КОНТЕНАНТ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ
ISSN: 2307-5767
Том 18, № 3, 2019

Журнал включен в Российский Индекс Научного Цитирования
Зарегистрирован в Научной Электронной Библиотеке
Лицензионный договор № 727-11/2014

СОДЕРЖАНИЕ

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ОПТИКЕ

Архипов С.А.
Опыт разработки и изготовления узла крупногабаритного сканирующего зеркала изделия 17В39 5

Азарова В.В., Макеев А.П., Сухов Е.В.
Поляризационные характеристики кольцевых резонаторов с неплоским контуром для лазерных гироскопов 16

Формозов А.Е., Кузнецов А.Н.
Роль измерителей высоты облаков в становлении метеорологического обеспечения авиации 22

Зубко А.В.
работы по обеспечению радиационной стойкости космической аппаратуры дистанционного зондирования земли в СКБ-1 28

Заварзин В.И., Филонова П.А.
Методика получения данных для стохастической математической модели вычисления фазовых координат траектории полёта воздушного объекта 32

Вечерин Я.А., Литвинов С.А
Определение параметров движения мехатронного шагающего устройства 36

Галенин Д.В.
Разработка системы автоматического регулирования теплоснабжения здания с водогрейными котлоагрегатами 43

Целищев К.Н.
Математическая модель колебаний цельноповоротного стабилизатора в сверхзвуковом потоке 49

РАСЧЕТ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ПРОИЗВОДСТВО ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Архипов С.А., Архипова Л.Н., Линько В.М., Морозов С.А., Понин О.В., Шаров А.А.
Практические достижения ГОИ им. С.И. Вавилова, АО «Лыткаринский завод оптического стекла» и ПАО «Красногорский завод им. С.А. Зверева» по созданию длиннофокусных объективов для дистанционного зондирования Земли 54

Шмидт А.И., Маршаков Б.Г., Семенов Е.С.
История и перспективы развития стереомикроскопов серии МБС 73

КОНТЕНАНТ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ
ISSN: 2307-5767
Том 18, № 3, 2019

Журнал включен в Российский Индекс Научного Цитирования
Зарегистрирован в Научной Электронной Библиотеке
Лицензионный договор № 727-11/2014

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

СОДЕРЖАНИЕ
(продолжение)

ОПТИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ

Наумов В.М.
Разработка метода фиксации утечки теплоносителя на трубопроводах ТЭС и АЭС 79

Денисов Д.Г., Кудрова В.Д., Сериков В.Ю.
Технологические особенности изготовления оптико-механических узлов конструкции обзорной телевизионной камеры 84

Тарасов В.Д., Денисов Д.Г., Семенов А.П.
технологический процесс изготовления и метод контроля астрономического зеркала с гиперболическим профилем 93

Шарикова М.О., Денисов Д.Г., Сериков В.Ю.
Проектирование технологического процесса изготовления оптико-механичекого узла монокуляра для проведения нейро- и микрохирургических операций 100

Фирсова Ю.А., Гулюкин М.Н., Храмогин Д.А.
Нейтральные стекла и особенности их синтеза в газовых печах 107

ОПТИЧЕСКОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ

Новиков А.А., Подлесная Г.В.
Разработка конструкций всепогодного радиопрозрачного укрытия из композиционного материала 111

ОБЩЕСТВЕННАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ АКАДЕМИЯ «КОНТЕНАНТ»

ОСНОВАНА 14 СЕНТЯБРЯ 1994 ГОДА

Добровольная, основанная на членстве, самоуправляемая организация, созданная с целью объединения творческих усилий граждан России и иностранных граждан, заинтересованных в дальнейшем развитии оптико-электронной отрасли науки и промышленности. Организация создана в соответствии с Конституцией Российской Федерации, Беларуси и Украины и впоследствии реорганизована в 2012 году в соответствии с Конституцией РФ на основании закона РФ «Об общественных организациях» и действующего законодательства Российской Федерации.

Общественная научно-техническая академия «Контенант»

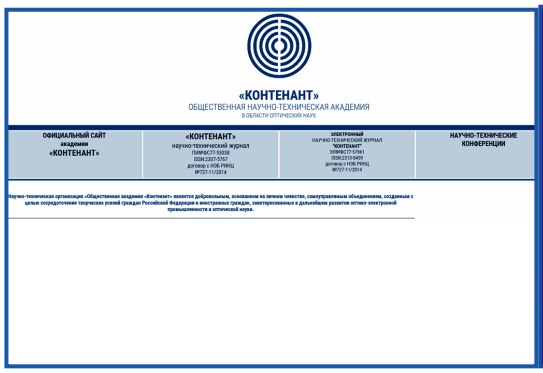
Цели академии «Контенант»:

- *содействие развитию оптической науки и техники во всех направлениях;*
- *проведение комплексных исследований проблем оптико-электронной науки и производства;*
- *поддержка внедрения образовательных, научных программ, отдельных исследований организаций, внедряющих новые методы и технологии в интересах оптико-электронной промышленности и других смежных направлений;*
- *повышение профессионального уровня и престижа специалистов, работающих в области оптики;*
- *организовывать и проводить исследовательскую, просветительскую, информационную деятельность.*

Задачи академии «Контенант»:

- *организация и проведение научно-технических конференций, семинаров, творческих дискуссий, в том числе международных, по различным проблемам современной оптики;*
- *принимать участие в подготовке и решениях органов управления предприятий и организаций оптической отрасли;*
- *осуществление издательской и рекламной деятельности и публикация статей в Российском Индексе Научного Цитирования;*
- *регулярно издавать собственные печатные и электронные издания;*
- *осуществлять сотрудничество с российскими и иностранными юридическими лицами – общественными организациями в оптической отрасли науки и производства*

Собственные издания академии «Контенант»



сайт академии в Интернет www.contenant.ru

научно-технический журнал «Контенант»

электронный журнал «Контенант»

тезисы докладов на конференциях

Президент академии «Контенант», доктор технических наук Сеник Б.Н.

ОПЫТ РАЗРАБОТКИ И ИЗГОТОВЛЕНИЯ УЗЛА КРУПНОГАБАРИТНОГО СКАНИРУЮЩЕГО ЗЕРКАЛА ИЗДЕЛИЯ 17В39

АРХИПОВ С.А.

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

E-mail: da23@mail.ru

Аннотация: *Узел сканирующего зеркала устанавливается перед изображающим длиннофокусным объективом и должен обеспечивать развертку изображения подстилающей поверхности поперек направления полета космического аппарата. Подробно рассмотрены альтернативные конструкции двухсторонних облегченных зеркал (на основе кварцевого стекла, ситалла и бериллия), технологии сборки узлов сканирующего зеркала. Описана оригинальная методика проектирования крупногабаритных облегченных зеркал. По результатам автономных испытаний узлов зеркал в состав изделия 17В39 был принят узел кварцевого зеркала. Поводом для статьи стал 80 летний юбилей АО «Лыткаринский завод оптического стекла» и 75-летие создания СКБ-1 в ПАО «Красногорский завод им. С.А. Зверева». Эти трудовые юбилейные даты предприятия отметят осенью 2019 года.*

Ключевые слова: сканрующее зеркало, определение схемы сканирования, требования к конструкции, разработка методики проектирования.

Abstract: *The scanning mirror assembly shall be installed in front of the imaging long-focus lens and shall provide a scan of the underlying surface image across the spacecraft flight direction. Considered in detail alternative constructions of a lightweight two way mirrors (on the basis of quartz glass, glass-ceramic and beryllium), technology subassemblies of the scanning mirror. Describes an original methodology for the design of large lightweight mirrors. According to the results of independent tests of the nodes mirrors the composition of the product 17B39 was passed node quartz mirror.*
The reason for the article was the 80th anniversary of JSC «lytkarinsky optical glass plant» and the 75th anniversary of the SKB-1 in PJSC «Krasnogorsk plant. S. A. Zvereva».
These employment anniversary date, the company will celebrate the fall of 2019.

Keywords: scanning mirror, definition of the scheme of scanning, requirement to a design, development of a technique of design.

Панорамный аппарат 17В39 был разработан специалистами СКБ-1 и изготовлен Красногорским заводом в 80-годы для космического комплекса «Орлец». Аппарат имел характеристики, превосходящие аналог КН-9 *Hexagon*, что обеспечивало, при прочих равных условиях съемки, вдвое больший объём информации, получаемый с одного скана [1]. Одна из сложных конструкторско-технологических проблем, которая была успешно решена в ходе создания аппарата 17В39 – узел крупногабаритного сканирующего зеркала – рассматривается в настоящей статье.

НАЗНАЧЕНИЕ УЗЛА СКАНИРОВАНИЯ

Узел сканирующего зеркала устанавливается перед изображающим длиннофокусным объективом и должен обеспечить развертку изображения (сканирование) подстилающей поверхности поперек направления полета КА (способ съемки – wiskbroom) в диапазоне углов ±60 градусов.

ВЫБОР СХЕМЫ СКАНИРОВАНИЯ

Рассматривалось два базовых варианта движения зеркала в схеме сканирования. Их достоинства и недостатки указаны в таблице 1.

Оба варианта были признаны не удовлетворительными, имеющими существенные недостатки. Известна конструкция, в которой сканирующее зеркало последовательно повторяет само себя, образуя треугольное или четырех угольное зеркально-призменное устройство. В минимальном варианте требуется два параллельных зеркала, закрепленных на одном валу.

Однако, такие конструкции кратно (2, 3, 4) проигрывают по массе одиночному зеркалу. Снятие этих противоречий привело разработчиков к конструкции сканирующего зеркала, имеющего две одинаковых параллельных рабочих поверхности – передняя и задняя. Схема сканирования таким двухсторонним плоским зеркалом объединяет достоинства вариантов 1 и 2 и имеет следующие преимущества:

1) высокий коэффициент использования цикла сканирования;

2) непрерывность движения зеркала с постоянной угловой скоростью по время съемки. Отсутствие необходимости торможения и разгона зеркала на каждой карде съемки. Как следствие отсутствие резкого возрастания моментной нагрузки на валу зеркала, которая неизбежно приводит к появлению собственных изгибных колебаний зеркала;

3) симметрия внешних тепловых потоков при работе зеркала и, как следствие, симметричные по толщине зеркала температурные градиенты, не приводящие к изгибу рабочих поверхностей зеркала;

4) симметрия конструкции, следствием которой становится повышенная жесткость облегченной структуры зеркала, а значит, при прочих равных условиях, предложенная конструкция двухстороннего зеркала обладает повышенной размерной стабильностью;

5) упрошенная циклограмма работы привода и минимальный расход энергии, необходимой лишь на начальный разгон вращения зеркала;

6) автоматическая установка зеркала в положение автоколлимации для контроля расфокусировки объектива панорамного аппарата.

Таблица 1.
Варианты движения зеркала в схеме сканирования

№	Варианты движения	Достоинства	Недостатки
1	Качание зеркало в диапазоне рабочих углов сканирования	Высокий коэффициент использования цикла сканирования ~33 %	Необходимость реверсивного движения (разгона и торможения).
2	Вращение зеркала с равномерной угловой скоростью	Отсутствие реверсивного движения.	Низкий коэффициент использования цикла сканирования ~16%

Таблица 2.
Требования к конструкции узла двухстороннего сканирующего зеркала

№	Требование	Значение
1	Число рабочих поверхностей	2
2	Размер световой зоны рабочей поверхности, мм	780х600
3	Плоскостность рабочей поверхности, N	0,3
4	Среднеквадратическая погрешность отклонения волнового фронта от ближайшей сферы, λ= 0,633 мкм	0,06 λ
5	Коэффициент отражения	0,8
6	Не параллельность рабочих поверхностей, сек	30
7	Масса узла зеркала, кг	не более 105

ТРЕБОВАНИЯ К КОНСТРУКЦИИ УЗЛА ЗЕРКАЛА

Требования к конструкции узла сканирующего зеркала для панорамного аппарата 17В39 приведены в таблице 2.

АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ЗЕРКАЛА

В 80-е годы отечественные предприятия, прежде всего ЛЗОС, имели технологии изготовления крупногабаритных сплошных зеркал астрономической оптики и некоторый опыт изготовления зеркал космического назначения (главное ситалловое зеркало диаметром 880 мм объектива «Комета-11М» для изделия Агат-1» изготовлено ЛЗОС в 1972 году). В качестве возможных материалов для изготовления облегченного крупногабаритного зеркала рассматривались:

1 Ситалл-СО-115М. В ЛЗОС имелись отработанные технологии изготовления заготовок и фрезерования сложных пространственных структур из ситалла, что позволяло гарантированно изготавливать облегченные структуры и зеркала габаритами до 1 м и более.

2 Кварцевое стекло. В НИИ Кварцевого стекла (г. Ленинград) под руководством Г.И. Амура велась активная отработка технологий изготовления и спекания облегчённых структур, изготовления и доводки крупногабаритных облегченных зеркал.

3 Бериллий. В ГОИ, в отделении 10 под руководством С.В. Любарского проводились работы по созданию крупногабаритных зеркал из нетрадиционных материалов, в т.ч. из бериллия.

Полноценные работы по созданию узла зеркала (проект, разработка КД, создание и отработки новых технологий, изготовление и испытания опытных образцов зеркал) в то время возможно было выполнить примерно за два года. Поэтому для снижения рисков ОКР по изделию 17В39 было принято решение проводить работы по всем трем альтернативным направлениям (ситалл, кварц, бериллий).

После выбора материала основная задача – проектирование конструкции облегченного зеркала, имеющей минимальную массу и сохраняющей форму поверхности на протяжении всего жизненного цикла от изготовления до эксплуатации.

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ОБЛЕГЧЕННОГО ЗЕРКАЛА

Впервые задача расчета оптимальных облеченных ячеистых зеркал поставлена и решена в 1969 г. в статье W.P.Barnes'a [2]. На основе этой статьи в 1973 г. специалистами ГОИ Г.В.Родкевич и В.И.Робачевской разработана «Инструкция №24-73-ГОИ по расчету и проектированию облегченных заготовок для крупногабаритных зеркал диаметром до 3 м» [3]. Однако, как в работе W.P.Barnes'a, так и Инструкции ГОИ приведены общие соотношения между параметрами облегченной структуры, но не указан однозначный алгоритм их выбора. В этой связи автором статьи в процессе разработки конструкторской документации на сканирующее зеркало изделия 17В39 был предложен Алгоритм расчета оптимальных параметров облегченных зеркал [4], изложенный далее.

Общие положения Алгоритма

Под оптимальными параметрами облегченного ячеистого зеркала понимается такая комбинация его геометрических параметров (форма и размер ячеек, толщины ребер и пластин), при которой достигается максимальная жесткость при минимальной массе зеркала для заданных условий крепления и эксплуатации.

На рисунке 1 изображены поперечные сечения сплошного зеркала диаметром *D*, толщиной *H* , и облегченного зеркала тех же габаритов и указаны геометрические параметры облегченного зеркала.

B – размер ячейки, равный диаметру вписанной в ячейку окружности (границами ячеек являются осевые линии ребер)

d – толщина ребер

t – толщина пластин, принятая одинаковой для рабочей (зеркальной) и задней пластин.

Допущения, принятые в Алгоритме

В основу расчетных формул определения деформаций зеркала положена модель упругой пластинки, то есть принимается, что толщина зеркала существенно меньше его диаметра.

1. Основное допущение – размер ячеек много меньше диаметра зеркала. Это позволяет раздельно исследовать локальные деформации лицевой пластины в пределах ячейки и общий прогиб облегченного зеркала.

2. В модели пластики облегченного зеркала также предполагается, что эквивалентная цилиндрическая жесткость на изгиб не зависит от направления изгиба и постоянна.

3. Дополнительные допущения, принятые для упрощения расчетных формул: облегченное зеркало плоское; толщины лицевой и задней пластин равны.

Алгоритм расчета параметров облегченного зеркала

В отличие от подхода Barnes'a и ГОИ в работе [4], вводится критерий ψ

$$\psi = \alpha^{4/3}\beta \qquad (1)$$

где

$$\frac{d}{B} = \alpha, \qquad \frac{t}{H} = \beta$$

Критерий *y* характеризует точность изготовления рабочей поверхности.

При заданных величинах давления, толщины стенок и толщины зеркала комплекс *y* обратно

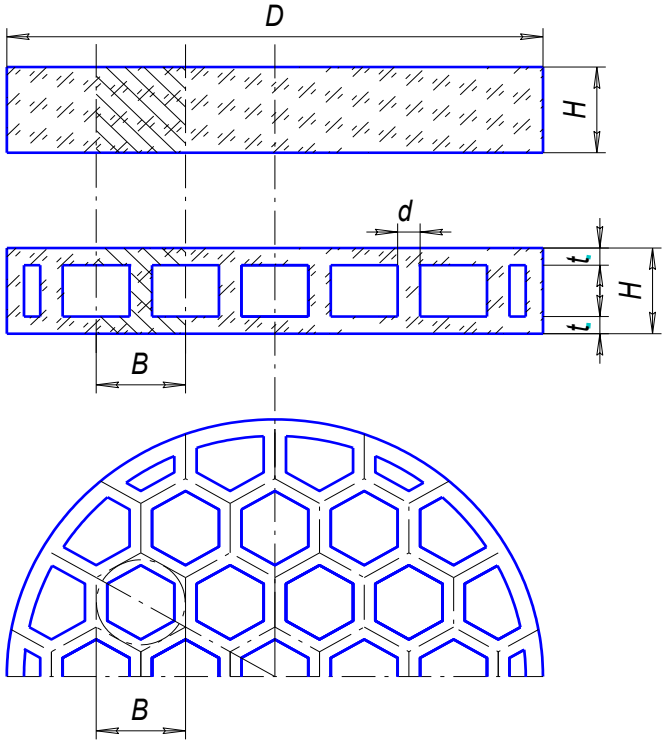


Рисунок 1.
Облегченное зеркало

пропорционален кубическому корню из локального прогиба $W_{лок}$ в ячейке

$$\alpha^4 \beta^3 = \xi \frac{pd^4}{EH^3 W_{лок}} (1-\nu^2) \quad (2)$$

где

$$W_{лок} = \xi \frac{p \cdot B^4}{Et^3} (1-\nu^2)$$

ξ - коэффициент, зависящий от формы ячейки,

E – модуль Юнга,

ν – коэффициент Пуассона,

p – величина полировочного давления.

Предполагается, что материал и технология изготовления облегченного зеркала известны. Известна также величина допустимых местных ошибок $W_{лок.}$

Шаг 1. Расчет параметра ψ

Из конструктивных и технологических соображений выбирается форма ячеек, параметры *d* и *H* и по формуле (1) рассчитывается параметр ψ.

Из (1,2) следует

$$\psi = \frac{1}{H} \cdot \left[\xi \frac{pd^4}{EW_{лок}} (1-\nu^2) \right]^{\frac{1}{3}} \quad (3)$$

Шаг 2. Выбор минимальных значений K_M и K_W

Степень облегчения зеркала принято оценивать отношением масс *M* облегченного и сплошного зеркал

$$K_M = \frac{M_{об}}{M_{сп}} \quad (4)$$

Степень жесткости зеркала принято оценивать отношением прогибов облегченного и сплошного зеркал под действием собственного веса

$$K_W = \frac{W_{об}}{W_{сп}} \quad (5)$$

По умолчанию предполагается *расчетный случай* - зеркало лежит в горизонтальной плоскости и закреплено по краю, а прогиб W – смещение центра зеркала после приложения сил тяжести.

В на рисунках 2, 3 приведены графики, позволяющие для найденного значения ψ выбрать кривые зависимостей K_W и K_M от α. По этим графикам можно определить минимальные значения K_W и K_M и величины переменной α, при которой эти значения достигаются.

Отметим, что значения α, при котором достигается минимум K_W, не совпадают со значением а, при котором достигается минимум K_M. Выбирается то значение α, которое больше удовлетворяет требованиям Конструктора. Например, требуется получить предельно легкое зеркало, тогда выбирается α, при котором достигается минимум K_M

Если предпочтение конструктора по выбору α, при котором достигается минимум K_M оценить в *Z %* , то α выбирается средне взвешенным $\alpha = \alpha_W + (\alpha_M - \alpha_W)$ *Z/100*.

Если предпочтений нет, то из соображений минимизации ошибок, следует выбрать среднее арифметическое значение α.

Шаг 3. Определение B и t

По формулам

$$B = \frac{d}{\alpha} \quad (6)$$

$$t = \frac{\psi H}{\alpha^{4/3}} \quad (7)$$

находим оптимальный диаметр ячейки и оптимальную толщину пластины.

В результате определены все основные геометрические параметры облегченного зеркала.

КОНСТРУКЦИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ УЗЛА СИТАЛЛОВОГО ЗЕРКАЛА

Традиционная технология изготовления облегченных ситалловых зеркал предполагает получение облегченной структуры путем выборки (фрезерования) ячеек со стороны задней, нерабочей поверхности. Для двухстроннего зеркала эта технология не подходила. Специалистами ЛЗОС была предложена оригинальная арочная структура облегчения, сохраняющая сплошными, как лицевую, так и заднюю поверхности зеркала. Облегченная арочная структура внутри плоской заготовки получается высверливанием отверстий по срединной плоскости заготовки, параллельных рабочим поверхностям зеркала.

