Theta_M}{\varepsilon_\lambda} \geq \Psi_{тр},$$

которое можно преобразовать к виду

$$E_c \geq 2\,\Psi_{тр}\sqrt{\frac{E_c + E_\phi\,\varepsilon_\lambda^{\,2}}{B\,t_н}}\,\frac{\varepsilon_\lambda}{\Theta_M}, \qquad (2.20)$$

или

$$10^{-\left(\frac{13,^m89+m}{2,5}\right)} \geq 2\,\Psi_{тр}\sqrt{\frac{E_c + E_\phi\,\varepsilon_\lambda^{\,2}}{B\,t_н}}\,\frac{\varepsilon_\lambda}{\Theta_M}. \qquad (2.21)$$

где $E_\phi = \pi\,L_\phi$ - освещённость в апертурной плоскости, создаваемая фоном ночного неба.

После логарифмирования неравенство принимает вид:

$$m \leq -13,^m89 - 2,5\,\lg\left(2\Psi_{тр}\sqrt{\frac{E_c + E_\phi\,\varepsilon_\lambda^{\,2}}{B\,T_K}}\,\frac{\varepsilon_\lambda}{\Theta_M}\right). \qquad (2.22)$$

Переводя неравенство в равенство, получим выражение для оценки проницающей способности канала

$$m_{пр} = -13,^m89 - 2,5\,\lg\left(2\Psi_{тр}\sqrt{\frac{E_c + E_\phi\,\varepsilon_\lambda^{\,2}}{B\,t_н}}\,\frac{\varepsilon_\lambda}{\Theta_M}\right) \qquad (2.23)$$

Выражение в скобках с учётом формулы 2.17 можно преобразовать к виду:

$$m_{пр} = -14,^m64 - 2,5\,\lg\left[\left(u_{D_{тр}} + \frac{u_{F_{тр}}\sqrt{N_\phi}}{\sqrt{N_{c_{тр}} + N_\phi}}\right)\sqrt{\frac{E_c + E_\phi\,\varepsilon_\lambda^{\,2}}{B\,t_н}}\,\frac{\varepsilon_\lambda}{\Theta_M}\right] \qquad (2.24)$$

Формула (2.24) представляет зависимость проницающей способности ОЭС от входных величин освещённостей, создаваемых КО и фоновым излучением, параметров оптической системы и параметров, обеспечивающих требуемые значения характеристик обнаружения.

3. ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ВЫРАЖЕНИЙ ДЛЯ ПРОНИЦАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ОЭС

По результатам проведенного выше анализа выражений для проницающей способности ОЭС (2.8, 2.7, 2.22, 2.24) мониторинга околоземного космического пространства можно сделать ряд предварительных выводов.

1. Выражение для проницающей способности связывает оптические, спектральные, пространственные и временные характеристики (параметры) всех объектов на трассе распространения сигнала - от источника излучения - Солнца, ночного неба, космического объекта, земной атмосферы, приемной оптической системы, преобразователя "свет-сигнал" до устройства обработки принятого сигнала. К ним относятся:

- энергетические и спектральные характеристики излучения Солнца;
- величина фона ночного неба;
- фаза Луны и дополнительное излучение фона, вызванное рассеянием в атмосфере отраженного от Луны солнечного света;
- дальность до КО и его размеры;
- отражательные свойства поверхности КО;
- величина фазового угла КО;
- величина топоцентрической (или видимой) угловой скорости КО;
- коэффициент пропускания атмосферы и величина зенитного угла;
- диаметр входного зрачка приемной оптической системы;
- фокусное расстояние объектива;
- диаметр кружка рассеяния;
- аберрационные искажения оптической системы;
- разрешающая способность оптической системы;
- поле зрения и мгновенное поле зрения приемной оптической системы;
- коэффициент пропускания оптической системы;
- - спектральная чувствительность и квантовая эффективность преобразователя "свет-сигнал";
- величина полезного сигнала и внутренних шумов фотоприемника и их статистические характеристики;
- время накопления сигнала;
- геометрические размеры элементарной светочувствительной ячейки фотоприемника и площадь фотокатода;
- параметры, связанные с решающим правилом, определяющим заданное качество выделения полезного сигнала от КО на фоне внутренних и внешних шумов приемного канала ОЭС или заданные характеристики обнаружения.

2. Анализ выражения для проницающей способности позволяет выделить параметры, изменением которых можно повысить ее величину. Так, например, проницающая способность ОЭС может быть повышена:

- при увеличении диаметра входного зрачка приемной оптической системы и фокусного расстояния объектива;
- за счет увеличения коэффициента пропускания оптической системы;
- при увеличении квантовой эффективности фотоприемника;
- за счет увеличения времени накопления принимаемого сигнала;
- при работе ОЭС в условиях пониженного фона ночного неба $m_ф$;
- при применении преобразователей "свет-сигнал" с более низким уровнем внутренних шумов.

Одним из определяющих моментов при этом является заданный критерий качества работы ОЭС. Решение задачи повышения проницающей способности ОЭС должно происходить на его основе путем последующего подбора (варьирования) параметров составных частей ОЭС и их значений.

Список литературы:

1. Проблема загрязнения космоса. Под ред. *А.Г. Масевич*. М., Косинформ, 1993;

2. Вопросы радиоэлектроники. Серия "Радиолокационная техника", вып. 4. М., 2002;

3. *Мартынов Д.Я.* Курс практической астрофизики. М., Наука. 1977.

4. Телевизионная астрономия. Под ред. *Б.В. Никонова*. М., Наука, 1984.;

5. *Воробьев В.И.* Оптическая локация для радиоинженеров. М., Радио и связь, 1983;

6. *Порфирьев Л.Ф.* Теория оптико-электронных приборов и систем. Ленинград, Машиностроение, 1980;

7. *Эклз М., Сим Э., Тритон К.* Детекторы слабого излучения в астрономии. М., Мир, 1986.

ГОНИОФОТОМЕТРИЧЕСКАЯ УСТАНОВКА С ВОЗМОЖНОСТЬЮ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ НА БАЗЕ ГОНИОМЕТРА Г-5

КАРЛЕНКО Б.В., МАКАРЕНКО А.В. - **кандидат физико-математических наук,**
ПОПЕРЕНКО Л.В. - **доктор физико-математических наук**

Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко

E-mail: plv@univ.kiev.ua

Показано, что сконструированная авторами установка на базе гониометра Г-5 может иметь различные применения и использоваться при решении ряда важных задач. Приведены результаты гониофотометрического исследования рассеивающих образцов, в частности, эталонного рассеивателя - молочного стекла МС-19. Обсуждается возможность определения поверхностных неоднородностей. Изучено влияние поверхностного загрязняющего слоя поляроидных пленок на результаты измерений. Согласно предложенной методики определены коэффициенты поглощения и показатели преломления стеклянных образцов.

Ключевые слова: гониофотометрия, рассеяние, пропускание, поляризация.

ВВЕДЕНИЕ

Оптические методы исследования являются одними из наиболее информативных при исследовании внутренней структуры, поверхности и свойств вещества. Использование гониофотометрических исследований, в частности, получение углового распределения рассеяного света, фотометрических характеристик, являются неотъемлемой составляющей множества технологических процессов. Поэтому в текстильной, бумажной и нефтеперерабатывающей промышленности, на предприятиях по производству лаков, красок или пластмасс широко используют гониофотометрические исследования. Более того, всё ускоряющееся успешное освоение космоса за последние десятилетия, открыло новые возможности для применения гониофотометрии. В связи с этим постоянно возрастает необходимость в повышении точности измерения гониофотометрических характеристик.

В фотометрических и других оптических устройствах с целью корректировки и/или проверки результатов часто используются эталонные образцы [1 , 2]. Кроме того, поляроидные пленки стали ключевым элементом в поляризационных устройствах. Как в первом, так и во втором случае, необходимо точно знать их основные характеристики и учитывать некоторые особенности влияния их использования на точность результатов.

С помощью сконструированного (на базе стандартного гониометра) гониофотометрического устройства мы провели экспериментальные исследования молочного стекла МС-19 [3] и получили индикатрису пропускания для поляроидной пленки. Были также предложены методы определения основных фотометрических характеристик, таких как показатель преломления и коэффициент поглощения сильнопоглощающих светофильтров , полученных из цветных стекол.

Коэффициент поглощения такого типа диэлектрического материала является одним из ключевых характеристик, которые определяют фотометрические свойства [4,5,6]. Конечно, коэффициенты поглощения приведены в каталогах, однако, для дискретного набора длин волн.

Определение этой характеристики в широком диапазоне требуется более сложного подхода к решению указанной задачи.

Что касается поляриметрии, гониофотометрические исследования также показали, что загрязнение и неоднородная структура слоистой поляроидной пленки сильно влияет на её индикатрисы рассеяния, что должно быть принято во внимание при последующей обработке экспериментальных данных.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Прикладное решение подобных задач не в первый раз встает перед инженерами и учеными [7,8]. Нами для проведения исследований использована сконструированная гониофотометрическая установка на базе гониометра Г-5. В качестве источника света использован полупроводниковый лазер, излучающий на длине волны 655 нм, мощностью 3 мВт.

Источник излучения расположен в фокальной плоскости коллиматорного объектива гониометра (рис. 1), поэтому на образец падает параллельный пучок. На объективы коллиматора и зрительной трубы гониометра могут быть установлены поляроидные пленки, выступающие поляризатором и анализатором, соответственно. Рассеяние света будет происходить на обеих пленках. Фокусное расстояние объектива составляет 40 см, диаметр пучка регулируется с помощью ирисовой диафрагмы и составляет 1-1,5 мм.

Для регистрации световых потоков использована схема синхронного детектирования [9]. Лазерное излучение модулируется строб-сигналом, поступающим с персонального компьютера (ПК). Скважность модулирующего сигнала составляет 2, а модуляция происходит на частоте 117 Гц. Такая частота выбрана для уменьшения

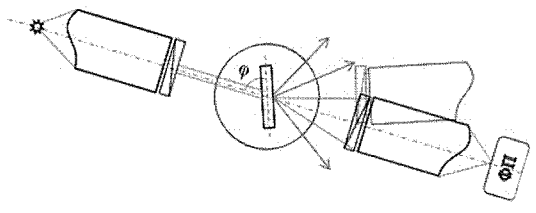


Рисунок 1.
Схема гониофотометрической установки (вид сверху):
ФП - фотоприемник

влияния внешнего освещения, питающегося от электросети переменного напряжения частотой 50 Гц.

На электрическую схему поступает два периодических сигнала. Сигналы предоставляют полезную информацию, характеризующую как объект, так и внешний фон. Эти сигналы синхронизированы с соответствующими строб-сигналами. Для устранения таких искажений сигнала, как искривление переднего и заднего фронта, вызванных большим сечением пучка и инерционностью фотоприемника в устройстве существует возможность изменения длительности строб-сигналов.

Синхронный детектор функционирует программно в среде LabView. Для каждого отдельного измерения значение отклика фотоприемника получается несколько раз. Для совокупности полученных результатов рассчитывается среднее отклонение. Когда погрешность достигает значения 1,5%, накопление данных прекращается. Уровень сигнала есть среднее значение по выборке, полученное с использованием коэффициента Стьюдента с доверительной вероятностью 0,95.

В фокальной плоскости объектива зрительной трубы установлен фотоприемник (ФП), сигнал с которого обрабатывается аналогово-цифровым преобразователем (АЦП) и поступает в персональный компьютер.

Для установки разработана схема автоматизации, с этой целью установлен шаговый двигатель, управляемый ПК. Двигатель с помощью ременной передачи разворачивает алидаду гониометра. Контроль угла поворота реализован программно в среде LabView путем распознавания изображения шкалы гониометра, создаваемого видеокамерой.

ЭКСПЕРИМЕНТ

Как уже было упомянуто выше, данная гониофотометрическая установка позволяет проводить ряд разнообразных измерений. Нами была получена индикатриса рассеяния эталонного молочного стекла МС-19 с возможностью исследования внутренней структуры неоднородностей. Был предложен метод по определению основных оптических характеристик образца, примененный для определения коэффициентов погло-

щения и показателей преломления сильно поглощающих диэлектрических светофильтров на основе цветного стекла. Также был проведен анализ поверхности поляроидных пленок с целью оценки влияния поверхностных загрязнений на изменение индикатрис рассеяния при использовании таких пленок в качестве поляризатора и анализатора.

Индикатриса рассеяния эталонного образца

Заводы оптического стекла выпускают более 10 сортов светорассеивающих молочных (МС) стекол. Стекло марок МС16, МС17, МС18 и, собственно, МС19 с показателем преломления n = 1,472 предназначено для изготовления образцов и рабочих эталонов мутности, а также имитаторов рассеивающих средств. Образец для исследований был изготовлен на Изюмском казенном приборостроительном заводе.

Спектральный коэффициент отражения является важной спектрофотометрической характеристикой. Этот коэффициент определяется как отношение светового потока, рассеянный образцом, к световому потоку, рассеянному эталоном при тех же условиях освещения и наблюдения. В общем случае это отношение изменяется при изменении соответствующих условий.

При измерении спектрального коэффициента отражения возникают метрологические и технологические сложности, которые можно преодолеть, если с большой точностью известна индикатриса рассеяния света, что и стало предметом исследования.

Гладкая поверхность раздела воздух-стекло зеркально отражает часть света согласно формулам Френеля. Основная часть светового потока попадает внутрь стекла и рассеивается массой мелких неоднородностей. В результате некоторая часть потока выходит обратно (или проходит через слой), испытывая новое отражение и преломление на поверхности раздела. Часть потока поглощается в толще стекла.

При расчётах была использована формула

$$T(\varphi) = \frac{I_t}{I_0 \cos\varphi d\omega}, \qquad (1)$$

где φ - угол рассеяния, I_0 - начальная интенсивность, I_t - интенсивность пучка, прошедшего сквозь образец, $d\omega$ - пространственный угол, в котором фотоприемник регистрирует световой поток.

При отсутствии образца, установив трубы гониометра точно одна напротив другой, можно получить начальную интенсивность.

В процессе получения этого значения, оказалось, что приемник не может регистрировать потоки такой интенсивности. Возникла потребность в уменьшении интенсивности пучка с последующей возможностью восстановить значение начальной интенсивности. Для этого была применена стопа светофильтров с известными значениями пропускания.

Пространственный угол, в котором фотоприемник регистрирует световой поток является константой и составляет $1{,}35 \times 10^{-4}$ ср. В процессе работы установка регистрирует набор значений углов (φ) и интенсивностей (I_t) световых потоков, прошедших через образец, после чего рассчитывается индикатриса рассеяния.

Определение оптических характеристик образцов

В качестве образцов были выбраны плоскопараллельные пластинки светофильтров из "Набора образцов цветных оптических стекол" (набор предназначен для использования в разных областях научной деятельности: в фотографии, при люминесцентном анализе, для выделения отдельных участков спектра при оптических измерениях, в фотометрии, колориметрии, пирометрии и т.д.). На каждый образец из набора оформлен паспорт спектральной характеристики, где указаны показатели поглощения для ряда длин волн в рабочей части спектра. Каждому образцу из набора присвоено условное обозначение типа оптического стекла, из которого он изготовлен и порядковый номер в рамках данного набора.

В общей сложности произведены измерения для 12 образцов. Однако для более тщательных исследований были отобраны образцы с большими значениями коэффициентов поглощения: СС8, ИКС1 и НС11 размерами 40х40, толщиной 2-3 мм. Исследования проводились для s- и p-поляризаций зондового излучения при двенадцати углах падения (от 0 до 55 через каждые 5 градусов).

На первом этапе проведено определение I_{0s} и I_{0p} - величин фототока, соответствующих начальным интенсивностям излучения, попадающего на фотоприемник при заданном положении поляризатора при отсутствии образца в канале зондового излучения. При этом установка настроена на режим измерения пропускания при нормальном падении пучка, когда оптические оси обеих труб гониометра совпадают.

На следующей стадии измерений в канал зондового излучения образец устанавливается так, чтобы пучок падал перпендикулярно поверхности. Такое положение образца - стартовая позиция всех измерений. Изменяя угол падения света на образец (от 0 до 55 через каждые 5 градусов) при s- и p-поляризациях, сигнал регистрируется фотоприемником при указанных условиях.

Используя значения I_{0s} и I_{0p}, на ПК рассчитывается пропускание образца (τ_s, τ_p) для всех указанных углов.

После теоретических расчетов и моделирования, с помощью ПК определяются искомые характеристики.

Для определения коэффициента поглощения α была предложена процедура, целью которой является подбор таких значений α и n, в соответствии с которыми экспериментальные значения будут наименьшим образом отличаться от теоретических. Критерием этой сходимости является достижение наименьшего значения критерия оптимальности Δ.

$$\Delta = \sum (\tau_{теор} - \tau)^2 / M^2$$

где $\tau_{теор}$ - теоретически рассчитанное значение пропускания при подобранных α и n,

τ - полученное экспериментально значение пропускания,

M - среднее значение $\tau_{теор}$ для одного образца для одной из поляризаций.

Сформулированная задача является задачей по минимизации критерия оптимальности при определении коэффициентов поглощения.

Фактически в этой задаче создается вектор, состоящий из искомых параметров α и n. Для него случайным образом необходимо задать начальное значение. Кроме того, для переменных задают диапазон вариации, который соответствует границам их существования.

Подбирая значения вектора, программа, реализованная в среде MatLab, рассчитывает целевую функцию, которой был избран критерий оптимальности Δ. Поскольку желательно достичь полного соответствия экспериментальных данных и результатов расчета, т.е. минимизировать Δ, то и искомым целевым значением будет $\Delta = 0$.

Анализ поверхностных загрязнений образца

В установке анализатором и поляризатором является полимерная пленка. В гониофотометричних измерениях регистрируется свет, который рассеивается не только на исследуемом образце, но и на поляроидных пленках, поэтому актуальной является задача по определению характеристик рассеяния самой пленки, чтобы учесть влияние этого рассеяния на общие результаты.

Учитывая оптическую неоднородность поляроидных пленок, целесообразно установить распределение этих неоднородностей по всей ее площади и предложить адекватную модель светорассеяния.

Загрязнение (запыления) поверхностей пленок также влияют на их светорассеяние и, учитывая это, желательно исследовать это влияние для оценки точности соответствующих измерений.

Угол расхождения светового потока (0,14°) значительно меньше, чем углы, наблюдаемые в эксперименте. Поэтому для рассмотрения модели светорассеяния достаточно описать процесс рассеяния на пленке поляризатора (рис. 2.)

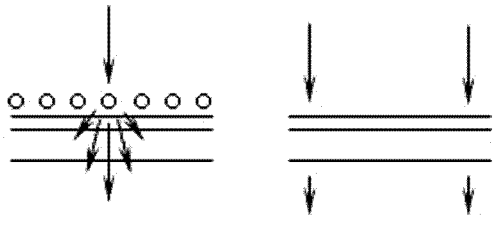


Рисунок 2.
Схематическое изображение чистой (слева) и пыльной (справа) пленки

При падении параллельного пучка света на чистую пленку происходит лишь незначительное рассеяние на неоднородностях пленки.

В общем случае необходимо учитывать угловое распределение рассеянного слоем пыли света, которое впоследствии интерферирует на отдельных слоях пленки [10, 4].

В эксперименте исследовались как предварительно загрязненные, так и очищенные поляроидные пленки.

Проведены измерения рассеяния пленок поляризатора и анализатора при отсутствии образца на предметном столике.

На объектив коллиматора установлен поляризатор, а на объектив зрительной трубы - анализатор. При отсутствии образца на предметном столике измерена интенсивность рассеянного света в диапазоне углов отклонения от центрального хода луча -8° ... 8° через каждые 10′.

Далее на объективы коллиматора и зрительной трубы были установлены предварительно очищенные от пыли поляроидные пленки. Измерения проводились в том же диапазоне.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Индикатриса рассеяния эталонного образца

Проведены измерения для углов падения пучка на заразок 0° (рис. 3.) и 45° (рис. 4.) Для двух поляризаций (плоскости поляризации поляризатора и анализатора параллельны) pp и ss.

Отличие результатов для различных поляризаций может быть связано с отличием френелевских коэффициентов пропускания при прохождении света через плоскую границу раздела двух сред с различными показателями преломления (стекло-воздух, воздух-стекло).

Полученные результаты указывают на то, что для стекла МС-19 индикатриса рассеивания далека от соответствия закону Ламберта.

Определение оптических характеристик образцов

Табличные значения характеристик образцов можно найти в [11], а коэффициенты поглощения (α) и показатели преломления (n), полученные в результате обработки экспериментальных данных, а также критерии оптимальности (Δ) приведены в табл. 1.

Заметим, что характеристики приведены только для некоторого набора волн и таблицы каталога имеют пропуски.

В нашем случае, среднее отклонение полученных показателей преломления от табличных составляет 10%. Однако, в описанном подходе результаты определения коэффициента поглощения слабо зависит от изменения n. Значения коэффициентов поглощения α получены с точностью не хуже 0.5-1%.

Анализ поверхностных загрязнений образца

На рис. 5 приведен график зависимости интенсивности рассеянного света в диапазоне углов отклонения от центрального хода луча -8° ... 8° через каждые 10′

На графике видны 3 пика, соответствующие углам рассеяния: -1,9 °, 2,2 ° и 7,5 °.

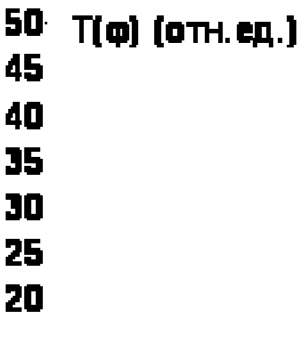


Рисунок 3.
Зависимость абсолютных значений пропускания для молочного стекла МС-19 от угла наблюдения. Угол падения пучка на образец 0 °, pp и ss поляризации

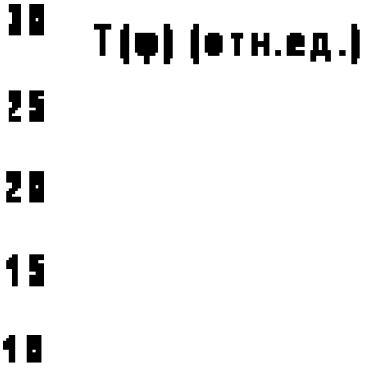


Рисунок 4.
Зависимость абсолютных значений пропускания для молочного стекла МС-19 от угла наблюдения. Угол падения пучка на образец 45 °, pp и ss поляризации

Таблица 1.

Полученные значения коэффициентов поглощения и показателей преломления, $\lambda = 655$ нм

Образец	n		α		Δ	
	p-поляр.	s-поляр.	p-поляр.	s-поляр.	p-поляр.	s-поляр.
СС8	1.599	1.582	1.648	1.635	0.091	0.027
ИКС1	1.572	1.671	1.921	1.942	0.129	0.097
НС11	1.469	1.415	1.746	1.736	0.096	0.013

Далее было определено угловое распределение интенсивности рассеянного света на поляризаторе и анализаторе. На объективы коллиматора и зрительной трубы установлены предварительно очищенные от пыли поляроидные пленки.

Как видно из рисунков 5 и 6 , при отсутствии рассеивающего слоя пыли, пик при угле рассеяния 2,2° сглаживается, а пик при угле рассеяния 7,5° исчезает.

По нашему мнению, объяснение этого явления заключается в том, что при отсутствии загрязняющего слоя количество рассеянного на поляроиде света в направлениях, отличных от направления распространения, должна быть малой. Причиной же возникновения зафиксированного рассеяния является взаимодействие падающего излучения с центрами неоднородности внутри самого поляроида и рассеяния света на них.

При наличии загрязняющего слоя, количество рассеянного света существенно возрастает. При этом вполне может случиться, что количество света, которое рассеивается под углом, для которого выполняется условие наблюдения интерференционного максимума, будет достаточной для регистрации такого максимума.

Другими словами, слой пыли создает рассеянный световой поток, который участвует в создании интерференционных полос равного наклона.

Необходимым условием возникновения интерференционных полос является несовпадение между собой углов для максимумов интерференции и "провалов" в индикатрисе рассеяния света для определенных частиц пыли [12] .