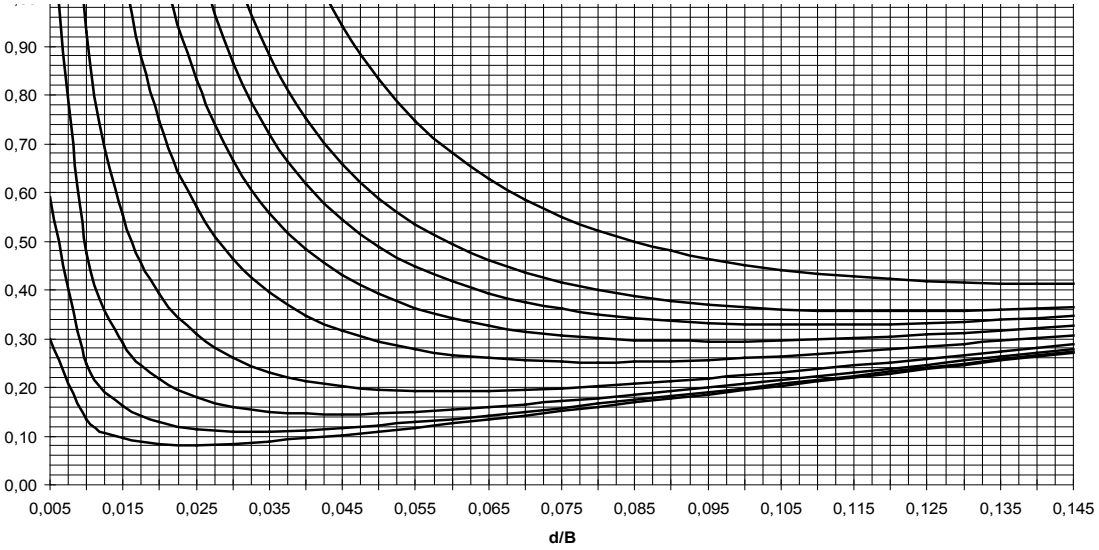


Рисунок 2.
Зависимость K_M от α=d/B

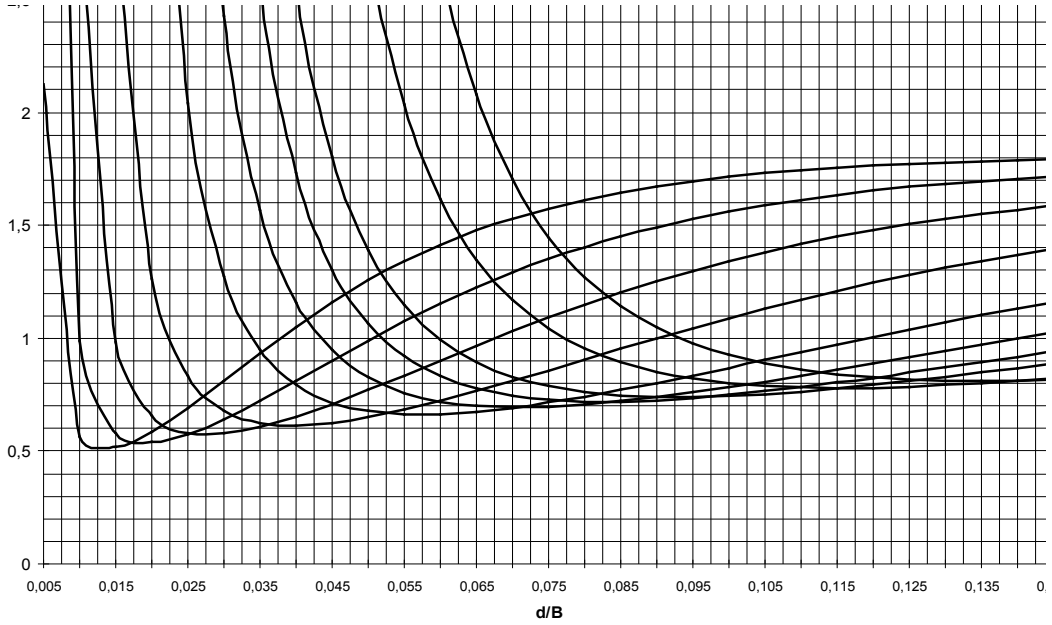


Рисунок 3.
Зависимость K_W от α=d/B

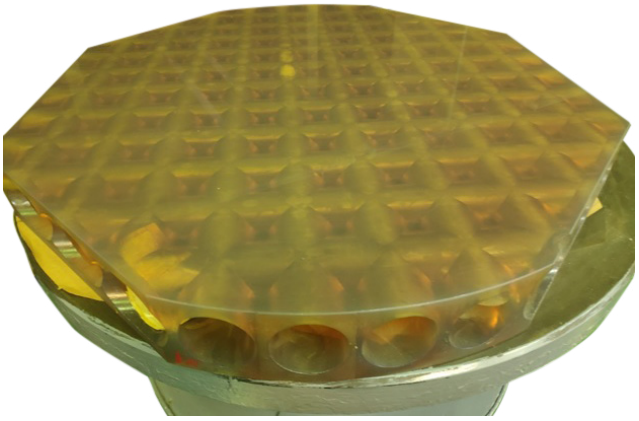


Рисунок 4.
Облегченное ситалловое двухстороннее зеркало

Конструкторская документация на узел ситаллового зеркала была разработана КМЗ и согласована с ЛЗОС. На рисунке 4 приведена фотография ситаллового зеркала для изделия 17В39.

Зеркало имеет шестиугольный контур размерами 790х620. При доводке формы рабочих поверхностей была выявлена повышенная чувствительность формы рабочей поверхности зеркала к разгрузке. Использовалось два вида разгрузки:

– локальные опоры на резиновых пятаках,

– пневматическое разгрузочное устройство, содержащее на продольные цилиндрические камеры, вкладываемые внутрь отверстий облегчения и соединенные между собой, как сообщающиеся сосуды, внутри которых поддерживается избыточное давление.

Сохранности формы поверхности на пневматической разгрузке получить не удалось. После повторной установки зеркала на разгрузочное устройство топограмма поверхности зеркала изменялась не предсказуемо на величины, существенно превышающие допуск на форму поверхности, Было изготовлено шесть ситалловых зеркал уровнем среднеквадратического отклонения (СКО) ~ (1÷3) λ рабочих поверхностей.

Далее была предпринята попытка сборки узла ситаллового зеркала. Для этого зеркало устанавливалось на ребро вертикально, в центральное отверстие заводился вал, который фиксировался относительно зеркала, при этом обеспечивались равномерные зазоры между поверхностью вала и фрагментами внутренних поверхностей арок. Внутри вала имелись заливочные отверстия, через которые в зазоры между поверхностями вала и фрагментами внутренних поверхностей арок заливался герметик. После полимеризации герметика проводился контроль форм поверхностей зеркала в вертикальном положении на валу, который показал, что форма поверхности зеркала исказилась до уровня в десятки λ. На этом работы по конструкции ситаллового зеркала были прекращены.

Сформулированы возможные причины не достижения требуемых характеристик:

– размерная нестабильность ситалла,

– недостаточная жесткость конструкции облегченного зеркала,

– неопределенность и неравномерность распределенной нагрузки на зеркало, создаваемой пневматической разгрузкой,

– недостаточность и локальность площади опирания зеркала на валу,

- необеспеченность разгрузки зеркала во время заливки,

- прямое, локальное влияние герметика на форму рабочей поверхности.

После дополнительного анализа и консультаций с д.т.н. В.С. Доладугиной (ГОИ) первая причина была отвергнута.

КОНСТРУКЦИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ УЗЛА КВАРЦЕВОГО ЗЕРКАЛА

Работы по созданию конструкции кварцевого зеркала выполнялись под руководством начальника сектора Е.К. Кобозева. В комплект документации на кварцевое зеркало вошли сборочный чертеж, технические условия, инструкция по входному контролю, инструкция по контролю волновых фронтов поверхностей, сборочный чертеж на каркас зеркала после спекания, чертежи лицевой и задней пластин, чертеж на внутреннюю пластину и чертеж на облегченную пластину (каркас) после изготовления ячеек. Разработанный КМЗ комплект документации согласовывался с НИИ кварцевого стекла и ЛЗОС.

Рассматривалось две марки кварцевого стекла КУ и КВ. Окончательно выбрано стекло марки КВ, имеющее более однородную, аморфную микроструктуру. Сырье поступало в ЛЗОС из стекольного завода г. Гусь Хрустальный. Из одной плавки стекла ЛЗОС изготавливал пластины; заднюю и лицевую толщиной в 30 мм, диаметром 818 мм и пластину каркаса толщиной в 110 мм, с плоскостностью в 0,1 мм и шероховатостью R_z <0,1 на поверхностях спекания. В пластине каркаса фрезеровались шестиугольные сквозные «соты», всего 151 штука, с толщиной стенок 6 мм, поверхностные пазы в 8 мм, глубиной в 4 мм для выхода воздуха из ячеек через отверстия 10 мм в обечайке зеркала.

Изготовленные пластины поступали в НИИ кварцевого стекла (г. Ленинград). Здесь на специально созданном участке проводилось их травление плавиковой кислотой с целью повышения прочности за счет выборки микротрещиноватого слоя, оставшегося после фрезерования. Далее пластины соединядись в трехслойный каркас и устанавливались на вращающийся стол в специально созданную печь с равномерно расположенными горелками. При температуре ~ 1700°С стекло первой верхней пластины подвергалось моллированию и спекалось с сотовой поверхностью каркаса. Затем заготовка зеркала остывала, переворачивалась и процесс спекания с каркасом повторялся для второй пластины. Спечённый каркас поступал в ЛЗОС, где из него изготавливалось зеркало. Каркас шлифовался в габаритные размеры, полировался. Окончательные габаритные размеры зеркала составили: диаметр 788 мм, толщина 140 мм. Форма рабочих поверхностей доводилась до требований таблицы 2.

Расчеты оптимального расположения разгрузочных опор при доводке зеркала выполнил начальник сектора ЦКБ КМЗ к.т.н. Л.Л. Воскресенский.

Высокопрофессиональную работу по подготовке производства, внедрению новых технологических процессов доводки рабочих поверхностей зеркала, созданию средств интерференционного контроля выполнили специалисты цеха 095 ЛЗОС А.П. Семенов и Ю.А. Шаров под руководством и непосредственном участии начальника цеха М.А. Абдулкадырова.

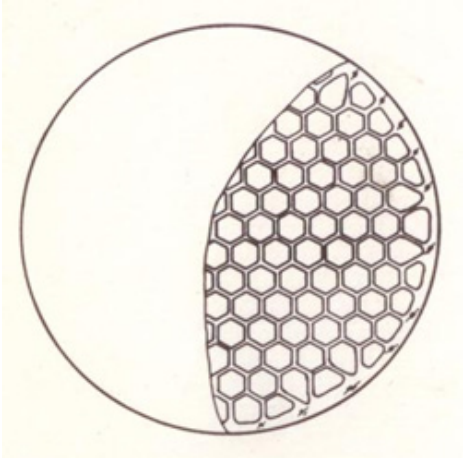


Рисунок 5.
Конструкция каркаса кварцевого зеркала

Конструкция каркаса (облегченной структуры) кварцевого зеркала изображена на рисунке 5.

Ведение кварцевых зеркал в производстве ЛЗОС потребовало выполнения кропотливой работы по анализу и классификации дефектов стекла (свилей, пузырей, камней), уточнения допусков и размеров, нормировки отступлений реальной конструкции (выколок, сколов, локальных трещин), дефектов зеркального покрытия, с которой автор статьи под руководством и при непосредственном участии Е.К. Кобозева успешно справился.

При проектировании узла зеркала рассматривалось две схемы крепления конструкции зеркала на валу, которые указаны в таблице 3.

- конструкция, аналогичная ситалловому зеркалу, в которой зеркало непосредственно соединяется с валом,
- конструкция в форме обода, который охватывает зеркало по обечайке и к которому крепятся отрезки вала

Таблица 3.
Варианты конструкции крепления кварцевого зеркала

№	Варианты конструкции	Достоинства	Недостатки
1	Конструкция, аналогичная ситалловому зеркалу, в которой зеркало непосредственно соединяется с валом	Минимальная масса Ось вала проходит через центр масс зеркала	Локальное закрепление, которое может вызвать локальные прогибы Отсутствие разгрузки зеркала
2	Конструкция в форме обода, который охватывает зеркало по обечайке и к которому крепятся отрезки вала	Распределенное закрепление Разгруженное состояние зеркала Ось вала проходит через центр масс зеркала	Недостаточная жесткость обода, соединяющего отрезки вала, на его диаметральное сжатие.

Оба варианта были признаны не удовлетворительными, имеющими существенные недостатки. За основу был взят вариант 2, в котором предложено усилить жесткость обода за счет ребра жесткости по периметру всего обода, но при этом не увеличивать габаритный диаметр конструкции узла зеркала. Это значит, что ребро жесткости обода должно «внедряться» в само зеркало. Разрешение этого противоречия – введение в конструкцию облегченного зеркала паза, в котором размещается ребро жесткости обода. Предложенная конструкция зеркала объединяет достоинства вариантов 1 и 2 и имеет следующие преимущества:

1. Относительно невысокая масса и минимальные габариты оправы;
2. Повышенная жесткость оправы, соединяющей отрезки вала;
3. Ось вала проходит через центр масс зеркала;
4. Возможность распределенного закрепления зеркала по ободу;
5. Разгруженное состояние зеркала, закрепленного по ободу;
6. Симметрия конструкции узла зеркала;
7. Наличие паза позволяет эффективно закрепить зеркало от перемещений вдоль нормали к рабочей поверхности.

Конструкция крепления зеркала изображена на рисунке 6. В качестве способа крепления зеркала в такой оправе был выбран способ крепления через эластичные прокладки, реализованный с помощью заливки в зазоры между оправой и зеркалом виксинтовых «пятачков». Этот способ дал дополнительные преимущества конструкции узла крепления кварцевого зеркала:

– относительно более равномерная разгрузка зеркала,

– высокие демпфирующие характеристики конструкции, гасящие механические вибрационные воздействия от привода узла зеркала, снижающие собственные изгибные колебания («звон») зеркала.

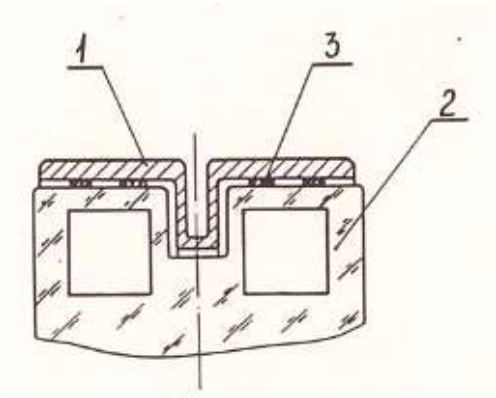


Рисунок 6 .
Конструкция крепления зеркала в оправе.
1 – оправа (обод с ребром жёсткости),
2 – облегченное зеркало,
3 – эластичные «пятачки»

Проблема влияния температурных изменений размеров «пятачков» из-за высокого коэффициента температурного расширения и не сжимаемости виксинта, решена за счет ограничения размеров «пятачков. Рекомендации по выбору размеров и жесткости конструкции оправы оценивала ведущий инженер З.И. Камышан. Рекомендации по выбору размеров «пятачков» разработал автор статьи. Технологии заливки герметиком типа «виксинт» разработали: к.х.н. Е.П. Целикова, З.Т. Полукарова и Г.В. Ленская.

Узел кварцевого зеркала собирал рабочий высочайшей квалификации В.И. Замокин. Обеспечение сборки – зам. начальника цеха И.И. Комендантов.

Оправа из инвара с отрезками вала собиралась отдельно, проходила операции контроля размеров и балансировки. Взаимное положение полуколец оправы и отрезков вала фиксировалось штифтами. После этого оправа разбиралась. Составные части оправы собирались вновь вокруг разгруженного на резиновых пятаках зеркала, находящегося в горизонтальном положении. При сборке оправы с помощью эбонитовых технологических винтов контролировались и выставлялись зазоры между боковой поверхностью зеркала и оправой. Выставленное взаимное положение зеркала и оправы дополнительно фиксировалось технологическими винтами. Производилась заливка виксинтовых «пятачков» в зазор между поверхностью паза зеркала и ребром жесткости обода. Предварительно на поверхность зеркала был нанесен полимер, обеспечивающий отсутствие адгезии поверхности зеркала с виксинтом. Собранный узел зеркала кантовался и устанавливался в раму, при этом выставлялось вертикальное положение вала, и соответственно, зеркала. Далее производилась разгрузка зеркала. Были отработаны два способа разгрузки:

– автономная разгрузка зеркала на ленте из двух тонких стальных полосок, охватывающих по углу в 180° края сплошных пластин зеркала; для этого под зеркало подводилась лента, технологические винты ослаблялись, оправа фиксировалась и разгружалась в раме на верхнем отрезке вала; проводился контроль зазоров между боковой поверхностью зеркала и контроль волнового фронта зеркала;

– разгрузка зеркала в оправе на ленте из двух тонких стальных полосок, охватывающих по роликам, вкрученным по торцу обода, по углу в 180° оправу, на которую зеркало опирается через эбонитовые технологические винты; для этого под ролики подводилась лента, оправа с зеркалом разгружалась, технологические винты в верхней части оправы ослаблялись, проводился контроль зазоров между боковой поверхностью зеркала и контроль волнового фронта зеркала, при необходимости проводилась под регулировка нижних эбонитовых винтов таким образом, чтобы обеспечить отсутствие искажений волнового фронта.

По результатам отработки выбран второй способ разгрузки, как более технологичный. После завершения операции разгрузки производилась заливка эластичных виксинтовых «пятачков» по боковой поверхности зеркала (см. рисунок 6). Вначале попеременно заливались 152 «пятачка» диаметром 20 мм, закрепляющие сплошные пластины зеркала к ободу. Затем 40 зон больших «пятачков» диаметром 40 мм и 8 зон пятачков по 50 мм.

На рисунке 7 приведена фотография фрагмента узла зеркала, на которой видны: паз, технологические отверстия и заполненные виксинтом заливочные отверстия в оправе зеркала.

Перед заливкой и после заливки проводился контроль волнового фронта. Сушка виксинтовых «пятачков» проводилась в течении 3 суток, при этом узел зеркала находился в раме

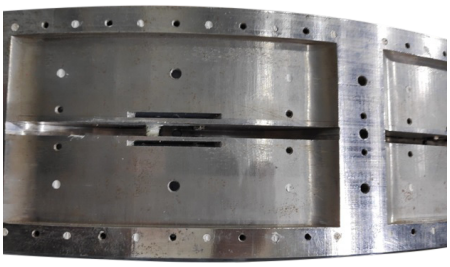


Рисунок 7 .
Фотография фрагмента узла кварцевого зеркала. Вид на оправу

в разгруженном состоянии. Работы проводись в зале № 5 ПИКа, температура воздуха ±20°, скорость изменения температуры воздуха не более 0,3° в сутки.

На конструкцию узла кварцевого зеркала и способ его сборки была оформлена заявка на изобретение «Сканирующее устройство и способ его сборки» 1987 г. В коллектив авторов вошли: Яблоков А.Т., Барсуков Ю.Б., Буянов Л.В., Моисеев В.А., Камышан З.И., Архипов С.А.

Контроль волнового фронта зеркала проводился в схеме Коммона. Инструкцию контроля волнового фронта зеркала разрабатывали и согласовывали с ЛЗОС специалисты КМЗ Малыхин В.А. Аганин А.В. Оптические измерения (работа с теодолитами и интерферометром) выполняла инженер цеха Л.С. Голыбина.

Расчеты напряженно-деформированного состояния зеркала с использованием программных комплексов метода конечных элементов проводил С.А. Архипов.

КОНСТРУКЦИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ БЕРИЛЛИЕВОГО ЗЕРКАЛА

Бериллий в отличие от традиционных материалов (ситалла и кварц) имеет преимущества по относительной жёсткости (см. таблицу 4). За счет высокой теплопроводности температурная деформируемость бериллия в три раза меньше чем у кварцевого стела.

Поэтому конструкции ячеистых зеркал из

Таблица 4.
Сравнение физико-механических свойств материалов зеркал

Относительная характеристика материала	Кварцевое стекло	Ситалл	Бериллий
Отношение модуля Юнга к плотности материала	1	1,15	4,54
Отношение коэффициента температурного расширения к теплопроводности материала	1	0,2	0,32

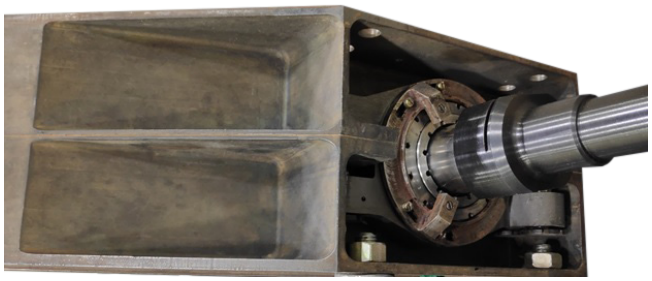


Рисунок 8.
Фотография фрагмента узла бериллиевого зеркала. Вид на зону крепления зеркала на валу

бериллия в разы легче аналогичных зеркал из традиционных материалов. Единственный недостаток бериллия – невозможность получения на нем оптической поверхности – был преодолен ГОИ за счет создания специального стекла, имеющего согласованный с бериллием коэффициент температурного расширения, которое напекалось на ячеистую подложку, и уже на ней доводилась рабочая поверхность. Эти конструкторско-технологические решения работали в облегченных зеркалах размером до 400 мм, которые успешно эксплуатировались в составе изделий «Топаз» для КА «Янтарь-1КФТ».

Созданный технологический задел был применен для разработки сканирующего двухстороннего зеркала по техническому заданию КМЗ. Облегченная ячеистая структура получалась методом изостатического прессования половинок ячеистых зеркал с последующим их спеканием. На рабочие поверхности зеркала напекалось специальное стекло, на котором доводились рабочие поверхности. Для сборки узла сканирующего зеркала вал устанавливался насквозь облегченной структуры. Зеркало закреплялось фланцевыми соединениями по его торцам на валу (см. рисунок 8).

Был изготовлен один образец узла зеркала, который выдержал механические испытания на вибрацию и удар, но не прошел автономные испытания на сохранность формы поверхности после воздействия температур ±40°С. Поверхности зеркала изменялись на величины, сравнимые с технологическим допуском. Работы были остановлены. Дополнительные причины остановки работ – относительно высокая стоимость образцов, токсичность и экологическая опасность бериллиевого производства, проблемы формирования кооперации предприятий по поставкам сырья и обработки бериллия.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения ОКР по созданию изделия 17В39 был проведен комплекс исследовательских работ по разработке и испытаниям альтернативных конструкций (на основе кварцевого стекла, ситалла и бериллия), отработке технологий изготовления зеркал, отработки технологий сборки узлов сканирующего крупногабаритного двухстороннего облегченного зеркала. Разработаны оригинальные методики проектирования крупногабаритных облегченных зеркал, выбора оптимальных радиусов разгрузки при доводке зеркала, расчета конструктивных параметров эластичных элементов крепления («пятачков») зеркал в оправе. Проведены аналитические оценки и конечно-элементные расчеты напряжено-деформированного состояния узла кварцевого зеркала на всех стадиях его жизненного цикла, позволившие выбрать оптимальные конструкторско-технологические решения.

По результатам автономных испытаний в состав изделия 17В39 был принят узел кварцевого зеркала, который в ходе наземных испытаний в составе изделия подтвердил требуемые технические характеристики и обеспечил успешную работу изделия 17В39 в эксплуатации.

Список литературы:

1. *Архипов С.А.* 70 лет Специальному Конструкторскому Бюро - 1 ОАО «Красногорского завода им. С.А. Зверева» // Научно-технический журнал «Контенант», 2014, том 13, №3.

2. *Barnes W.P.* Optimal design of codes mirror structures. //Appl.Opt., 1969, vol.8, № 6, p.1191-1196.

3. Инструкция №24-73 ГОИ по расчету и проектированию облегченных заготовок для крупногабаритных точных зеркал диаметром до 3м. / ГОИ, 1973.

4. *Архипов С.А.* Проектирование крупногабаритных высокоточных облегченных зеркал. Обзор № 5593. – М.: НТЦ «Информатика», 2004.

УДК 004.94:531.383

ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОЛЬЦЕВЫХ РЕЗОНАТОРОВ С НЕПЛОСКИМ КОНТУРОМ ДЛЯ ЛАЗЕРНЫХ ГИРОСКОПОВ

АЗАРОВА В.В., МАКЕЕВ А.П., СУХОВ Е.В.

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

E-mail: azarova_v_v@mail.ru, makstal@mail.ru, tov.suhov81@mail.ru

Аннотация: *Проведено математическое и численное моделирование поляризационных характеристик лазерных кольцевых резонаторов с неплоским контуром. При расчетах учитывались значения фазовой анизотропии зеркал лазерных гироскопов. Результаты моделирования сопоставлены с результатами натурных измерений. Представлены расчеты спектров собственных типов колебаний резонаторов с различными углами излома контуров. Для поперечных мод резонаторов проанализирована зависимость снятия частотного вырождения от величины фазовой анизотропии зеркал. Результаты численных расчетов сопоставлены с экспериментальными результатами. Сформулированы рекомендации для оптимизации подбора зеркал при комплектовании резонаторов.*

Ключевые слова: виртуальная модель, кольцевой резонатор с неплоским контуром, поляризационные характеристики, фазовая анизотропия лазерных зеркал, спектр мод кольцевых резонаторов.

THE POLARIZATION CHARACTERISTICS OF THE RING CAVITYS WITH NON-PLANAR CONTOUR FOR LASER GYROSCOPES

AZAROVA V.V., MAKEEV A.P., SUHOV E.V.

JSC research Institute “Polyus” named M.F.Stelmakh , Moscow, Russia

E-mail: azarova_v_v@mail.ru, makstal@mail.ru, tov.suhov81@mail.ru

Abstract: *Mathematical and numerical simulation of polarization characteristics of laser ring resonators with a non-planar contour is carried out. The phase anisotropy of laser gyroscope mirrors was taken into account in the calculations. The simulation results are compared with experimental measurements. Calculations of the spectra of natural types of resonator oscillations with different angles of contour fracture are presented. For transverse modes resonators the dependence of the mod frequency from the sum of modules of the phase anisotropy of the mirrors was analyzed. The results obtained in this work can be used to optimize the selection of mirrors for the acquisition of resonator.*

Keywords: the virtual model, ring laser cavity with non-planar contour, the polarization characteristics of the phase anisotropy of the laser mirrors, the spectrum of modes of ring cavities, the virtual model.

ВВЕДЕНИЕ

Характеристики лазерных гироскопов во многом определяются характеристиками кольцевых резонаторов, используемых в них, и принципами формирования частотной подставки. Широкое распространение получили гироскопы с магнитооптической частотной подставкой, или так называемые Зеемановские [1]. Зеемановский лазерный гироскоп (ЗЛГ) представляет собой He-Ne лазер с неплоским контуром резонатора, образованного 4-мя диэлектрическими зеркалами. Благодаря резонатору с неплоским контуром в таком лазере возможна генерация двух и четырех мод с циркулярными ортогональными поляризациями. К зеркалам таких резонаторов предъявляются самые высокие требования. Зеркала изготавливаются путем напыления многослойных покрытий в высоком вакууме. В результате неточного напыления толщин слоев на зеркалах косого падения может возникнуть фазовая и амплитудная анизотропии.

В работе проведено математическое моделирование резонаторов с неплоским контуром с учетом фазовой анизотропии зеркал. Проанализирована зависимость спектров собственных мод резонаторов от угла излома контура и фазовой анизотропии зеркал. В результате моделирования показано, что в симметричных резонаторах с неплоским контуром моды TEM_{01} и TEM_{10} вырождены по частоте для соседних аксиальных мод и это вырождение снимается при наличии фазовой анизотропии зеркал. Также в работе исследовано влияние фазовой анизотропии зеркал на изменение эллиптичности поляризации собственных мод и, как следствие, изменение их добротности.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОЛЬЦЕВЫХ ЛАЗЕРНЫХ ГИРОСКОПИЧЕСКИХ РЕЗОНАТОРОВ С УЧЕТОМ ФАЗОВОЙ АНИЗОТРОПИИ ЗЕРКАЛ КОСОГО ПАДЕНИЯ

Используемая в работе математическая модель кольцевого лазерного гироскопического резонатора с неплоским контуром основывается на матричном методе Джонса [2].

$$\mathbf{M}\cdot\begin{pmatrix}\mathbf{E_x}\\ \mathbf{E_y}\end{pmatrix}=\boldsymbol{\lambda}\cdot\begin{pmatrix}\mathbf{E_x}\\ \mathbf{E_y}\end{pmatrix}, \qquad (1)$$

где **M** – матрица, описывающая воздействие всех элементов резонатора на световую волну, $\mathbf{E}=\begin{pmatrix}\mathbf{E_x}\\ \mathbf{E_y}\end{pmatrix}$ – электрический вектор световой волны.

$\boldsymbol{\lambda}$ – собственные значения матрицы **M**.

Матрица обхода резонатора M получается перемножением матриц M_N оптических элементов, из которых он состоит, записанным справа налево в последовательности, в которой свет проходит эти элементы. Рассматриваемый резонатор состоит из четырех зеркал, угол поворота плоскости поляризации при полном обходе резонатора равен $4\boldsymbol{\rho}$

$$\mathbf{M}=\mathbf{S}(\boldsymbol{\rho})\mathbf{M_4}\mathbf{S}(-\boldsymbol{\rho})\mathbf{M_3}\mathbf{S}(\boldsymbol{\rho})\mathbf{M_2}\mathbf{S}(-\boldsymbol{\rho})\mathbf{M_1} \qquad (2)$$

Где $M_1..M_4$ =

$$=\begin{pmatrix}\left|\mathbf{r_{tm_{1..4}}}\right|\mathbf{e}^{\mathbf{i}\frac{\Delta_{1..4}}{2}} & \mathbf{0}\\ \mathbf{0} & -\left|\mathbf{r_{te_{1..4}}}\right|\mathbf{e}^{-\mathbf{i}\frac{\Delta_{1..4}}{2}}\end{pmatrix} -$$

– матрицы зеркал косого падения,

притом, что $\mathbf{r_{tm}}$ и $\mathbf{r_{te}}$ – коэффициенты отражения для мод с TM и TE поляризацией, а Δ - фазовая анизотропия зеркала.

$\boldsymbol{S(\rho)}=\begin{pmatrix}\boldsymbol{\cos\rho} & \boldsymbol{\sin\rho}\\ \boldsymbol{-\sin\rho} & \boldsymbol{\cos\rho}\end{pmatrix}$ **–** матрица поворота.

Выражение для спектра продольных и поперечных мод резонатора получены на основе рассмотрения, проведенного в работе [3]

$$\boldsymbol{\nu_{mnqp}}=\frac{\mathbf{c}}{\mathbf{L}}\left(\mathbf{q}+(\mathbf{m}+\mathbf{n}+\mathbf{2})\frac{\boldsymbol{\alpha}}{\mathbf{4\pi}}+(\boldsymbol{m}-\boldsymbol{n})+\frac{\mathbf{arg}\boldsymbol{\lambda_p}}{\mathbf{2\pi}}\right) \qquad (3)$$

где **m,n,q** – индексы поперечных и продольных мод, индекс поляризации **p**, **arg** $\boldsymbol{\lambda_p}$ – набег фазы при полном обходе резонатора с учетом фазовой анизотропии зеркал, **α** – набег фазы при полном обходе резонатора с учетом его сферичности с эффективным радиусом **R** и **θ** - углом падения излучения на зеркала.

$$\boldsymbol{\alpha}=\mathbf{arccos}\sqrt{\left(\mathbf{1}-\frac{\mathbf{L}}{\mathbf{R}}\mathbf{sec}\,\boldsymbol{\theta}\right)\left(\mathbf{1}-\frac{\mathbf{L}}{\mathbf{R}}\mathbf{cos}\,\boldsymbol{\theta}\right)} \qquad (4)$$

В качестве примера, изменение спектра собственных частот кольцевого резонатора, рассчитанное на основе уравнения (3), показано на рис. 1.

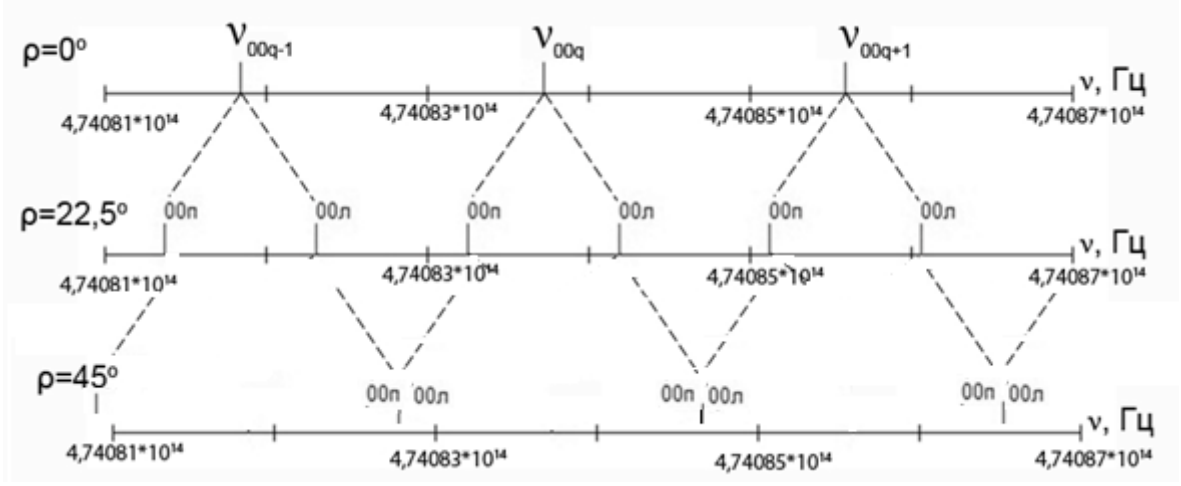


Рисунок 1.
Спектры собственных частот симметричного кольцевого резонатора в зависимости от угла поворота изображения световой волны ρ при отражении от зеркал

Расчеты спектров мод, представленных на рисунке 1, проведены для резонаторов с периметром L=16 см в зависимости от угла поворота изображения световой волны. В случае плоского (ρ=0) и неплоского контура с различными углами излома при углах поворота плоскости поляризации при отражении от каждого зеркала ρ=22.5 и 45 градусов. Соответственно при полном обходе резонатора плоскость поляризации поворачивается на суммарный угол.

СПЕКТР ПРОДОЛЬНЫХ МОД КОЛЬЦЕВОГО РЕЗОНАТОРА С НЕПЛОСКИМ КОНТУРОМ

Численный расчет частот спектра мод с использованием формулы (3) проведен для 3х соседних продольных мод кольцевого лазера ($\nu_{00(q-1)}, \nu_{00q}, \nu_{00(q+1)}$) для разных значений угла поворота изображения световой волны (ρ). В случае плоского резонатора ($\rho = 0$) моды имеют линейную поляризацию. Соседние продольные моды отстоят по частоте на $\nu = \frac{c}{L}$ (c – скорость света, L = 0.16 м – периметр резонатора). Использование резонатора с неплоским контуром приводит к появлению мод круговой поляризации и снятию вырождения по частоте.

В настоящей работе численное и экспериментальное моделирование проведено на симметричных резонаторах с неплоским контуром. Угол поворота изображения световой волны при отражении от зеркал равен ρ= 22,5°, соседние моды правой и левой круговой поляризации (TE и TM) отстоят на $\nu_{00q_л} - \nu_{00q_п} = \frac{c}{2L}$ по частоте.

При наличии фазовой анизотропии в многослойных интерференционных покрытиях зеркал в резонаторе будет происходить так же изменение спектра собственных резонансных типов колебаний, как и при изменении угла излома контура.

СНЯТИЕ ВЫРОЖДЕНИЯ ПО ЧАСТОТЕ ПОПЕРЕЧНЫХ МОД

В симметричных резонаторах с неплоским контуром поперечные моды TEM_{01} и TEM_{10} вырождены по частоте и оценка их добротности используется при юстировке и сборке резонаторов для оценки уровня селективности резонатора. При наличии фазовой анизотропии на зеркалах это вырождение снимается, что может привести к ошибкам при измерении добротностей этих мод.

На рисунке 2. приведено экспериментальное изображение спектра двух соседних продольных мод с правой и левой круговой поляризациями, расположенных по краям экрана осциллографа в установке юстировки резонаторов [4].

Частотное расстояние между модами – $\nu_{00q_л} - \nu_{00q_п} = \frac{c}{2L} \cong 0{,}94\ ГГц$. Между ними расположены вырожденные по частоте для данной конфигурации резонатора моды $TEM_{01q_л}$ и $TEM_{10(q+1)_п}$, отстоящей приблизительно на 0,41 ГГц от правой на экране продольной

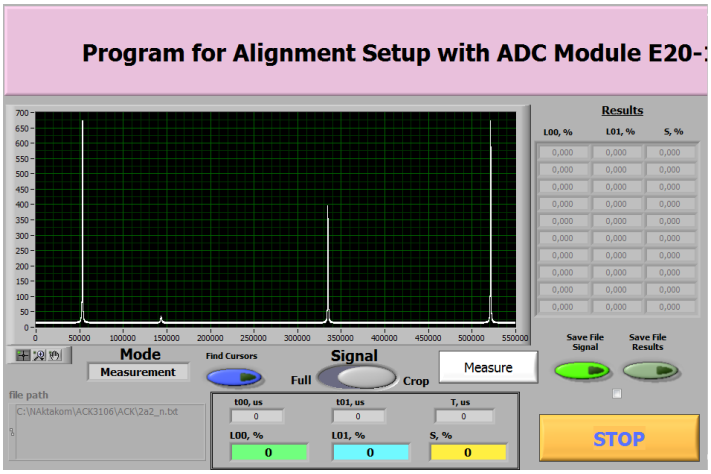


Рисунок 2.

Экспериментальное изображение спектра двух соседних продольных мод с правой и левой круговой поляризациями, расположенных по краям экрана осциллографа в установке юстировки резонаторов [4]

моды TEM_{00q}. Еще один пичок малой амплитуды, наблюдаемый на экране

– это мода $\boldsymbol{TEM_{20(q+1)n}}$, согласно расчетам спектра мод резонатора данной конфигурации с радиусом кривизны сферического зеркала R ≅ 3,6 *м*.

С помощью описанной математической модели можно исследовать влияние фазовой анизотропии зеркал резонатора на разность частот мод TEM_{01} и TEM_{10}. Случайным образом, меняя анизотропию зеркал, построим график зависимости разности частот мод TEM_{01} и TEM_{10} от суммы модулей фазовых анизотропий на зеркалах ($|\Delta_1| + |\Delta_2| + |\Delta_3| + |\Delta_4|$).

Из графика видно, что при сумме модулей фазовых анизотропий зеркал 0,16 рад, разность частот мод TEM_{01} и TEM_{10} может достигать 1 МГц. При средней ширине резонансного пика мод TEM_{01} и TEM_{10} 1 МГц такое снятие вырождения может привести к ошибке при оценке селективности резонатора.

РАЗНОСТЬ ПОТЕРЬ МОД ОРТОГОНАЛЬНОЙ КРУГОВОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ

Для проверки полученной модели резонатора были проведены сравнения расчетных значений с экспериментально полученными. Сравнения были проведены на 3-х резонаторах с неплоским контуром. Для каждого были измерены потери для продольных мод правой и левой круговой поляризации с высокой точностью. Для этого была использована установ-

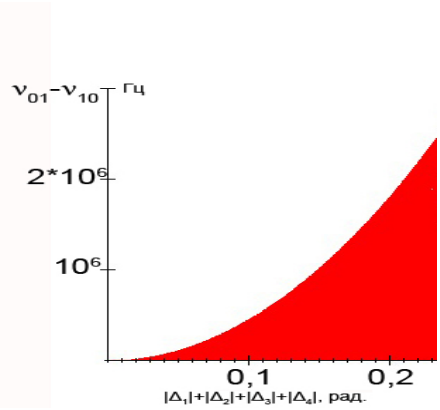


Рисунок 3.

Зависимость разности частот мод TEM_{01} и TEM_{10} от суммы модулей фазовых анизотропий на зеркалах ($|\Delta_1| + |\Delta_2| + |\Delta_3| + |\Delta_4|$)

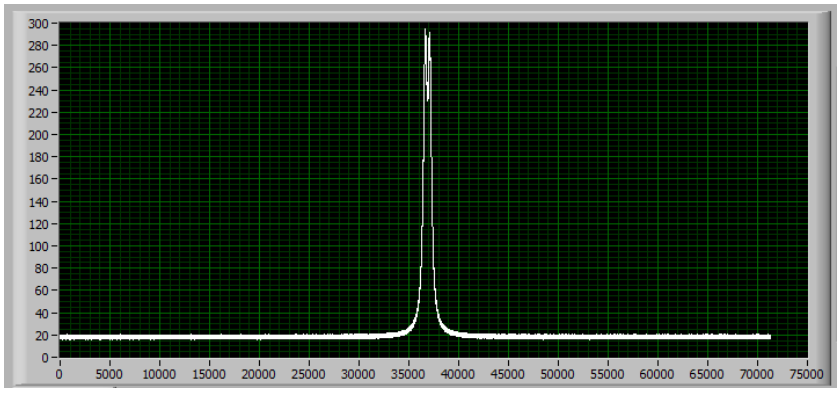


Рисунок 4.