ВЫВОДЫ

Показано, что сконструированная гониофотометрическая установка на базе гониометра ГС-5 может иметь различные применения и использоваться при решении ряда важных задач. Авторами были проведены исследования внутрен-

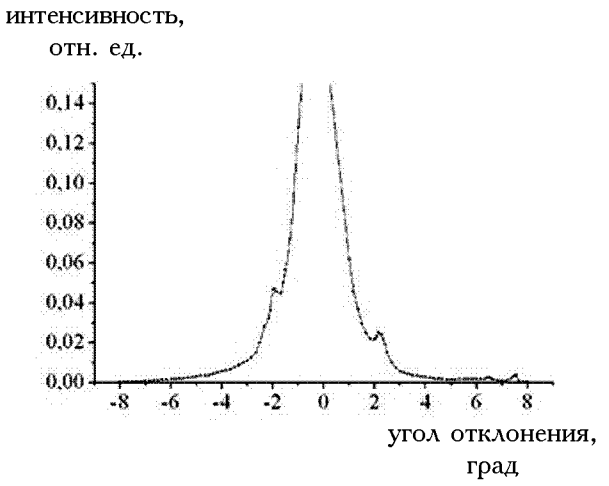


Рисунок 5.
Угловое распределение интенсивности рассеянного света (s-поляризация)

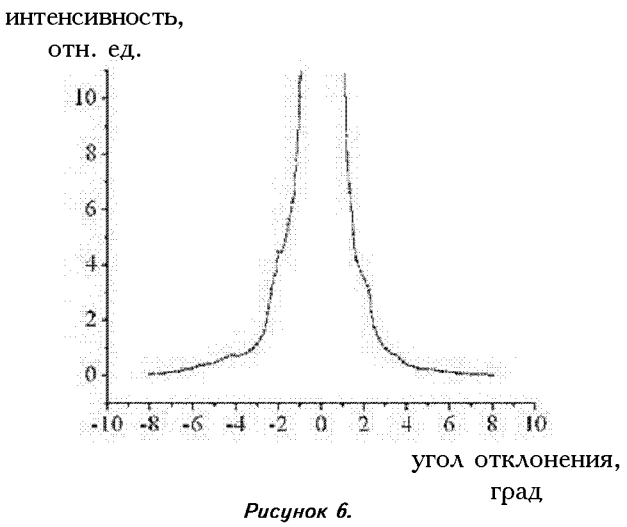


Рисунок 6.
Угловое распределение интенсивности рассеянного очищенными от пыли поляризатором и анализатором света (s-поляризация)

ней структуры рассеивающих образцов, в частности, эталонного рассеивателя - молочного стекла МС-19. Также установка даёт возможность исследовать поверхностные неоднородности, что и было продемонстрировано в эксперименте по исследованию влияния поверхностного загрязняющего слоя поляроидных пленок на результаты измерений. Кроме того, согласно предложенной методики были получены коэффициенты поглощения и показатели преломления ряда светофильтров для конкретной длинны волны, отсутствующей в паспорте этих образцов.

Список литературы:

1. *Bergen A.* / A practical method of comparing luminous intensity distributions // Lighting Research and Technology, 44 (1), p.27-36, (2012)

2. *Stefan R.* Sandmeier and Klaus I. Itten / A Field Goniometer System (FIGOS) for Acquisition of Hyperspectral BRDF Data // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing - Vol.37, №2 - P.978-986, (1999)

3. *Прядко А.* / Фотометрические материалы // "625" - №3, (2005)

4. *Кросиньяни Б., Ди Порто П., Бертолотти М.* / Статистические свойства рассеянного света //М.:Наука 1980.- 206с.

5. *Борн М., Вольф Е.* // Принципы оптики, 2изд. испр.-М.:Наука, - 856с., (1973)

6. *Розенберг Г.* / Физические основы спектроскопии светорассеивающих веществ // Усп. физ. наук - с.91, №.4, (1967)

7. *Горбань Н.Я., Дрозд П.И., Поперенко Л.В.* / Автоколлимационный гониометр-спектрометр // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. М.: ТЕСТ-ЗЛ, 1980, № 4.

8. *Горбань Н.Я., Дрозд П.И., Поперенко Л.В.* / Гониометрическая приставка для определения зависимости показателя преломления вещества от длины волны // Вестник КНУ. Физика. Киев.1980. №21

9. *Тихонов Е.А., Ивашкин В.А., Лямец А.К.* / Рефрактометрия по отражению света при квазинормальном падении и под углом Брюстера // Журнал прикладной спектроскопии. Минск: Институт физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси, 2012. Т. 79. №1. С. 160-167.

10. *Хюлст ван де Г.* / Рассеяние света малыми частицами. М.: Изд-во иностр. лит-ры. 1961. - 536с.

11. Каталог цветного стекла. М.: Машиностроение, 1967. 63 с.

12. *Хёнл Х., Мауэ А., Вестпфаль К.* / Теория дифракции. - М.:Мир.1964.- 428с.

ВАКУУМНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИОННО-ЛУЧЕВОЙ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТЕЙ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ

АБДУЛКАДЫРОВ М.А. - кандидат технических наук, **АЗЕРБАЕВ А.А., БАЛАНДИН В.Ю., БЕЛОУСОВ С.П.** - доктор технических наук, **ПАТРИКЕЕВ Е.А, СЕМЕНОВ А.П.** - кандидат технических наук, **ШАРОВ Ю.А.**

ОАО "Лыткаринский завод оптического стекла", Лыткарино, Московская обл.

E-mail: lastro@lzos.ru ; lastro-am@lzos.ru

Рассмотрены вопросы создания установки для ионно-лучевой полировки оптических деталей диаметром до 2.5 м и приведены результаты эксперимeтальной обработки оптических деталей.

Ключевые слова: ионно-лучевая обработка, крупногабаритная оптика, полировка, формообразование.

Для обработки поверхностей прецизионных оптических деталей в настоящее время широко используется технология и оборудование для автоматизированного формообразования с использованием малого полирующего инструмента. Такая технология активно используется в ОАО Лыткаринский завод оптического стекла (ОАО ЛЗОС, г. Лыткарино, Московской области) и позволила изготовить целый комплекс высокоточной оптики, зеркал астрономических и космических телескопов диаметром до 4 м, как для российских, так и для зарубежных изготовителей телескопов.

В настоящее время для изготовления крупногабаритной астрономической и космической оптики широко используется метод программно-управляемой финишной доводки рабочих поверхностей с использованием малого полирующего инструмента. Современные тенденции развития методов формообразования поверхностей оптических деталей выдвигают на передовые рубежи метод ионно-лучевой обработки (ИЛО). При контакте полирующего инструмента с поверхностью детали появляются значительные ошибки в краевой зоне при выходе его за край детали, поэтому задаются параметры световой области на рабочей поверхности. Метод ИЛО не имеет данного недостатка и особенно эффективен при обработке составных зеркал телескопов, состоящих, как правило, из шестигранных сегментов, объединенных в единое зеркало.

Но при ИЛО поверхностей должны сохраниться и все достоинства традиционной полировки оптических деталей и, прежде всего, достигаемая шероховатость поверхности (RMS<2нм).

Подобные установки для обработки сегментов составных зеркал созданы во Франции (фирма SAGEM), в США (ITT), они успешно использовались при изготовлении составных главных зеркал телескопов Keck I и Keck II (США), GRANTECAN (Испания) и т.д.

В ОАО создана вакуумная установка для ИЛО поверхностей крупногабаритных оптических деталей (установка "Луч-2,5", рис. 1) для ИЛО деталей диаметром до 2,5 м.

При ИЛО оптической детали происходит распыление атомов материала с поверхности детали направленным ионным пучком.

Поставленная задача - получать асферические

поверхности оптических деталей (линз, зеркал) с произвольным внешним контуром с точностью формы по среднеквадратическому отклонению (СКО) до $\lambda/100$ и микрошероховатостью не хуже 2 нм (СКО).

Технические характеристики установки «Луч-2,5»:

Диаметр обрабатываемой детали: *до 2,5м*

Вес обрабатываемой детали: *до 5,5т*

Форма обрабатываемой поверхности: *плоская, выпуклая или вогнутая, сферическая или асферическая*

Конфигурация внешнего контура детали: *произвольная*

Достигаемая точность формы поверхности по СКО: до $\lambda/60$.

Система перемещения ионного источника: *6-ти координатный гексапод*

Точность перемещений системы перемещения: *линейная ±0,5 мм, угловая ±1′.*

Ионный источник: *2 источника Холловского типа с диаметрами пучка ионов 90 и 150 мм*

Рабочий газ: *аргон, ксенон*

Откачная система: *форвакуумные агрегаты на основе насосов Рутса и высоковакуумные турбомолекулярные насосы*

Разряжение в вакуумной камере: *предельное - $1x10^{-3}$ Па, предварительное - $4x10^{-3}$ Па.*

Описание установки "Луч-2,5".

Установка "Луч-2,5" состоит из следующих основных частей: вакуумной камеры с узлом крепления детали, откачной системы, узла ионных источников, системы перемещения ионных источников и системы управления.

Вакуумная камера представляет собой разъемную цилиндрическую конструкцию с внутренним диаметром 3,8 м, выполненную из нержавеющей стали 12Х18Н10Т, состоящую из подъемного контейнера, стационарной части и крышки стационарной части.

Обрабатываемая деталь загружается в подъемный контейнер и фиксируется в узле крепления (рис. 2). В узле крепления имеется два типа крепежных элементов - крепление детали при помощи прижимных лап и при помощи опоясывающей металлической ленты, применяемых в зависимости от размера и формы внешнего периметра обрабатываемой детали. Имеется возможность переустановки крепежных элементов обеих систем по базовому контейнеру, что позволяет осуществлять надежное крепление оптических деталей диаметром до 2,5 м. Подъем базового контейнера осуществляется при помощи двух синхронизированных шарико-винтовых пар, передающих крутящий момент от моторредукторов.

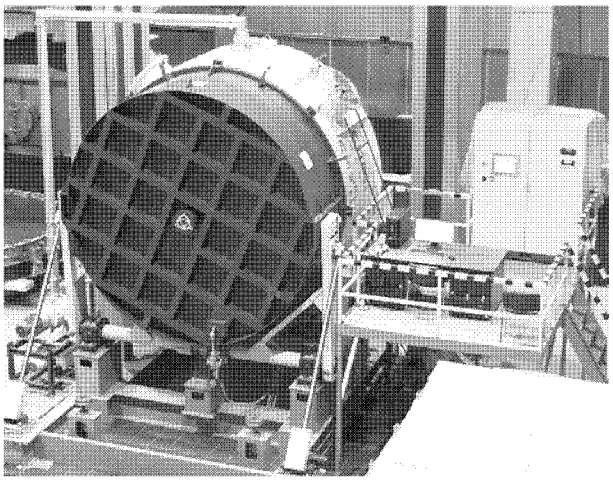


Рисунок 1.
Вакуумная установка «Луч-2,5». Вид сверху

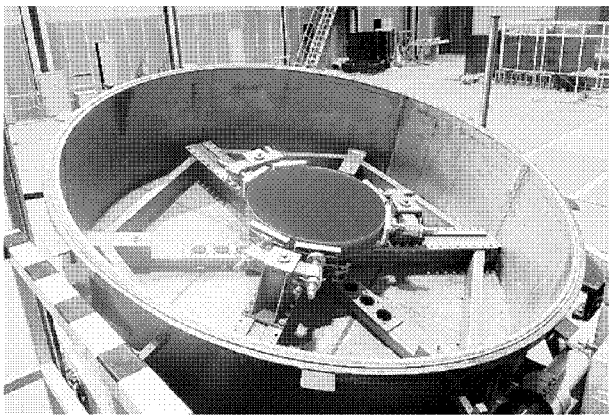


Рисунок 2.
Подъемный контейнер с деталью

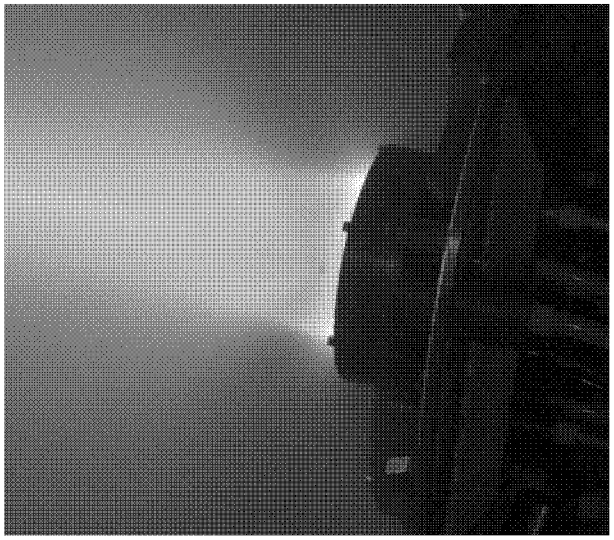


Рисунок 3.
Ионный источник во время ИЛО

В стационарной части находятся 4 патрубка ∅ 660 мм и 2 патрубка ∅ 160 мм. Патрубки ∅ 660 мм используются следующим образом: два патрубка - для крепления турбомолекулярных насосов с коммуникациями, один как смотровое окно и еще один - запасной. Патрубки ∅ 160 мм предназначены для крепления элементов байпасной магистрали.

К стационарной части сзади пристыковывается крышка с прикрепленной системой перемещения. Крышка монтируется к стационарной части при помощи болтовых соединений. Для проведения операций по обслуживанию системы перемещения крышка может быть отсоединена и отодвинута посредством специальной рельсовой тележки.

Крепление стационарной части камеры и съемной крышки осуществляется к единому основанию, лежащему на бетонной подушке. Откачная система установки служит для создания и поддержания разряжения, требуемого для проведения техпроцесса ИЛО. В откачную систему входят: 2 форвакуумных агрегата в составе насосов Рутса и пластинчато-роторных насосов, 4 высоковакуумных турбомолекулярных насоса на магнитном подвесе; запорная и коммуникационная арматура (клапана, затворы, вакуумпроводы и т.д.), вакуумные датчики.

Узел ионных источников состоит из двух ионных источников Холловского типа (рис. 3, 4), генерирующих направленные пучки ионов с ∅ 90 и 150 мм. В ионных источниках ионизация рабочего газа и ускорение ионов происходит в скрещенных электромагнитных полях без использования накальных элементов, что способствует большому ресурсу работы и позволяет проводить длительные сеансы ИЛО. В качестве рабочего газа используются аргон и ксенон.

Система перемещения (рис. 4) предназначена для движения ионных источников во время сеанса ИЛО и представляет собой 6-ти координатный гексапод. В гексаподе движение от приводов скоординировано передается на шесть шарико-винтовых пар, соединенных кареткой. На каретке крепятся два ионных источника, а также находится посадочное гнездо для измерительной головки с щупом, используемой для позиционирования детали, закрепленной в контейнере, относительно системы перемещения. Каретка может осуществлять 3 линейных и 3 угловых перемещения с точностью ±0,5 мм и ±1′ соответственно.

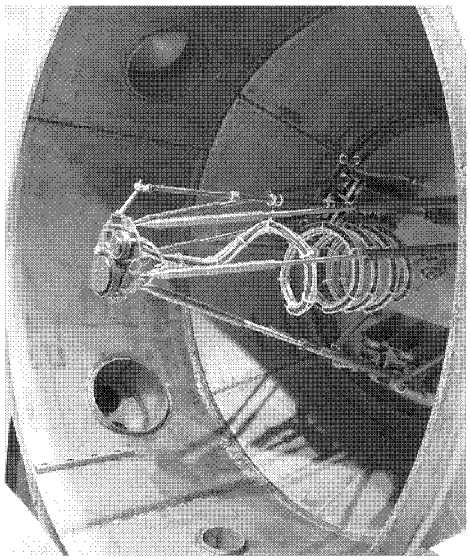


Рисунок 4.
Система перемещения с ионными источниками

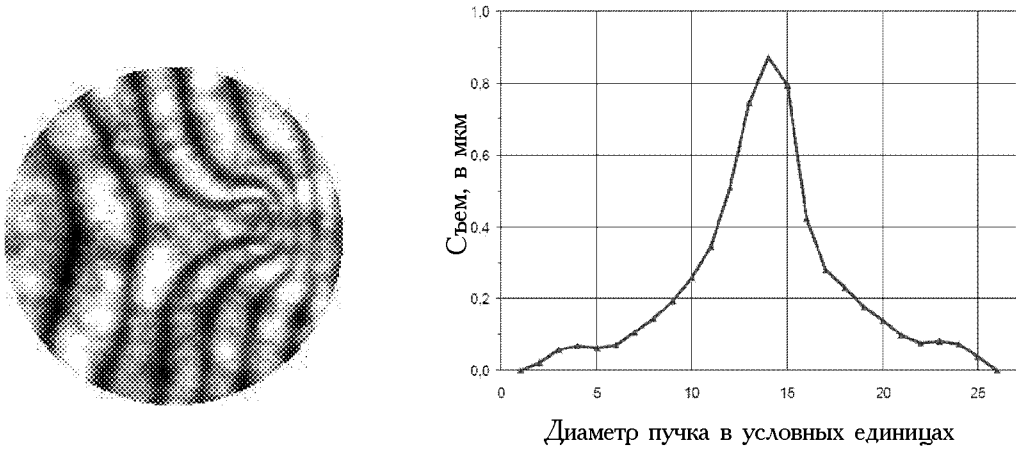


Рисунок 5.
Интерферограмма профиля съема материала пучком ионов диаметром 50 мм и профиль съема в мкм. Максимальный съем за 10 мин обработки около 0,9 мкм

Система управления служит для оперирования элементами установки и контроля их состояния. Управление системой перемещения осуществляется на персональном компьютере) и посредством сенсорного экрана шкафа управления.

На стадии отладки технологического процесса выполнялись исследования процесса съема материала с поверхности детали и определение функций съема материала при различных режимах обработки. На рис. 5 представлена одна из интерферограмм профиля съема ионным источником с диаметром пучка 50 мм при распылении в течение 10 минут. Максимальный съем в центре пучка около 0, 9 мкм.

Полученные экспериментальные профили съема для различных источников ИЛО использовались при моделировании и расчете сеансов программно-управляемого формообразования поверхности детали.

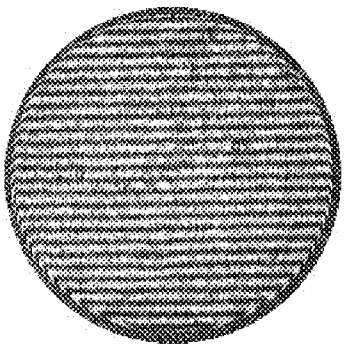


Рисунок 6.
Интерферограмма обработанной детали. СКО = λ/56

На установке получены первые результаты по формообразованию оптических поверхностей деталей с использованием описанной методики. На рис. 6 представлена интерферограмма обработанной поверхности. СКО = λ/56.

В настоящее время проводится доработка и совершенствование узлов системы, выполняется отладка технологического процесса и программного обеспечения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Созданная установка «Луч-2,5» позволяет достигать точности формы поверхности по RMS до λ/60 для крупногабаритных оптических деталей диаметрами до 2,5 м при помощи ИЛО. Выполняются работы по отладке и совершенствованию системы ИЛО для достижения стабильных результатов обработки и обеспечения уверенного достижения формы поверхности с точностью формы по среднеквадратичному отклонению (RMS) до λ/100 и микрошероховатостью по RMS не хуже 2 нм для оптических деталей вне зависимости от их конструктивного исполнения (линзы, зеркала, пластины, клинья), вида внешнего контура и формы поверхности (плоские, сферические и асферические).

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КРАЕВЫХ ЭФФЕКТОВ НА ТОЧНОСТЬ ГРАНИЦ МНОГОЗОННЫХ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ (ОБМЕН ОПЫТОМ)

ГАЙНУТДИНОВ И.С. - доктор технических наук, ГУСЕВ А.Г., КОЛЬЦОВ А.Ю., ХАСАНОВ А.М., ГАЛИЕВ А.Н.

ОАО "НПО ГИПО", г. Казань

E-mail: npogipo@tnpko.ru,

В работе рассмотрены вопросы технологии изготовления двухзонных интерференционных фильтров с помощью экранирующих масок. Дано объяснение нечеткости границы покрытий, исследовано влияние "краевых" эффектов на точность границ двухзонных интерференционных фильтров.

Ключевые слова: интерференционный фильтр, двухзонный, маска.

В случае необходимости получения нескольких различных покрытий в разных зонах одной и той же подложки обычно используется метод масок. Каждое покрытие наносится через соответствующую маску, определяющую положение покрытия на подложке. Выполнение заданных требований к границе покрытия должно обеспечиваться тщательным и точным изготовлением режущей кромки маски. Кроме того, недопустимы зазоры между маской и поверхностью подложки. Маска должна плотно прилегать к подложке. Это означает, что поверхность маски должна быть отполирована по высокому классу.

Наиболее технологичными материалами для изготовления маски являются металлы. Однако полировка металлов всегда дает качество поверхности значительно хуже, чем можно получить на стекле или кристаллах. Кроме того, полное сопряжение двух поверхностей из разных материалов практически невозможно, поэтому между маской и поверхностью подложки всегда остается малый зазор.

Проведенные эксперименты показали, что поверхность подложки под маской на 10 - 15 мкм от ее кромки оказывается покрытой слоем испаряемого пленкообразующего вещества (действие маски и краевые эффекты, возникающие при этом, иллюстрирует рис. 1).

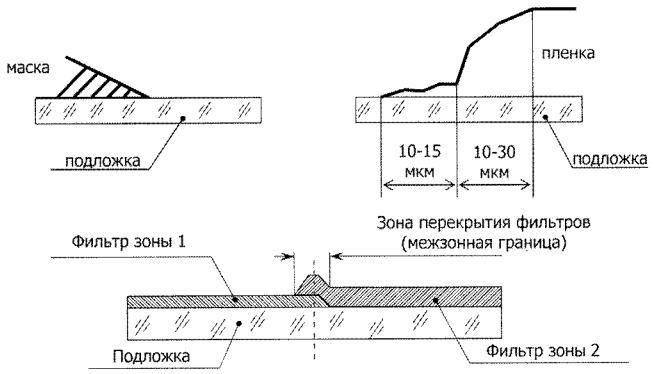


Рисунок 1.
Применение маски для формирования границ зон фильтров

Объяснение факта образования тонкого слоя под маской лежит в процессах диффузии конденсируемого материала по поверхности подложки, "подпылении" через зазор при больших углах падения пучка атомов испаряемого материала (это происходит при вращении общей системы для получения равномерного по покрываемой площади покрытия и изменения угла падения пучка на подложку), изменении положения края маски на подложке из-за теплового расширения материала маски. Следует отметить, что управление температурой маски для предотвращения смещения положения границы покрытия выполнить невозможно. В процессе нанесения покрытия производится управление только температурой подложки, что необходимо для получения интерференционных покрытий со строго заданными свойствами. Тепловые свойства материала маски отличаются от тепловых свойств материала подложки. Поэтому температура маски в каждый момент времени оказывается отличной от температуры подложки и ход изменения температур маски и подложки не совпадают.

Кроме этого, толщина слоя покрытия в области границы плавно уменьшается от заданного значения в нескольких десятках микрон от границы до малого значения на самой границе. Это малое значение и продолжается в область "тени".

Такое изменение толщины слоев можно объяснить процессами отражения пучка испаряемого материала от маски и скачком температуры между подложкой и маской, что следует из представлений [1, 2]. Очевидно, что температура маски выше, чем температура поверхности подложки, что и служит причиной подобного роста слоя вблизи границы. Более детальное рассмотрение кинетики образования слоя в области границы пока не проводилось, так как это требует создания специальных математических моделей образования слоя с привлечением сложного аппарата современной теории необратимых процессов.

В области границы между различными зонами происходит наложение покрытий из-за не абсолютно точного совмещения положения масок и процессов, указанных выше. Это усложненное наличием маски расширение области границы вносит дополнительные эффекты. Наличие маски приводит к искажению распределения толщины слоев покрытия в области границы как из-за перекрытия в установке масок, так и из-за всех указанных выше эффектов различия температуры и процессов диффузии.

Наличие пленки в "тени" маски накладывает ограничение на ширину минимально возможной области перекрытия покрытий при их нанесении на сопряженные зоны одной подложки. Очевидно, при изготовлении многозонных покрытий, ширина зоны перекрытия которых должна быть менее 10 мкм, необходимо использовать методы, позволяющие получать более четкие границы, например, метод фотолитографии.

До тех пор, пока площадь покрытия много больше площади граничных искажений, эффектами границы можно пренебречь. Прозрачность фильтра (или любого иного интерференционного покрытия) следует определить как:

$$T = \int_{S} T(r,\varphi) r dr d\varphi - \int_{S1} T(r,\varphi)\, r dr d\varphi \quad ,$$

где S - полная площадь покрытия в заданном окне, а r, - полярные координаты на поверхности, S_1 - площадь границы, $T(r, \varphi)$ - пропускание фильтра в точке с полярными координатами r, φ.

Если площадью занятой границей можно пренебречь (что бывает в обычных случаях нанесения одного интерференционного покрытия на подложку), то второй интеграл выпадает из рассмотрения и выражение для прозрачности фильтра оказывается обычным.

Для изготовления двухзонных фильтров и обеспечения четкой и точной границы между зонами нами была разработана и изготовлена технологическая оснастка, принцип действия которой состоит в следующем. Подложка фильтра устанавливается на основание и прижимается к упору. Границу зон формируют стальные ножи, передвигаемые по направляющим с помощью микрометрического винта. Сначала открыта для напыления поверхность первой зоны фильтра, поверхность второй зоны фильтра закрыта поверхностью ножа.

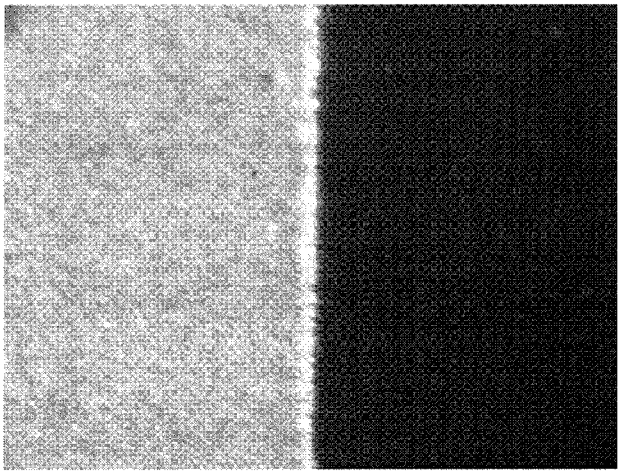


Рисунок 2.
Фотография границы фильтра первой зоны при использовании разработанной технологической оснастки

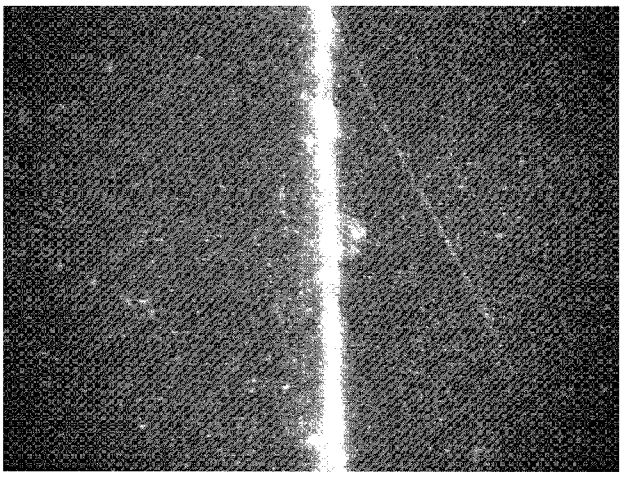


Рисунок 3.
Фотография границы между фильтрами первой и второй зон, полученная с использованием разработанной технологической оснастки

Результат напыления фильтра первой зоны и его граница при использовании разработанной оснастки показан на рис. 2.

После напыления фильтра на первую зону подложка разворачивается на основании таким образом, что открытой для напыления становится вторая зона фильтра. Граница области перекрытия фильтров первой и второй зон показана на рис. 3.

Разработанная технологическая оснастка обеспечивает получение межзонной области перекрытия фильтров для многоспектральных фотоприемных устройств ИК спектрального диапазона шириной от 20 до 60 мкм.

Список литературы:

1. *Днепровский В.Г., Осадин Б.А., Русаков Н.В.* К конденсации плотного потока пара//ЖТФ, 1974, т. 44, вып. 2, с. 435-441.

2. *Журавлев В.А.* Термодинамика необратимых процессов. - Ижевск: Изд-во Удмуртского университета, 1998.

3. *Шпильрайн Э.Э., Кессельман П.М.* Основы теории теплофизических свойств веществ. - М.: Энергия, 1977.

ОПТИЧЕСКИЕ ПОКРЫТИЯ ДЛЯ СОВРЕМЕННЫХ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ (ОБЗОР)

ГАЙНУТДИНОВ И.С. - доктор технических наук, САБИРОВ Р.С. - кандидат технических наук, АЗАМАТОВ М.Х.

ОАО "НПО ГИПО", г. Казань

E-mail: npogipo@tnpko.ru,

В статье выполнен обзор оптических покрытий, разработанных одним из ведущих предприятий отрасли – ОАО «НПО ГИПО». Приведены номенклатура выпускаемых типов оптических покрытий и их технические характеристики, указаны возможные области применения.

Ключевые слова: оптические покрытия, фильтры, просветляющие покрытия, отражающие покрытия.

Оптические покрытия являются неотъемлемой частью современной оптоэлектроники. Применение покрытий позволяет улучшить энергетику приборов за счет увеличения коэффициента пропускания оптических элементов в рабочих спектральных диапазонах, увеличить соотношение сигнал/шум путем подавления фонового излучения, повысить помехозащищенность благодаря устранению бликов [1,2].

В ОАО "НПО ГИПО" на протяжении нескольких десятков лет разрабатываются и изготавливаются оптические покрытия различного функционального назначения для УФ, видимой и ИК областей спектра. За это время предприятием накоплен огромный опыт в создании оптических покрытий -от расчета и синтеза конструкций до изготовления и испытаний образцов. Разработанные покрытия находят применение в современных оптико-электронных приборах. Основные типы оптических покрытий, изготавливаемые в ОАО "НПО ГИПО", представлены ниже.

Просветляющие покрытия для дневных, ночных, тепловизионных, дальномерных каналов оптико-электронных приборов [3,4].

Просветляющие покрытия на лазерные длины волн видимого и ближнего ИК диапазонов с остаточным отражением не более 0,1%. Просветляющие покрытия для оптических элементов лазерных систем, изготовленные на основе пленкообразующих материалов из тугоплавких окислов, обладают малыми потерями на рассеяние и высокой лучевой прочностью.

Широкополосные (ахроматические) просветляющие покрытия для оптических деталей из оптического стекла, кремния, германия и селенида цинка служат для увеличения коэффициента пропускания полезного излучения в рабочих спектральных диапазонах приборов. Среднее значение коэффициента пропускания оптических элементов с двухсторонним широкополосным просветлением в рабочих спектральных диапазонах составляет не менее 99% в спектральных

диапазонах 0,4 - 0,7 мкм и 0,6 - 0,9 мкм, не менее 94% в спектральных диапазонах 3-5 мкм и 8 - 11 мкм.

"Солнечно-слепой" фильтр для УФ-пеленгаторов [5]

Разработанный фильтр предназначен для работы в составе приборов пеленгации для обнаружения объектов по их УФ-излучению. Глубокое подавление фона в спектральной области от 300 до 1000 нм позволяет устранить влияние излучения Солнца на фотоприемник. Солнечное излучение в области длин волн короче 300 нм сильно поглощается озоновым слоем земной атмосферы, поэтому помехи, вызванные им, в этой зоне отсутствуют. Максимальное значение коэффициента пропускания фильтра в спектральном диапазоне 280 - 290 нм составляет не менее 30%, а фоновое пропускание в области блокировки 300 - 800 нм не превышает 1×10^{-7} %. Такие характеристики фильтра достигнуты благодаря комбинированной фильтрации излучения как цветными стеклами, так и несколькими интерференционными системами, общее количество слоев в которых превышает 300.

Интерференционные фильтры для многоспектральных глубокоохлаждаемых фотоприемников ИК-спектрального диапазона [2]

Разработанные двухзонные блокирующие и полосовые интерференционные фильтры обеспечивают пространственную и спектральную селекцию падающего на них излучения. Межзонная граница фильтров составляет не более 30 мкм. Фильтры работоспособны при температурах до минус 196°С и используются в составе многоспектральных фотоприемных устройствах мозаичного (матричного) типа, требующих охлаждения жидким азотом. Разработанные фильтры охватывают спектральный диапазон от 1,5 до 15 мкм.

Алмазоподобные защитно-просветляющие покрытия для входных окон тепловизионных приборов

Используемая технология получения алмазоподобных пленок основана на разложении углеводорода (пропана) ионным пучком в плазме газового разряда. Метод прямого осаждения углерода на подложку позволяет получать износостойкие пленки с алмазоподобной структурой. Стойкость к внешним воздействиям (механическая прочность, химическая инертность к агрессивным средам, термо- и влагопрочность) дает возможность использовать пленки алмазоподобного углерода в приборах, работающих в самых жестких условиях эксплуатации приборов. Разработанные многослойные двухсторонние покрытия, имеющие в своем составе слой алмазоподобного углерода, позволяют увеличить максимальное значение коэффициента пропускания оптических элементов из германия в спектральном диапазоне от 8 до 12 мкм до 94%, оптических элементов их кремния в спектральном диапазоне от 3 до 5 мкм до 96%.

ОАО "НПО ГИПО" обладает большим опытом в изготовлении отражающих покрытий различного назначения, как на основе диэлектрических пленкообразующих материалов, так и получаемых напылением металлов (серебро, алюминий, золото) [1,2].

Изготавливаемые высокоотражающие металлические зеркала служат для отражения излучения в широком спектральном интервале при формировании телевизионных и/или ИК каналов приборов. Коэффициент отражения зеркал из напыленного золота составляет не менее 98,0% в спектральном диапазоне от 1 до 12 мкм.

Диэлектрические покрытия с высоким значением коэффициента отражения (до 99,99% на лазерной длине волны) находят применение в зеркалах лазерных резонаторов, обладают высокой лучевой прочностью и малыми потерями на поглощение и рассеяние.

Кроме того, изготавливаются отражающие диэлектрические системы с заданным значением коэффициента отражения - от 50% до 99% для светоделения падающего излучения [6].

Интерференционные узкополосные и полосовые фильтры

Фильтры с рабочими длинами волн в спектральном диапазоне от 0,4 до 15 мкм служат для выделения излучения заданных спектральных интервалов и наносятся на оптические элементы из оптического и кварцевого стекла, оптической

керамики, кремния, германия [1,2,7, 8]. Относительная полуширина узкополосных фильтров составляет от 1 до 3% , коэффициент пропускания от 60 до 90%, среднее пропускание в области блокировки не более 0,1%.

ОАО "НПО ГИПО" - одно из немногих предприятий, владеющих технологией изготовления малогабаритных **линейных перестраиваемых узкополосных фильтров** [9]. Особенность такого типа покрытий заключается в линейном изменении толщин их слоев от одного края подложки к другому. Благодаря этому на плоскопараллельной пластине длиной 15 - 70 мм располагается непрерывный ряд узкополосных фильтров, рабочие длины волн которых охватывают широкую область спектра. Линейные узкополосные перестраиваемые фильтры могут быть использованы в составе современной оптико-электронной аппаратуры для решения широкого круга задач от дистанционного мониторинга и анализа окружающей среды и удаленных объектов до обнаружения и распознавания сигналов сложного спектрального состава.

На нашем предприятии разработаны перестраиваемые фильтры на спектральные диапазоны от 0,4 до 1,0 мкм, от 3 до 5 мкм, от 8 до 12,5 мкм.

Коротковолновые и длинноволновые блокирующие интерференционные фильтры

Служат для спектрального разделения светового потока [10, 11]. Фильтры, разработанные в ОАО "НПО ГИПО" обладают крутизной (контрастностью) более 0,97, высокой прозрачностью в области пропускания и подавлением фонового излучения в области блокировки до 0,01%.

Все покрытия, разработанные на нашем предприятии, обладают высокими эксплуатационными характеристиками - механической, химической, термической прочностью и влагопрочностью. Наличие опытных, высококвалифицированных специалистов, а также современного технологического, измерительного и испытательного оборудования позволяют нам успешно разрабатывать новые типы покрытий для решения стоящих перед отечественным оптико-электронным приборостроением задач.

Список литературы:

1. *Гайнутдинов И.С., Несмелов Е.А., Хайбуллин И.Б.* Интерференционные покрытия для оптического приборостроения. - Казань, изд-во "Фэн", 2002 г.

2. *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, изд-во "Фэн", 2003 г.

3. *Гайнутдинов И.С., Несмелов Е.А., Азаматов М.Х., Каримов Р.Т., Сафин Р.Г., Абзалова Г.И.* Достижение предельных характеристик просветляющих интерференционных покрытий. // Оптический журнал, 2007 г., т.74, №3, с.75-78.

4. *Гайнутдинов И.С., Шувалов Н.Ю., Сабиров Р.С., Иванов В.А., Гареев Р.Р.* Просветляющие покрытия на подложках из германия и кремния в окнах прозрачности ИК области спектра 3-5 мкм и 8 - 12 мкм. // Оптический журнал, 2009 г., т.76, №5, с.68-72.

5. *Сафин Р.Г., Гайнутдинов И.С., Сабиров Р.С, Азаматов М.Х.* "Солнечно-слепой" фильтр для УФ области спектра. // Оптический журнал, 2007 г., т.74, №3, с.72-74.

6. *Гайнутдинов И.С., Несмелов Е.А., Сабиров Р.С., Сафин Р.Г.* Широкополосный светоделитель. // Оптический журнал, 2002 г., т.69, №4, с.67-68.

7. *Гайнутдинов И.С., Несмелов Е.А., Алиакберов Р.Д., Михайлов А.В., Абзалова Г.И.* Стабилизация оптических параметров фильтров на основе аморфного кремния. // Оптический журнал, 2004 г., т.71, №12, с.48-53.

8. *Гайнутдинов И.С., Алиакберов Р.Д., Гареев Р.Р., Михайлов А.В., Мирханов Н.Г.* Развитие теории Карда для металлодиэлектрических фильтров. // Оптический журнал, 2009, т.76, №5, с.60-67.

9. *Азаматов М.Х., Валеев Ш.Ш., Гайнутдинов К.Н., Нагимов И.Х.* Учет влияния ширины сканирующей щели при измерении оптических параметров линейных перестраиваемых узкополосных фильтров. // Оптический журнал, 2011г., т.78, №3, с.88-91.

10. *Гайнутдинов И.С., Иванов В.А., Борисов А.Н., Никитин А.С., Несмелов Е.А.* Воспроизводимость спектральных характеристик отрезающих фильтров. // Оптический журнал, 2002 г., т.69, №4, с.62-63.

11. *Гайнутдинов И.С., Несмелов Е.А., Алиакберов Р.Д.* Критерий качества для определения оптимальных параметров широкополосных спектроделителей. // Оптический журнал, 2003 г., т.70, №5, с.83-86.

РАЗРАБОТКА СВЕТОСИЛЬНЫХ ПЕРЕСТРАИВАЕМЫХ УЗКОПОЛОСНЫХ ФИЛЬТРОВ НА ВИДИМЫЙ И ИК СПЕКТРАЛЬНЫЕ ДИАПАЗОНЫ

ГАЙНУТДИНОВ И.С. - доктор технических наук, АЗАМАТОВ М.Х., НАГИМОВ И.Х., КОЛЬЦОВ А.Ю., ХАСАНОВ А.М., ГАЛИЕВ А.Н.

ОАО "НПО ГИПО", г. Казань

E-mail: npogipo@tnpko.ru,

В статье рассмотрены вопросы технологии изготовления перестраиваемых интерференционных фильтров. Приведены основные требования к современным линейным перестраиваемым фильтрам и достигнутые технические параметры разработанных в ОАО "НПО ГИПО" фильтров.

Ключевые слова: линейный перестраиваемый узкополосный фильтр

Линейные перестраиваемые узкополосные фильтры (ЛПУФ), являясь оптическими монохроматизирующими элементами, по геометрической форме представляют собой плоскопараллельные прямоугольные пластины, на которые нанесены многослойные интерференционные системы.

ЛПУФ находят применение в составе газоанализаторов, монохроматоров, радиометров, сканирующих скоростных спектрометров при решении задач контроля загрязнения воздуха, дистанционного мониторинга, астрономии, разделения порядков в дифракционных решетках и т.д.

ЛПУФ в составе многоэлементных приемников изображения могут использоваться в оптико-электронной аппаратуре высокого разрешения, позволяющей оперативно решать задачи обнаружения, распознавания и анализа сложных сигналов.

Технология изготовления ЛПУФ представляет собой напыление в вакууме узкополосных интерференционных фильтров с использованием специально рассчитанных экранирующих масок.

Главной отличительной особенностью ЛПУФ является линейное изменение его рабочей длины волны λ_0 по длине подложки l. Для достижения этого в процессе напыления применяются маски, регулирующие величину осаждаемого вещества таким образом, что толщина каждого слоя пропорционально растет от одного края подложки к другому. Таким образом, ЛПУФ представляет собой непрерывный ряд узкополосных фильтров с изменяющейся по линейному закону рабочей длиной волны. На рис. 1 схематично показан ЛПУФ (1 - подложка длиной l, 2 - узкополосные интерференционные фильтры с рабочими длинами волн от $\lambda_{нач.}$ до $\lambda_{кон.}$, 3 - диафрагма шириной d, выделяющая спектральный диапазон $\Delta\lambda$.

Основными требованиями, помимо оптических характеристик, предъявляемыми в настоящее время к разрабатываемым ЛПУФ, является их миниатюризация - уменьшение габарит-

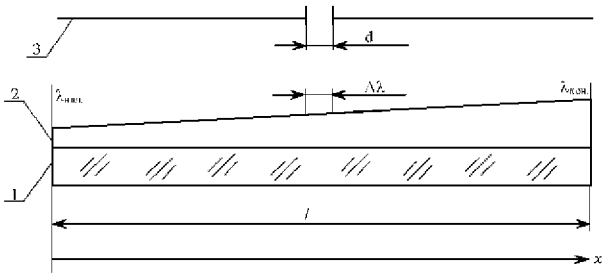


Рисунок 1.
Схема ЛПУФ

ных размеров с целью использования в составе современной оптико-электронной аппаратуры с матричными (многоспектральными) фотоприемными устройствами. За последние годы в ОАО "НПО ГИПО" выполнено несколько работ по разработке ЛПУФ, в результате чего были изготовлены перестраиваемые фильтры длиной 70 мм на спектральные диапазоны от 3 до 5 мкм и от 8 до 12,5 мкм, а также ЛПУФ длиной 15 мм на спектральный диапазон от 0,4 до 1,1 мкм.

Форма спектральной характеристики пропускания ЛПУФ определяется как конструктивными параметрами интерференционного покрытия и составляющих его слоев (количеством и порядком чередования слоев, показателями преломления пленкообразующих материалов, толщинами слоев), так и апертурой светового пятна, используемого при измерении характеристик фильтра (вследствие его неравнотолщинности по длине подложки). Это наглядно проявляется при измерении спектральных характеристик ЛПУФ на приборах с переменным регулируемым размером входной щели. В работе [1] было отмечено, что с увеличением угловой ширины входной щели пропускание кольцевого перестраиваемого узкополосного фильтра падает, а его полуширина растет. Этот вывод справедлив и для линейных перестраиваемых фильтров, что показывают проведенные нами расчеты.

Степень изменения толщин слоев фильтра по длине подложки характеризуется параметром, называемом линейной дисперсией и определяемом из соотношения:

$$\delta = \frac{\lambda_{кон.} - \lambda_{нач.}}{l}, \qquad (1)$$

где $\lambda_{нач.}$ и $\lambda_{кон.}$ - длины волн, определяющие, соответственно, начало и конец рабочего спектрального диапазона ЛПУФ, l - длина ЛПУФ.

Измерение параметров реальных ЛПУФ происходит не точно в координате x, а в имеющих конечную ширину окрестностях этой координаты Δx, определяемых размером диафрагмы сканирующего по поверхности фильтра светового пучка. Поэтому измеренная спектральная характеристика ЛПУФ всегда является результатом интегрирования спектральных характеристик узкополосных фильтров с различными значениями λ_0, соответствующие которым координаты x находятся внутри интервала Δx. Увеличение ширины щели d приводит к увеличению количества суммирующихся фильтров и, соответственно, искажению результирующей спектральной характеристики - уменьшению максимального коэффициента пропускания и увеличению относительной полуширины. Влияние ширины диафрагмы на оптические параметры ЛПУФ рассмотрено в работе [2].

Основными оптическими параметрами ЛПУФ являются максимальное пропускание, относительная полуширина и пропускание в области блокировки. Исходя из требований конструкция узкополосных фильтров могут представлять собой как фильтр Фабри-Перо, так и контрастный интерференционный фильтр (состоящий из нескольких последовательных элементарных фильтров Фабри-Перо). Подавление фонового излучения в области блокировки, которое не устраняется узкополосными фильтрами, обеспечивается нанесением дополнительных блокирующих фильтров либо на обратную сторону подложки, либо на вторую подложку. Контрастные фильтры более трудоемки в изготовлении, и имеют в несколько раз большую толщину, чем фильтры конструкции Фабри-Перо. Толщина контрастных фильтров ограничивает возможность их изготовления видимой и ближней ИК областями спектра. Преимущества таких конструкций фильтров в сравнении с фильтрами типа Фабри-Перо заключаются в лучших значениях оптических параметров (контрастность, фоновое пропускание) и меньшем искажении формы спектральной кривой по мере увеличения ширины щели.

Таблица 1.

Технические параметры разработанных ЛПУФ

Параметры ЛПУФ	Спектральный диапазон ЛПУФ		
	3…5 мкм	8…12,5 мкм	0,4….1,1 мкм
Длина фильтра, мм	70	70	15
Коэффициент пропускания на рабочей длине волны, % при размере пятна засветки 0,5х5 мм	Не менее 30	Не менее 30	Не менее 20
Относительная полуширина	Не более 1,3	Не более 1,3	Не более 3.0
Среднее пропускание в области блокировки, %	Не более 0,1	Не более 0,1	Не более 0,2
Тип конструкции	Фабри-Перо	Фабри-Перо	контрастный
Пленкообразующие материалы	Ge/SiO	PbTe/ZnSe	ZrO_2/SiO_2
Материал подложки	Ge, КО-1	Ge	К-108
Количество подложек	2	2	2

В результате проведенных теоретических расчетов и экспериментальных исследований нами были разработаны ЛПУФ некоторые параметры которых приведены в табл. 1.

Список литературы:

1. *Марциновский В.А., Несмелов Е.А.* Исследование зависимости спектральных характеристик кольцевых перестраиваемых фильтров от ширины входной щели монохроматора // Журнал прикладной спектроскопии. 1984. Т.40. №2. С.250-254.

2. *Азаматов М.Х., Валеев Ш.Ш., Гайнутдинов К.Н., Нагимов И.Х.* Учет влияния ширины сканирующей щели при измерении оптических параметров линейных перестраиваемых узкополосных фильтров // Оптический журнал. 2011. Т.78, №3. С.88-91.

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРОЦЕССА ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ ИЗ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ОПТИЧЕСКИХ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ

ФИЛАТОВ Ю.Д. - **доктор технических наук,** **КОВАЛЕВ С.В.** - **кандидат технических наук**

Институт сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины, г. Киев, Украина

E-mail: filatov@ism.kiev.ua

Показано, что на шероховатость обработанной поверхности наибольшее влияние оказывают число молекулярных фрагментов, из которых состоят частицы шлама, их наиболее вероятный размер, частоты собственных колебаний фрагментов обрабатываемого материала и инструмента, теплопроводность обрабатываемого материала и режимы обработки.

Ключевые слова: шероховатость поверхности, полирование, частицы шлама.

ВВЕДЕНИЕ

Основными показателями, характеризующими эффективность процесса финишной обработки поверхностей деталей электронной техники и оптических систем, декоративно-художественных изделий и архитектурных форм из природного и синтетического камня, а также прецизионных деталей из функциональных материалов различного назначения из металлов, полупроводников и диэлектриков различных форм и конструкций, являются шероховатость, оптическая чистота, отражающая способность и дефектность. Указанные показатели обработанных поверхностей зависят от размеров частиц износа и шлама и их поведения в зоне контакта инструмента и детали. Актуальность рассматриваемой проблемы обусловлена тем, что улучшение качества обработки прецизионных деталей возможно лишь на основе изучения влияния физико-механических свойств обрабатываемого материала и полировального порошка в инструменте, характеристики и конструкции алмазно-абразивного инструмента, режимных и кинематических параметров процесса обработки на формирование микрорельефа обрабатываемой поверхности.

Результаты исследований механизма полирования неметаллических материалов [1-7] и основные положения кластерной модели износа твердых тел [1, 5, 7] позволили подтвердить активационный характер съема обрабатываемого материала, описать статистически распределение частиц шлама по площадям поверхности при помощи распределения Пуассона с параметром $\nu=E_b/E_{cl}$ (E_{cl} - энергия кластера, Eb - энергия связи обрабатываемого материала) и оценить вероятность их образования, пропорциональную $\exp(-\nu)$ [6-8]. Анализ закономерностей образования и удаления частиц шлама при финишной обработке неметаллических материалов в рамках физико-статистической модели [9] позволил установить, что удаление обрабатываемого материала (массоперенос) при полировании является результатом процессов диспергирования микро- и наночастиц.

Размеры частиц шлама зависят от числа образующих их молекулярных фрагментов и определя-

ют как производительность процесса полирования, так и шероховатость обработанной поверхности [1, 11]. При этом корреляции интенсивности съема обрабатываемого материала с механическими характеристиками обрабатываемого материала и полировального инструмента не наблюдается [2, 7]. Шероховатость полированных поверхностей (среднее квадратичное отклонение профиля *rms*) деталей из оптического стекла не зависит от его микротвердости [3].

Влияние физико-механических свойств обрабатываемого материала, характеристик инструмента и режимов обработки на формирование микрорельефа поверхности

Параметры шероховатости поверхностей деталей из поделочного, строительного природного и синтетического камня (амазонита, обсидиана, чароита, яшмы, базальта, габбро, гранита, керамического гранита фирм "Kentaur" (Чехия), "Mirage"(Италия), "Pamesa Ceramica" (Испания)), а также оптического стекла марки К8, полированных инструментом со связанным полировальным порошком диоксида церия или оксида алюминия, определялись при помощи профилографа "Mitutoyo". На основе результатов исследования влияния строения и структуры обрабатываемого материала на шероховатость обработанной поверхности установлено, что среднеарифметическое отклонение профиля линейно зависит от числа ξ молекулярных фрагментов (рис. 1). На рис. 2 приведена линейная зависимость параметра *Ra* шероховатости от наиболее вероятного размера a_v частиц шлама, введенного проф. Цеснеком Л.С., которая может быть аппроксимирована линейной функцией $Ra = \alpha_1 a_v + \beta_1$ (где $\alpha_1 = 4{,}2$; $\beta_1 = -0{,}012$ мкм - коэффициенты, определенные при помощи метода наименьших квадратов; погрешность аппроксимации - 16 %). Исходя из условия $Ra > 0$, можно оценить минимально-допустимое значение наиболее вероятного размера a_v частиц шлама, образующихся в процессе полирования. Это значение составляет $a_{v\min} \approx 3$ нм (для стекла марки К8 a_v=3,2 нм [7]).