Экспериментальное изображение эффекта снятия вырождения по частоте моды $TEM_{01q,л}$ и $TEM_{10(q+1)п}$, при наличии фазовой анизотропии зеркал. Это изображение промежуточного пика, показанного на рис. 2, полученное при большем времени развертки

ка измерения потерь, основанная на сравнении ширин резонансных кривых исследуемого и образцового резонатора (см. [4]). При построении модели были использованы измеренные для каждого зеркала значения потерь для TE и TM поляризаций и фазовой анизотропии. Результаты представлены на рисунках 5,6,7.

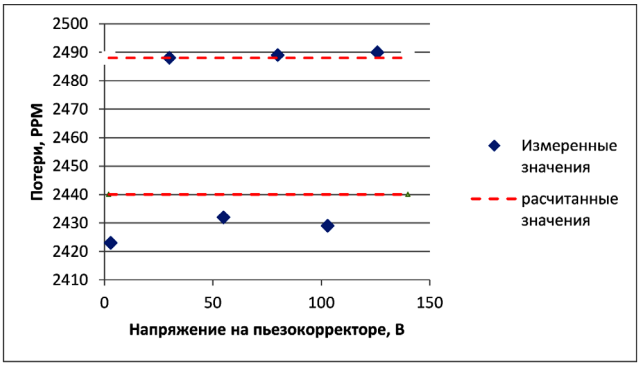


Рисунок 5.
Зависимость потерь от направления вращения эллипса поляризации для мод $\mathbf{TEM_{00}}$
резонатора 4.12.06

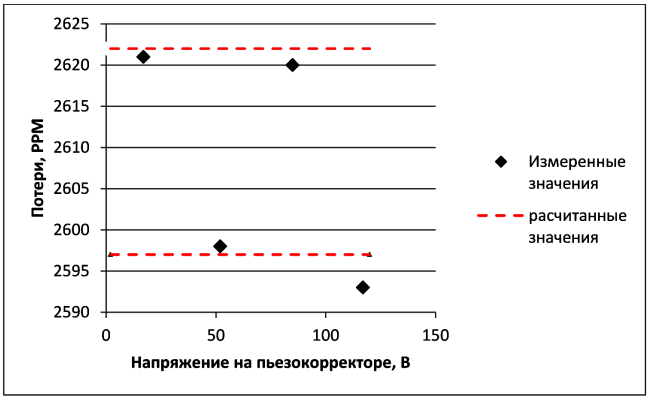


Рисунок 6.
Зависимость потерь от направления вращения эллипса поляризации для мод $\mathbf{TEM_{00}}$
резонатора 40.10.12

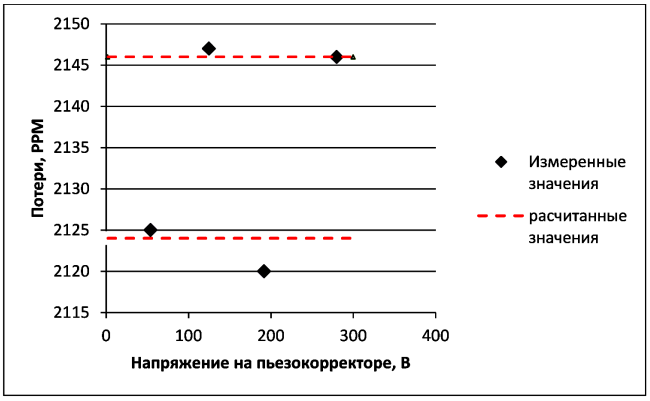


Рисунок 7.
Зависимость потерь от направления вращения эллипса поляризации для мод $\mathbf{TEM_{00}}$
резонатора 03.01.10

Как видно из рисунков, расчетные значения хорошо согласуются с экспериментальными данными. Это дает нам уверенность, что наша математическая модель на основе матриц Джонса достаточно точно описывает кольцевой резонатор с неплоским контуром и на основе этой модели можно делать прогнозы относительно влияния отдельных зеркал на характеристики проходящего через резонатор излучения.

Положим, что все зеркала идеальные и не имеют фазовой анизотропии. Начнем изменять фазовую анизотропию в пределах от -0.1 до 0.1 рад. только на одном из зеркал. В результате можно проследить, как меняются характеристики оптического резонатора и его собственных мод.

Построим графики изменения разницы потерь для мод левой и правой круговой поляризации при изменении фазовой анизотропии одного зеркала.

Из представленных рисунков видно, что при изменении фазовой анизотропии на зеркалах, установленных на пьезокорректоры (зеркала 2 и 4), на которых происходит поворот изображения световой волны, разность потерь для мод левой и правой круговой поляризации ведет себя одинаково.

На сигнальном зеркале (зеркало №1) влияние фазовой анизотропии наименьшее, что связано с большим пропусканием на этом зеркале из-за чего при формировании собственных мод резонатора его влияние наименьшее из четырех зеркал. Зеркало номер 3 является сферическим и глухим, наличие на нем небольшой фазовой анизотропии может компенсировать значительно большее значение фазовой анизотропии сигнального зеркала противоположного знака.

Выводы. Результаты, полученные при помощи математического и численного моделирования симметричного резонатора с неплоским контуром с учетом фазовой анизотропии зеркал, подтверждены результатами измерений. Представлены расчеты спектров продольных

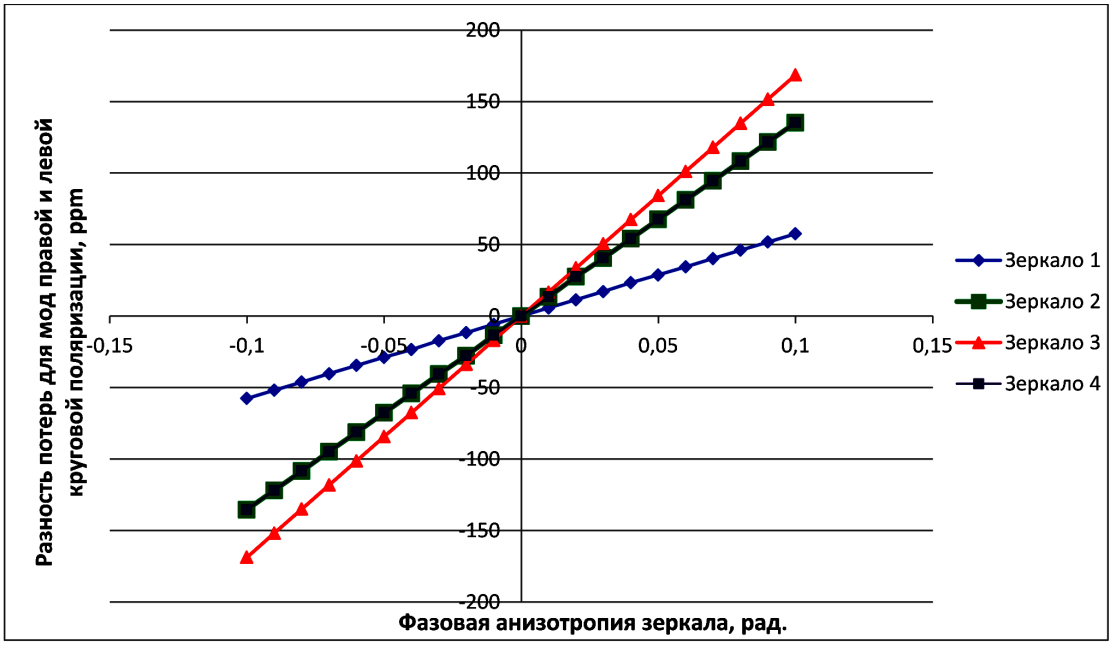


Рисунок 8.
Влияние анизотропии отдельных зеркал на разность потерь мод с правой и левой круговой поляризацией

мод резонаторов с различными углами излома контура. Для поперечных мод резонатора проанализирована зависимость снятия вырождения по частоте от суммы модулей фазовой анизотропии зеркал. Полученные в работе результаты могут быть использованы для оптимизации подбора зеркал при сборке резонаторов.

Заключение. Авторы выражают благодарность Бессонову А.С. за помощь в написании программы контроля спектров в установке юстировки резонаторов, Полищуку В.С. за предоставление результатов измерения спектров и Чертовичу И.В. за помощь в измерении фазовой анизотропии зеркал.

Список литературы:

1. *Азарова В.В., Голяев Ю.Д., Дмитриев В.Г.* Кольцевые газовые лазеры с магнитооптическим управлением в лазерной гироскопии. // Квантовая электроника, 30, №2, 2000.

2. *R.C.Jones*. New calcules for the treatment of optical systems. // «J. Opt. Soc. Amer.” -1941- v. 31, p. 488

3. *Савельев И.И., Хромых А.М.* Продольные моды объемного кольцевого резонатора. // Квантовая электроника, 3,№7, 1976.

4. *Азарова В.В.,Бессонов А.С., Бондарев А.Л., Макеев А.П., Петрухин Е.А.* Двухканальный способ измерения потерь в кольцевом резонаторе на длине волны 632,2 нм. // Квантовая электроника, 46, № (2016).

УДК 551.508.762

РОЛЬ ИЗМЕРИТЕЛЕЙ ВЫСОТЫ ОБЛАКОВ В СТАНОВЛЕНИИ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ АВИАЦИИ

ФОРМОЗОВ А.Е., КУЗНЕЦОВ А.Н.

АО "Лыткаринский завод оптического стекла", г. Лыткарино, Московская обл.

E-mail: formozov@lzos.ru

Аннотация: *Представлена история разработки и производства измерителей высоты облаков на предприятии. Приведены основные технические характеристики изделий и архитектура. Проведен обзор текущего состояния работ по внедрению в производство современных образцов облакомеров.*

Ключевые слова: измеритель высоты облаков, облакомер, светолокация, лидар.

THE ROLE OF CEILOMETERS IN THE DEVELOPMENT OF METEOROLOGICAL SUPPORT FOR AVIATION

FORMOZOV A.E., KUZNETSOV A.N.

JSC "Lytkarino Optical Glass Factory" (LZOS), Lytkarino, Moscow region, Russian Federation

E-mail: formozov@lzos.ru

Abstract: *The history of the development and production of ceilometers in an enterprise is presented. The main technical characteristics of products and architecture are given. A review of the current state of work on the introduction of modern cloud gauge samples in production.*

Keywords: ceilometer, light location, lidar.

ВВЕДЕНИЕ

В 2015 г. метеорологи отмечали 290-летие организации инструментальных метеорологических измерений в России. 1 декабря 1725 г. Ф.Х. Майер, академик «Академии наук и всяческих искусств», созданной по указу Петра I, начал производство регулярных метеорологических измерений.

М. В. Ломоносов дал мощный толчок развитию приборной базы метеорологических измерений. Он лично изготовил несколько оригинальных приборов.

Дальнейшее развитие метеорологических измерений в России связано с именем академика А. Я. Купфера, основателя и первого заведующего Нормальной обсерватории в Петербурге (ныне – Главная Геофизическая Обсерватория им. А.И. Воейкова). Обсерватория была создана в 1834 г.

В Советском Союзе метеорологическим наблюдениям придавалось серьезное значение. В 1921 г. подписан декрет об организации Метеорологической службы Российской Федерации. В 1927 г. в Ленинграде введён в эксплуатацию завод «Метприбор», выпускавший более 80 наименований приборов для метеорологических измерений.

Авиация подвержена влияниям погоды более чем любой другой вид транспорта. Облака, туман и интенсивность выпадения осадков могут создавать потенциально опасные ситуации при взлете и посадке самолетов, что требует внесения существенных изменений в расписание их полетов. Развитие авиации поставило новые задачи перед метеорологами. Появляются приборы для измерения высоты нижней границы облаков (ВНГО) – оптико-электронные приборы, которые устанавливаются на аэродромах вблизи взлетно-посадочной полосы. Их конструкция постоянно совершенствуется в техническом отношении с целью улучшения выходных параметров [1].

В 1959 г. создается регистратор нижней границы облачности А-26, а в начале 60-х гг. совместно с заводом «Волна» (г. Москва) и «Всесоюзным электротехническим институтом им. В.И. Ленина» впервые в стране освоили выпуск светолокационных измерителей высоты нижней границы облаков ИВО-1 с диапазоном измерения от 50 до 2000 м. Внешний вид прибора приведён на рис. 1.

Рисунок 1.
Внешний вид ИВО-1

Прибор состоит из передатчика и приемника световых импульсов, пульта управления и комплекта соединительных кабелей. В приборе реализуется «теневой» метод измерения облачности. Это способ сокращения динамического диапазона регистрируемых сигналов, позволяющий увеличить дальность и информативность зондирования за счет сокращения геометрических факторов. При таком методе передатчик и приемник облакомера находятся на определенном расстоянии друг от друга от 8 до 10 м. Рассмотрим блок-схему ИВО-1 на рис. 2.

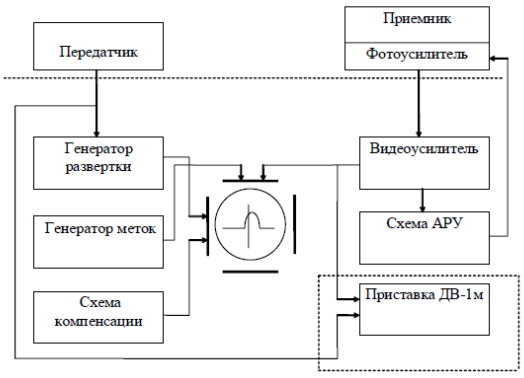


Рисунок 2.
Блок-схема ИВО-1

Передатчик и приемник аналогичны по конструкции и содержат несущий корпус, параболическое зеркало, подвешенное на карданов подвесе, и крышку с защитным стеклом, поднимающуюся при помощи электродвигателя. В передатчике в фокусе зеркала находится импульсная газоразрядная лампа. Лампа

поджигается по сигналам с пульта управления. Частота вспышек импульсной лампы - 20 Гц. Большая частота ведёт к преждевременному износу лампы, а меньшая создает неприятный для глаз эффект мерцаний на экране ЭЛТ. В момент вспышки лампы в передатчике формируется короткий импульс напряжения запуска длительностью 0,5 мкс, который передается по кабелю в пульт управления и запускает генератор развертки, который в свою очередь генерирует пилообразный импульс развертки. Импульс развертки подается на горизонтально отклоняющие пластины ЭЛТ, которые для наглядности показаны рядом с экраном. Длительность импульса развертки 13,3 мкс и за время его прохождения должен прийти отраженный световой сигнал от облаков высотой до 2 км. В приёмнике в фокусе зеркала находится фотоумножитель, преобразующий отраженный от облака световой сигнал в электрический импульс. После усиления импульс подаётся в пульт управления. После вторичного усиления видеоусилителем, находящимся в пульте управления, импульс поступает на вертикально отклоняющие пластины ЭЛТ. На экране возникает всплеск - облачный импульс. Затем оператор вращает ручку схемы компенсации - потенциометра. Эта схема подаёт на горизонтально отклоняющие пластины постоянное напряжение. Вся картина на экране сдвигается влево. Вращением ручки можно менять напряжение, перемещая картину на экране влево или вправо. Задача оператора - подобрать такое положение ручки, чтобы середина переднего фронта облачного импульса находилась в центре экрана, отмеченным вертикальной чертой. Шкала высот находится рядом с ручкой. Амплитуда облачного импульса зависит от высоты и плотности облаков. Удобнее, однако, работать с импульсами одинаковой амплитуды. Это обеспечивается схемой АРУ - автоматическим регулятором усиления. В зависимости от амплитуды импульсов схема регулирует коэффициент усиления фотоусилителя, обеспечивая одинаковую амплитуду импульсов. Если зондирование ведётся во время дождя, то наблюдается сильный ложный импульс за счет отражения света от капель дождя. Он располагается впереди облачного импульса. Схема АРУ срабатывает на ложный импульс, поэтому во время дождя АРУ выключается, и оператор вручную подбирает режим усиления.

Дальнейшие модификации ИВО-1 стали приборы РВО-2 и РВО-2М. В приборе РВО-2 была улучшена шкала высот. Она разбита на десятки метров, что позволяет произвести считывание показаний ВНГО с погрешностью не более 5 м. За счет уменьшения длительности светового импульса, увеличения напряжения на конденсаторе основного разряда импульсной лампы и увеличения крутизны фронта светового импульса, передний фронт сигнала на ЭЛТ пульта управления стал круче, что обеспечило более точное измерение ВНГО. Приборы серийно изготавливались до середины 90-х годов.

Всего за период производства ИВО-1 и его модификаций было выпущено порядка 15 000 изделий. Практически все гражданские и военные аэродромы и метеоплощадки СССР и стран Варшавского договора были оснащены именно этими приборами.

Модернизация измерителей облачности шла по пути автоматизации процесса измерений. В 90-е годы создается Межгосударственный авиационный комитет и утверждаются новые авиационные правила, определяющие требования к метеорологическому оборудованию. Учитывая эти требования, предприятие с 1999 г. начинает выпускать датчик высоты облаков ДВО-2. Внешний вид прибора приведён на рис. 3.

Рисунок 3.
Внешний вид ДВО-2

В разработке ДВО-2 и освоении производства приняли участие научные сотрудники и специалисты «Всероссийского электротехнического института»: О.И. Абрамов, Г.А. Щербакова, Г.Г. Карлсен, Ю.Н. Настич, «Главной геодезической обсерватории»: В.Ю. Окоренков, Т.И. Боковая, В.П. Гордюк, А.В. Кузьминов, директор научно-производственной фирмы «Автоматические метеорологические системы» Г.Ф. Исаев.

Основное отличие ДВО-2 от предшественников - появление в составе блока измерительного и пульта дистанционного с функцией автоматизированной работы и автоматической обработки сигнала с выдачей результатов измерений на цифровой индикатор.

В 2001 г. прибор успешно прошёл сертификационные испытания в Межгосударственном авиационном комитете. Испытания проводили с участием военных метеорологов: Э.Ф. Стёпина, А.Н. Мельникова, А.И. Романенко.

В развитие этого направления в 2007 г. был освоен в серийном производстве светолокационный измеритель высоты облаков РВО-3 с системой управления на базе персонального компьютера. Прибор был разработан в конце 90-х годов совместно с ВЭИ им. Ленина. Диапазон измерения ВНГО от 30 до 1500 м. Управляющая программа работала в сертифицированной МО РФ операционной системе ДОС Багет, основанной на PTS-DOS 2000 (российский клон MS-DOS). Работы по организации производства первой промышленной серии были выполнены группой сотрудников отдела главного конструктора АО ЛЗОС: А.Н. Кузнецовым, А.Е. Формозовым, Т.И. Воробьевой совместно с ЗАО ЦНИИ «Волна» - разработчиком электронных блоков. Внешний вид и состав изделия приведён на рис. 4.

Рисунок 4.
Внешний вид РВО-3

Его отличием от предыдущих моделей стало то, что информация представлялась не только в числовом, но и в графическом виде благодаря использованию в составе изделия персонального компьютера и наличию специализированного программного обеспечения. Прибор обеспечивал автоматический и ручной режимы измерений, регистрацию одно- и двухслойной облачности, отображение профиля сигнала обратного рассеяния, вывод результатов измерений на принтер и подключение до пяти комплектов датчиков. На рис. 5 показано окно программы РВО-3.

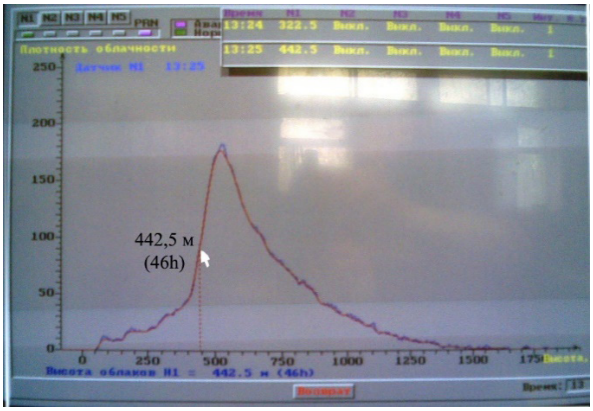


Рисунок 5.
Окно программы РВО-3

Дальнейшее развитие этой разработки стало создание регистратора высоты облаков РВО-5 в 2012 г. Аппаратная часть была реализована на микропроцессорах и ПЛИС, а управляющая программ работала в операционной системе Ubuntu, основанной на ядре Linux. Программный модуль получил более совершенный алгоритм обработки сигнала обратного рассеяния и функцию определения вертикальной видимости. Внешний вид изделия приведён на рис. 6.

Рисунок 6.
Внешний вид РВО-5

Увеличение верхнего предела измерения ВНГО до 3000 м было достигнуто за счет следующих методов:

- увеличение чувствительности и соотношения сигнал/шум в дальней зоне (2000-3000) м методом накопления нескольких измерений;
- снижение чувствительности в ближней зоне (до 1000 м) относительно дальней зоны (2000-3000) м;
- введение порога для предотвращения отправки на анализ в компьютер сигналов с малым соотношением сигнал/шум.