Анализируя полученные зависимости, можно заключить, что чем больше число молекулярных фрагментов (то есть, чем меньше отличаются частоты собственных колебаний молекулярных фрагментов ω_{01} и ω_{02}, наиболее близко расположенные в ИК-спектрах поглощения), тем выше значение высотных параметров шероховатости. Кроме того, установлено, что высотные параметры шероховатости полированной поверхности зависят от координаты исследуемой зоны на обработанной поверхности, что не может быть объяснено с точки зрения размеров частиц шлама и их распределения по площадям поверхности. Координатная зависимость шероховатости может быть обусловлена концентрационными зависимостями частиц, траекториями их перемещения, характером их взаимодействия между собой, а также с частицами износа инструмента, с поверхностями рабочего слоя инструмента и обрабатываемой детали в контактной зоне, и механизмом образования налета [10-11] на контактирующих поверхностях. По аналогии с координатной зависимостью шероховатости поверхностей деталей из оптического стекла при тонком алмазном шлифовании [12], которая описывается периодической функцией, указанные зависимости могут быть объяснены на основе результатов исследования динамики столкновений и рассеяния частиц шлама в контактной зоне. Однако, при исследовании состояния полированных поверхностей нельзя ограничиться лишь рассмотрением потока частиц шлама с учетом эрозионного износа обрабатываемой поверхности - как при шлифовании, а необходимо исследовать поведение частиц шлама и частиц износа полировального инструмента в контактной зоне, определить их концентрации, смоделировать траектории их перемещения с учетом зарядового состояния, а также

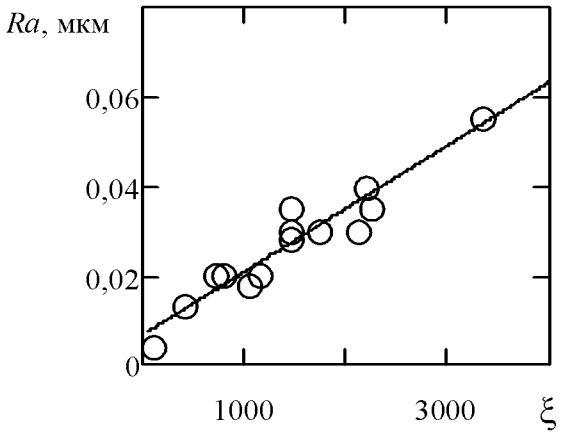


Рисунок 1.
Зависимость шероховатости от числа молекулярных фрагментов в частице шлама

особенностей столкновения и рассеяния наночастиц, оценить потенциалы их взаимодействия и эффективные дифференциальные сечения рассеяния.

Согласно физико-статистической модели образования и удаления частиц шлама с обрабатываемой поверхности их концентрация $c_i(z,\tau)$ в зависимости от координат и времени обработки определяется по формуле [9, 12]

$$c_i(z,\tau) = n_{0i}\left[1 - \frac{erf\left(\frac{z}{2\sqrt{\eta_i\,\tau}}\right)}{erf\left(\frac{\alpha}{2\sqrt{\eta_i}}\right)}\right],$$

где: n_{0i} - концентрация i-x частиц шлама на поверхности, ξ_m - коэффициент массового износа, $\eta = \xi_m/\rho$ - коэффициент объемного износа, ρ - плотность обрабатываемого материала, α - коэффициент пропорциональности в законе движения границы раздела инструмент - обрабатываемая поверхность $z = \alpha\sqrt{\tau}$, $erf(.)$ - интеграл ошибок.

Функциональная связь производительности обработки и шероховатости обработанных поверхностей с параметрами физико-статистической модели (L_t, λ, T, ρ_a, u, n_{0i}, S_i) выражается их зависимостями от безразмерного параметра $\theta = \frac{\lambda T L_t}{p_a u S_k}$, концентрации и размеров частиц шлама (L_t - длина пути трения элемента рабочего слоя инструмента по обрабатываемой поверхности детали, λ - коэффициент теплопроводности обрабатываемого материала, T - температура, ρ_a - номинальное давление прижима инструмента к обрабатываемой поверхности, u - скорость относительного перемещения инструмента и детали, S_k - площадь контакта инструмента и детали, S_i - площадь поверхности i-ой частицы).

Влияние физико-механических свойств обрабатываемого материала на параметры микропрофиля обработанной поверхности иллюстрируется зависимостью параметра шероховатости Ra поверхностей деталей из неметаллических материалов (стекла, хрусталя, природного и синтетического камня) от

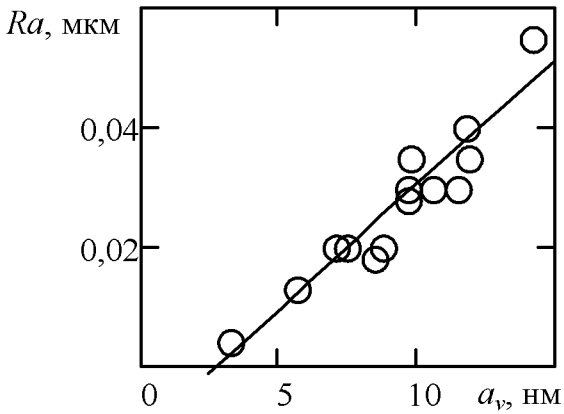


Рисунок 2.
Зависимость шероховатости от наиболее вероятного размера частиц шлама

безразмерного параметра θ. При полировании оптического стекла марок ТФ110, ТК21, БФ12, ТФ101, ТФ102, ТК116, К8 и хрусталя шероховатость поверхностей оценивается параметром $Ra \approx 0{,}01$ мкм и практически не зависит от их физико-механических свойств (рис. 3, участок 1). При полировании природного и синтетического камня возрастание параметра Ra при увеличении параметра θ (рис. 3, зона 2) объясняется следующим. При обработке материалов с большей теплопроводностью (с большим значением параметра θ) согласно уравнению $\xi_m U^* = \lambda T$ [13] (U^*- энергия переноса) возрастает ξ_m, то есть размеры частиц шлама увеличиваются и, соответственно, ухудшается шероховатость. Физический смысл безразмерного параметра (коэффициента переноса) θ состоит в том, что он показывает какая часть механической энергии W_m, затрачиваемой на процесс обработки, переноситься частицами шлама при их удалении с поверхности, а его отношение к коэффициенту трения k_t может быть выражено как $\frac{\theta}{k_t} = \frac{U_\Sigma^*}{W_m}$ (U_Σ^* - полная энергия переноса). При его увеличении увеличивается энергия переноса и уменьшается энергия диспергирования, что приводит к уменьшению производительности съема обрабатываемого материала и ухудшению шероховатости качества обработанной поверхности.

Влияние характеристики и конструкции алмазно-абразивного инструмента на шероховатость

обработанной поверхности проявляется через параметры физико-статистической модели (n_{0i}, L_{t_i}, S_i). Согласно *ad hoc* предположению о пропорциональной зависимости шероховатости обработанной поверхности от концентрации n_{0i} и площади поверхности S_i частиц шлама, которые увеличиваются одновременно с размером алмазных или абразивных зерен в рабочем слое инструмента, параметр шероховатости Ra пропорционален зернистости алмаза или абразивного порошка в инструменте.

Из физико-статистической модели также следует, что Ra зависит от L_t (пропорционально) и от площади S_k контакта инструмента с поверхностью детали (обратно-пропорционально), которые определяются размерами и количеством отдельных элементов рабочего слоя инструмента, а влияние концентрации алмазного или абразивного порошка и материала связующего инструмента на шероховатость обработанной поверхности не может быть выявлено. Влияние режимных и кинематических параметров процесса обработки на шероховатость обработанной поверхности иллюстрируется зависимостью параметра Ra поверхности детали из стекла марки К8 от удельной мощности, потребляемой в процессе ее тонкого алмазного шлифования (рис. 4). При увеличении произведения $p_a u$, значение параметра θ уменьшается и, соответственно, снижается шероховатость обработанной поверхности.

Исходя из приведенных закономерностей, для полирования конкретного материала можно не только оценить целесообразность применения того или иного абразива (полировального порошка), определить оптимальный состав абразивной массы инструмента, а и установить режимы, при которых достигается необходимое качество обработанных поверхностей. Для высококачественной обработки различных материалов, требования к шероховатости которых выражаются неравенством $Ra \leq 0{,}02$ мкм, необходимо, что бы с обрабатываемой поверхности удалялись наночастицы шлама с наиболее вероятным размером $a_v \leq 10$ нм (рис. 2), что может быть достигнуто при использовании полировального инструмента из нанопорошков ультрадисперсных алмазов (УДА) на основе специального связующего, например кремнийорганического [14]. В результате экспериментальных исследований состояния полированных поверхностей различных материалов (диэлектриков, полупроводников и металлов), обработанных указанным инструментом установлено, что величина их параметра шероховатости Ra находится в диапазоне 0,01 мкм $\leq Ra \leq$ 0,02 мкм. Полированные поверхности оптических деталей из стекла марки К8 характеризуются уровнем шероховатости Ra 0,01 и наличием отдельных микроскопических дефектов, число и площадь которых регламентируется соответствующими стандартами на оптическую чистоту. Полированные поверхности подложек для ус-

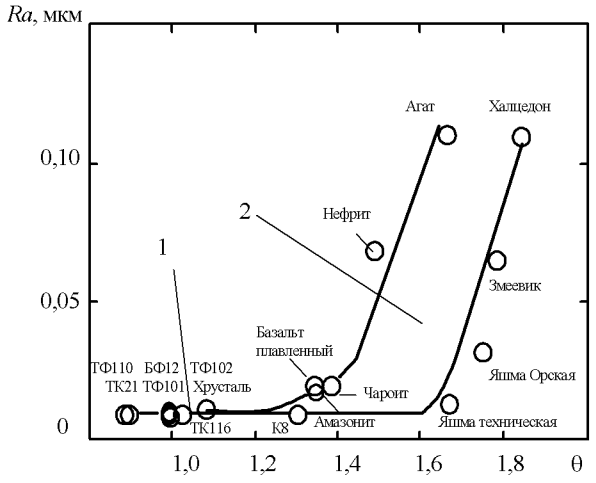


Рисунок 3.
Зависимость параметра шероховатости Ra от параметра θ

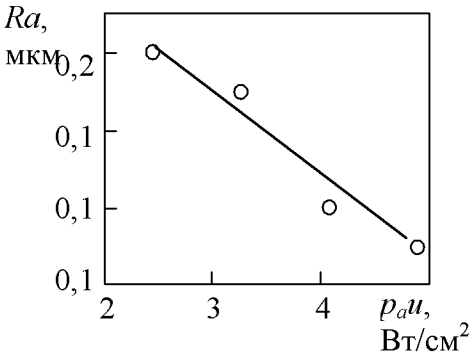


Рисунок 4.
Зависимость шероховатости обработанной поверхности от удельной мощности

тройств ИК-техники из антимонида индия (InSb) характеризуются уровнем шероховатости $Ra \leq 0{,}01$ мкм и для обеспечения требуемого для них качества обработки требуют дополнительного полирования специальными суспензиями нанопорошков, обеспечивающими практически полное отсутствие дефектов на обработанной поверхности. При полировании прецизионных элементов пресс-форм для изготовления световозвращающих устройств из стали 95Х18У8 обеспечивается практически бездефектная обработка их рабочих поверхностей, что приводит к существенному возрастанию износостойкости пресс-форм и улучшению качества изделий, изготовленных с их помощью.

ВЫВОДЫ

В результате проведенных исследований обобщены закономерности влияния физико-механических свойств обрабатываемого материала и полировального порошка в инструменте на эффективность процесса полирования. Показано, что определенные кластерной моделью износа поверхностей и физико-статистической моделью образования и удаления частиц шлама при полировании зависимости шероховатости обработанной поверхности от размеров частиц соответствуют экспериментальным данным. Они позволяют осуществить оптимальный выбор полировального порошка для изготовления рабочего слоя инструмента, при использовании которого достигается требуемое качество полированной поверхности применительно к конкретному обрабатываемому материалу.

Список литературы:

1. *Филатов Ю.Д., Рогов В.В.* Кластерная модель механизма усталостного износа SiO_2-содержащих материалов при их полировании инструментом со связанным полировальным порошком на основе диоксида церия. Часть 1 // Сверхтв. материалы. - 1994. -№ 3. - С. 40-43.

2. *Komanduri R., Lucca D.A., Tani Y.* Technological Advances in Fine Abrasive Processes/ Annals of the CIRP. - 1997. - No 46/2. - P. 545-596.

3. *Gillman B.E and Jacobs S.D.* Bound-abrasive polishers for optical glass // Appl. Opt. - V. 37, No. 16. - June 1998. - P. 3498-3505.

4. *Oliver W.* Fahnle and Hedser van Brug. Novel approaches to generate aspherical optical sufaces // Part of the SPIE Conference on Optical Manufacturing and Testing, Denver, Colorado, July 1999, SPIE, vol. 3782. - P. 170-176.

5. *Филатов Ю.Д.* Полирование алюмосиликатных материалов инструментом со связанным полировальным порошком // Сверхтв. материалы. - 2001. - № 3. - С. 36-49.

6. *Rogov V.V., Filatov Y.D., Kottler W., Sobol V.P.* New technology of precision polishing of glass optic // Optical Engineering. - V. 40, august 2001. - P. 1641-1645.

7. *Филатов Ю.Д.* Полирование прецизионных поверхностей деталей из неметаллических материалов инструментом со связанным полировальным порошком // Сверхтв. материалы. - 2008. - № 1. - С. 59-66.

8. *Скрябин В.В., Филатов Ю.Д., Сидорко В.И.* Закономерности полирования деталей из алюмосиликатных материалов инструментом со связанным полировальным порошком // Сверхтв. материалы. - 2004. - № 6. - С. 73-78.

9. *Филатов Ю.Д., Сидорко В.И.* Статистический подход к износу поверхностей деталей из неметаллических материалов при полировании // Сверхтв. материалы. - 2005. - № 1. - С. 58-66.

10. *Филатов Ю.Д., Рогов В.В.* Особенности процесса полирования стекла инструментом со связанным полировальным порошком // Оптика и спектроскопия. - 1993. - Т. 74. - вып. 6. - С. 1229-1235.

11. *Попереченко Л.В., Филатов Ю.Д.* Технологія обробки оптичних поверхонь. Навчальний посібник для студентів фізичного факультету. - К.: Видавничо-поліграфічний центр "Київський університет".- 2004. - 165 с.

12. *Филатов А.Ю., Сидорко В.И., Филатов Ю.Д.* Особенности формирования макро- и микрорельефа плоских поверхностей деталей из неметаллических материалов при алмазном шлифовании // Сверхтв. материалы. - 2007. - № 6. - С. 48-57.

13. *Сидорко В.И., Филатов Ю.Д.* Закономерности образования нарушенного слоя при финишной обработке неметаллических материалов // Прогресивні технології і системи машинобудування. - Донецьк: ДонНТУ. - 2005. - Вип. 30. - С. 181-185.

14. Пат. 15433 Україна, МПК B24D3/20. Маса для виготовлення робочого шару абразивного інструмента / М.В.Новіков, Ю.Д.Філатов, В.И.Сідорко та ін.- Заявл. 14.10.2005; Опубл. 17.07.2006, Бюл. № 7.

ИССЛЕДОВАНИЕ КОМБИНИРОВАННОГО ИНСТРУМЕНТА С РЕЖУЩИМИ ПЛАСТИНАМИ ОСНАЩЕННЫМИ СТМ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ ОПТИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ

ГРЕЧИШНИКОВ В. А. - доктор технических наук, ПЕТУХОВ Ю.Е. - доктор технических наук, ТАРАСОВ А.В., РОМАНОВ В.Б. - кандидат технических наук, ДОМНИН П.В. - кандидат технических наук, ЧУЛИН И.В. - кандидат технических наук, ЮНУСОВ В.В.

ФГБОУ ВПО МГТУ "СТАНКИН", г. Москва

E-mail: ittf.stankin@gmail.com

Рассмотрены вопросы применения комбинированного инструмента, оснащённого режущими пластинами с СТМ для обработки ступенчатых отверстий. Освещаются вопросы конструирования инструментов в зависимости от обрабатываемого материала, требуемой геометрии обработки, режимов резания, с учётом погрешностейвозникающих в процессе установки и работы инструмента, с целью выявления отклонений параметров конструкции инструмента от номинала.

Ключевые слова: комбинированный инструмент, ступенчатое отверстие, СМП, силы резания.

При изготовлении инструмента для обработки ступенчатых отверстий необходимо учитывать погрешности, влияющие на точность обрабатываемых отверстий. Погрешности, вызываемые деформацией вспомогательного инструмента, составляют в ряде случаев 60% и более от суммарной погрешности обработки. Роль приспособлений для металлорежущего инструмента возрастает с повышением требований к точности изготовления изделий, с развитием и совершенствованием объектов производства, с увеличением частоты смены изготовляемых деталей, а также с повышением уровня автоматизации и механизации процессов механической обработки путем внедрения станков с ЧПУ и автоматизированных производств на их основе.

При обработке ступенчатых отверстий ступенчатым сверлом оснащенным СМП, из-за разностей сил резания, действующие на пластину в трех плоскостях (x, y, z), требуемое отверстие может не соответствовать техническим требованиям, задаваемые конструктором. Разность силовых составляющих оказывает влияние на точность ступенчатого отверстия. В результате требуемое ступенчатое отверстие выходит за поле допуска номинального диаметра или же возникает погрешность в геометрической форме.

Для выявления факторов, влияющих на разность силовых составляющих, с целью предупреждения и исключения их влияния на обработку многоступенчатых отверстий, инструментами, оснащенными многогранными твердосплавными пластинами, были использованы: инструменты с геометрическими параметрами изменяемые в определенном диапазоне, разные условия обработки и материалы с разными физико-механическими характеристиками (жаропрочная сталь - 12Х13 ГОСТ 5632-72, алюминиевый сплав - АК6 ГОСТ 10702-78 и сталь 40 ГОСТ 4784-74). Исходные данные для расчетов представлены в табл. 1.

Работу в сплошном материале ведут двухступенчатым сверлом. Пластины WCMX, расположенные на первом диаметре, работают в сплошном материале, трехгранные пластины TCMT распо-

Таблица 1.

Исходные данные для определения значений сил резания

Материал	$\sigma_в$ (МПа)	Режимы резания			Геом. параметры державки				
		t,	V,	S,	d1,	d2,	l21,	l3s,	l1s,
		(мм)	(м/мин)	(мм/об)	(мм)	(мм)	(мм)	(мм)	(мм)
Сталь 12Х13	730	2	35	0,14	27,8	42,8	110,5	200,5	300,5
		1,5	50	0,11	32,8	47,8	140,5	240,5	340,5
		1	65	0,09	37,8	52,8	160,5	270,5	370,5
Сталь 40	520	2	190	0,22	27,8	42,8	110,5	200,5	300,5
		1,5	220	0,18	32,8	47,8	140,5	240,5	340,5
		1	270	0,14	37,8	52,8	160,5	270,5	370,5
АК6	378	2	300	0,24	27,8	42,8	110,5	200,5	300,5
		1,5	350	0,18	32,8	47,8	140,5	240,5	340,5
		1	400	0,14	37,8	52,8	160,5	270,5	370,5

ложенные на втором диаметре располагаются в первом случае под углом $\varphi_1=60°$, во втором $\varphi_2=30°$. Схема действия сил резания на ступенчатое сверло представлена на рис. 1.

Силу резания, принято раскладывать на составляющие силы, направленные по осям координат станка рис. 1 (осевую P_x, радиальную P_y и тангенциальную P_z). Эти составляющие рассчитываются по формулам:

$$P_x = 10 C_p t^x S^y V^n K_p$$

$$P_y = 10 C_p t^x S^y V^n K_p$$

$$P_z = 10 C_p t^x S^y V^n K_p \qquad (1)$$

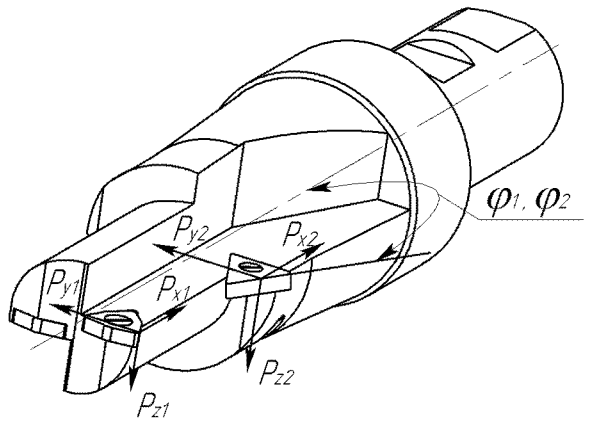


Рисунок 1.

Схема действия сил резания на режущие кромки СМП, расположенных в корпусе сверла для обработки ступенчатых отверстий

где постоянная C_p и показатели степени x, y, n выбираются по справочной литературе для конкретных (расчетных) условий обработки.

Поправочный коэффициент K_p представляет собой произведение ряда коэффициентов учитывающих фактические условия резания, рассчитывается по формуле:

$$K_p = K_{mp} K_p K_p K_p K_{rp}; \qquad (2)$$

где K_{mp} - учитывает влияние качества обрабатываемого материала на силовые зависимости; $K_{\varphi p}$, $K_{\gamma p}$, $K_{\lambda p}$, K_{rp} - поправочные коэффициенты, (связанные с главным углом в плане $\varphi°$, передним углом $\gamma°$, углом наклона лезвия пластины $\lambda°$, радиусом при вершине режущей кромки r соответственно) учитывающие влияние геометрических параметров режущей части инструмента на составляющие силы резания.

Определение величин сил резания при обработке различных материалов аналогичны, поэтому рассмотрим пример обработки жаропрочной стали - 12Х13.

Подставляем численные значения коэффициентов в формулу (2) для определения поправочного коэффициента Кр . Далее определим силы резания P_z и P_y по формуле (1), рассчитанные значения усилий резания для ступенчатого сверла с установкой сменных многогранных пластин на второй ступени под углами $\varphi_1=60°$, $\varphi_2=30°$ показаны в табл. 2.

Таблица 2.

Расчетные значения сил резания

φ=60°	$К_{фр}$	Р.р.1	Р.р.2	Р.р.3	φ=30°	$К_{фр}$	Р.р.1	Р.р.2	Р.р.3
	0.92	805	504	289		1.06	928	581	333
P_z,(Н)	0.94	823	515	295	P_z,(Н)	1.08	945	591	339
	0.96	840	526	302		1.1	963	603	346
	0.75	377	238	141		1.28	643	407	241
P_y,(Н)	0.77	387	245	145	P_y,(Н)	1.3	653	414	245
	0.79	400	251	149		1.32	664	420	249

По данным табл. 2 можно сделать вывод о том, что силы резания при обработке ступенчатым сверлом оснащенным СМП не уравновешиваются.

То есть при расположении пластины в гнезде державки под углом отличающимся от 30° и 60° на ±0,5 , при резании металла ступенчатым сверлом, на СМП действуют силы резания отличающиеся друг от друга рис. 2. Это оказывает влияние на точность ступенчатого отверстия, виброустойчивости инструмента и т.д.

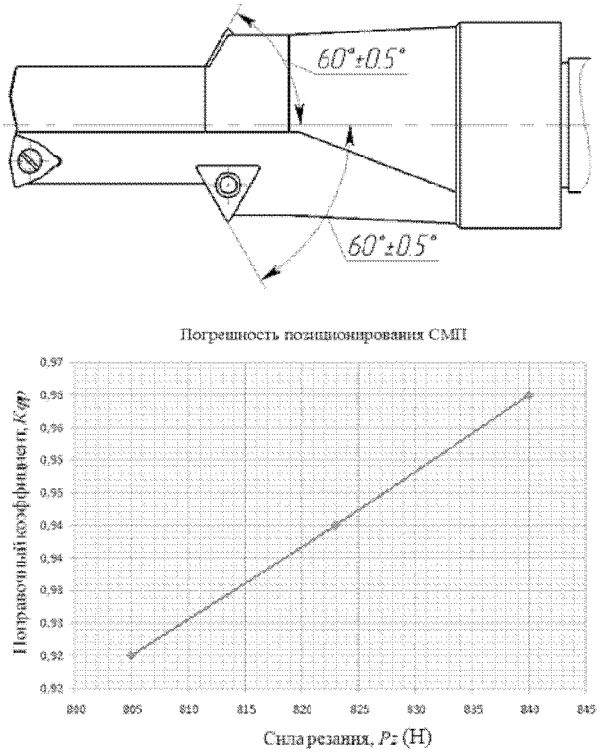


Рисунок 1.

Погрешность расположения СМП

В результате воздействия неуравновешенных сил резания инструмент деформируется. Деформация инструмента регламентируется допускаемой податливостью, т.е. величиной деформации в точке приложения силы, отнесенной к величине этой силы.

Сборное ступенчатое сверло оснащенное СМП с цилиндрическим патронам с двумя зажимными винтами рассматривается, как балка, жестко заделанная с одной стороны рис. 3. Жесткость рассматриваемой системы определяется собственной жесткостью корпуса ступенчатого сверла и контактной жесткостью, определяемой деформациями в месте крепления инструмента.

Деформация системы "шпиндельный узел-корпус патрона-инструмент равна сумме двух величин:

$$y_{сист} = y_и + y_к \ ,$$

где $у_u$ - деформация при изгибе корпуса патрона, $у_k$ - упругое перемещение инструмента в результате деформаций контактирующих поверхностей в месте соединения.

Стрела прогиба (упругая деформация) консольной оправки рассчитывается по формуле:

$$y_и = \frac{P_y l^3}{3EJ} \ .$$

Подставляем в формулу по определению податливости, получаем:

$$\delta_и = \frac{y_и}{P_y} = \frac{l^3}{3EJ} \ ,$$

где Ру - радиальная составляющая силы резания, (Н); l- величина вылета соответствующих

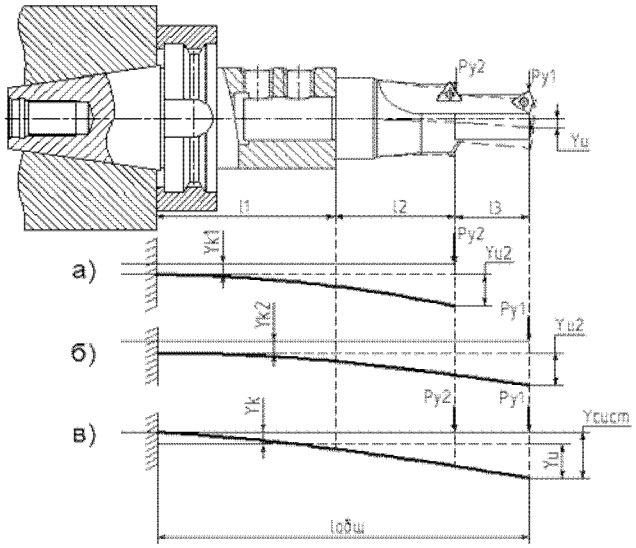


Рисунок 3.
Кинематическая схема для расчета и определения радиальных деформаций инструмента и места его крепления от силы резания Ру

элементов ступенчатого сверла, (мм); Е - модуль продольной упругости материала оправки, (МПа); J-момент инерции сечения тела оправки, (мм^4), для круглого сечения $J = \frac{d^4}{64}$.

Перемещение инструментального блока определяем как суммарное перемещение режущей кромки в точке приложения нагружающей силы с учетом контактной податливости в соединениях инструмента. Расчет перемещения режущей кромки в точке приложения нагружающей силы P_y (рис. 3) с учетом контактной податливости в коническом соединении шпиндель станка - корпус патрона, хвостовик инструмента - корпус патрона.

Суммарная деформация блока состоит из суммы деформаций следующих составляющих:

1) деформация цилиндрической части зажимного патрона на длине $l_1 + l_2$ (мм) относительно максимального посадочного диаметра конуса 7:24D = 69,85 (мм);

2) деформация инструмента диаметром второй ступени d_2на длине l_2 (мм) под действием силы P_{y2} (кН);

3) деформация контактных поверхностей конуса 7:24, выполненных со степенью точности АТ7;

4) деформация контактных поверхностей диаметра хвостовика инструмента, выполненного по посадке H7/h6 (зазор не более 0,041 мм).

Сумма перечисленных составляющих будет записываться в формуле представленной ниже, которая будет соответствовать схеме на рис. 3а.

$$y_{сист1} = \frac{P_2(l_1+l_2)^3}{3EJ_1} + \frac{P_2 l_2^3}{3EJ_2} + P_2\frac{\theta_1}{M}(l_1+l_2)^2 + P_2\frac{\theta_2}{M}l_2^2.$$

Опишем составляющие второй части формулы (рис. 3б).

1) деформация цилиндрической части зажимного патрона на длине $l_1 + l_2 + l_3$(мм) относительно максимального посадочного диаметра конуса 7:24 D = 69,85 (мм);

2) деформация инструмента диаметром второй ступени d_1 на длине $l_2 + l_3$ (мм) под действием силы P_{y1} (кН);

Таблица 3.

Податливость θ_1/м в конусах 7:24, (кН·м)$^{-1}$

Конус конусностью 7:24	Степень точности конусов			
	АТ5	АТ6	АТ7	АТ8
40	0,00121	0,00133	0,00142	0,00191
50	0,00020	0,00027	0,00035	-

Таблица 4.

Податливость θ_2/м в цилиндрических соединениях с боковым зажимным винтами, (кН·м)$^{-1}$

Диаметр соединения, мм	Зазор в соединении, мм	θ_2 в направлении силы затяжки винтов	θ_2 перпендикулярно силе затяжки винтов
36	0,014	0,032	0,006
	0,037	0,041	0,0079
48	0,014	0,001	0,0014
	0,026	0,012	0,0032
	0,048	0,016	0,0062

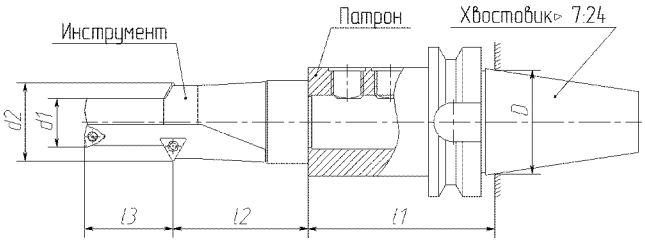


Рисунок 4.

l_1 - длина вылета вспомогательного инструмента закрепленного в шпинделе станка, мм; l_2 - длина вылета ступенчатого сверла от места стыковки режущего инструмента с вспомогательным инструментом, без учета длины первой ступени, мм; l_3 - длина вылета первой ступени инструмента, мм; D - максимальный посадочный диаметр конуса 7:24; d_1 - диаметр первой ступени инструмента, мм; d_2- диаметр второй ступени инструмента, мм.

3) деформация контактных поверхностей конуса 7:24, выполненных со степенью точности АТ7;

4) деформация контактных поверхностей диаметра хвостовика инструмента, выполненного по посадке H7/h6 (зазор не более 0,041 мм).

$$y_{сист2} = \frac{P_1(l_1+l_2+l_3)^3}{3EJ_1} + \frac{P_1(l_2+l_3)^3}{3EJ_3} + P_1\frac{\theta_1}{M}(l_1+l_2+l_3)^2 + P_1\frac{\theta_2}{M}(l_2+l_3)^2.$$

Так как при работе ступенчатым сверлом силы P_2 и P_1 действуют одновременно, то деформация блока усист будет рассчитываться как сумма $y_{сист1}$ и $y_{сист2}$ (рис. 3в):

$$y_{сист} = y_{сист1} + y_{сист2}\ .$$

Численные значения податливостей приведены в табл. 3 и 4.

Схема крепления инструментальной системы в шпинделе станка представлена на рис. 4.

Полученные результаты расчета по определению расчетного значения величины смещения режущего элемента представлены в табл. 5.

Таким образом интервал смещения оси инструмента при различных условиях обработки составляет от 0,064 мм до 0,187 мм, при = 60 и от 0,082 мм до 0,237 мм, при = 30 (см. табл. 6), а поле допуска отверстия 30 по H12/2 равно 0,105 мм. Соответственно вершина режущей пластины в некоторых случаях выходит за поле допуска обрабатываемого отверстия рис. 5.

Так же полученные результаты позволяют говорить о уменьшении смещения оси инструмента при увеличении диаметров ступеней сверла и режимов обработки (увеличение скорости резания, уменьшение подачи и глубины резания).

Основные выводы:

1. На точность обрабатываемого ступенчатого отверстия в значительной степени оказывает влияние разность радиальных сил резания;

2. Величина разности радиальных сил резания зависит от точности расположения оси отверстия под пластины, разности углов на каждой пластине, свойств обрабатываемого материала. Указан-

Таблица 5.

Расчетные значения величины смещения режущего элемента в зависимости от нагружаемых сил и геометрических параметров инструмента

Перемещение	Сила	*d1*, (мм)	*d2*, (мм)	l_1, (мм)	l_2, (мм)	l_3, (мм)	φ=60°			φ=30°		
							P.p.1	P.p.2	P.p.3	P.p.1	P.p.2	P.p.3
$\delta_в$,(мм)	P_{z1}	27,8	42,8	116	83,4	45	0,169	0,106	0,061	0,195	0,122	0,07
	P_{y1}	27,8	42,8	116	83,4	45	0,08	0,05	0,03	0,135	0,085	0,051
	P_{z2}	32,8	47,8	116	98,4	45	0,163	0,102	0,059	0,187	0,117	0,067
	P_{y2}	32,8	47,8	116	98,4	45	0,077	0,049	0,029	0,129	0,082	0,048
	P_{z3}	37,8	52,8	116	113,4	45	0,159	0,1	0,057	0,184	0,115	0,066
	P_{y3}	37,8	52,8	116	113,4	45	0,075	0,047	0,028	0,127	0,08	0,048

Таблица. 6.

Результирующие значения величины смещения режущего элемента

Перемещение	Сила	*d1*, (мм)	*d2*, (мм)	l_1, (мм)	l_2, (мм)	l_3, (мм)	φ=60°			φ=30°		
							P.p.1	P.p.2	P.p.3	P.p.1	P.p.2	P.p.3
$\delta_в$,(мм)	P_1	27,8	42,8	116	83,4	45	0,187	0,117	0,068	0,237	0,149	0,087
	P_2	32,8	47,8	116	98,4	45	0,180	0,113	0,066	0,227	0,143	0,082
	P_3	37,8	52,8	116	113,4	45	0,176	0,110	0,064	0,224	0,140	0,082

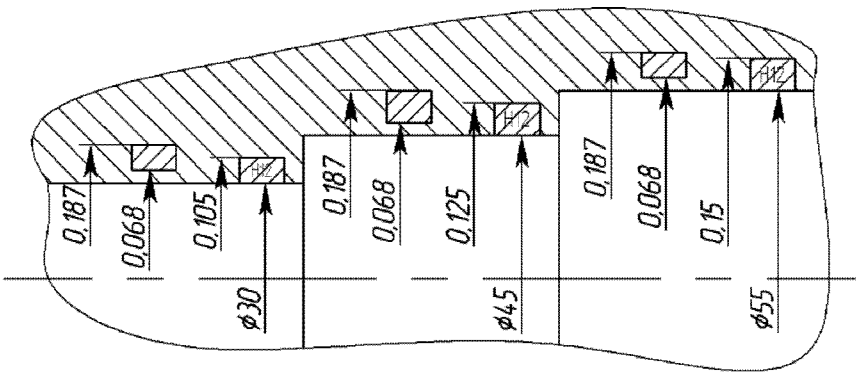


Рисунок 5.
Поле допуска ступенчатого отверстия

ные факторы влияют на увеличение в большей степени при увеличении вылета оправки и уменьшение ее диаметра.

Список литературы:

1. *Петухов Ю.Е.* Численные модели режущего инструмента для обработки сложных поверхностей / Ю.Е. Петухов, Н.В. Колесов / Вестник машиностроения. 2003. № 5. С. 61.

2. *Петухов Ю.Е.* Два типа компьютерных моделей режущего инструмента Ю.Е. Петухов, Н.В. Колесов / СТИН.2007. № 8 С. 23-26.

3. *Петухов Ю.Е.* Профилирование режущих инструментов в среде t-flexcad 3d / Вестник машиностроения. 2003. № 8. С. 67.

4. *Чулин И.В.* Особенности проектирования фасонных фрез для обработки поверхностей с прямолинейными образующими / СТИН. 2011. № 12. С. 13-16.

5. *Чулин И.В.* Проектирование сборных фасонных фрез для обработки боковой поверхности "остряка" стрелочных переводов / Вестник МГТУ Станкин. 2011. № 1. С. 56-60.

6. *Петухов Ю.Е.* Точность профилирования при обработке винтовой фасонной поверхности /Ю.Е.Петухов, П.В. Домнин // СТИН №7-2011, с. 14-17.

7. *Петухов Ю.Е.* Способ формообразования фасонной винтовой поверхности стандартным инструментом прямого профиля./ /Ю.Е.Петухов, П.В. Домнин // Вестник МГТУ "Станкин" № 3 (15), 2011, с.102-106.

8. *Петухов Ю.Е.* Компьютерное моделирование обработки винтовой канавки на заготовке концевой фрезы /Ю.Е.Петухов, П.В. Домнин / "Известия МГТУ МАМИ" №2 (12), 2011. М. С. 156-164.

9. *Петухов Ю.Е.* Решение обратной задачи профилирования на базе схемы численного метода заданных сечений /Ю.Е.Петухов, П.В. Домнин / "Инженерный журнал СПРАВОЧНИК" №11 2011, с. 26-29.

ФРЕЗА С РЕГУЛИРУЕМЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ ИЗ СТМ ДЛЯ ОБРАБОТКИ МЕРНЫХ ПАЗОВ ДЕТАЛЕЙ ОПТИКИ

ГРЕЧИШНИКОВ В. А. - **доктор технических наук, ПЕТУХОВ Ю.Е.** - **доктор технических наук, ТАРАСОВ А.В., РОМАНОВ В.Б.** - **кандидат технических наук, ДОМНИН П.В.** - **кандидат технических наук, ЮНУСОВ В.В., ЧУЛИН И.В.** - **кандидат технических наук**

ФГБОУ ВПО МГТУ "СТАНКИН", г. Москва

E-mail: ittf.stankin@gmail.com

В статье представлена методика проектирования регулируемых фрез с СТМ для обработки деталей оптики. Представлены расчеты, по определению углов поворота узлов регулировочного механизма.

Ключевые слова: сборная фреза, высокоскоростная обработка, регулировка.

При обработке некоторых видов направляющих, установочных пазов под оптические элементы и других изделий возникает необходимость в большой номенклатуре инструмента, так как пазы отличаются геометрическими параметрами и формой профиля. Поэтому их невозможно обработать стандартным инструментом за один проход. Эскиз сечения паза типовой детали "плита" с наклоном в 10° представлен на рис. 1.

Одним из направлений, в значительной степени повышающим эффективность процесса обработки фрезерованием таких деталей, является применение сборных фрез оснащенных режущими элементами из СТМ с регулировкой по диаметру фрезы [1]. Трехмерная модель подобной конструкции представлена на рис. 2 На рис. 3 представлена схема узла поворота режущего элемента с СТМ для обеспечения регулировки геометрических па-

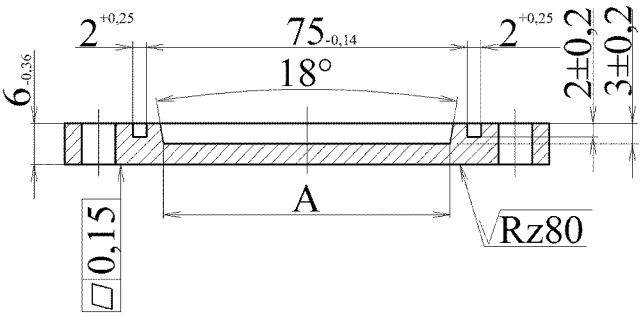


Рисунок 1.
Эскиз детали "плита"

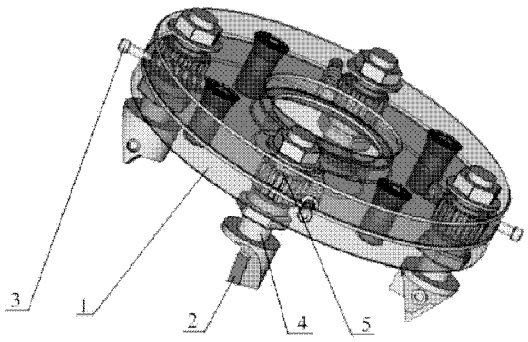


Рисунок 2.
Трехмерная модель регулируемой фрезы

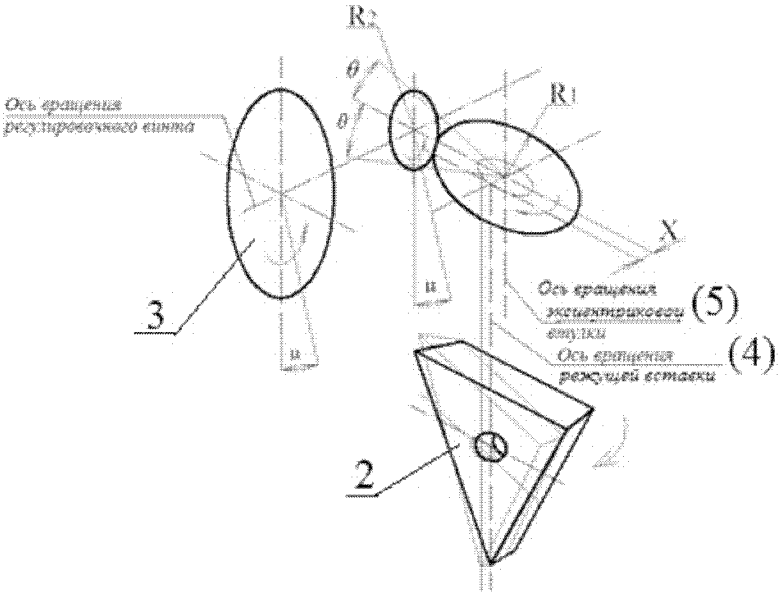


Рисунок 3.
Схема узла поворота режущего элемента с СТМ: 1 - корпус, 2 - режущая пластина с СТМ, 3 - регулировочный винт, 4 - нож, 5 - промежуточная втулка

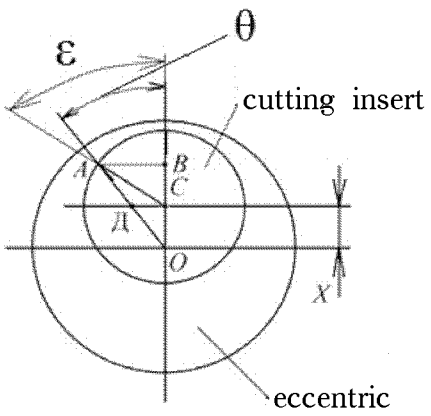


Рисунок 4.
Проектная схема регулировочного узла.

раметров после настройки. При повороте регулировочного винта 3 на угол μ промежуточная втулка повернется на угол θ. Поскольку поворотный нож установлен эксцентрично в промежуточной втулке, он совершит поворот на угол ε. Режущая пластина примет положение, при котором углы резания режущего элемента примут значения отличные от исходных, что приведет к появлению отрицательных задних углов.

Для установки положительных задних углов необходимо режущую вставку вместе с эксцентриком повернуть на угол θ. На основании схемы представленной на рис. 4 получена формула для определения угла θ.

$$tg\theta = \frac{\left(-X\times cos\varepsilon + \sqrt{X^2\times cos^2\varepsilon + OA^2 + X^2}\right)\times sin\varepsilon}{\left(-X\times cos\varepsilon + \sqrt{X^2\times cos^2\varepsilon + OA^2 + X^2}\right)\times cos\varepsilon + X}$$

В качестве примера на рис. 5 дан расчет изменения задних углов при настройке фрезы на обработку пазов размерами 66 и 68 мм

Как видно из схемы 5, величина заднего угла фрезы изменилась с 15° до –9°. При повороте эксцентрика на угол θ = 34,17° задний угол принимает исходное значение (рис. 6). Обработка деталей из алюминия выполняется на скоростях резания до 2000м/мин. При обработки на такой скорости необходима динамическая балансировка инструмента. Для динамической балансировки, при-

Рисунок 5.
Схема изменения задних углов при настройке фрезы на обработку паза другого размера (положение ножа 1 на положение ножа 2)

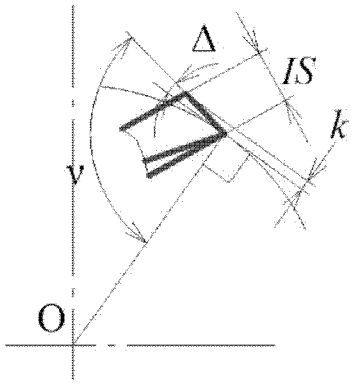
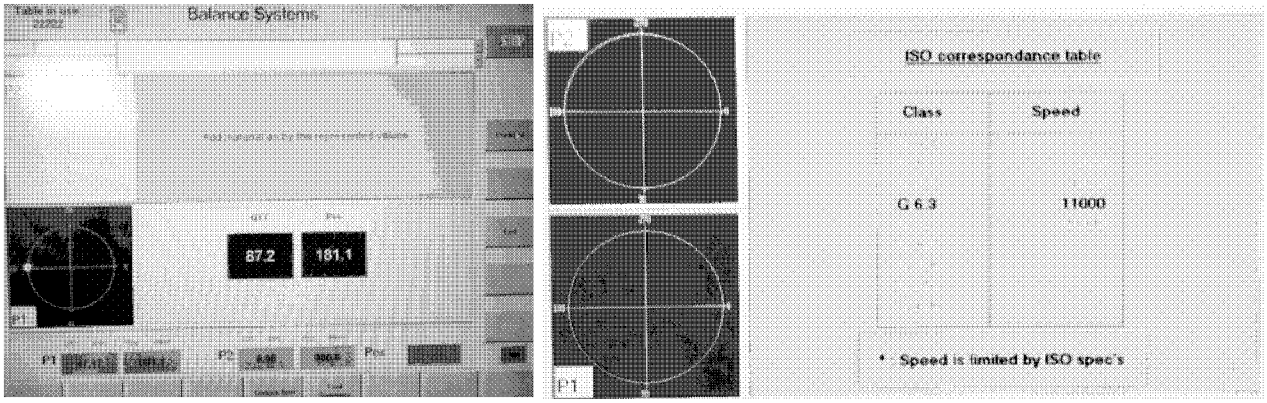


Рисунок 6.
Схема восстановления исходного значения заднего угла.
ν- угол заострения режущего клина фрезы, IS- толщина пластины, k- величина, Δ- задний угол фрезы



а) б)

Рисунок 7.
Окно вывода результатов измерений

меняют специальные балансировочные машины, на которых определяют центробежную силу, величину эксцентриситета и вес груза для уравновешивающей пары моментов. Для балансировки торцевой регулируемой фрезы применялась балансировочная машина BestBalance 4000, которая позволяет проводить динамическую балансировку различного класса точности G в соответствии с ГОСТ ИСО 1940-1-2007. В зависимости от выбранных параметров балансировки система укажет массу балансировочного элемента и угол его установки. Заданные параметры и результаты измерений выводятся на монитор (рис. 7а) и сохраняются в памяти, что делает работу с данными максимально удобной.

Производитель поликристаллического алмаза CD10 компания Sandvik Coromant рекомендует вести обработку алюминиевых сплавов на скоростях порядка 2000 м/мин, что при диаметре фрезы 66 мм, соответствует частоте вращения 9651об/мин. В процессе балансировки экспериментальной фрезы на балансировочной машине BestBalance 4000, был достигнут класс точности балансировки G6.3, в соответствии с ГОСТ ИСО 1940-1-2007, что позволяет вести обработку с частотой вращения инструмента до 11000 об/мин (рис. 7б). Эксперимент проводился на многоцелевом станке MAZAK *Variaxis* 630-5X. В качестве образца использовалась заготовка призматической формы из алюминия марки Д16. Для контроля параллельности использовался контактный датчик Renishaw OMP6. Для контроля параллельности плоскости детали с плоскостью стола, щуп касается детали в трех точках, через которые система ЧПУ станка строит плоскость, и сравнивает ее положение с эталонной. В ходе измерения было выявлено, что плоскость детали пересекает плоскость стола станка под углом 0.02°. Такая величина отклонения от параллельности является малозначимой и не окажет существенного влияния на результаты эксперимента. Измерение показало, что после настройки диаметр режущей части фрезы составляет 66.06 мм, что соответствует ширине обрабатываемого мерного паза $66^{+0.74}$ мм (табл. 1).

Для понимания предельных значений скорости резания, при которых обработанный мерный паз удовлетворяет требованиям чертежа, была проведена обработка мерного паза мм при различных значениях скорости резания. Следует учесть, что с течением времени работы инструмента происходит изменение геометрических параметров режущей кромки, и поэтому интенсивность появления среднего отклонения может с увеличением времени увеличиваться (рис. 8).

Таблица 1.
Результаты измерения ширины обработанных мерных пазов

Ширина паза	Ширина паза по сечению, мм		
	Сечение I	Сечение II	Сечение III
$66^{+0.74}$	66.03	66.01	66.02
$68^{+0.74}$	68.12	68.15	68.11

Таблица 2.

Сопоставление результатов измерения

Скорость резания, м/мин.	Среднее отклонение ширины паза, мкм	
	при статической балансировке	при динамической балансировке по классу G6.3
100	20	10
200	10	10
300	20	20
400	30	20
500	70	40
600	210	50
800	350	70
1000	580	80
1200	-	90
1500	-	130
1800	-	260
2000	-	350

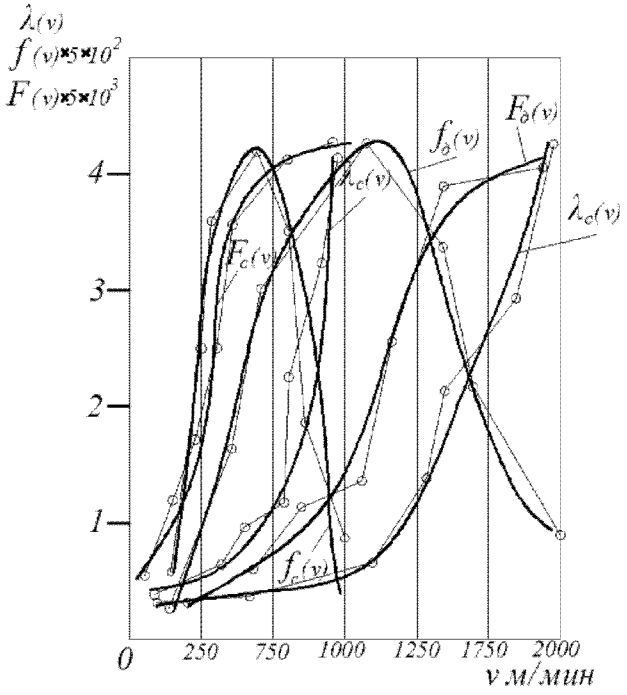


Рисунок 8.