Работы была выполнена группой сотрудников отдела главного конструктора: А.Н. Кузнецовым, А.Е. Формозовым совместно с ЗАО ЦНИИ «Волна» - разработчиком электронных блоков и программного обеспечения.

Необходимо отметить, что за рубежом на аэродромах уже давно эксплуатируются лазерные измерители ВНГО - лидары.

Принцип действия лидаров основан на измерении характеристик обратно рассеянного зондирующего импульса в атмосфере при прохождении им исследуемого участка трассы и математической (цифровой) обработки огибающей эхо-сигнала с целью получения информации о профиле оптической плотности атмосферы в вертикальном направлении.

Следуя тенденции, предприятие в начале 2010 г. инициирует две работы по созданию лазерных измерителей высоты облаков нового поколения: датчик высоты облаков ДВО-3Л, который должен прийти на смену ДВО-2 и РВО-5, и измеритель высоты облаков ЛДВО-01 - малогабаритный прибор форм-фактора моноблок. В настоящее время работы находятся в завершающей стадиях.

В конструкции передатчика ДВО-3Л в качестве излучателя используется лазерный светодиод, что позволит отказаться от высоковольтных цепей, снизить энергопотребление и вместе с тем увеличить ресурс и повысить надежность. Внешний вид изделия приведён на рис. 7.

ЛДВО-01 состоит из блока оптического, блока питания и связи, модема и панели индикации. Геометрическая схема блока оптического выполнена с биаксиальной конфигурацией оп-

Рисунок 7.
Внешний вид ДВО-3Л

тических осей. Лазерный пучок в такой схеме входит в поле зрения приемника только на некотором, заранее определенном расстоянии. Такая схема расположения оптических осей источника излучения и приемника позволяет избежать насыщения фотодетектора приемника, вызванного обратным рассеянием излучения (на атмосферном аэрозоле) в ближней зоне лидара. Источником зондирующих импульсов является диодный лазер, а приемником служит лавинный фотодиод.

Принцип работы основан на зондировании среды лидаром, работающим в статистическом режиме счета фотонов, когда вероятность регистрации сигнала в каждом лазерном импульсе существенно меньше единицы. При этом информацию о среде, при ее зондировании импульсами с предельно малым уровнем излучения получают за счет увеличения числа импульсов зондирования в одном акте измерения до десятков тысяч.

Это позволяет использовать в качестве передатчика маломощные источники излучения с малой массой и большой частотой повторения импульсов при низковольтном питании, с одной стороны. С другой стороны, позволяет реализовать принцип счета фотонов и только цифровую обработку сигнала без его предварительного усиления. В целом, все это повышает надежность и помехоустойчивость прибора, максимально снижает все пиковые нагрузки на энергопотребление и обработку информации. Внешний вид изделия приведён на рис. 8.

Рисунок 8.
Внешний вид ЛДВО-01

Прибор обладает следующими преимуществами:

- небольшая мощность используемого лазера обеспечивается источника питания с небольшой пиковой и средней мощностью, что определяет низкие массогабаритные характеристики всего устройства, а также возможность работы с автономным источником питания небольшой емкости;

- цифровые цепи управления, регистрации и обработки сигнала без применения предусилителей и усилителей, низковольтное питание – повышают надежность работы и помехоустойчивость;

- статистический режим набора отсчетов и представление сигнала в цифровом виде без аналогово-цифровых преобразователей;

- компактность и малая масса обеспечивают возможность быстрого развертывания в полевых условиях и установку на мобильных метеостанциях;

- малое время восстановления готовности приемника после перегрузки, отсутствие «мертвой» зоны;

- селекция сигнала по времени прихода фотонов – возможность регистрации событий за плотной рассеивающей завесой (дымовая завеса, плотный туман, дымка, редколесье и др.).

Программное обеспечение приборов нового поколения позволяет осуществлять округление измеренных значений; получать мгновенные и статистические значения измеренных величин; скользящую выборку данных за период 60 с. В случае отсутствия облачности приборы переходят в ждущий режим с увеличенным интервалом измерений. В случае образования инея и наличия осадков включается обогрев защитного стекла. В приборах предусмотрена функция самодиагностики, а в качестве отображающего устройства используется графическая сенсорная панель.

Следует отметить, что все существующие и разрабатываемые облакомеры предназначены как для автономного использования, так и для работы в составе автоматизированных метеорологических измерительных систем.

Заключение

Современные облакомеры представляют собой компактные и достаточно лёгкие приборы, которые достаточно просто транспортировать и при необходимости можно перевезти на любое расстояние. Все они используются для определения уровня высоты нижней границы облаков и дополнительно - вертикальной видимости. Благодаря уникальным особенностям конструкции они могут распознавать одновременно от 1 до 9 слоёв облаков. Такие приборы просто незаменимы в метеорологии и авиации, ведь именно в этих сферах так важно получить точные данные по уровню облачности и ее сплоченности.

Список литературы:

1. *Григоров Н.О., Саенко А.Г., Восканян К.Л.* Методы и средства гидрометеорологических измерений. Метеорологические приборы. - Санкт-Петербург: изд. РГГМУ, 2012. - 306 с.

УДК 608.4

РАБОТЫ ПО ОБЕСПЕЧЕНИЮ РАДИАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ КОСМИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ В СКБ-1

ЗУБКО А.В.

ПАО «Красногорский завод им. С.А. Зверева», г. Красногорск

E-mail: a.zubko@zenit-kmz.ru

Аннотация: *Данная статья написана в связи с 75-летним юбилеем СКБ-1. В статье дается краткий обзор результатов работ в СКБ-1 по обеспечению радиационной стойкости космической аппаратуры дистанционного зондирования Земли.*

Ключевые слова: оптико-электронная аппаратура, дистанционное зондирование Земли, ионизирующие излучения космического пространства (ИИКП), локальная доза ИИКП, радиационное окрашивание стекла, математическая модель, численное интегрирование.

THE WORK ON ENSURING OF RADIATION RESISTANCE OF SPACE INSTRUMENTS FOR REMOTE SENSING OF THE EARTH IN THE SDB-1

ZUBKO A.V.

PJSC «Krasnogorsky plant him S.A. Zvereva», Krasnogorsk

E-mail: a.zubko@zenit-kmz.ru

Abstract: *This article was written in connection with the 75th anniversary of SDB-1. The article gives a brief overview of the results of work in SDB-1 to ensure the radiation resistance of space equipment for remote sensing of the Earth.*

Keywords: optoelectronic equipment, remote sensing of the Earth, ionizing radiation of outer space (IROS), local dose of IROS, radiation coloring of glass, mathematical model, numerical integration.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из важнейших составных частей работ по обеспечению работоспособности оптико–электронной космической аппаратуры дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) в течение срока ее активного существования, является выполнение требований по стойкости аппаратуры к воздействию ионизирующих излучений космического пространства (ИИКП) – космической радиации. Соответствующие мероприятия проводятся в отношении как электронной, так и оптической частей аппаратуры на этапе ее разработки, в соответствии с их конструкцией и спецификой влияния ИИКП на их работоспособность.

ИСТОРИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Работы по радиационной стойкости разрабатываемой НТЦ аппаратуры имеют более чем полувековую историю. Исходно, расчеты радиационной стойкости и проведение соответствующих испытаний всей аппаратуры опытного производства ЦКБ выполнялись сектором радиационной стойкости в составе отдела испытаний ЦКБ. Начальником данного сектора, а с 1980 г. начальником отдела испытаний был Анатолий Васильевич Лалакин. В 1984 г. в сектор радиационной стойкости был принят молодой специалист Алексей Викторович Зубко.

В результате структурно-организационных преобразований в НТЦ, в 2000 году А.В. Лалакин перешел на работу ведущим инженером в СКБ-1 и выполнял весь перечень работ по радиационной стойкости разрабатываемой СКБ-1 космической аппаратуры ДЗЗ.

К моменту прихода в СКБ-1, А.В. Лалакин являлся крупным специалистом в области радиационной стойкости оптических систем, кандидатом технических наук. В 1987 году им была защищена диссертация по методу расчета радиационной стойкости оптических сред и оптических систем. Результаты диссертации, в части методики расчета, были включены в состав ряда отраслевых нормативных технических документов. Предметом диссертации являлось изучение влияния воздействия различных ионизирующих излучений на оптические характеристики стекол, в особенности при длительном воздействии ионизирующих излучений низкой интенсивности, характерной для типичных условий эксплуатации оптических систем космической аппаратуры.

Расчет изменения коэффициента пропускания оптических систем космической аппаратуры при длительном воздействии ионизирующих излучений является чрезвычайно сложной задачей как в части математического аппарата, описывающего радиационную кинетику оптических стекол, так и в части получения необходимых характеристик радиационных свойств стекол из имеющихся экспериментальных данных.

Благодаря глубокому пониманию радиационных свойств оптических стекол, достигнутому при выполнении соответствующих экспериментальных работ и их теоретическом анализе, в диссертации А.В. Лалакина были сделаны упрощающие приближения, сохраняющие количественные характеристики процессов радиационной кинетики оптических стекол и позволяющие получать численные результаты после относительно несложных вычислений. В итоге была создана, пожалуй, уникальная «работающая» инженерная методика расчета радиационной стойкости оптических систем.

Данная методика позволяет с достаточной точностью учесть эффекты обесцвечивания радиационного окрашивания оптических стекол с течением времени, а также получать необходимые для этих расчетов характеристики стекол из имеющихся справочных данных. Особое значение учет таких эффектов имеет для расчетной оценки работоспособности оптических систем аппаратуры ДЗЗ с большими сроками активного существования. Необходимо отметить, что данную задачу не удалось удовлетворительно решить даже крупным научным организациям соответствующего профиля.

Использование данной методики позволяет обоснованно применять в конструкции космической аппаратуры не радиационно-стойкие оптические стекла, имеющие более высокие значения начального коэффициента пропускания, по сравнению с их радиационно-стойкими аналогами, с меньшим начальным коэффициентом пропускания и имеющих более высокую стоимость.

Кроме того, А.В. Лалакиным был предложен и внедрен метод представления табличных данных зависимости доз ИИКП от толщины защиты, приводимых в ТЗ на космическую аппаратуру ДЗЗ, в виде суммы экспоненциальных функций. Применение этого метода позволило создать эффективный способ расчета локальных доз ИИКП с учетом защиты конструкцией аппаратуры ее критичных элементов – как оптических, так и электронных компонент.

За время работы в СКБ-1 с 2000 г. по 2014 г. А.В. Лалакиным были выполнены расчеты радиационной стойкости аппаратуры Геотон-Л1 и гиперспектральной аппаратуры ГСА РП в составе космического аппарата (КА) «Ресурс-П» № 1, 2, 3, а также инфракрасного Фурье-спектрометра ИКФС-2 для КА «Метеор-М» № 2 и соответствующие расчеты в рамках ряда эскизных проектов аппаратуры ДЗЗ.

С приходом в СКБ-1 в 2012 году ведущего инженера А.В. Зубко была продолжена систематическая работа по совершенствованию методической базы расчетов радиационной стойкости аппаратуры ДЗЗ на основе использования вычислительных средств компьютерной алгебры. Это позволило увеличить точность соответствующих расчетов и использовать более совершенные математические модели для описания процессов воздействия ИИКП на оптико-электронную аппаратуру.

На первом этапе была разработана аналитическая методика оценки радиационных нагрузок от ИИКП на элементы космической аппаратуры ДЗЗ. Предложенная методика состоит в аппроксимации заданных ТЗ дискретных зависимостей доз ИИКП от толщины экрана аналитическими функциями специального вида, аппроксимации защитных свойств конструкции аппаратуры по отношению к ИИКП в различных телесных углах совокупностью экранов с аналитической формой поверхности с последующим численным интегрированием соответствующего выражения для локальной дозы.

Эта методика была доложена в 2013 г. на заводской научно-технической конференции [1], опубликована в тезисах докладов 17 Всероссийской научно-технической конференции по радиационной стойкости электронных систем «Стойкость 2014» [2], также на данную методику был получен патент РФ [3].

На втором этапе работ была усовершенствована методика расчета радиационной стойкости оптических систем в части использования теоретически последовательной математической модели процессов радиационного окрашивания стекла и численного интегрирования точного решения уравнения радиационной кинетики для оптической плотности стекол. Также соответствующим образом была усовершенствована процедура получения необходимых радиационных характеристик стекла из имеющихся справочных данных.

Данная методика была доложена в 2014 г. на заводской научно-технической конференции [4], опубликована в тезисах докладов 17 Всероссийской научно-технической конференции по радиационной стойкости электронных систем «Стойкость 2014» [5] и на данную методику был получен патент РФ [6]. Таким образом, благодаря собственным фундаментальным наработкам и преемственности в развитии работ по радиационной стойкости аппаратуры на Красногорском механическом заводе была создана не имеющая аналогов в отрасли методика расчета радиационной стойкости оптических систем космической аппаратуры ДЗЗ.

Неотъемлемой составной частью этой методики расчета радиационной стойкости оптических систем является разработанная ранее аналитическая методика оценки локальных доз ИИКП. В своей совокупности, эти две методики являются составными частями комплексной методики расчета радиационной стойкости космической аппаратуры ДЗЗ, которая была доложена на заводской научно-практической конференции в 2017 г. [7]. Данная комплексная методика в полном объеме была использована для расчета радиационной стойкости ОЭА «Аврора» в составе МКА «Аист-2Д», который был выведен на орбиту 28.04.2016 г. с космодрома «Восточный», а также при выполнении соответствующих расчетов в рамках ряда эскизных проектов аппаратуры ДЗЗ.

Для эффективного использования новой редакции отраслевых нормативных документов в части расчета характеристик одиночных ра-

диационных эффектов в электронной аппаратуре при воздействии ИИКП был разработан и в 2018 г. оформлен патентом РФ [8] способ оценки частоты одиночных радиационных эффектов в бортовой аппаратуре космических аппаратов. Этот способ дополнил комплексную методику расчета радиационной стойкости космической аппаратуры ДЗЗ в части одиночных радиационных эффектов. Таким образом, созданная комплексная методика в таком виде включает в себя расчет всех основных эффектов воздействия ИИКП на аппаратуру ДЗЗ.

Систематически проводимые работы по совершенствованию научно-методического и организационного обеспечения радиационной стойкости аппаратуры ДЗЗ позволяют СКБ-1 соответствовать растущим требованиям к разрабатываемой аппаратуре со стороны заказывающих организаций.

Список литературы:

1. *Архипов С.А., Зубко А.В., Лалакин А.В.* Аналитическая методика оценки радиационных нагрузок от ионизирующих излучений космического пространства на элементы космической аппаратуры дистанционного зондирования Земли. Сборник тезисов докладов научно-технической конференции «Гиперспектральные приборы и технологии». г. Красногорск, 17-18 января 2013 г. с. 97-98

2. *Архипов С.А., Зубко А.В., Лалакин А.В*. Аналитическая методика оценки локальных доз ИИКП. Тезисы докладов 17 Всероссийской научно-технической конференции по радиационной стойкости электронных систем «Стойкость 2014». г. Лыткарино, 3-4 июня 2014 г. с. 277-278

3. *Архипов С.А., Зубко А.В., Лалакин А.В.* Способ определения локальных доз ионизирующих излучений космического пространства за защитными экранами с аналитической формой поверхности. Патент РФ на изобретение № 2564472 от 04 сентября 2015г.

4. *Архипов С.А., Зубко А.В., Лалакин А.В*. Методика расчетной оценки снижения спектрального коэффициента пропускания оптических систем космической аппаратуры при длительном воздействии ионизирующих излучений космического пространства. Тезисы докладов научно-технической конференции «Размерная стабильность материалов и конструкций оптических и оптико-электронных приборов». г. Красногорск, 2014 г. с. 66-72

5. *Архипов С.А., Зубко А.В., Лалакин А.В*. Методика расчетной оценки снижения спектрального коэффициента пропускания оптических систем КА при длительном воздействии ИИКП. Тезисы докладов 17 Всероссийской научно-технической конференции по радиационной стойкости электронных систем «Стойкость 2014». г. Лыткарино, 3-4 июня 2014 г. с. 275-276

6. *Архипов С.А., Зубко А.В., Лалакин А.В*. Способ выбора марок оптических стекол для конструирования оптических систем космической аппаратуры в условиях длительного воздействия ионизирующих излучений космического пространства. Патент РФ на изобретение № 2626450 от 27 июля 2017 г.

7. *Зубко А.В., Архипов С.А.* Комплексная методика расчета радиационной стойкости космической аппаратуры ДЗЗ. Сборник тезисов докладов научно-практической конференции «Оптико-электронные приборы и комплексы». г. Красногорск, 2017 г. с. 135-139

8. *Зубко А.В*. Способ оценки частоты одиночных радиационных эффектов в бортовой аппаратуре космических аппаратов. Патент РФ на изобретение № 2675669 от 21 декабря 2018 г.

УДК 629.7.058.53

МЕТОДИКА ПОЛУЧЕНИЯ ДАННЫХ ДЛЯ СТОХАСТИЧЕСКОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ВЫЧИСЛЕНИЯ ФАЗОВЫХ КООРДИНАТ ТРАЕКТОРИИ ПОЛЁТА ВОЗДУШНОГО ОБЪЕКТА

ЗАВАРЗИН В.И., ФИЛОНОВА П.А.

Московский государственный технический университет им.Н.Э.Баумана

E-mail: zavarzin@bmstu.ru

Аннотация: *Получение оптимальных оценок фазовых координат траекторий воздушных объектов базируется на априорных сведениях о динамике их изменения в виде соответствующей структуры стохастических математических моделей радиальных составляющих скорости и ускорения и численных значений ее параметров. В качестве исходных данных для разработки подобных моделей используются результаты корреляционного анализа реальных траекторий доплеровских частот, вопрос достоверности которых представляет практический интерес. В статье приводится методика, обеспечивающая определение адекватных по критерию минимума суммы квадратов разностей реальным траекториям доплеровских частот исходных данных.*

Ключевые слова: автокорреляционная функция, стохастическая математическая модель.

THE METHOD OF OBTAINING DATA FOR A STOCHASTIC MATHEMATICAL MODEL FOR CAL-CULATING THE PHASE COORDINATES OF THE FLIGHT PATH OF AN AIR OBJECT

V.I. ZAVARZIN, P.A. FILONOVA

Bauman Moscow State Technical University, Moscow

E-mail: zavarzin@bmstu.ru

Abstract: *Obtaining optimal estimates of the phase coordinates of the trajectories of aerial objects is based on a priori information about the dynamics of their change in the form of the corresponding structure of stochastic mathematical models of the radial components of speed and acceleration and the numerical values of its options. The results of the correlation analysis of real Doppler frequency trajectories are used as initial data for the development of similar models the question of the reliability of which is of practical interest. The article provides a method for determining the minimum of the sum of squared differences that are adequate by the minimum criterion to the real paths of the Doppler frequencies of the initial data.*

Keywords: autocorrelation function, stochastic mathematical model.

Оценка параметров траекторий воздушных объектов базируется на теории оптимальной фильтрации, которая предполагает наличие априорных сведений о динамике их полета в виде соответствующей структуры стохастических математических моделей радиальных составляющих скорости и ускорения и численных значений ее параметров. К математической модели предъявляются требования адекватности отображения существенных свойств реального полета воздушного объекта, простоты и продуктивности [1 - 3].

В [2, 4] рассматриваются различные подходы к построению стохастической математической модели радиальных скорости и ускорения полёта воздушного объекта на основе его траекторного доплеровского портрета, который формируется в процессе узкополосного спектрального анализа радиолокационных сигналов, отраженных от реального воздушного объекта, однако все они сводятся к последовательному выполнению следующих операций.

1. Проведение корреляционного анализа траекторного доплеровского портрета.

2. Получение оценок параметров полученной оценки автокорреляционной функции (АКФ): $\tau_к$ – время корреляции; f_0 – частота собственных колебаний; σ_v^2 – дисперсия скоростных флуктуаций – траекторные статистические характеристики траекторий радиальных скоростей сближения (доплеровских частот).

3. Аппроксимация полученной оценки автокорреляционной функции одним из известных [6] выражений.

4. Вычисление АКФ флюктуаций ускорения.

5. Определение структуры дифференциальных уравнений математической модели радиальных составляющих скорости и ускорения полёта воздушного объекта с использованием математического аппарата метода формирующих фильтров [7].

6. Вычисление значений параметров дифференциальных уравнений: α_v – величина, характеризующая расширение спектра сигнала; β – квадрат частоты собственных колебаний АКФ; σ_a^2 – дисперсия ускорения цели.

7. Оценка адекватности математической модели [1, 2].

Из анализа приведённой обобщённой методики построения стохастической математической модели можно сделать вывод, что основными факторами, оказывающими влияние на её адекватность, являются вид АКФ и численные значения траекторных статистических характеристик.

Целью статьи является определение методики получения достоверных исходных данных для построения стохастической математической модели изменения фазовых координат траектории полёта воздушного объекта на основе его траекторного доплеровского портрета.

Для достижения цели предлагается следующее содержание первых трёх пунктов обобщённой методики построения стохастической математической модели – методика определения исходных данных для построения стохастической математической модели изменения фазовых координат траектории полёта воздушного объекта.