Интенсивность появления среднего отклонения на определенной скорости, плотность и функция распределения отклонения

Где $\lambda_c(v)$ и $\lambda_д(v)$- интенсивность появления среднего отклонения при статической и динамической балансировке, $f_c(v)$ и $f_д(v)$- плотность распределения при статической и динамической балансировке; $F_c(v)$ и $F_д(v)$- функция распределения отклонения при статической и динамической балансировке.

Выводы:

1. Полученная формула для определения угла θ характеризует взаимосвязь конструктивных параметров регулировочного узла с углами поворота отдельных его элементов при настройке на определенный размер паза.

2. Руководствуясь результатами эксперимента, инструмент схожих размеров и конструкции, сбалансированный статическим методом на параллельных стендах, не рекомендуется использовать при частоте вращения шпинделя свыше 2400 об/мин., и динамическим методом по классу точности балансировки G6.3 при частоте вращения шпинделя свыше 8500 об/мин

Список литературы:

1. Патент на полезную модель №88594 "Сборная торце-концевая фреза с режущими элементами из наноструктурированных сверхтвердых материалов"

2. *Гречишников В.А., Григорьев С.Н., Кирсанов С. В., Кожевников Д.В., Кокарев В.И., Схиртладзе А.Г.* Металлорежущий инструмент. Учебник. М.:ИЦ МГТУ "Станкин", "Янус-К", 2005, 586с.

3. *Чулин И.В.* Особенности проектирования фасонных фрез для обработки поверхностей с прямолинейными образующими.// Ежемесячный научно-технический журнал "СТИН". -2011-. № 12. С. 13-16

4. *Исаев А.В.* Проектирование сборных фасонных фрез с круглыми сменными многогранными пластинами, расположенными на винтовой поверхности.// Вестник МГТУ Станкин. 2011. № 1. С. 61-66

6. *Волосова М.А., Григорьев С.Н.* Режущие пластины из керамики: влияние абразивной обработки и покрытий на их эксплуатационные показатели.// Вестник МГТУ "Станкин". Научный рецензируемый журнал. М.: МГТУ "Станкин", №2(14), 2011, С.68-74

РЕКОНСТРУКЦИЯ СТРУКТУРЫ ЗРИТЕЛЬНОГО ВОСПРИЯТИЯ ЧЕЛОВЕКА НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ПРОИЗВЕДЕНИЙ ЕВРОПЕЙСКОЙ ЖИВОПИСИ И ГРАФИКИ

(По материалам международного историко-научного симпозиума по оптике "История оптики и современность", г. Санкт-Петербург, 28-30 октября 2013 года)

СМИРНОВ В.Л. - **кандидат физико-математических наук**

ОАО "ГОИ им. С.И. Вавилова", г. Санкт-Петербург

E-mail: bens09@yandex.ru

Выдвигается гипотеза, согласно которой при развёртывании системы изображений в европейской живописи и графике от эпохи Возрождения до абстракционизма включительно повторяются в обратном порядке этапы эволюции (развёртывания) зрительной системы человека как вида. Обсуждаются сценарии, позволяющие обосновать целостность указанных систем. Основой анализа являются классические стили и стилевые направления в живописи. Образы и изображения интерпретируются как структурные эквиваленты объектов. Воссоздаются ветви и уровни зрительной системы, а также рассматриваются структурные события, происходившие в процессе её эволюции.

Ключевые слова: изображение, образ, структура, структурный эквивалент, эволюция.

1. ВВЕДЕНИЕ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Хорошо известно, что изображения, возникшие в западноевропейской живописи после эпохи Возрождения приблизительно с 1520 г. по 1950 г. представляются [1] с помощью стилей, а затем всё более измельчающихся стилевых направлений. К последним относятся разного рода "-измы", начиная с импрессионизма и кончая абстракционизмом. Такая группировка носит сугубо описательный характер и не затрагивает смысла происходящих в изображениях изменений. Указанная ситуация подробно описана специалистами, однако рационально не объяснена. В то же время существует мнение [1], согласно которому "то, что даётся художнику в виде стиля или в виде разных вариантов стилевых направлений, - предопределено". Возникает вопрос: откуда берётся такая детерминированность, где искать её истоки?

В настоящей работе совокупность указанных выше изображений представляется как наделённая порядком система. При этом изменения в её пределах рассматриваются как следствие заложенных в зрительной системе человека способов видения окружающего мира, которые сформировались в процессе её эволюции. Сейчас система зрения изучена недостаточно. Так, ничего не известно об этапах её становления и, соответственно, о смене

в ходе эволюции вариантов видения наблюдаемых объектов. О связях *системы зрительного восприятия* человека и *системы изображений* также известно мало. При обсуждении изменений, которые наблюдаются в структуре изображений, тема зрительного восприятия за редким исключением [2, 3] не затрагивается. По указанным причинам в качестве объекта исследования выбрана эволюция (развёртывание) указанных систем, а также влияние *зрительной системы* на *систему изображений*.

Задачу работы удобно охарактеризовать как состоящую из трёх этапов. На первом этапе моделируется процесс эволюции, в ходе которого возникают и разворачиваются две указанные выше системы, а также выявляются структурные взаимосвязи между ними. В ходе второго этапа система изображений (стили и стилевые направления) представляется как структура, составленная из ветвей и уровней. На третьем этапе при учёте выявленных связей реконструируется *система зрительного восприятия* человека как вида от зарождения до эволюционной зрелости.

2. МЕТОДИКА

Поскольку работа является междисциплинарной, на объекты исследования как бы набрасываются обобщающие понятийные сетки. Для этого используется тринитарная методика [4], допускающая удаление от данных опыта и упрощение логических основ. Согласно принципу дополнительности Бора в формулировке [5] "для представления в знаковой системе целостного явления необходимы дополнительные классы понятий". В настоящей работе любая структурная ситуация рассматривается на основе бинарной оппозиции *A*-C, элементы которой дополнительны и характеризуются как крылья, между которыми имеется или предполагается база *B*. Её наличие диктуется принципом совместимости, согласно которому, наряду с дополнительностью классов понятий, необходимо их структурное единство или общность.

Элементы *A*-*B*-*C* образуют представленную на рис. 1a триаду, где база обозначается точкой, а крылья - концами расходящихся от неё линий. Элементы триад выделяются в тексте курсивом, они могут быть произвольной степени сложности и характеризовать как качество, так и количество. Примеры используемых оппозиций приведены на рис. 1b-d, другие будут рассмотрены в процессе изложения. Ситуация, при которой элементы оппозиции *A* и C ставятся тем или иным способом в равные условия, называется [6] симметричным планом. Наглядным его аналогом является [2] равновесие. Вслед за [6] мы принимаем, что при формировании структур (моделирование - в их числе) сначала реализуется симметричный план, а уже затем наступает черед диссимметрии.

Те же позиции *A*-*B*-C, которые мы выделяем при моделировании, называются [7] уровнями

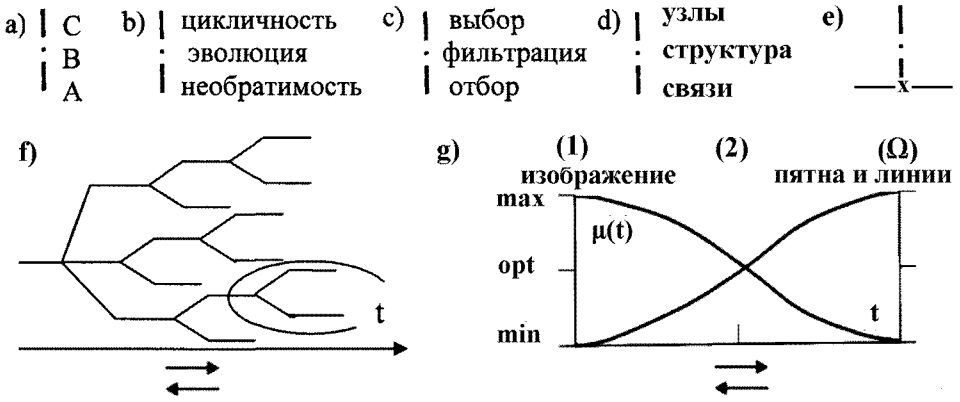


Рисунок 1.

Дополнительность: a) крыльев A и C в бинарной оппозиции, где B - база; b) необратимости и цикличности в процессе эволюции структур; c) процедур отбора и выбора в живых самоорганизующихся системах, d) узлов и связей в структуре; e) интерпретаций узлов в разных вариантах группировки; f) правого (→) и левого (←) направлений при анализе "дерева эволюции", t - ось времени; обводкой выделена повторяющаяся триада; g) элементов оппозиции при использовании функции совместимости [13]

иерархии, когда подчёркивается подчинённость или процедура их следования друг за другом. Следует иметь в виду, что для исследуемых процессов характерна *непрерывность*, а введение уровней является упрощением и трактуется как *дискретность*. Структура понятие междисциплинарное, единого её определения нет, т.к. [5] чем шире научный термин, тем труднее он вербализуется. Структуру представляют [8] как совокупность отношений или трактуют [9] как *сеть*, которая состоит из узлов и *связей* между ними (правил). Здесь мы придерживаемся именно последнего определения. Поскольку зрительное восприятие человека [9] занято анализом отношений, постольку оно ориентировано на структуру.

Эволюция понимается как развёртывание, изменение структуры от уровня к уровню, от этапа к этапу. *Разъединение* и *объединение* уровней трактуется как ветвление, формирующее "дерево эволюции", представленное на рис. 1f. Постоянно учитывается предыстория. При этом используется [10] циклическая схема *сырьё - продукт*: из сырья формируется продукт, который потом сам становится сырьём для следующего продукта и т.д. Развёртывание представляется вдоль числовой оси t, позиции которой могут быть как *условными*, так и *реальными*. Общие и подобные рис. 1f схемы, характеризующие процессы эволюции, называются сценариями. Мы вслед за [7] стремимся смотреть на события разных масштабов с одной точки зрения.

Для количественной оценки структурных ситуаций используется триада *min-opt-max*, ориентированная на представление начала процесса и его завершения. При этом позиция *min* обычно связана с зарождением структурного уровня, а позиция *max* - с его насыщением, с заполнением всех возможных эволюционных ниш, с эволюционной зрелостью. Триада *1-2-Ω* (*один - два - много*) отличается известным примитивизмом, она ориентирована на представление числа анализируемых уровней. Позиция *Ω* символизирует *разнообразие*, а позиция *1* - *единообразие*. База представляется позицией *2*, поскольку в этом случае разнообразие сохраняется, но предельно ограничивается. Элементами названной триады могут быть, скажем, направления, варианты возникающих интерпретаций или способы видения, о которых речь будет ниже.

3. ВАЖНЫЕ ПОНЯТИЯ И ТЕРМИНЫ

В работе, как правило, используются имеющиеся классификации и термины, смысл которых поясняется. Мы исходим из того, что зрительная система формирует образы - [11] объект-гипотезы - наиболее правдоподобные гипотезы об объектах. Систему зрительного восприятия для краткости будем иногда называть системой образов. При анализе произведений живописи и графики мы имеем дело, прежде всего, с набором пятен и линий; это - узлы, если вспомнить определение структуры.

В качестве базы для пары *образ - изображение* выбран *структурный эквивалент*, который, так или иначе, представляет природный объект. Образно выражаясь, такой эквивалент может быть составлен из кубиков или элементов детского конструктора, а может быть создан кистью мастера. Соответствие *эквивалента* и *объекта* трактуется как адекватность эквивалента (обозначается μ), которая меняется в пределах *min-max*; полное соответствие понимается как недостижимый идеал. Адекватность иначе можно охарактеризовать как похожесть, сходство, соответствие, совместимость, своего рода качество. Изменение адекватности представляется либо системой ступеней, когда мы хотим подчеркнуть дискретность и наличие уровней, либо непрерывным образом, когда нас более интересует процесс в целом и его направленность. В пределах названного эквивалента фиксируются те или иные структурные признаки объекта. Его уместно назвать сеткой, которую восприятие "набрасывает" на объект или художник предлагает зрителю. О наличии таких сеток свидетельствуют [12] многочисленные геометрические иллюзии: системе зрения предъявляются одни отношения, а воспринимаются другие - несколько искаженные.

Живое существо, не обязательно человек, понимается как носитель зрительного восприятия (далее - носитель). Носитель формирует структурные эквиваленты и наделяет их смыслом. В целом зрительное восприятие имеет дело не с внешними объектами, а с их структурными эквивалентами. Очевидно, что высокая адекватность образов способствует выживанию носителя. От уровня адекватности зависит смысл - набор факторов (сведений), который носитель связывает с наблюдаемым

объектом. Можно сказать, что смысл - вариант группировки структурных элементов (например, пятен и линий), наделение их связями. Если опять вспомнить определение структуры, *связи* это - смысл. В нашей модели *адекватность* и *смысл* дополнительны, они обсуждаются в разделе 7. Структурные эквиваленты, формируемые в науке, называются моделями. Условимся называть процесс формирования структурного эквивалента (адекватность + смысл) интерпретацией. При анализе этого процесса целесообразно использовать лингвистическую логику [13], которая ориентирована на понимание сложных ситуаций. Её можно охарактеризовать как некий *общий случай*, включающий *частность* - традиционную жесткую логику (типа *да - нет*), которая не всегда годится.

Мы исходим из того предположения, что тот способ видения, которым наделён человек сейчас, является результатом поиска. В процессе эволюции была осуществлена *сборка* уровней видения, т.е. восприятие возникло, реализовало путём естественного отбора множество вариантов и достигло в итоге эволюционной зрелости. Отдельный способ видения есть характеристика анализируемого уровня - набор приемов, которыми располагает или к которым обращается зрительное восприятие для того, чтобы представить объект с помощью образа. Способ видения это - совокупность структурных эквивалентов (*узлы*) плюс правила обращения с ними (*связи*). В ходе эволюции были сформированы и преодолены, но сохранены в пределах зрительной системы многочисленные и в целом несовершенные варианты. Такие "скрытые" способы видения называются в работе архаическими.

Отдельный структурный эквивалент можно охарактеризовать как стереотип, а если речь идёт о большой группе носителей, то уместно говорить о стереотипном видении, а также использовать [9] термин зрительная парадигма - общепринятая модель, своего рода норма или "структура предпочтения". Противоположностью *парадигмы* является [14] *аномалия* - отступление от парадигмы. Ориентируясь на принцип дополнительности, отметим важный для дальнейшего изложения момент: наряду со *сборкой* уровней видения, может быть реализована их *разборка*.

4. ДВУЗНАЧИМОСТЬ СТРУКТУРНЫХ ЭКВИВАЛЕНТОВ

Как при исследовании зрительного восприятия [2,11,15], так и в изобразительной практике [3,16,17] предметом внимания являются всякого рода изображения, наделённые структурной двузначимостью - двойным смыслом. При их рассмотрении один и тот же набор изобразительных элементов - пятен и линий воспринимается и классифицируется двояко, причём варианты интерпретации одинаково существенны и взаимно исключают друг друга. Термин *двузначимость* происходит от слов *значить*, *значение* и указывает на бистабильность восприятия; наиболее близкими его аналогами являются двусмысленность и двойственность, а в английском языке - ambiguity. Подчеркнём, что речь идёт о том, какой именно объект изображен, а не о том, как этот объект можно интерпретировать, обращаясь к принятой условности, например, аллегории.

Двузначимость (*2*) занимает промежуточное место между *однозначимостью* (*1*), когда интерпретация одна, и *многозначимостью* (Ω), если интерпретаций много. Следует иметь в виду, что по мере продвижения по цепочке $1 \rightarrow 2 \rightarrow \Omega$ само понятие *изображение* сначала размывается (если *2*), а затем теряет смысл (в случае Ω). Для изображений эпохи Возрождения характерна *однозначимость* (*1*), а для абстрактных полотен - *многозначимость* (Ω). В промежутке изображения в той или иной степени неопределённы и наделены *двузначимостью* (*2*).

Если извлекаемых смыслов много (Ω), то ситуацию мы понимаем как *символьность* (иначе - *символичность*), а когда смысл один (*1*) - трактуем как *образность*. Промежуточную позицию (*2*), характеризующую симметричный план, обозначаем далее (за неимением лучшего термина) как *схематичность*; её принято описывать, обращаясь к указанным терминам попеременно.

Элементы названной триады использованы для оценки на рис. 1g, где представлена оппозиция изображение - *пятна* и *линии*, здесь $\mu(t)$ - [13] совместимость элементов оппозиции. Рисунок показывает, что происходящие или производимые

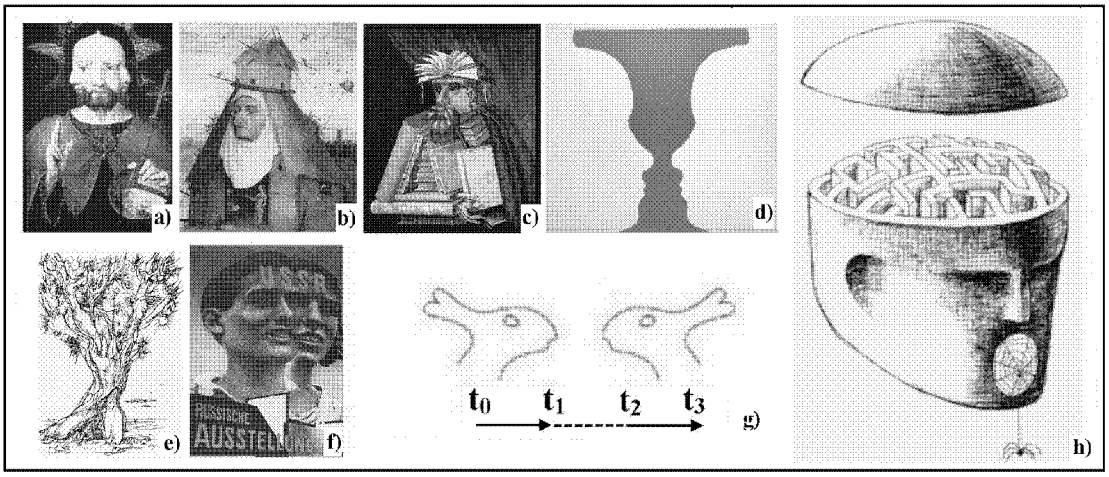


Рисунок 2.
Примеры двузначимых изображений: a) Троица. 1500 г. Неизвестный фламандский художник XVI века; b) Искушение св. Антония (фрагмент). Ок.1505. И.Босх; c) Библиотекать. Ок.1570. Д.Арчимбольдо; d) Ваза и профили. 1915 г. Э.Рубин; e) Псалм. 1965. Л.Маковей; f) Плакат. 1929. Л.Лисицкий. g) Кролик или утка? h) Без названия. А.Кардон

изменения в структуре ведут к изменению интерпретации; например, предъявляемая для оценки картинка оценивается на 80% как изображение, а на 20% как набор пятен и линий. С помощью рис. 1g могут быть предельно кратко охарактеризованы изменения в системе изображений от 1520 г. до 1950 г. Слева в эпоху Возрождения мы имеем *изображения* в полном смысле слова, по центру для характеристики могут быть в равной мере использованы оба термина, а справа в абстрактной живописи остаются лишь *пятна* и *линии*. Отметим, что при использовании лингвистической логики уместно не упирать на абсолютизацию какого-либо элемента, а говорить о смещении акцента от одного элемента оппозиции к другому. Так, на рис. 1g акцент смещается слева направо, если обсуждается переход от эпохи Возрождения (1) к абстракционизму (Ω).

Примеры двузначимых изображений приведены на рис. 2. Все они построены на основе симметричного плана и демонстрируют несколько вариантов дополнительности. В одних случаях используется равноценность элементов пары *левое - правое* (a) или цикличность в паре *ваза - профили* (d). В других случаях приводятся в равновесие более сложные представления, скажем, *портрет - натюрморт* (c), *дерево - человек* (e) или *оболочка - содержимое* (b и h). Равновесие достигается также путём систематического приписывания середины изображения то к левой части, то к правой (f) или изменения направления (g).

С помощью двузначимости может быть пояснена схема, которую мы ищем для решения поставленной задачи. На рис. 2g представлены два простых двузначимых изображения, образующие симметричный план. Они понимаются здесь как аналоги исследуемых систем. При их рассмотрении слева направо или справа налево, мы видим *утку*, а затем *кролика*. Нам нужна похожая структура, которая читалась бы в двух направлениях и представляла бы в одном случае *систему образов*, а в другом - *систему изображений*.

5. ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ СООБРАЖЕНИЯ И ГИПОТЕЗА

Обе исследуемые системы представлены отрезками числовой оси на рис. 3. *Слева* показано, что в ходе эволюции зрительной системы в пределах условного отрезка t_0 - t_1 *образы* сначала *простые*, а затем всё более *сложные*. Это, естественно, *предположение* - соображение, которое помогает объяснить приспособление к окружающей среде и выживание. *Справа* можно видеть, что на реальном отрезке t_2 - t_3 в европейском искусстве после эпохи Возрождения ситуация противоположна: *изображения* сначала весьма *сложные*, а затем - всё более *простые*. Например, нарастает повторяемость структурных элементов (в стилях), цвет разлагается на элементарные составляющие (в пуантилизме), стилизуется [1] контур (в модер-

не), фиксируется [2] "непреодолимое стремление к простым осязаемым формам" (в современном искусстве). В данном случае мы имеем дело с *наблюдением*.

Слева адекватность структурных эквивалентов *растёт*, а справа - *падает*. Слева исходно фиксируются непонятные пятна и линии на светочувствительной поверхности, а справа аналогичные пятна и линии появляются на полотнах абстракционистов. Проведённое упрощённое структурирование позволяет выявить исходный симметричный план и сформулировать гипотезу. В работе предлагается рассматривать *систему образов* как *первичную* структуру или *причину*, а *систему изображений* - как структуру *вторичную*, возникшую как *следствие*. Гипотеза формулируется в двух вариантах, назовём их ***A*** и ***C***.

A. Имеет место глобальный циклический процесс: слева происходит *сборка* уровней (способов) видения, а справа - их *разборка*, разумеется, не в буквальном смысле: художники до основания "разбирают" уровни видения, они обращаются к архаическим вариантам и представляют их в своих работах. Эта демонстрация реализуется в обратном порядке, т.е. от конца к началу, в результате чего происходит возвращение к набору пятен и линий, а цикл замыкается. Нетрудно видеть, что в данной формулировке акцент переносится на *цикличность* и на схему *причина* → *следствие*.

C. В ходе эволюции системы изображений в европейской живописи повторяется в обратном порядке сценарий, который разворачивался ранее при формировании системы зрительного восприятия. После эпохи Возрождения художники обращаются к архаическим способам видения, которые известны как классические стили и стилевые направления. Последние подробно описаны в искусствоведческой литературе, их можно формально охарактеризовать со структурных позиций, прочитать описание в обратной последовательности (от абстракционизма до эпохи Возрождения) и тем самым реконструировать архаические способы видения в системе зрительного восприятия от зарождения до эволюционной зрелости. Здесь схема обратная, т.е. *следствие* → *причина*, акцент же переносится на необратимость структуры слева.

Далее выявляется базовый вариант ***B***, который позволяет в равной мере обращаться как к варианту ***A***, так и к варианту ***C***.

6. ПАРА *ПОРЯДОК - ХАОС* И ПОЯВЛЕНИЕ НОСИТЕЛЯ

Выделим базовое структурное представление, которое, с нашей точки зрения, более всего подходит для совместного анализа *зрительной системы* и *системы изображений*. С его помощью мы рассчитываем описать изменения в исследуемых системах, включив в анализ отчасти и среду, в которой они эволюционируют, а также ответить на вопрос: почему, собственно, названные системы вообще появились? Речь идёт о графическом представлении, ориентированном на *схематичность*.

Любой стиль или стилевое направление в живописи есть характеристика, фиксирующая некое единообразие, общность, повторяемость тех признаков, которые, собственно, и позволяют произво-

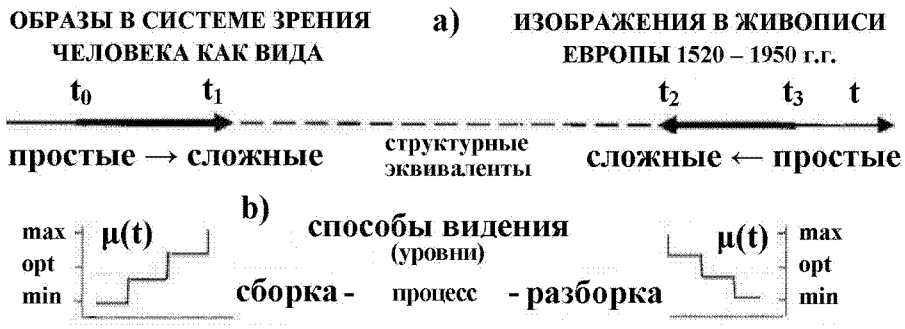


Рисунок 3.
Исходный симметричный план. Представление структурных эквивалентов (изображений и образов): a) вдоль числовой оси t и b) при использовании пары «сборка - разборка» для характеристики уровней (способов) видения

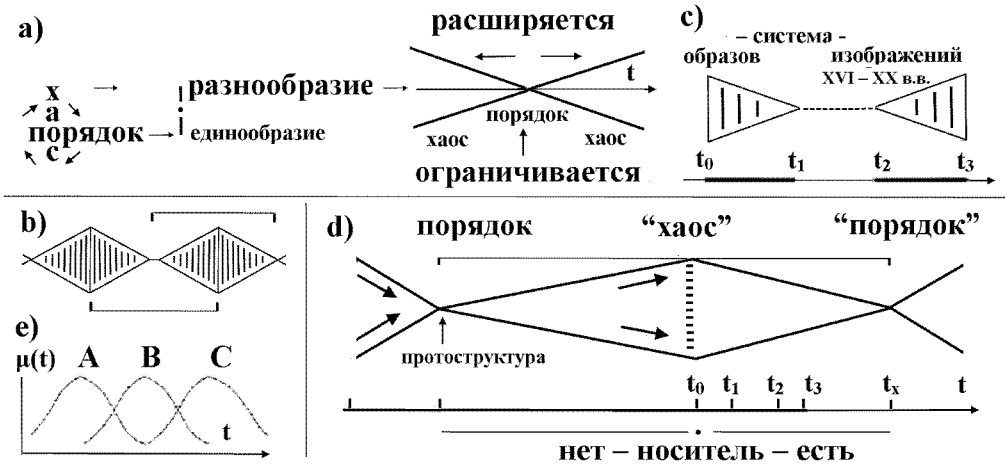


Рисунок 4.

Оппозиция «порядок - хаос»: a) в виде графического представления элементов пары; b) при циклической смене элементов оппозиции; c) в системах изображений и образов; d) в роли причины появления носителя; e) как смена вариантов порядка A, B и C

дить классификацию. Например, для стиля ампир характерно систематическое воспроизведение военных атрибутов, а в кубизме - одном из стилевых направлений повторяются разного рода геометрические элементы. Поскольку однотипные отношения понимаются [18] как *порядок*, будем считать, что при смене стилей или стилевых направлений мы имеем дело с разными вариантами порядка. Когда порядок не обнаруживается, уместно говорить о *хаосе* - противоположности порядка. Таким образом, мы получаем оппозицию *порядок - хаос*, она рассматривается здесь как базовый инструмент анализа.

В ходе эволюции акцент систематически смещается между элементами указанной пары, которые понимаются как дополнительные. Согласно рис. 4a *порядок* и *хаос* проникают друг в друга и трансформируются - как бы перетекают друг в друга. Хаос есть сырьё для порядка, а порядок - сырьё для хаоса. Один вид порядка служит сырьём для другого. Удобно *порядок* рассматривать как *единообразие*, а *хаос* - как *разнообразие*. Если выбрать разнообразие (перенести на него акцент), то оно или *расширяется*, или *ограничивается*. В первом случае мы имеем дело с наступлением хаоса, а во втором - с распространением порядка. На рис. 4b смена акцентов в паре *порядок - хаос* представлена как циклический процесс; циклы выделены скобками, а вертикальными линиями обозначены уровни в пределах циклов.

В соответствии со сказанным исследуемые структуры представлены на рис. 4c как части одного цикла; здесь вертикальные линии - уровни (способы) видения. Слева в пределах t_0 - t_1 способы видения зарождаются в разных вариантах (это - хаос), затем в ходе естественного отбора их разнообразие ограничивается, в результате чего достигается эволюционная зрелость (порядок). Справа на отрезке t_2 - t_3 способы видения представляются художниками в изображениях. Исходно в эпоху Возрождения они трактуются как эволюционно зрелые (и представляют порядок), затем разнообразие способов расширяется, в итоге достигается предел: изображения вообще исчезают (возвращается хаос).

Предлагаемая схема позволяет обсуждать появление носителя, которое поясняется рис. 4d. Здесь в пределах отрезка t до t_0 порядок трансформируется в "хаос". Исходный порядок понимается нами как протоструктура [19] - первичная система отношений, которая ответственна за процесс самоорганизации. Так в предельно сжатом виде представляется формирование разнообразных структур и заполнение всевозможных эволюционных ниш. В частности, на Земле возникает природа с её разнообразием, которое символизируется уровнями слева от t_0. Когда достигается своеобразный предел, разнообразие перестаёт расширяться, и начинается поиск возможностей его ограничения. Ситуация представляется нами как симметричный

план. Это значит, что мы имеем дело с циклом, правую часть которого удобно представлять как повторение - отражение левой. Подчеркнём, что речь идёт о попытке отражения, с одной стороны, в природе, а с другой стороны, - в предлагаемой модели.

В ходе эволюционного поиска в позиции t_0 появляется носитель, который начинает формировать структурные эквиваленты, сначала *простые*, а затем всё более *сложные*. В структурных эквивалентах, так или иначе, повторяются структурные признаки объектов, т.е. разнообразие ограничивается. Этот процесс понимается в работе как отражение, которое делится на три варианта *поверхностное - промежуточное - глубокое*. Можно заключить, что в настоящей работе появление носителя и его структурных эквивалентов рассматривается как следствие цикличности в паре *порядок - хаос*. Цикличность разнообразна, циклы могут быть большие и малые; так, малый цикл на рис. 4c включён в большой цикл на рис. 4d.

Порядок, как правило, ценится больше, чем хаос, т.е. порядок для нас - "структура предпочтения" [9]. По большому счёту здесь обсуждаются два варианта порядка, которые появляются в ходе поиска. Первый связан с повторением в структурных эквивалентах отдельных элементов и отношений; они - посторонние, их воспроизведение не зависит от того, являются они характеристикой объекта или нет. Такой порядок выше упоминался при обсуждении стилей и стилевых направлений. Второй вариант связан с повторяемостью элементов и отношений в паре *эквивалент - объект*. Эти элементы и отношения являются результатом попытки отразить в эквиваленте то, что имеет место в объекте. Они явно относятся к структуре объекта и могут быть разной степени совершенства. В работе степень упорядоченности, характеризующая второй вариант порядка, понимается как адекватность эквивалента. Второй вариант уместно сравнить с *фигурой*, которая выделяется из *фона* - первого варианта порядка. Пара *фигура - фон* рассматривается [15] как один из трёх важных факторов группировки элементов, используемых зрительным восприятием.

Вариантов порядка много, они сменяют друг друга, а между ними возникают неустойчивости. Этот процесс вполне напоминает волновой, он представлен на рис. 4e, где "волны" налагаются друг на друга: новый порядок возникает, как только прежний порядок достигает max - насыщения или эволюционной зрелости. Именно так сменяют друг друга стили и стилевые направления. Добавим, что *отражение* как представление является достаточно распространённым. Мы здесь несколько меняем вкладываемый в указанный термин смысл, связывая его, в частности, с представлением о *порядке* и добавляя для наглядности геометрический аспект.

7. СИСТЕМА ГЛАЗ - МОЗГ

Структурные эквиваленты формируются в пределах или при участи системы, которую принято называть [11] *глаз - мозг*. Чтобы подчеркнуть структурную специфику и взаимосвязи исследуемых систем, нами используются термины, которые отличаются от общепринятых. Согласно рис. 5a выделяется оппозиция *видимое - знаемое*, элементы которой соответствуют паре *левое - полушарие - правое* (ЛП - ПП). Глаз [11] формирует паттерн - набор пятен и линий на сетчатке, т.е. плоский и принципиально неоднозначный узор, структура которого весьма далека от структуры объекта. На схеме глаз смещён к основанию системы *видимое*. Динамика процесса эволюции и функции уровней представляются следующим образом. Напомним, что здесь нам нужны предельно простые соображения, позволяющие описывать обе исследуемые системы.

Элементы системы *видимое - знаемое* в ходе эволюции формируются параллельно, т.е. некоторому уровню первого из элементов соответствует вполне определённый уровень второго элемента. Этот симметричный план постоянно нарушается, поскольку акцент систематически переносится то на уровень *видимое*, то на уровень *знаемое*. Ситуация иллюстрируется рис. 5b, где $\mu(x)$ - [13] функция совместимости, а t - условное время, которое здесь может рассматриваться как слева направо, так и справа налево. Другими словами, активизируется то ПП, то ЛП. В ходе этого процесса система в целом совершенствуется, т.е. реализуется конкуренция, и способы видения сменяют друг друга, как это показано на рис.4e. Аналогичным образом (с наложением) реализуется и сосуществование способов видения. Таким

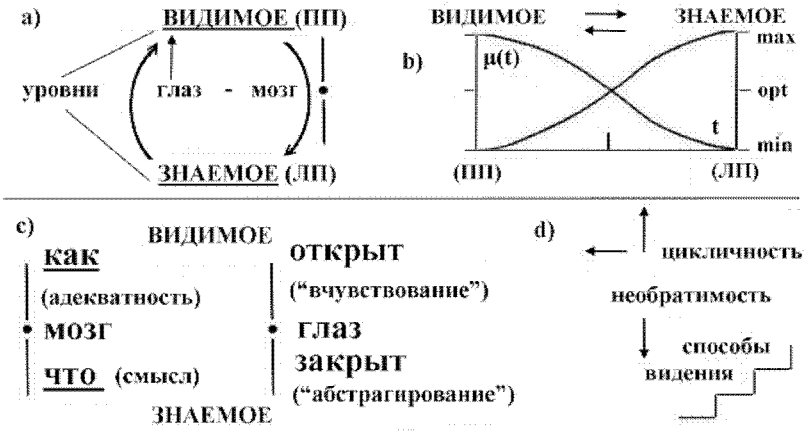


Рисунок 5.

Моделирование системы «глаз - мозг» при использовании: a) оппозиции «видимое - знаемое» (левое - полушарие - правое); b) функции совместимости μ(t) [13]; c) пары «адекватность - смысл»; d) оппозиции «цикличность - необратимость»

образом, мы в соответствии с рис. 5d принимаем во внимание, как *цикличность*, так и *необратимость*.

На рис. 5c показано, что система *видимое* отвечает на вопрос как воспринимается наблюдаемый объект; при её обсуждении речь идёт о приемах, используемых элементах, способах видения, здесь главное - *адекватность* образа. Система *знаемое* отвечает на вопрос, что собой представляет объект, она ответственна за смысл воспринимаемого. Если акцент полностью смещен к уровню видимое, то мы имеем дело с ситуацией "*глаз открыт*" и характеризуем её как "*вчувствование*". Когда ситуация противоположна, то "*глаз закрыт*", и ситуация понимается как "*абстрагирование*". Разумеется, возможны все промежуточные варианты, как это показано на рис. 5b. Таким образом, система зрения отчасти характеризуется нами в терминах, которые приняты при описании изображений и поясняются в разделе 8. Кавычки используются том случае, когда термин отрывается от привычного контекста. Зрительная система (система образов) представляется далее как оппозиция *видимое - знаемое*.

8. ЦИКЛИЧНОСТЬ ПРИ ЧЕРЕДОВАНИИ СТРУКТУРНЫХ ЭКВИВАЛЕНТОВ

Изменения в *системе образов* и в *системе изображений* представлены совместно на рис.6. Напомним: если адекватность μ(t) растёт, это значит, что наращивается порядок в системе структурных эквивалентов и наоборот, когда падает. В системе образов, начиная с позиции t_0, акцент переносится на систему *видимое*, которая совершенствуется и достигает эволюционной зрелости в позиции t_1. В названном интервале согласно рис. 4c происходит сборка уровней видения - обращение к внешним характеристикам объектов, они всё с большей точностью фиксируются. Здесь реализуется, *поверхностное* отражение, если мы обсуждаем симметричный план, или - "вчувствование", когда мы хотим подчеркнуть внимание восприятия к деталям объектов природы.

После t_1 акцент постепенно переносится на систему *знаемое*, т.е. с системы *видимое* акцент снимается. Ситуация подобна изображенной на рис. 5b, однако представлена лишь частично. Здесь происходит удаление от данных опыта, характеристики объектов упрощаются и синтезируются в некие обобщённые образы, которые понимаются как каркасы объектов; на рис. они отмечены знаком x. Каркас здесь - структура, которая основана на симметричном плане, предельно упрощена и допускает двойную интерпретацию (2). Результаты могут быть охарактеризованы с помощью таких терминов, как, например, "река вообще" или плод. Процесс трактуется как "абстрагирование" и *промежуточное* отражение, но только в целом. Можно видеть, что при формировании каркасов восприятие обращается попеременно к элементам пары *видимое - знаемое*, т.е. реализуется колебательный режим.

Далее на смену отвлечённым образам приходят простые геометрические элементы, которые также наделяются смыслом. Примером может служить круг (о) - фигура, объединяющая, скажем, Солнце и Луну или прямая линия (–), символизирующая горизонт. В позиции t_{opt} завершается цикл, связанный с формированием системы видимое. Известное [11] влияние системы *знаемое* на систему *видимое* и смыслы здесь не обсуждаются. Мы ограничимся утверждением, что к концу цикла отношения, характеризующие форму и цвет, воспринимаются практически так же, как это происходит в нашей зрительной системе сейчас.

Позиция t_{opt} отличается тем, что акцент полностью перенесён на систему *знаемое*, т.е. извлекаемый *смысл* достигает *max* (на рисунке не показан.), в то время как адекватность образов характеризуется позицией *min*. Отметим, что процесс "абстрагирования" не мешает воспринимать окружающий мир адекватно, поскольку система пользуется достигнутым в позиции t_1. Всё, что сказано выше про интервал t_0 - topt является, напомним, предположением.

В позиции t_{opt} начинается новый цикл, который также ориентирован на отражение и на симметричный план. Здесь возникают изображения, прежде всего, в пещерной живописи, где представлены как абстрактные элементы, так и каркасы объектов. Далее адекватность изображений наращивается и достигает *max* в позиции t_2, которая обозначает эпоху Возрождения. После этого последовательно возникают маньеризм, классические стили и стилевые направления. Адекватность изображений, если говорить в целом, снижается, а в современном искусстве возникает [2] огрубление и "тяга к простым осязаемым формам". Цикл завершается при появлении абстракционизма с его пятнами и линиями, когда изображение исчезает. Здесь имеет место "возвращение к истокам", причём, не только к позиции t_{opt}, но и к позиции t_0. В характерном для изображений интервале t_{opt} - t_3 В.Воррингер обнаруживает [20] колебания между элементами пары *вчувствование - абстрагирование*, которая представляет глобальные изменения в адекватности изображений. Характеристику *глаз закрывается* использует Г.Д.Фридрих, описывая ситуацию в живописи во второй половине XIX века, т.е. на части отрезка t_2 - t_3. Названные термины заимствованы нами для описания левой части рис. 6, а также рис. 5c.

Отметим, что в позиции t_2 зарождается классическая наука, а в позиции t_3 достигается её эволюционная зрелость и возникает [14] известный кризис. Аналогом ситуации является рис. 5b слева и справа соответственно. Можно видеть, что структурные события разного масштаба рассматриваются нами как результат повторение одного сценария.

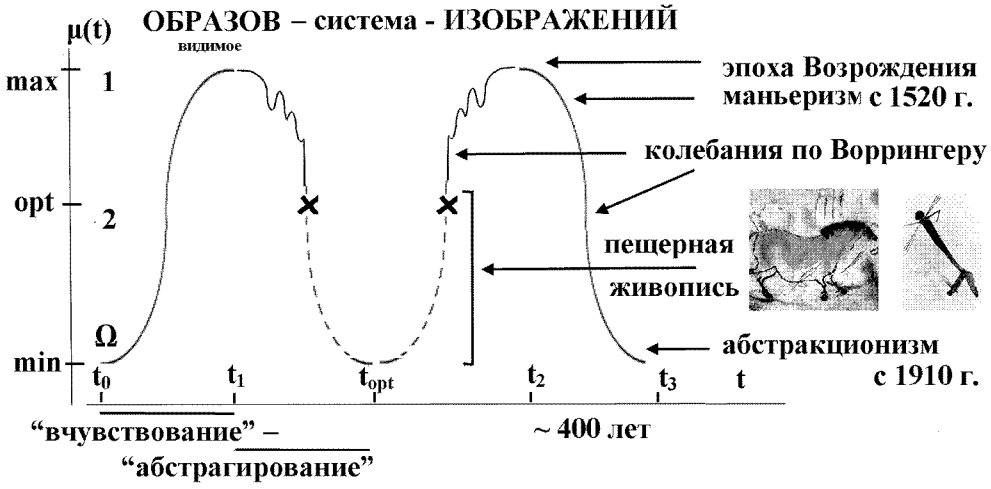


Рисунок 6.
Исследуемые системы как история (справа) и предыстория (слева);
μ(t) - совместимость в паре «структурный эквивалент - объект»

Представленная схема построена на основе симметричного плана и демонстрирует преемственность в паре *образы - изображения*. Она позволяет рассчитывать на реконструкцию левой системы по структурным характеристикам системы справа.

9. СХЕМА РЕКОНСТРУКЦИИ УРОВНЕЙ ВИДЕНИЯ

Напомним, что реконструкцией здесь называется воссоздание неизвестной сейчас *системы видимое* на основе подробно описанной *системы изображений*. Заметим, что в последнем случае мы имеем дело с набором классификаций, которые, с нашей точки зрения, структурированы недостаточно и как бы рассыпаны вдоль оси времени. Реконструкция включает в себя: a) введение в системы ветвей и уровней, а также присвоение им наименований; b) представление двух систем в виде каркаса; c) заполнение каркаса содержимым - кратким описанием структурных событий, которые происходят в пределах ветвей и уровней. Здесь под каркасом понимается конструкция, варианты интерпретации которой дополнительны и зависят от направления её рассмотрения. Каркас можно также назвать базой двух исследуемых систем.

Для целей реконструкции рис. 4c переносится на рис. 7a и представляется как две триады ветвей *образность - схематичность - символьность*. Далее удобно рассмотреть сначала систему справа, а потом перенести результаты на систему слева. Совокупность ветвей справа трактуется как известные в живописи стилевые направления, однако их группировка предлагается в настоящей работе впервые. Уровни в пределах конусов здесь не обозначены. Если двигаться вдоль оси t слева направо, то при *сборке* системы образов растёт определённость в интерпретации ($\Omega \rightarrow 2 \rightarrow 1$), а при *разборке* системы изображений интерпретация всё более затрудняется ($1 \rightarrow 2 \rightarrow \Omega$). Дополнительно у вершин конусов помещаются три уровня, которые понимаются справа как классические стили.

Правая и левая части схемы объединены на рис. 7c, который является аналогом рис. 2g и называется их структурным каркасом. Линии пунктира здесь символизируют уровни (способы) видения. Каркас в предельно сжатой форме представляет два сценария. Если его читать сверху вниз, то можно обсуждать *систему изображений*, а если снизу вверх - *систему видимое*. Например, согласно рис. 7b и d при сборке (см.↑) в способах видения наращивается порядок и растёт определённость в интерпретации наблюдаемых объектов. При разборке (см.↓) ситуация обратная. Отметим два важных момента. У основания конуса способов видения много (Ω). Применительно к *системе изображений* это означает, что

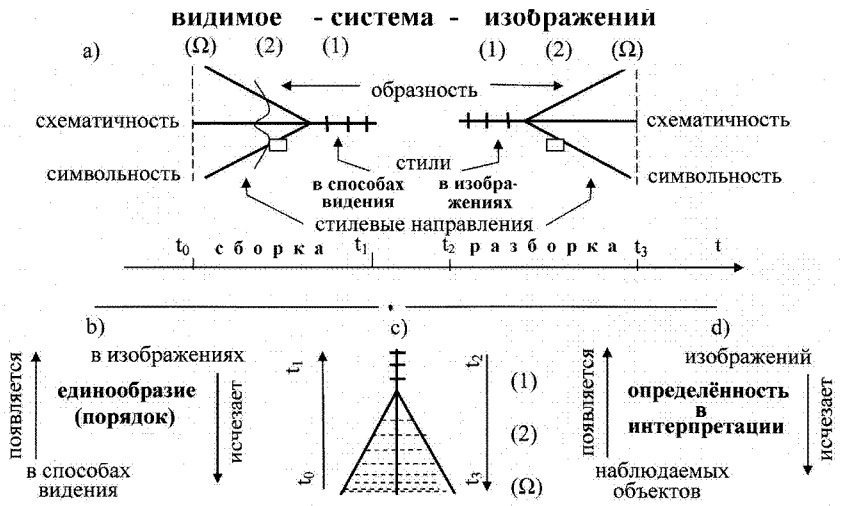


Рисунок 7.

Схема реконструкции способов видения: a) общая характеристика цикла, где на отрезке t_0 - t_1 происходит сборка уровней видения (эволюционирует зрения), а в пределах t_2 - t_3 - их разборка (разворачиваются изображения); c) схема, представляющая одновременно пару «сборка - разборка»; b) динамика вариантов порядка; d) динамика вариантов интерпретации

способов видения, по сути, столько же сколько и художников. Если обсуждать *систему видимое*, то из схемы видно, что носители видят мир поразному. У вершины конуса способ видения формально один (1), Применительно к *системе видимое* это значит, что разные люди видят окружающие объекты приблизительно одинаково. В *системе изображений* различия также невелики и сводятся к особенностям национальных школ.

Ориентируясь на *систему изображений*, охарактеризуем, прежде всего, классические стили. Они представляются триадой *барокко* → *рококо* → *ампир* и сменяют друг друга так, как это показано на рис. 4е. Для всех стилей характерным является наличие посторонних (не относящихся к сюжету) элементов, которые, как правило, располагаются на периферии изображения. В *барокко* появляются мелкие символьные конструкции в виде завитка, в *рококо* на их место приходит рокайль - раковина уже более крупного размера, и, наконец, в *ампире* возникают крупные образные конструкции - античные военные атрибуты. Обратим внимание на то, что располагающиеся на периферии элементы характеризуются соответственно триадой *символьность - схематичность - образность*.

Заполнение ветвей уровнями показано на рис. 8. Здесь базовая ветвь *схематичность* представляется состоящей из пяти уровней - этапов: импрессионизм - пуантилизм - кубизм и фовизм - экспрессионизм - абстракционизм. Этапы в целом разворачиваются последовательно, за исключением кубизма и фовизма, которые реализуются параллельно. В ветвь *образность* помещается примитивизм, сначала любителей, а затем профессионалов. Ветвь *символьность* содержит символизм, который позже трансформируется в модерн. Подчеркнём, что мы включаем имеющиеся классификации в предлагаемую структурную модель, ни в коем случае не разрушая их.

Структурные описания стилей и стилевых направлений представлены [17] в специальном обзоре; они составлены на основе литературных данных, очищены от сюжетных и эстетических соображений и предельно сжаты. При этом учитываются только новшества, повторы во внимание не принимаются.

При обращении к системе образов ситуация с расположением уровней напоминает отражение. Здесь стили располагаются в обратной последовательности, т.е. *ампир* → *рококо* → *барокко*, а стилевые направления реализуются и прочитываются согласно рис. 8 справа налево. Нетрудно видеть, что система *видимое* описывается нами в терминах изображений. Маньеризм, сюрреализм, а также этап "символизм" в настоящей работе не рассматриваются.

Далее приводятся примеры заполнения ветвей и уровней, названия которых заключаются в кавычки, чтобы отличать их от системы изображений. Изложение предельно сокращено, иногда ради образных ассоциаций упоминаются фамилии ху-

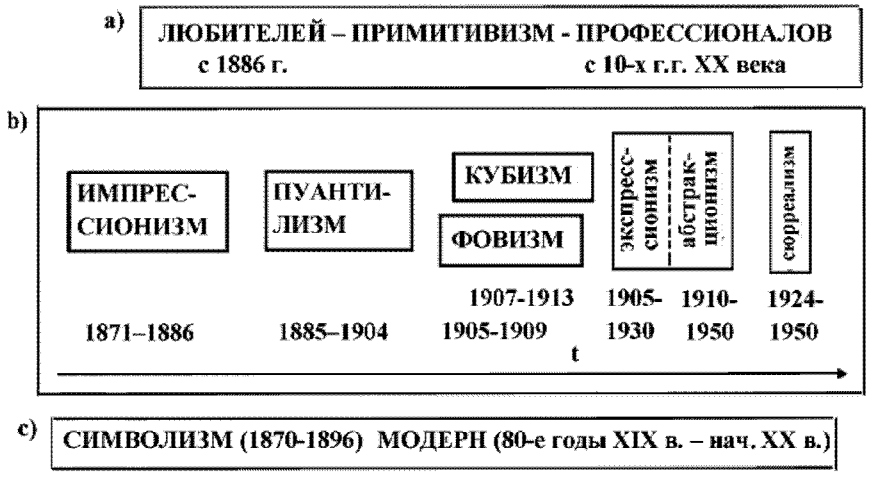


Рисунок 8.