1. Корреляционный анализ реальных траекторий доплеровских частот $F_д$ (рисунок 1) осуществлялся на основе построения АКФ в дискретном времени по следующей общей формуле [1, 5, 6]:

$$\hat{R}_F(k\Delta t)=\frac{\gamma(k\Delta t)}{n-k}\sum_{i=0}^{n-k}\left(F_д(i\Delta t)-m_F(i\Delta t)\right)\cdot\left(F_д\left((i+k)\Delta t\right)-m_F\left((i+k)\Delta t\right)\right), \quad (1)$$

где $m_F(i\Delta t)$ – изменяющееся во времени математическое ожидание реализации траекторий доплеровских частот, аппроксимируемое кусочно-линейной функцией, коэффициенты которой определялись на основе средней квадратичной регрессии; Δt – интервал дискре-

тизации; n – количество дискретных отсчетов траектории доплеровской частоты;

$\gamma(k\Delta t) = 0.54 + 0.46\cos\left(\pi k \frac{\Delta t}{n}\right)$ – весовое окно Хемминга, применяемое для сглаживания оценок АКФ; $k = 0, 1, 2, ..., n$.

Результатом корреляционного анализа является оценка $\hat{R}_v$ автокорреляционной функции (на рисунке 2 приведена АКФ не траектории доплеровских частот, но траектории радиальной скорости).

2. Получение оценок параметров оценки $\hat{R}_v$ АКФ.

2.1. Дисперсия скоростных флуктуаций определяется однозначно в соответствии с выражением [1, 5, 6]:

$$\hat{\sigma}_v^2 = \hat{R}_v(0). \quad (2)$$

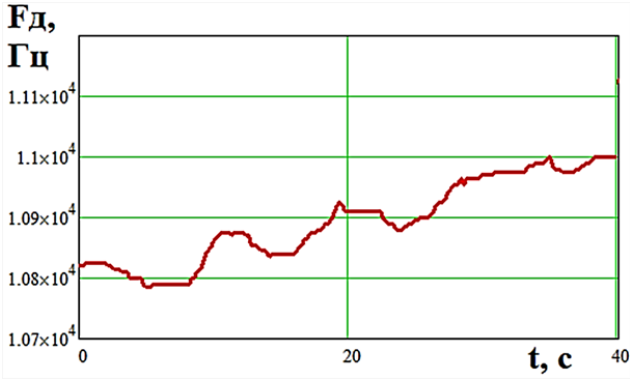


Рисунок 1.

Траекторный доплеровский портрет

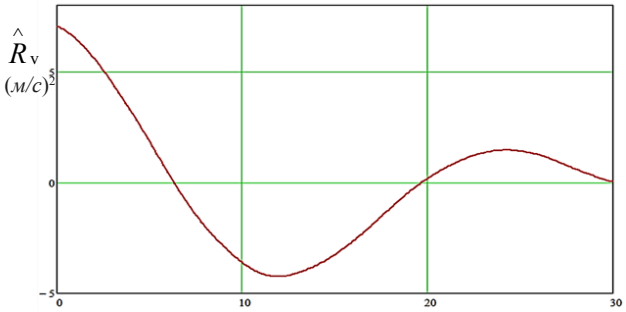


Рисунок 2.

Оценка автокорреляционной функции

2.2. Частота собственных колебаний определяется однозначно в соответствии с выражением [1, 5, 6]:

$$\hat{f}_0 = \arg\max_f(S(f)), \quad (3)$$

где $S(f)$ – спектральная плотность АКФ (рисунок 3), определяемая в соответствии с теоремой Хинчина.

Для проверки правильности построения спектральной плотности АКФ необходимо помнить, что дисперсия стационарной случайной функции равна площади под кривой спектральной плотности без каких-либо нормировочных коэффициентов.

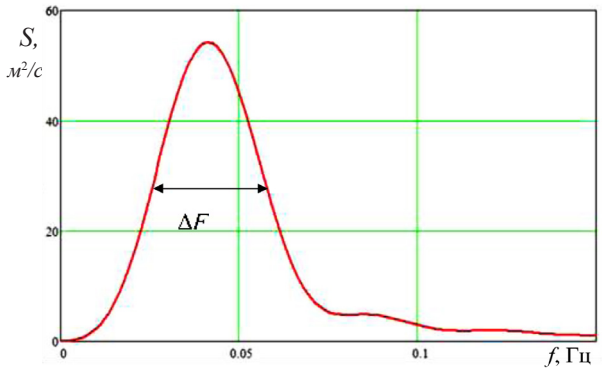


Рисунок 3.

Спектральная плотность АКФ

2.3. Анализ известных подходов к оценке времени $\tau_к$ корреляции позволил сделать вывод об имеющейся неоднозначности:

- в [1] используется выражение:

$$\tau_к = \int_0^\infty e^{-\alpha\tau} d\tau,$$

где α – величина, определяющая скорость спадания АКФ;

- в [8] используется выражение:

$$\tau_к = \int_0^\infty |\rho(\tau)| d\tau,$$

где $\rho(\tau)$ – нормированная АКФ;

- в [9] используется выражение:

$$\hat{\tau}_к = \frac{1}{2\Delta F}, \quad (4)$$

где ΔF – ширина спектральной плотности АКФ.

Оценку времени $\tau_к$ корреляции предлагается определять в соответствии с выражением (4), так как на основе этой оценки в дальнейшем вычисляется значение одного из параметров дифференциальных уравнений, описывающих математическую модель, – α_v – величина, характеризующая расширение спектра сигнала из-за скоростных флюктуаций.

3. После построения графика оценки АКФ обычно возникает необходимость аппроксимирования корреляционной функции простым аналитическим выражением, удобным при дальнейшем исследовании. Выражения, употребляемые при такой аппроксимации, должны удовлетворять общим свойствам корреляционных функций и отображать характерные свойства полученной кривой [5].

Аппроксимирующее выражение может быть найдено обычными методами приближения функций с любой точностью. Однако большая точность приближения к найденной оценке АКФ обычно бывает не только не нужна для получения ответа на конкретный практический вопрос, решаемый в данной задаче, но бывает даже в ряде случаев нежелательна, так как воспроизведение различных особенностей графика функций $\hat{R}_{\text{v}}$, возникающих вследствие невысокой точности самой оценки корреляционной функции, может только исказить физическую сущность рассматриваемого явления [5].

Аппроксимация полученной оценки автокорреляционной функции целесообразно производить одним из известных [1] выражений:

$$R1_{\text{v}}(\tau) = \hat{\sigma}_{\text{v}}^2 \, e^{-\frac{\tau}{\hat{\tau}_{\text{к}}}}; \quad (5)$$

$$R2_{\text{v}}(\tau) = \hat{\sigma}_{\text{v}}^2 \, e^{-\frac{\tau^2}{\hat{\tau}_{\text{к}}}} \cos\left(2\pi \hat{f}_0 |\tau|\right); \quad (6)$$

$$R3_{\text{v}}(\tau) = \hat{\sigma}_{\text{v}}^2 \, e^{-\frac{|\tau|}{\hat{\tau}_{\text{к}}}} \cos\left(2\pi \hat{f}_0 |\tau|\right); \quad (7)$$

$$R4_{\text{v}}(\tau) = \hat{\sigma}_{\text{v}}^2 \, e^{-\frac{|\tau|}{\hat{\tau}_{\text{к}}}} \left(\cos\left(2\pi \hat{f}_0 |\tau|\right) + \frac{\sin\left(2\pi \hat{f}_0 |\tau|\right)}{2\pi \hat{f}_0 \hat{\tau}_{\text{к}}} \right) \quad (8)$$

выражения, аппроксимирующего оценку $\hat{R}_{\text{v}}$ автокорреляционной функции, осуществляется по критерию минимума суммы квадратов разностей [6, 8]. Согласно нему выбирается такая теоретическая функция $\hat{R}i(\tau)$ ($i = \overline{1,4}$), в которой сумма квадратов отклонений наблюдаемых значений от значений экспериментальной автокорреляционной функции $\hat{R}_{\text{v}}$ была бы минимальной.

Выводы

1. В результате применения предложенной методики определяются следующие исходные данные:

- оценки траекторных статистических характеристик траекторий радиальных скоростей сближения (доплеровских частот);
- вид выражения $\hat{R}i(\tau)$, аппроксимирующего оценку $\hat{R}_{\text{v}}$ автокорреляционной функции реальной траектории доплеровских частот (радиальных скоростей сближения).

2. Полученные исходные данные являются адекватными по критерию минимума суммы квадратов разностей реально наблюдаемым процессам – реальным траекториям доплеровских частот (радиальных скоростей сближения).

3. Использование адекватных исходных данных позволит построить адекватную стохастическую математическую модель изменения фазовых координат траектории полёта воздушного объекта.

Список литературы:

1. *Тихонов В.И., Харисов В.Н.* Статистический анализ и синтез радиотехнических устройств и систем. Учебное пособие для ВУЗов. Москва, Радио и связь, 1991.

2. *Богданов А.В., Филонов А.А*. Методика построения динамических моделей радиальных скоростей и ускорений пары воздушных целей, летящих в сомкнутом боевом порядке. Известия РАН. *Сер.* Теория и системы управления, 2007, №4.

3. Информационные технологии в радиотехнических системах. Учебное пособие. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003.

4. *Богданов А.В., Васильев О.В., Филонов А.А., Жиронкин С.Б., Кучин А.А., Лютиков И.В., Анциферов А.А., Когтин А.В., Черваков В.О.,* ред. Обнаружение и распознавание пущенной противником ракеты в бортовой радиолокационной станции истребителя. Монография. Красноярск, Изд-во Сибирский федеральный университет, 2015.

5. *Свешников А.А.* Прикладные методы теории случайных функций. Москва, Наука, 1968.

6. *Тихонов В. И., Бакаев Ю.Н.* Статистическая теория радиотехнических устройств. Москва, Изд-во ВВИА, 1978.

7. М*иллер Б.М., Панков А.Р*. Теория случайных процессов в примерах и задачах. Москва, ФИЗМАТЛИТ, 2002.

8. *Вентцель Е.С. Овчаров Л.А*. Теория вероятностей. Учебное пособие. Москва, Наука, 1969.

УДК 681.5

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ МЕХАТРОННОГО ШАГАЮЩЕГО УСТРОЙСТВА

ВЕЧЕРИН Я.А., ЛИТВИНОВ С.А.

Публичное акционерное общество «Красногорский завод им. С.А. Зверева», г. Красногорск
3-я научная рота Космических войск Воздушно-космических сил РФ

E-mail: yavnrkv@yandex.ru

Аннотация: *На сегодняшний день важной проблемой является определение динамических возможностей шагающих устройств. С этой целью проводятся аналитические расчёты, компьютерное и натурное моделирование их динамики. Ввиду сложности динамических моделей мехатронного шагающего устройства и большого количества настраиваемых параметров, для решения указанной проблемы был выбран метод компьютерного моделирования. В данной статье описывается компьютерное моделирование механики мехатронного шагающего устройства и определяются параметры его движения: углы, угловые скорости, моменты, развиваемые приводами, а также механическая работа и мощность.*

Ключевые слова: мехатронное шагающее устройство, математическое моделирование, параметры движения, походка «рысь», MATLAB.

DETERMINATION OF MOTION PARAMETERS OF MECHATRONIC WALKING

VECHERIN Y.A., LITVINOV S.A.

PJSC «Krasnogorsky plant him S.A. Zvereva», Krasnogorsk

E-mail: yavnrkv@yandex.ru

Abstract: *Nowadays, the problem is to determine the dynamic capabilities of walking devices. For this purpose, analytical calculations, computer and field modeling of their dynamics are carried out. Due to the complexity of the dynamic models of the mechatronic device and the large number of tunable parameters, a computer simulation method was chosen to solve the problems. This article describes computer simulation of mechanics and mechanical work and power.*

Keywords: mechatronic walking device, mathematical modeling, motion parameters, “trot” gait , MATLAB.

ВВЕДЕНИЕ

Шагающие устройства являются сложными механическими системами, отличаются большим разнообразием кинематических структур, допускают реализацию множества различных алгоритмов и законов управления.

Достоинства шагающих устройств определяются в первую очередь потенциально более высокой проходимостью, маневренностью и лучшими экологическими свойствами по сравнению с устройствами, использующими традиционные типы движителей. Основные недостатки шагающих устройств связаны со сложностью конструкции и системы управления, а также небольшой скоростью передвижения шагающей техники. [1] Упрощение конструкции шагающего устройства уменьшает массу, удешевляет устройство, что расширяет возможные варианты его использования. Выбор конструкции шасси исследуемого мехатронного шагающего устройства (МШУ) обосновано в работе [2].

Новизна исследования заключается в определении параметров движения (скоростей, ускорений движения суставов, моментов, развиваемых в них) при помощи компьютерного моделирования объекта исследования (ОИ) (рис. 1 а), мировая новизна конструкции которого защищена патентами [3, 4].

Аналоги рис. 1 (б – г) имеют одинаковую кинематическую конструкцию ног. Такую, как показано на рис. 2, похожую на кинематику ноги млекопитающего. Объект исследования имеет более простую кинематическую конструкцию (две управляемые степени свободы против трёх у аналогов) (рис. 2.), но способен выполнять те же функции, что и аналоги (обеспечивать движения известными походками, способность двигаться по лестнице, по пересеченной местности, менять статические позы). Обеспечивает близкие параметры проходимости и скорости движения.

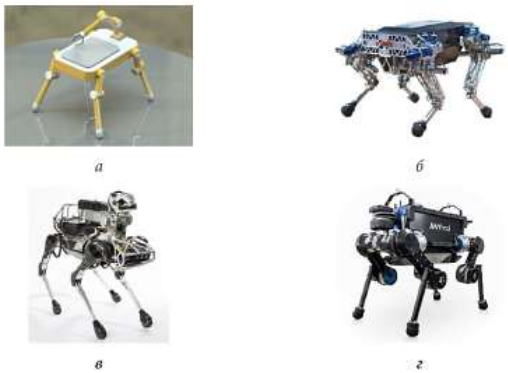


Рисунок 1.
Мехатронные шагающие устройства:
а – объект исследования; б – StarlETH[5];
в – Spot mini[6]; г – ANYmal[7]

ПАРАМЕТРЫ ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЯ

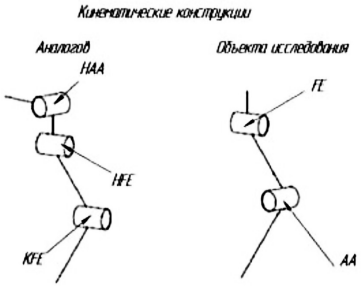
Установим для МШУ следующие параметры:

1. Длина ноги, примерно равная длине ноги средней собаки: L = 0,5 м.

2. Масса корпуса: M = 30 кг.

Все ноги совершают относительно корпуса периодическое движение, что показано на расчётной схеме (рис. 3) (сверху для аналогов, снизу — ОИ).

Введём следующие обозначения (взяты из [9]): n – количество ног шагающего устройства (для четырёхногих МШУ n = 4), V – скорость равномерного и прямолинейного движения корпуса (для кинематической конструкции объекта ис-



Обозначение	Наименование
H	Бедро
K	Колено
FE	Сгибание/разгибание
AA	Приведение/отведение

Рисунок 2.
Кинематические конструкции аналогов
и объекта исследования

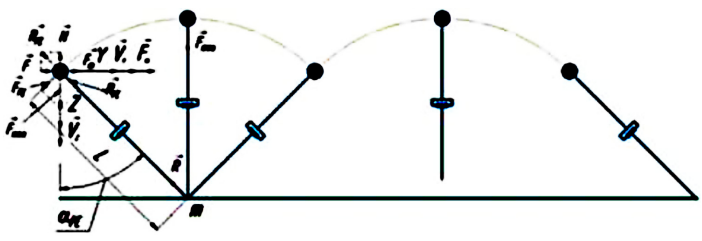


Рисунок 3.
Расчётная схема передвижения ноги объекта исследования и аналогов по прямой ровной поверхности [8]

следования – V – горизонтальная составляющая скорости), H – клиренс или расстояние по вертикали от опорной поверхности до середины подвеса ног, T_0 – продолжительность фазы опоры, T_1 – продолжительность фазы переноса, T – продолжительность одного периода движения шагающего устройства. Длина шага (расстояние, проходимое стопой относительно корпуса в течение фазы опоры) составляет $S = V \cdot T_0$. Длина шага на местности (расстояние между двумя последовательными точками постановки ног на опорную поверхность) $S_a = V \cdot T$. L – длина полностью распрямлённой ноги, M – масса устройства, g – ускорение силы тяжести, m – приведённая к стопе масса ноги.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ДВИЖЕНИЯ НОГ

На всём протяжении фазы опоры нога касается опорной поверхности. При передвижении походкой типа «рысь», корпус движется поступательно. Будем считать, что в точке касания сила трения между ногой и корпусом равна нулю, а нога совершает вращательное движение в сагиттальной плоскости относительно точки касания. Для описания движения ноги в фазе опоры в первом приближении будем считать, что нога представляет собой идеальный (жёсткий, невесомый) стержень (Рис. 4). При передвижении динамической походкой в контакте с поверхностью одновременно находятся две ноги (опорные), при этом центр масс корпуса располагается на линии, соединяющий точки крепления бёдер ног с корпусом.

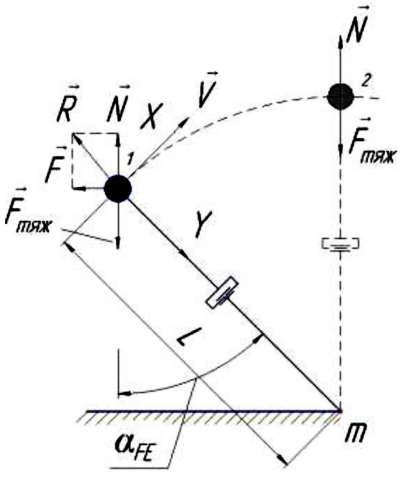


Рисунок 4.
Модель перевёрнутого маятника

Воспользуемся вторым законом Ньютона:

$$\sum_{i=1}^{n} F_i = M_н a$$

$$Ox: \sum_{i=1}^{n} F_x = M_н a_\tau;$$

$$Oy: \sum_{i=1}^{n} F_y = M_н a_n;$$

$$\begin{cases} M_н g \sin\alpha_{FE} = M_н a_\tau \\ M_н g \cos\alpha_{FE} - R = M_н a_n \end{cases};$$

$$\left[a_\tau = \frac{dv}{dt} = \frac{d\omega}{dt} L = \ddot{\alpha} L; a_n = \dot{\alpha}^2 L \right];$$

$$\begin{cases} M\dot{\alpha}^2 L = M_н g \cos\alpha_{FE} - R \rightarrow \dot{\alpha} = \sqrt{\dfrac{M_н g \cos\alpha_{FE} - R}{ML}} \\ \ddot{\alpha} L = g \sin\alpha_{FE} \rightarrow \ddot{\alpha} = \dfrac{g \sin\alpha_{FE}}{L}; \end{cases}$$

Полученные уравнения описывают движение ноги объекта исследования в фазе опоры. Полученная система уравнений нелинейна. Ввиду сложности получения решения системы уравнений аналитическими методами, её решение может быть получено численными методами.

РАСЧЁТ МАКСИМАЛЬНОГО УГЛА СГИБАНИЯ/РАЗГИБАНИЯ НОГ

Чтобы избежать коллизии между двумя ногами с одной стороны корпуса необходимо, чтобы α_{FE} не превышал значения:

$$a_{\max} = \arcsin\left(\frac{L_{н/2}}{L}\right) \quad ,$$

где $L_н$ – расстояние, откладываемое вдоль корпуса по горизонтали между двумя ногами с одной стороны устройства.

Приведённая формула получена из анализа геометрической модели устройства:

$$\sin a_{\max} = \frac{L_{н/2}}{L}$$

Если $L_{н/2}$=250 мм, *L=500 мм,* то

$$a_{\max} = \arcsin\left(\frac{250}{500}\right) = 30°.$$

Тогда диапазон изменения угла α принимает значения [-30°,30°].

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕДВИЖЕНИЯ МШУ

Компьютерная модель МШУ (рис. 5) — система абсолютно твердых тел, функцией которой является описание движения МШУ на прямой плоской поверхности. Система состоит из подсистем, которые функционально можно подразделить на три типа: описывающие взаимодействие ног с опорной поверхностью, движение ног относительно опорной поверхности и относительно тела.

В процессе моделирования динамики МШУ в пакете Matlab Simulink [10], происходит вычисление положений относительных систем координат, связанных с твёрдыми телами и визуализация их перемещения. На рис. 6 представлена компьютерная модель ноги.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

В результате математического моделирования движения МШУ по горизонтальной ровной поверхности были получены графики параметров движения (задающего воздействия, угла поворота, угловой скорости и вращающего момента) приводов бедра и голени (рис. 7 - 12) для разных значений периода шага T.

На графике угла приведения/отведения бедра можно видеть момент (t = 0,7 с), когда нога переходит в фазу переноса и момент (t = 1 с), когда она переходит в фазу опоры.