Детализация уровней видения в пределах ветвей: a) образность; b) схематичность и c) символьность. Схема при чтении слева направо представляет систему изображений, а в обратном направлении - систему видимое

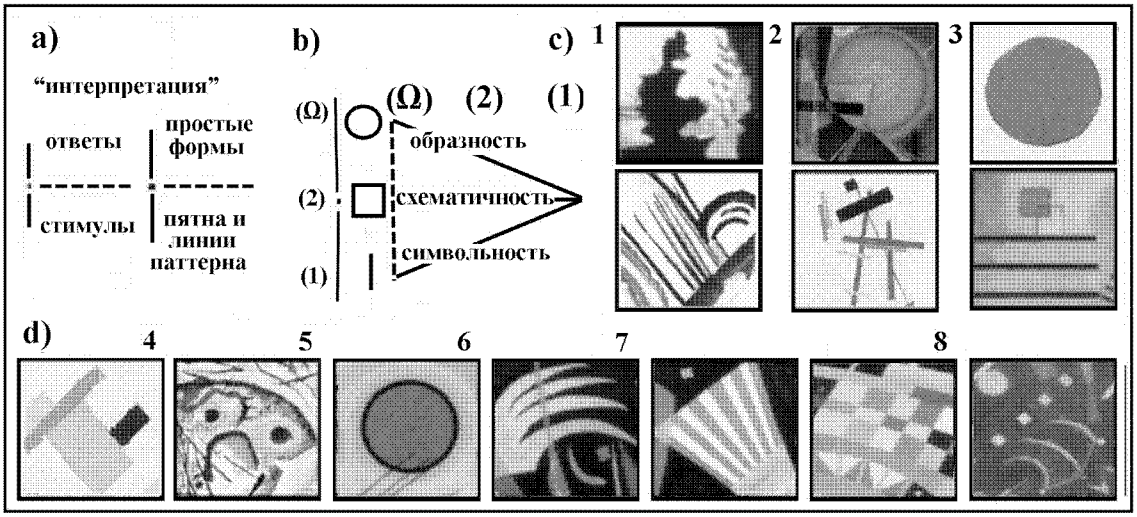


Рисунок 9.

Зарождение зрительной системы: a) возникновение интерпретации; b) структурные основания ветвей; c) примеры пятен, линий и простых форм; d) варианты группировки структурных элементов. В c) и d) использованы фрагменты работ В.Кандинского и К.Малевича

дожников (в скобках). Этой же цели служат иллюстрации, на содержание которых обращать внимание не следует, т.к. для нас здесь важен способ формирования образа.

10. ЗАРОЖДЕНИЕ ЗРЕНИЯ (ВЕТВЬ «СХЕМАТИЧНОСТЬ»)

Зрительная система начинает формироваться на этапе "абстракционизм", где образов ещё нет. Здесь осуществляется первоначальное накопление визуальных данных и генерируемых восприятием простых форм, которые согласно рис. 9a возникают как реакция (ответ) на регистрируемые линии и пятна паттерна. Те и другие реализуются отдельно без какой-либо логической связи. Элементы пары *форма - цвет* воспринимаются как одинаково существенные, они осваиваются и становятся разнообразными. Зарождается "интерпретация"; разумеется, мы употребляем этот термин со значительной долей условности.

Позже при освоении форм и направлений восприятием последовательно конструируется триада наиболее простых форм *линия - квадрат - круг*, которая представлена на рис. 9b. При её формировании определяющую роль играет выделение одного преимущественного или нескольких равносущественных направлений: для линии - одного (1), в случае квадрата их два (2), а для круга - множество (Ω). Элементы указанной триады рассматриваются как протоформы - первичные конструкции, которые являются структурными основаниями ветвей, напротив которых они расположены. Протоформы выявляются в указанной последовательности и "размножаются" путём группировки. Сначала абстрактные конструкции осваиваются в *статическом* варианте (К.Малевич), а затем - в *динамическом* (В.Кандинский).

Начальные способы видения иллюстрируются на рис. 9c. Здесь сначала трудно различить, что фиксируется как стимул, а что возникает как ответ (см. c 1). Позже акцент явно смещается в сторону генерируемых восприятием форм (см. c2). В результате выделяются протоформы (см. c3). Для создания новых форм используются такие процедуры, как повторение, сближение, наложение, *разъединение - объединение* (вспомним рис. 1f), деформация, поворот. Удобно воспользоваться термином [5] и считать, что ответственным за такого рода процедуры формообразования является "генератор фантазии".

Перечислим в соответствии с рис. 9d некоторые варианты группировки элементов, присваивая им соответствующие названия. Прежде всего, это гибрид - результат сближения двух (как правило, урезанных) форм с общей границей, которая близка к линии (см. d4). Композиционная фигура допускает два дополнительных варианта "интерпретации" всех узлов в зависимости от способа их группировки (см. d5). В композиционном гибриде две формы сближены, а общая граница близка к ок-

ружности; одна фигура располагается внутри другой (см. d6). Способ организации *фигура-фон* позволяет попеременно выделять (смещая акцент) те или иные дополнительные элементы (см. d7). Результатом ещё одного приёма, основанного на повторении, является орнамент (см. d8). Важно, что все перечисленные способы группировки зарождаются именно здесь и на следующих этапах эволюции лишь заполняются новым, уже образным содержанием. В этом можно убедиться, сравнив, например, рис. 9 d5 b и рис. 2c или рис. 9 d7 и рис. 2d.

При анализе возникновения зрения следует учитывать также начала разделов 12 и 13.

11. ВЕТВЬ «СХЕМАТИЧНОСТЬ»

Формирование стилевых направлений вдоль ветви схематичность представлено на рис. 10, который читается снизу вверх.

В ходе этапа "экспрессионизм" освоенные и получившие распространение крайне примитивные и простые формы отождествляются с пятнами и линиями, которые представляют реальные объекты. Результаты такого объединения могут быть охарактеризованы как простейшие образы, адекватность которых незначительна. Формы предметов и их фрагменты часто подчинены геометрическим фигурам (линиям, квадратам, треугольникам) и выглядят угловатыми (Э.Кирхнер), а отдельные образы как бы противостоят друг другу (Э.Хеккель). За счёт повторения в образах абстрагированных форм совокупность наблюдаемых объектов имеет очень обобщённый характер (К.Шмит-Ротлуф). Систематизации нет, единообразие отсутствует, но выявляются преимущественные направления (горизонталь и вертикаль). Внутренний мир представляет собой самостоятельную замкнутую сферу, в пределах которой восприятие занято толкованием, наряду с которым оно преобразует полученные из опыта представления. На основе опыта толкование форм увязывается с ощущением опасности. Форма как таковая является здесь выражением таинственных сил мира, который видится через призму страха, поскольку "понимать язык форм значит: жить" (А.Макке). Имеются ассоциации, но целое с их помощью не складывается или складывается с трудом из отдельных элементов. Внешний мир представляется носителю как набор раздробленных фрагментов восприятий, которые извлекаются из хаоса в поисках смысла и значения предметов.

На этапе "кубизм" в образах, как бы, обнажается скелет окружающего мира. Акцент смещён к

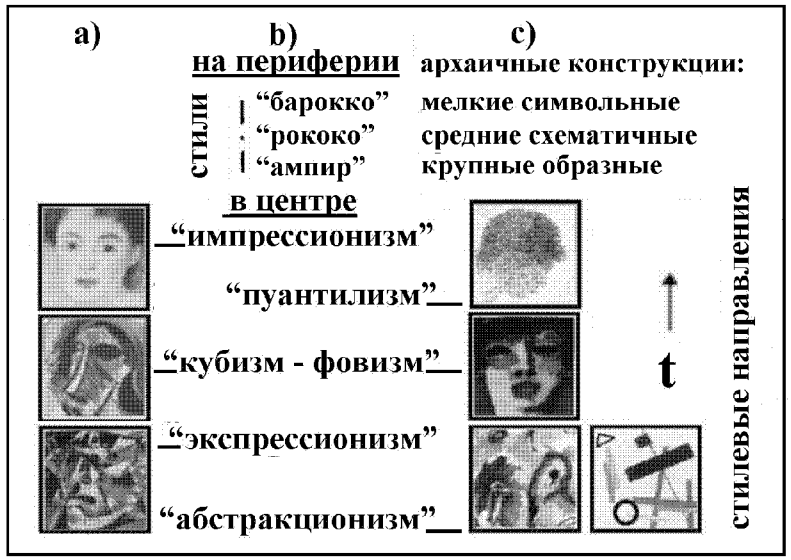


Рисунок 10.

Этапы формирования образов вдоль ветви схематичность. Схема читается снизу вверх и содержит: b) названия этапов; a) и c) иллюстрации способов видения для стилевых направлений; c) характеристики посторонних структурных элементов для стилей

форме, цвет играет второстепенную роль. При формировании образов используются геометрически простые формы - цилиндр, сфера, конус и другие. Формы играют роль знаков-намёков (Ж.Брак). Из-за повторения одних и тех же элементов возникает единообразие и зарождается порядок. Происходит постепенный переход от накопленных разнородных визуальных данных к их объединению, что способствует росту адекватности. Множество точек зрения сначала сводятся к двум, например, когда сочленяются фас и профиль (П.Пикассо), а затем одна позиция наблюдения становится преобладающей, т.е. реализуется схема $Q \rightarrow 2 \rightarrow 1$. В значительной степени осуществляется переход *раздробленность* $\rightarrow$ *связность*, контур трансформируется по схеме *изломанность* $\rightarrow$ *отчётливость*, т.е. всё более соответствует "анатомии" объектов. К концу этапа образы, несмотря на то, что они составлены из мелких геометрических элементов, приобретают черты сходства с объектами. Появление сконструированных восприятием геометрических элементов позволяет говорить о сетке, которая набрасывается восприятием на пятна и линии паттерна. В образах моделируется и простейшим образом заполняется контур, выявляются каркасы объектов, в грубом варианте появляется целостность, адекватность образов приближается к opt.

Этап "фовизм", разворачивается параллельно с этапом "кубизм", акцент смещён к цвету, форма - на втором плане. Восприятие как бы ослеплено светом и цветом, при этом отсутствует точность воспроизведения предметов реального мира. Имеют место колебания между примитивизмом и геометрической декоративностью (А. Матисс). Часто нет соответствия используемого цвета реальности. Сохраняется подозрительное отношение к видимому (Р.Дюфи). Связность изображаемого достигается только в контексте. Фигура иногда практически сливается с фоном, грубые цветные полосы превращаются в хаотически расположенные пятна (М.Вламинк). Тем не менее, в конце этапа адекватность образов приближается к opt.

На этапе "пуантилизм" для моделирования воспринимаемого выявляются простые структурные основания, при этом реализуется синтез элементов пары *форма - цвет*. Основания формируются по схеме $Q \rightarrow 1$, т.е. из многочисленных вариантов цвета и формы выделяется наиболее простой - окружность, заполненная чистым цветом. На основе унифицированных оснований образы детализируются (Ж.Сёра), и результат восприятия "представляет собой как бы панель из светящихся лампочек" [11]. Образы становятся унифицированными. Достигается своеобразная регулярность, вырабатываются твёрдые правила сборки образных каркасов. Далее при совершенствовании системы зрения цветные точки уменьшаются в размерах и перестают быть видимыми.

В ходе этапа "импрессионизм" единое видение становится правилом. Твёрдые правила сборки образов, как бы, отходят на второй план, вследствие чего результаты восприятия характеризуются большим разнообразием и непосредственностью (Э.Дега). Детализации отдаётся предпочтение (О.Ренуар). Происходит размывание каркасов, они перестают быть видимыми и "растворяются" в вариантах Цвет всё больше теряет самостоятельность и постепенно подчиняется форме. Увеличивается светочувствительность глаза ("много света"), адекватность образов устремляется к max. Оценивая ветвь в целом, заметим, что разнообразие способов видения сменяется единообразием по схеме $Q \rightarrow 2 \rightarrow 1$.

12. ВЕТВЬ «ОБРАЗНОСТЬ»

Исходно, на "профессиональном" этапе, выделяются два способа видения, где образы формируются на грани узнаваемости. Во-первых, из абстрактных элементов складывается нечто похожее на объекты - отдельные фигуры, звёзды, солнце, луна, пейзаж, змеи и насекомые (Х.Миро). Здесь возникает спонтанный поток образов, развивающихся по своим собственным законам. Черты реальных объектов радикально меняются, естественным формам придаётся геометрическая простота. Основные формы имеют вид символов, которые приспосабливаются для представления основных составляющих жизненного опыта. Формируются смутные очертания, выделяются наиболее существенные черты объекта. Во-вторых, при формировании образов возникает своего рода архитектура (обдуманная техника построения, работа с формами и цветом), которая противостоит спонтанно-

сти (П.Клее). Здесь изучается природа вещей, исследуются элементарные геометрические формы (круги, квадраты, углы, треугольники), создаются новые формы, используются декоративные элементы. Восприятие стремится сгруппировать формальные компоненты таким путём, чтобы каждая деталь имела своё место, не задевая соседей. Результаты формообразования выглядят странными, например, представляется цветок абстрактного растения с помощью разноцветных делящихся квадратиков. Оба способа видения имеют сходство с рисунками детей раннего возраста.

Далее на "профессиональном" этапе упрощение утверждается как принцип, а незначительные подробности игнорируются. Примитивность образов в значительной степени преодолевается, однако пропорции, так или иначе, демонстрируют неустойчивость, а цвет часто не соответствует реальности. Следует отметить неловкость (М.Ларионов), фантастичность (М.Шагал) и монументальность (Н.С.Гончарова).

В ходе "любительского" этапа явный примитивизм отступает. Появляются устоявшиеся приёмы, закрепляющие адекватность образов. Здесь контуры отчётливы, формы угловаты и прямолинейны, цвет является чистым и открытым (подобно витражам), а используемый язык может быть назван неотёсанным и корявым (А.Руссо). Подражание природе ещё не является правилом. Созданная структура мира соответствует не столько реальности, сколько собственным представлениям. Как правило, законы перспективы игнорируются. Можно сказать, что восприятие оказывается на пороге формирования зрительных стереотипов и достаточно жесткой регламентации, а подражание природе начинает формироваться как правило. Потребность в простой форме снижается, возникает тяготение к канонизации образов.

13. ВЕТВЬ "СИМВОЛЬНОСТЬ" (ЭТАП "МОДЕРН")

Этап насыщен структурными событиями, отметим некоторые из них. Исходно осваиваются как натурные, так и простые символьные формы, которые приспосабливаются восприятием для конструирования образов. При их повторении (остальное - такое же) возникает простой вариант порядка - орнамент, в качестве основы которого выступает растительное начало. В орнаменте на смену *символьным* конструкциям приходят *схематические* построения (*геометризованный* узор), которые затем устремляются к натурным формам, т.е. орнамент становится всё более *образными*.

Происходит разъединение *центра* и *периферии* в пределах узкого поля зрения (см. раздел 15). Последнее заполняется образами в центральной части, где они формируются, распространяются и становятся всё более совершенными. На периферии же преобладает орнамент, в результате чего образы постоянно обрамлены всякого рода растительными мотивами, которые, как бы, наступают на них с периферии.

В ходе поиска совместимости структур *объекта* и его *образа* восприятие формирует силуэт - размытый вариант контура, оно занято выявлением образа из орнаментальной линии или красочного сгустка. Контур возникает из орнамента и наделён декоративностью. Создаются предпосылки для формирования фигуры - того, что восприятие признаёт неслучайным и важным для выживания. Контур обнаруживается и как граница между элементами пары *фигура - фон*, и как некое устойчивое образование - база.

Сначала фигура сливается с фоном, фон как таковой отсутствует, (Ч.Войзи). "Клонирование" форм приводит сначала к симметричным, а затем к диссимметричным вариантам орнамента. Во втором случае орнаментальный образ составляется из отдельных регулярно или хаотически повторяющихся блоков наподобие ковра или мозаики (Г.Климт). Поскольку позиции фигуры и фона почти уравновешены, образ, условно говоря, то всплывает из окружающего орнамента, то в него погружается. Можно сказать, что в пределах фигуры реализуется "*вчувствование*", а в пределах фона - "*абстрагирование*". Контур начинает приписываться к фигуре, что можно назвать целесообразной группировкой.

После того, как контуры сформированы, они заполняются обширными плоскостями чистого цвета, что позволяет говорить о "клаузонистской" системе восприятия (Э.Бернар, Л.Анкетен). Распространены ситуации, когда образы либо одноцветны, либо цвет отсутствует (Т.Лотрек). В ходе этапа "становятся популярными" то одни, то другие цвета.

Параллельно с орнаментом восприятие создаёт обрывки формы и натурные фрагменты (поздний О.Редон). Этот процесс напоминает копирование. Проявляется интерес не к природе в целом, а к отдельным её частям или предметам Арсенал используемых форм беден, а тематика образов сужена до листка, цветка, растения, плода, камня, птицы, стрекозы, светового луча и т.д. Образы этих предметов выступают не в естественной среде, а самостоятельно, как изолированные объекты. Наибольшая образность достигается для важных (в смысле выживания) элементов.

Отдельные детали и объекты воспроизводятся в образах весьма правдоподобно. При группировке таких образов выделяются два варианта. В пределах первого из них восприятие занято творчеством и создаёт новые формы, которые не способны ещё воспроизвести реально наблюдаемые ситуации. Решение задач такого рода проводится, в основном, с применением гибридной схемы. В результате окружающие объекты и, в частности, представители фауны воспринимаются как гибридные композиции и метаморфозы (А.Бёклин, М.Клингер, Ф. фон Штук). Получают распространение существа-симбиозы - полурастения-полуживотные и проч., где соединены в одно целое, скажем, цветок и птица. Распространение гибридов позволяет говорить о биологизме образов, В этом варианте стереотипность восприятия отсутствует.

Во втором варианте направленность группировки связана со стремлением восприятия избавиться от уникальности и выделить общее в наделённых сходством наблюдаемых объектах. Восприятие ещё не умеет разъединять в должной мере. В самой схеме формообразования заложена значительная совместимость признаков носителя и окружающей его среды (А.Муха, О.Бердсли, М.А.Врубель), т.е. велико сходство различного (В.Ван Гог, П.Гоген). В результате при восприятии живого существа индивидуальность отсутствует, а объекты представляются монолитными обтекаемыми блоками с минимумом деталей. (Э.Мунк). Восприятие часто использует повторы и подобие ситуаций (П.Гоген). Зарождаются абстрактная образность и стереотипность восприятия. В конце этапа "модерн" достигается равновесие в паре *творчество - стереотипность*.

Здесь формируется набор пар, разделяющих элементы *важное - для выживания - несущественное*. Среди них выделяются: *фигура - фон, образ - орнамент (натурность - декоративность), фауна - флора (живое - неживое), повторяющееся - случайное, центральная часть поля зрения - его периферия*. Восприятие не видит существенной разницы между живой и неживой материей, мир представляется живым организмом. Основными инструментами восприятия являются линия и орнамент.

14. ДЕТАЛИЗАЦИЯ ОТДЕЛЬНОГО СПОСОБА ВИДЕНИЯ

Если рассматривать структурные приёмы, используемые отдельным художником, можно в деталях реконструировать отдельный способ видения. Ниже представляется попытка реконструкции способа видения на примере П.Пюви де Шаванна, творчество которого соответствует в нашем понимании началу этапа *символьность*; на рис. 7а знаки □ справа и слева. В табл. на основе [1] указан тот или иной признак, который *появляется* в живописи или *исчезает* в ходе эволюции зрительного восприятия. Признаки условно разделены на три группы: A - методика; B - результаты и C - их оценка. Для полноты картины здесь иногда указаны дополнительные приёмы и соответствующие ссылки на оппозицию - художника Г.Моро.

Можно видеть, что здесь достигается своеобразное равновесие в паре *абстрактное — конкретное*, а также появляется (на основе оценки C) некоторая граница, разделяющая восприятие человека и других живых существ. Она представлена изогнутой линией слева на рис. 7а.

15. ОСВОЕНИЕ ПЕРИФЕРИИ

Триада стилей "ампир" → "рококо" → "барокко" формируется последовательно в соответствии с рис. 4е. В ходе её развёртывания происходит становление периферического зрения, когда угол зрения увеличивается вплоть до ~180°. В ходе освоения любого из стилей периферия заполняется согласно рис. 10с посторонними для данного акта восприятия архаическими элементами. Последние: a) играют роль знаков, указывающих на присутствие каких-то объектов; b) повторяются

Таблица.

Структурные и другие признаки выделенного способа видения

	ПОЯВЛЯЕТСЯ ↓ Δ ↓ *ИСЧЕЗАЕТ*
	в живописи — в зрительном восприятии
A	метод сборки по рациональным схемам (чертежам), явная структурность
	интерес к биному, отчётливая парность
	чёткая прорисовка силуэтов (контрастность), чеканный контур
	линия как главное формообразующее средство, психологическая выразительность линии
	набор вариантов цвета, которые словно разбавлены мелом
	простота и статика (Пюви) – *сложность и динамика* (Моро)
	разделение *горизонтального* (Пюви) и *вертикального* (Моро) форматов
	одинаковая чёткость передних и фоновых планов (пространственные планы лишены световоздушной среды)
	параллельность пространственных планов, как в театральной декорации
	двойное толкование объекта, который воспринимается, как находящийся то на переднем, то на заднем плане
B	ирреальный "мир, параллельный природе"
	предельная типизация, отвлечённость, обобщённость ситуаций, пластический эквивалент, идеал формы, декоративность
	собирательность в образах проявлений реальности, безличность персонажей, бесплотность фигур
	примитивизм, "неуклюжесть", неловкость, статичность, конвульсивность поз,
	блуждание повторяющихся мотивов, объектов, фигур, лиц
	видение через "окуляр деформирующей оптики", несовпадение абрисов фигур с анатомией, зыбь диссонансов,
	уравновешенность образа и его реального окружения и в то же время отсутствие действенных связей между фигурами и объектами
	скульптурность образов, монументальность композиции
C	размытость понятийно-логических связей, нерасчленённость восприятий,
	изолированность от окружающей жизни, позиция наблюдателя (созерцателя)
	универсальность значений в наблюдаемой природе, в конкретных событиях
	грань сознательного бытия и безотчётного повиновения импульсам природы, хрупкость и неустойчивость мира, ощущение призрачности
	качественное единство природы и носителя (человека), слитность с природой

в ходе этапа и являются его признаком и с) постепенно вытесняются и заменяются лучшими вариантами. В стиле "*ампир*" роль знаков-намёков выполняют архаические образные конструкции, далее в стиле "*рококо*" появляется орнамент в виде раковин, а потом стиль "*барокко*" сопровождается отдельными элементами - завитками. При смене стилей периферия совершенствуется, посторонние элементы измельчаются и занимают в поле зрения всё меньшее место. Деление поля зрения на *центр* и *периферию* позволяет восприятию, с одной стороны, экономить ресурсы, а с другой - концентрировать внимание. Если обратиться к лингвистической аналогии, можно указать на пару *текст - контекст*. В итоге зрительная система формируется в том эволюционно зрелом виде, в каком мы знаем её сейчас.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

В работе предложена специальная методика и представлены обоснования целостности *системы зрительного восприятия* человека и *системы изображений* в живописи Европы после эпохи Возрождения. Согласно модели, они включены в единый цикл и являются последовательными звеньями одной цепи. Охарактеризованы основные ветви и уровни системы зрительного восприятия. Сейчас в науке нет ясных представлений об эволюции зрения, и предлагаемый подход может оказаться полезным. Из модели следует, что система изображений детерминирована: она сложилась под влиянием сценария, по которому эволюционировало зрение. Например, появление квадрата у К.Малевича объясняется [17] завершением цикла и возвращением к "истокам " - структурному основанию.

Укажем на применимость модели в смежных областях и на возможные направления дальнейших исследований.

Синергетика. Предлагаемая методика ориентирована на сближение гуманитарных и точных наук; она может использоваться не только на качественном, но и на количественном уровне. Например, протоструктура [19] формируется на основе золотого сечения, представление о котором широко используется в искусстве. Отметим также весьма

полезную роль симметричного плана для начальной фазы исследований.

Культурология. Феномен двузначимости должен быть изучен более тщательно в широком контексте. Сейчас двойное толкование [17] используется как приём при формировании архитектурного ансамбля, интерьера, театрального действия, структуры романа. Двойной смысл обсуждается при анализе сказок, игр, юмора и конструкций разговорного языка. Было бы полезно сформировать здесь единую точку зрения.

Гносеология. Поскольку выявлена роль биологического прошлого (предыстории) для сравнительно недавних событий, постольку должны учитываться факторы цикличности и переноса акцента при исследовании крупных структурных процессов. Так, согласно модели, возникновение классической науки в XVI в. также предопределено: это своего рода глобальный переход от системы *видимое* к системе *знаемое*, появление *глубокого отражения*. Добавим, что модель позволяет обсуждать феномен догадки и возможности фантазии.

Антропология. Возможно, проблему происхождения человека следует рассматривать как результат перехода в паре *хаос-порядок* (т.е. при реализации отражения в структурных эквивалентах). Известные [17] параллели между философскими и стилевыми направлениями могут быть использованы для реконструкции архаических уровней системы *знаемое* (ЛП). Кроме того, можно реконструировать (скажем, с помощью компьютерной графики) сравнительно непротиворечивый ряд изображений, которые иллюстрировали бы этапы эволюции зрительного восприятия и те способы видения, которыми владели наши предки. Такого рода "музей" был бы интересен в образовательном плане, т.к. имеет прямое отношение к истории жизни на Земле.