На графиках видно, что угол сгибания/разгибания бедра изменяется в диапазоне [-30°;30°].

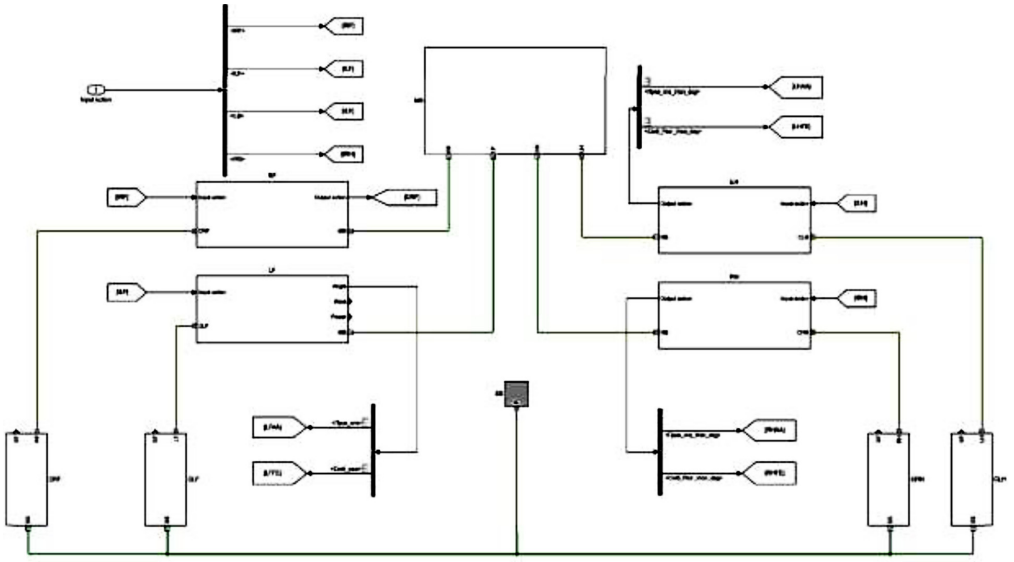


Рисунок 5.

Компьютерная модель исследуемого устройства, выполненная в пакете MATLAB Simulink

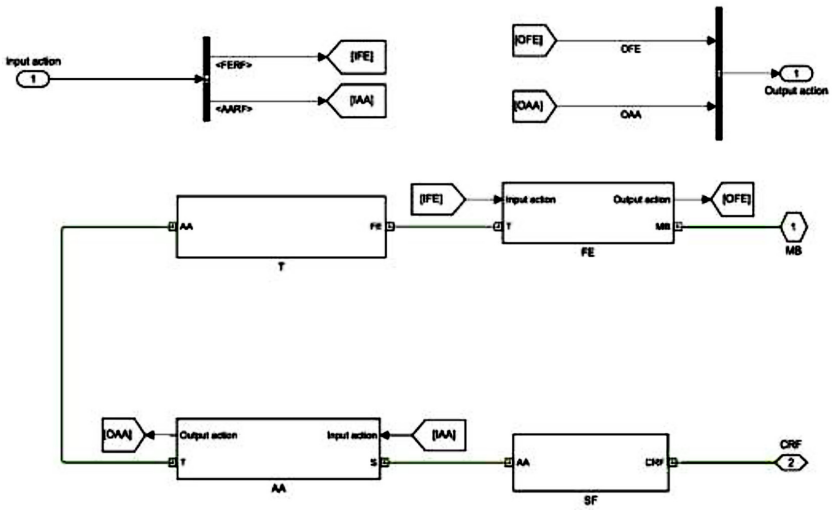


Рисунок 6.

Компьютерная модель ноги

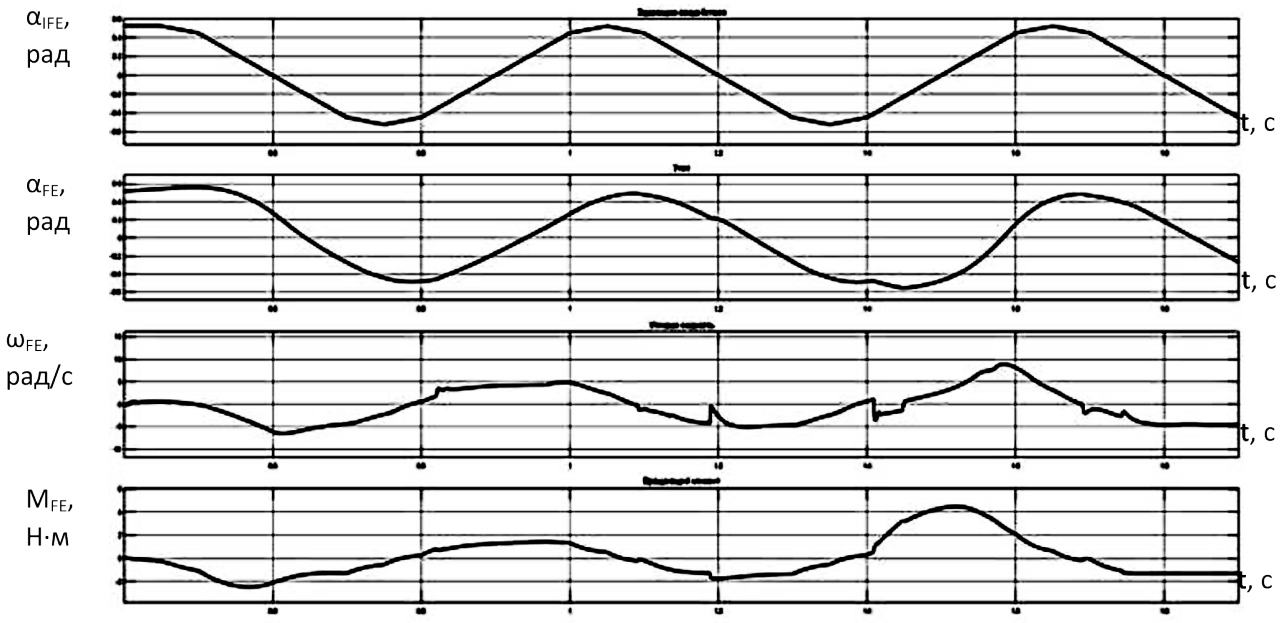


Рисунок 7.

Параметры движения привода сгибания/разгибания бедра (T = 0,5 с; V = 0,6 м/с)

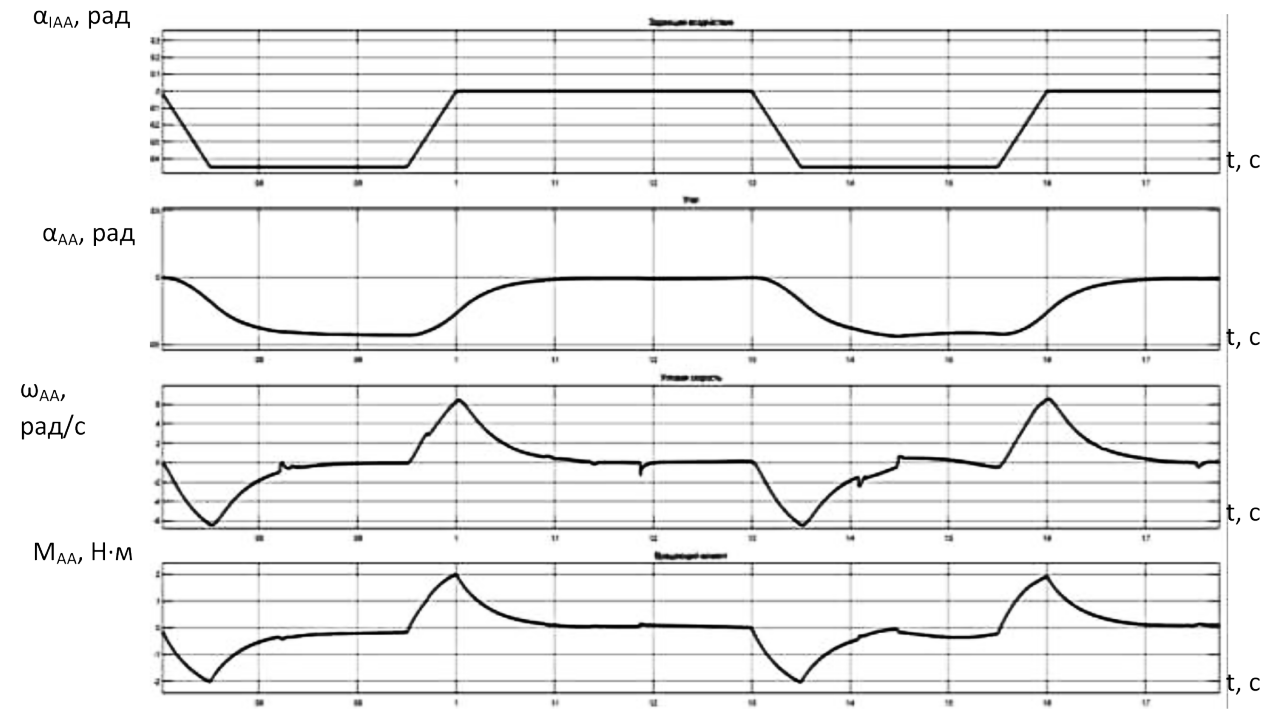


Рисунок 8.

Параметры движения привода приведения/отведения голени.

ПАРАМЕТРЫ ДВИЖЕНИЯ ПРИ Т = 1С .

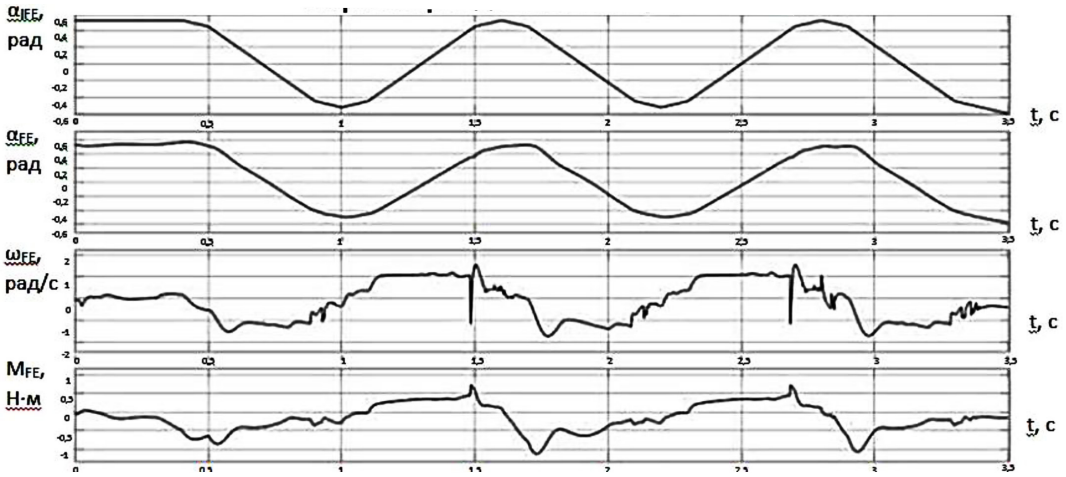


Рисунок 9.

Параметры движения привода сгибания/разгибания бедра

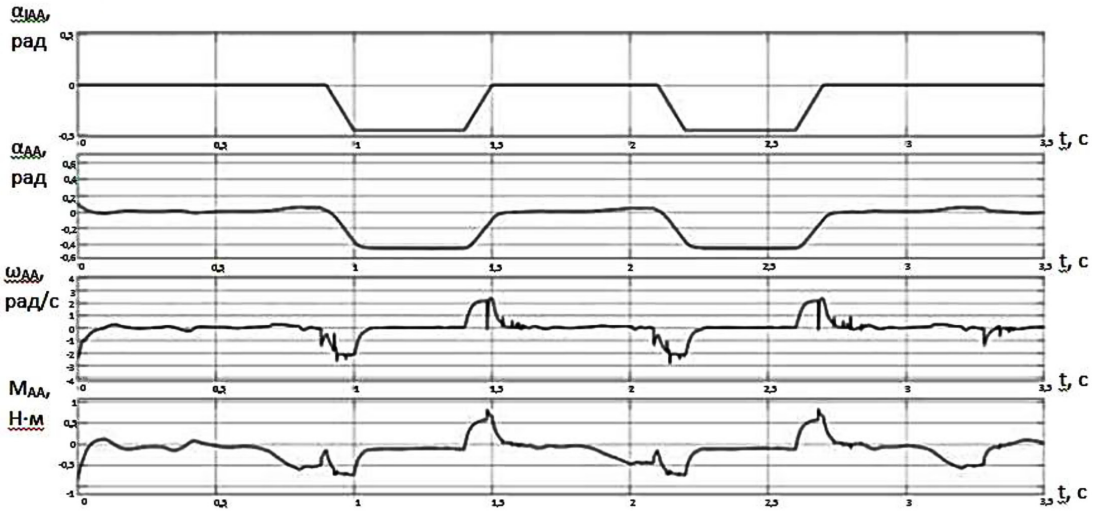


Рисунок 10.

Параметры движения привода приведения/отведения голени

ПАРАМЕТРЫ ДВИЖЕНИЯ ПРИ Т = 4 С

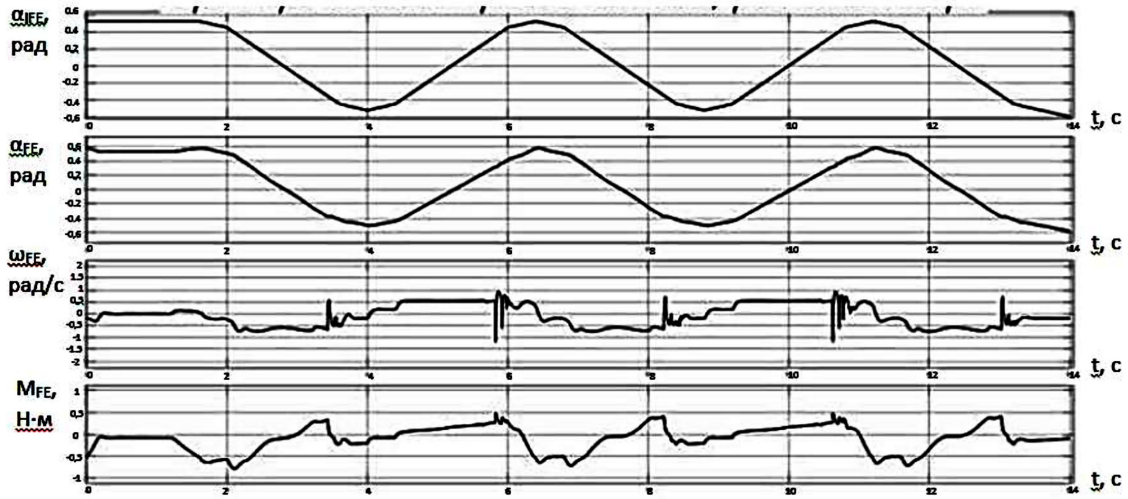


Рисунок 11.

Параметры движения привода сгибания/разгибания бедра

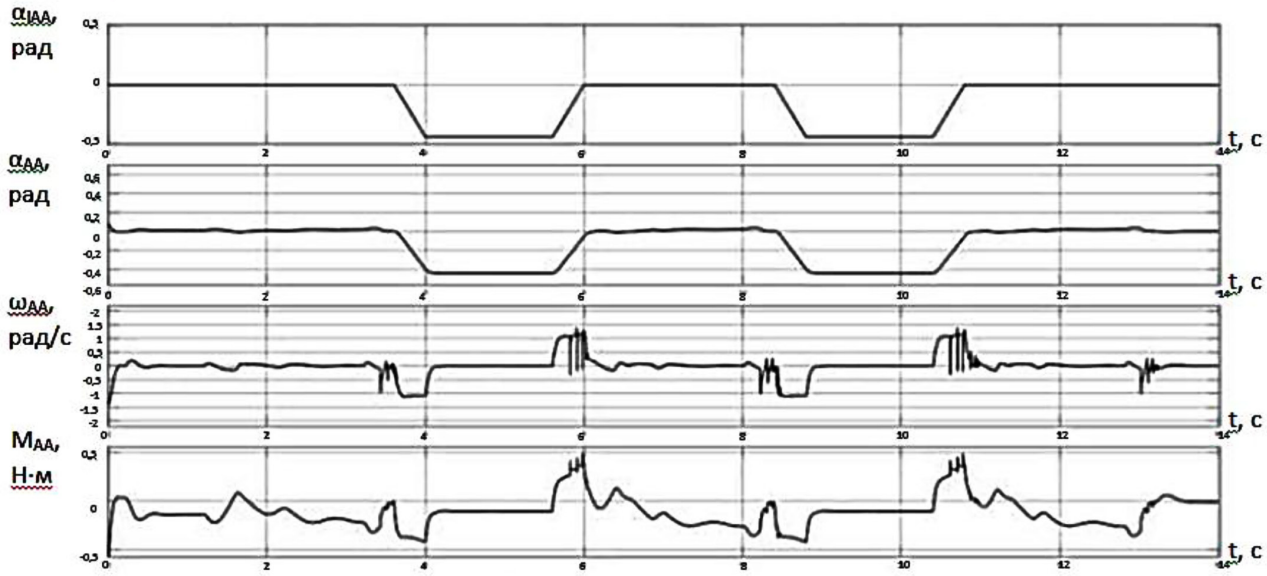


Рисунок 12.
Параметры движения привода приведения/отведения голени

ВЫВОД

В рамках данной статьи была аналитически получена математическая модель движения ноги объекта исследования. Были определены параметры движения (углы, угловые скорости и вращающие моменты суставов МШУ) для разных длительностей цикла шага.

Список литературы:

1. *Малолетов А.В.* Динамика и оптимизация структуры, параметров и алгоритмов управления движением шагающих машин со сдвоенными шагающими движителями. 2015.

2. *Близнец П.М., Рубцов В.И., Коновалов К.В., Бошляков И.А.* Домашний охранный робот на базе шагающего движителя // Международный научный журнал «Символ науки». 2017. № 3(2). С. 14–20.

3. *Близнец П.М., Коновалов К.В., Близнец М.П., Лапшов В.С., Метасов И.Е., Артамонов Ю.П., Бошляков И.А*. Шагающее устройство. Патент 2642020 РФ. Заявл. 24.06.2016, опубл. 23.01.2018.

4. *Близнец П.М*. Транспортирующее устройство. Патент 2033955 РФ. Заявл. 04.01.1991, опубл. 30.04.1995.

5. *Hutter M*. Design and control of legged robots with compliant actuation. Master of Science Diss. ETH Zurich, Switzerland, 196 p.

6. Spot mini. URL: https://www.bostondynamics.com/spot-mini (дата обращения 05.08.2019).

7. ANYmal – Autonomous Legged Robot. URL: https://www.anybotics.com/anymal-legged-robot/ (дата обращения 05.08.2019).

8. *Вечерин Я.А*. Исследование энергоэффективности четырёхногих мехатронных шагающих устройств. Политехнический молодежный журнал, 2018, № 8. URL: http://ptsj.ru/articles/362/362.pdf.

9. *Лапшин В.В.* Механика и управление движением шагающих машин. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012, 199 с.

10. *Вечерин Я.А*. моделирование динамики четырехногого мехатронного шагающего устройства в пакете MATLAB Simulink. Политехнический молодежный журнал, 2018, № 12. URL: http://ptsj.ru/articles/412/412.pdf

УДК 697.326

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ ЗДАНИЯ С ВОДОГРЕЙНЫМИ КОТЛОАГРЕГАТАМИ

ГАЛЕНИН Д.В.

Публичное акционерное общество «Красногорский завод им. С.А. Зверева», г. Красногорск
3-я научная рота Космических войск Воздушно-космических сил РФ

E-mail: galenin.den2013@yandex.ru

Аннотация: *в данной статье представлены разработанная принципиальная схема системы автоматизации отопления с применением котлоагрегатов Geffen MB 1.2 и функциональную схему системы автоматизации отопления на базе контроллера ECL Comfort 210.*

Ключевые слова: автоматизация, котельная, котлоагрегат, теплоснабжение, контроллер.

DEVELOPMENT OF A SYSTEM FOR AUTOMATIC REGULATION OF HEAT SUPPLY TO A BUILDING WITH HOT WATER BOILERS

GALENIN D.V.

PJSC «Krasnogorsky plant him S.A. Zvereva», Krasnogorsk

E-mail: galenin.den2013@yandex.ru

Abstract: *this article presents a developed schematic diagram of a heating automation system using Geffen MB 1.2 boilers and a functional diagram of a heating automation system based on an ECL Comfort 210 controller.*

Keywords: automation, boiler room, boiler unit, heat supply, controller.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из основных факторов, оказывающим непосредственное влияние на энергоэффективность систем горячего водоснабжения и отопления, является способность этих систем осуществлять поступление определенного количества тепла в соответствии с потребностями людей в данный момент времени и в зависимости от климатических условий. Данная возможность должна быть воплощена в жизнь с помощью комплексного регулирования параметров теплоносителя.

В современном мире одним из самых важных условий развития производства является использование современных ресурсо и энергосберегающих технологий, поэтому энергосбережение - одно из главных направлений промышленной политики в нашей стране. Это связано с необходимостью сохранения природных ресурсов, уменьшением влияния техногенных факторов на окружающую среду и повышением эффективности экономики [1].

Для повышения уровня эксплуатации сетей теплоснабжения зданий производят внедрение автоматизированных сетей управления технологическими процессами, что позволяет добиться следующего:

Автоматическое регулирование в системах отопления позволяет снизить расход тепловой энергии до 30%, а также:

1. Регулировать теплоноситель в системе отопления с учетом температуры наружного воздуха (погодная компенсация), что позволяет избежать перерасхода тепловой энергии в осенне-весенний периоды сезона отопления;

2. Управлять подачей теплоносителя по суточному и недельному графику теплопотребления и учитывать расход тепловой энергии в выходные дни и праздники;

3. Производить увеличение температуры в системе отопления зданий после периодов понижения температуры в помещениях, например, в ночное время, а затем переходить на оптимальный режим работы системы отопления;

4. Ограничивать максимальную и минимальную температуру теплоносителя; отключать систему отопления при определенной температуре наружного воздуха [2];

5. При отключенной в летнее время системе отопления поддерживать возможность функционирования циркуляционных насосов и регулирующих клапанов путем их кратковременного включения;

6. Регулировать температуру воды в системе горячего водоснабжения, а также выполнять другие типы регулировки, блокировки, защиты и сигнализации.

Система автоматического регулирования отопления зданий обеспечивает экономию и рациональное использование энергоресурсов и создает требуемый температурный режим в помещениях здания путем изменения расхода теплоносителя [3].

РАЗРАБОТКА ПРИНЦИПИАЛЬНОЙ СХЕМЫ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ ОТОПЛЕНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ КОТЛОАГРЕГАТОВ GEFFEN MB 1.2

Блок - схема крышной котельной на базе водогрейных котлоагрегатов здания для закрытой системы децентрализованного теплоснабжения при независимом присоединении отопления к тепловым сетям показана на рис. 1.

САР отопления здания содержит следующие приборы и оборудование:

- два циркуляционных насоса (позиция 1);
- специализированный контроллер ECL Comfort 210 для регулирования температуры в системе отопления и ГВС (позиция 2);
- трехходовой регулирующий клапан с исполнительным механизмом (позиция 7);
- накладные датчики температуры теплоносителя ТЕ1 в подающем трубопроводе системы отопления и ТЕ2 в обратном трубопроводе Т2 (позиция 3 и 4),

датчик температуры наружного воздуха здания (позиция 5);

- два пластинчатых теплообменника (позиция 9);
- обратный клапан (позиция 6);

Система горячего водоснабжения содержит следующие приборы и оборудование:

- два пластинчатых теплообменника (позиция 8);
- трехходовой регулирующий клапан с исполнительным механизмом (позиция 10);
- погружной датчик температуры (позиция 11);

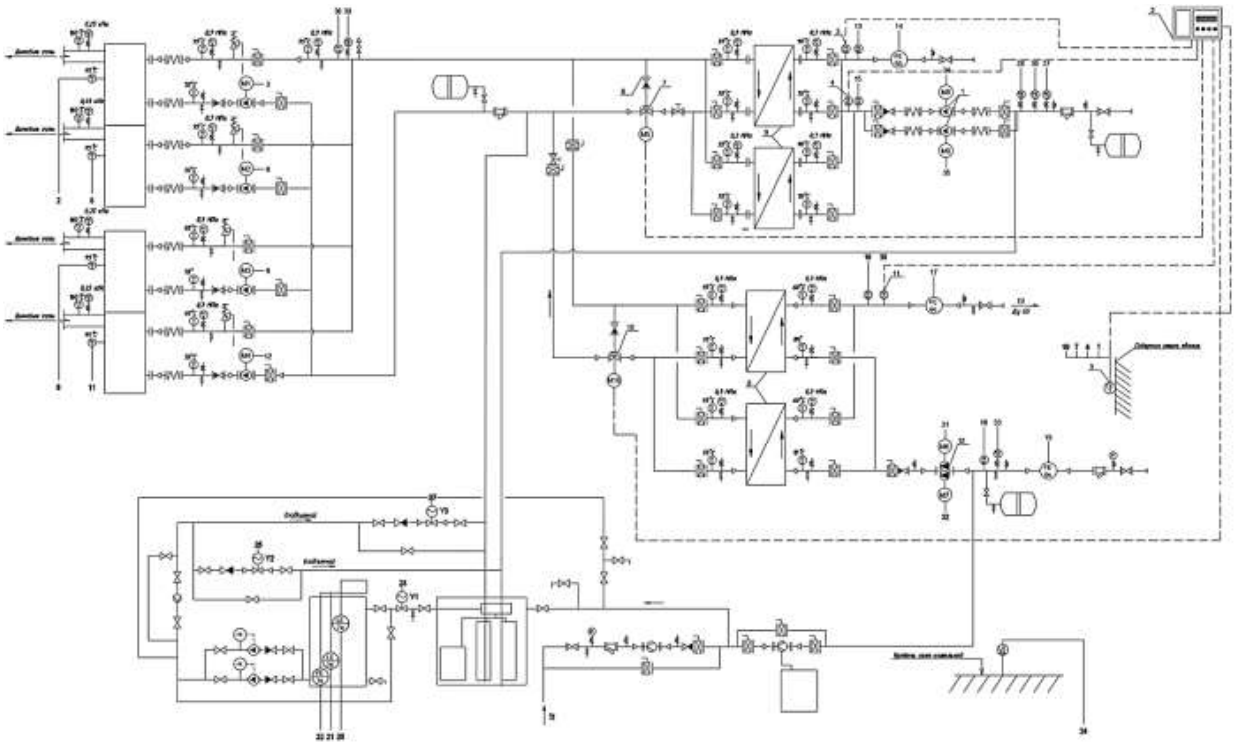


Рисунок 1.
Блок-схема крышной котельной

- блок управления насосами Wilo SK-702;

- моноблок циркуляционных насосов (позиция 12);

К контроллеру ECL Comfort 210 подключены:

- датчик температуры наружного воздуха;

- накладные датчики температуры (позиция 3,4,11) соответственно к аналоговым входам (X1–X4);

- исполнительный механизм М1 системы отопления соответственно к выходам ECL Comfort 210 (Y1) и исполнительный механизм М2 системы ГВС к выходу (Y2).

К блоку управления Wilo SK-702 подключены:

- датчик давления, подключенный к аналоговому входу (X1);

- электроприводы насосов (поз. 12) к выходам (Y1- Y2).

Основная особенность системы автоматического регулирования отопления здания состоит в том, что данная система позволяет регулировать температуру теплоносителя в системе отопления путем изменения расхода теплоносителя от внешних теплосетей учитывая подмес теплоносителя через перемычку с обратным клапаном [4].

При этом, в системе отопления даже при полностью открытом регулирующем клапане (с исполнительным механизмом), будет происходить подмешивание теплоносителя, за счет использования перемычки с обратным клапаном [5].

Основными особенностями контроллера специализированного типа ECL Comfort 210 использованного в системе отопления здания и ГВС являются:

- регулирование температуры в контуре отопления по отопительному графику;

- обеспечивает поддержание оптимальной температуры при минимальных затратах на тепловую энергию;

- использование электронных ключей программирования обеспечивающих минимальную настройку контроллера;

- архивирование значений температуры и сигнализаций об авариях за определенный период времени.

Схема подключения контроллера представлена на рис. 2.

Из данной схемы сразу становится понятна невозможность использования одного контроллера для нашей системы теплоснабжения, так как ECL Comfort 210 не имеет возмож-

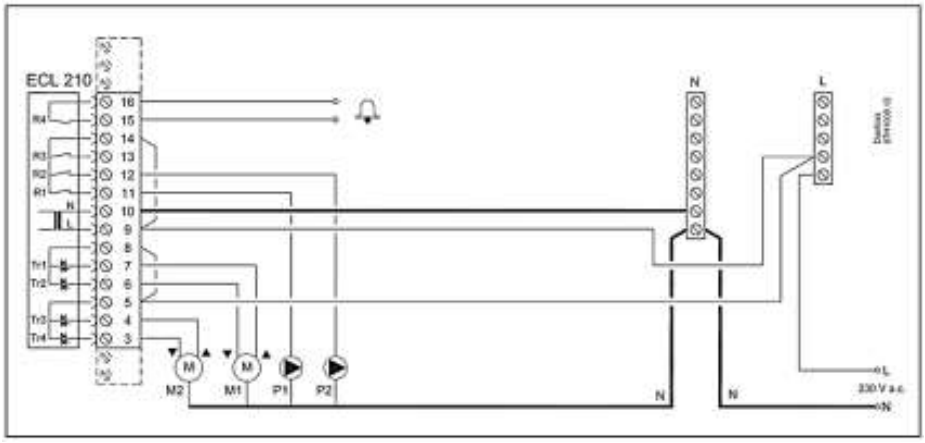


Рисунок 2.
Схема электрических соединений контроллера ECL Comfort 210

ности регулировать работу циркуляционных насосов и в системе отопления, и в системе горячего водоснабжения. Для функционирования заданной схемы необходимо дополнить контроллер ECL Comfort 210 дополнительным блоком управления Wilo SK-702, который предназначен для защиты, контроля и управления насосами в системах горячего и холодного водоснабжения.

РАЗРАБОТКА ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СХЕМ СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦИИ ОТОПЛЕНИЯ НА БАЗЕ КОНТРОЛЛЕРА ECL COMFORT 210

На рис. 3. представлена функциональная схема системы автоматического регулирования отопления здания на базе специализированного контроллера ECL Comfort 210.

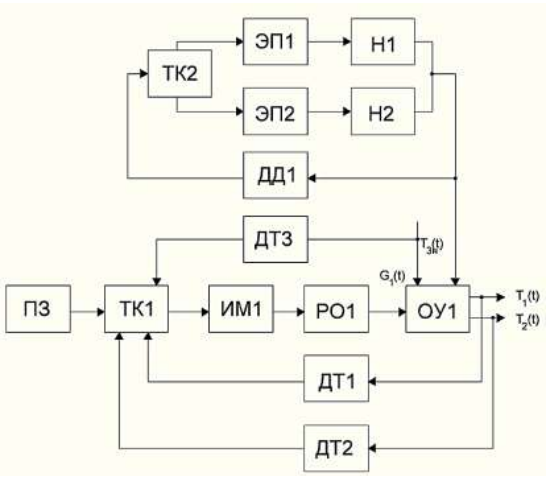


Рисунок 3.
Функциональная схема САР отопления здания на базе специализированного контроллера типа ECL Comfort 210

Функциональная схема САР отопления содержит:

- задатчик температуры ПЗ, для программного задания температуры в обратном трубопроводе;
- блоки ТК1 (управление температурным режимом) и ТК2 (управление ЭП насосов в СО) контроллера типа ECL Comfort 210;
- исполнительный механизм ИМ1;
- регулирующий орган РО1;
- накладной датчик температуры ДТ1 расположенный в подающем трубопроводе системы отопления;
- датчик температуры ДТ2 расположенный в типовом помещении здания;
- датчик температуры наружного воздуха ДТ3;
- датчик давления ДД1;
- объект управления ОУ1.
- электроприводы насосов ЭП1, ЭП2;
- насосы Н1, Н2.

Выходные величины ОУ1 следующие:

Выходные величины ОУ1 следующие:

- T1(t) – температура теплоносителя в СО здания;
- T2(t) – температура теплоносителя в обратном трубопроводе теплосетей.

Входные величины ОУ1 следующие:

- Т3н(t) – температура наружного воздуха;
- G1(t) – расход теплоносителя.

Рассмотрим особенности функционирования САР, функциональная схема которой показана на рис. 3.

В схеме САР отопления здания применяется 3 контура регулирования-1 по возмущению и 2 по отклонению. Контур регулирования по возмущению представлен с учетом датчика ДТ3, который определяет температуру наружного воздуха Т3н, контуры же регулирования по отклонению представлены с учетом датчиков ДТ1 (по температуре теплоносителя Т3 в системе отопления) и ДТ2 (по температуре воздуха в типовом помещении здания Т2) [6].

Первый контур регулирования по отклонению предназначен для управления температурой теплоносителя Т1(t) системы отопления путем изменения расхода теплоносителя G1(t) системы отопления. Этот контур регулирования функционирует на базе одного из блоков ПИ-регулятора контроллера ECL Comfort 210. Расход по этому контуру корректируется с учетом температуры воздуха в типовом помещении здания [7].

Также имеется контур регулирования для защиты системы теплоснабжения от превышения температуры теплоносителя Т2(t).

Первый контур регулирования системы работает следующим образом:

Согласно выбранному отопительному графику в самом контроллере и с учетом показаний датчика температуры ДТ1, в блоке обработки данных формируется задание для ПИ-регулятора контура отопления т.е. определяется температура уставки с целью поддержания необходимой температуры в системе отопления здания [8].

При возникновении в САР отклонения по температуре, в результате сравнения показаний датчика температуры ДТ1 и задатчика ПЗ, формируется управляющий сигнал в контроллере ТК для устранения этого отклонения:

$$\Delta_{t1} = f_{ПЗ}(t) – f_{ДТ1}(t), \quad (1)$$

где $f_{ПЗ}(t)$ – программное задание температуры в системе отопления, то есть уставка для регулятора ($T_{3у}$), определяемая в блоке обработки данных; $f_{ДТ1}(t)$ – данные от датчика температуры ДТ1.

Если температура в системе отопления здания увеличилась относительно уставки, то контроллер формирует управляющую команду, в результате которой исполнительный механизм ИМ1 перемещает шток регулирующего органа РО1 клапана, тем самым уменьшая подачу теплоносителя в систему отопления здания. При этом температура в системе отопления начнет уменьшаться. Перемещение штока будет происходить до тех пор, пока отклонение Δ_{t1} не станет равным нулю [9].

В случае уменьшения температуры теплоносителя относительно уставки регулирование происходит аналогичным образом. Контроллер формирует команду, подаваемую на исполнительный механизм, для увеличения температуры теплоносителя в системе отопления здания путем перемещения штока в другую сторону, до равенства показаний датчика ДТ1 и программного задания ПЗ.

Второй контур регулирования системы работает следующим образом:

Если в системе автоматического регулирования произойдет увеличение или уменьшение температуры на датчике ДТ2, выходящее за необходимый диапазон, то контроллер сформирует управляющую команду защищающую от этого изменения. ТК1 прерывает регулирование температуры по заданию $T_{3у}$ в контуре отопления и переходит на режим снижения температуры T_2 до значения при котором T_{2i} станет меньше максимально допустимой на некоторую величину Δ. После снижения температуры теплоносителя в обратном трубопроводе до заданной, контроллер ТК1 автоматически переходит в режим регулирования температуры в системе отопления здания [10].

ВЫВОД

По результатам проделанной работы можно сделать вывод, что была разработана принципиальная схема системы автоматизации отопления с применением котлоагрегатов Geffen MB 1.2, а также функциональная схема системы автоматизации отопления на базе контроллера ECL Comfort 210.

Список литературы:

1. *Потапенко А.Н.* Особенности имитационного моделирования управления процессом теплоснабжения зданий с учетом экспериментальных данных / А.Н. Потапенко, А.С. Солдатенков, А.О. Яковлев // Сб. докл. междунар.

науч.-практич. конф..Научные исследования, наносистемы и ресурсосберегающие технологии в стройиндустрии (XVIII научные чтения). –Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2007. – с. 98-101.

2. *Потапенко А.Н*. Управление процессом теплоснабжения зданий с возможностью имитационного моделирования / А.Н. Потапенко, А.С. Солдатенков, А.О. Яковлев // Сб. докл. Междунар. науч.- практич. конф.: Научные исследования, наносистемы и ресурсосберегающие технологии в стройиндустрии (XVIIIнаучные чтения). – Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2007. – с.102-106.

3. *Солдатенков А.С.* Инновации в автоматизированных системах централизованного и децентрализованного теплоснабжения зданий образовательного назначения / А.С. Солдатенков, Е.А. Потапенко, А.О. Яковлев // Известия Самарского научного центра. Российской академии наук. – 2010. – Т.12. №4 (3). – с. 618-622.

4. *Сканави А.Н.* Отопление / А.Н. Сканави, Л.М. Махов. – Москва: Изд-во АСВ, 2002. - 576 с.

5. *Шилькрот Е.О.* Эффективность систем отопления и вентиляции зданий / Е.О. Шилькрот // Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика (АВОК). – 2003. – №4. – с. 6-11.

6. *Потапенко А.Н*. Датчики и регуляторы в системах теплоснабжения: учебное пособие / А.Н. Потапенко – Белгород: Изд-во БГТУ, 2016. – 251 с.

7. *Солдатенков А.С*. Математическое моделирование системы управления теплопотреблением комплекса зданий: монография/А. С. Солдатенков. -Белгород: Изд-во БГТУ, 2015. -176 с.

8. *Галенин Д.В.* Расчет и построение переходной характеристики «датчик - объект управления» по заданному каналу регулирования с раскрытием структуры контроллера ECL COMFORT 310/ Д.В. Галенин, С.С. Бобенко// Международная научно-практическая конференция. -Чехия, 2017. -С. 31-35.

9. *Галенин Д.В*. Современные контроллеры в автоматизированных системах теплоснабжения / Д.В. Галенин, С.С. Бобенко//Международная научно-практическая конференция. -Казахстан, 2017. -С. 47-52.

10. *Галенин Д.В.* Разработка локальной системы автоматического регулирования подачи газа в горелочное устройство парового котлоагрегата / Д.В. Галенин, С.С. Бобенко//Международная научно-практическая конференция. -Молдаваия, 2017. -С. 17-22.

УДК 533.6

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КОЛЕБАНИЙ ЦЕЛЬНОПОВОРОТНОГО СТАБИЛИЗАТОРА В СВЕРХЗВУКОВОМ ПОТОКЕ

ЦЕЛИЩЕВ К.Н.

Публичное акционерное общество «Красногорский завод им. С.А. Зверева», г. Красногорск
3-я научная рота Космических войск Воздушно-космических сил РФ

E-mail: zkn1994@yandex.ru

Аннотация: *определение приращения аэродинамического давления, собственных частот и форм колебаний. Выявление критических скоростей флаттера и дивергенции. Пример расчета.*

Ключевые слова: стабилизатор, флаттер, устойчивость, сверхзвук, дивергенция, число Маха, собственная частота колебаний, аэродинамическое давление.

MATHEMATICAL MODEL OF OSCILLATIONS OF ALL-TURNING STABILIZER IN A SUPERSONIC FLOW

CELISHEV K.N.

PJSC «Krasnogorsky plant him S.A. Zvereva», Krasnogorsk

E-mail: zkn1994@yandex.ru

Abstract: *Determination of the aerodynamic pressure increment, natural frequencies and vibration modes. Identification of critical speeds of flutter and divergence. An example of calculation.*

Keywords: Stabilizer, flutter, stability, supersonic, divergence, Mach number, fundamental frequency, aerodynamic pressure.

ВВЕДЕНИЕ

Флаттер – сочетание самовозбуждающихся незатухающих изгибающих и крутящих автоколебаний. Возникает данное явление при достижении критических скоростей, присущих тем или иным характеристикам летательных аппаратов. Возникающий при этом резонанс может привести к последующему разрушению.

Цельноповоротный стабилизатор – полностью отклоняемая поверхность горизонтального оперения летательного аппарата.

Применяется данное решение на сверхзвуковых летательных аппаратах вместо обычных рулей высоты. Данный вид стабилизатора используется в конструкции как отечественных (Су-27, Як-130), так и зарубежных (F-16) самолётов.

Толчком к созданию цельноповоротного стабилизатора послужило огромное количество катастроф, связанных с крушением самолетов на сверхзвуковых и гиперзвуковых скоростях. Наиболее ярким примером такого случая был построенный в 1942 году самолет БИ-1 с жидкостным ракетным двигателем. Предполагалась эксплуатация данного самолета на скоростях до 1000 км/ч. Однако в 1943 году при полете на скорости свыше 800км/ч самолет вошел в пикирование, после чего разбился.

После изучения данного явления в аэродинамической трубе (Т-106 ЦАГИ) оказалось, что на дозвуковых скоростях отклонение руля высоты приводило к изменению давления на всей поверхности горизонтального оперения, однако при достижении сверхзуковой скорости отклонение руля высоты приводило к изменению давления только на поверхности руля.

Флаттер достаточно исследован в настоящее время на дозвуковых скоростях полета летательных аппаратов. В представленной работе выполнен расчет флаттера в сверхзвуковом диапазоне. Так же помимо флаттера рассматривается дивергенция (статическая устойчивость), представлены их границы (критические показатели скоростей) и способы их увеличения.

Для расчёта флаттера и дивергенции был составлен алгоритм для расчётной компьютерной программы и выполнен пример расчёта критической скорости флаттера.

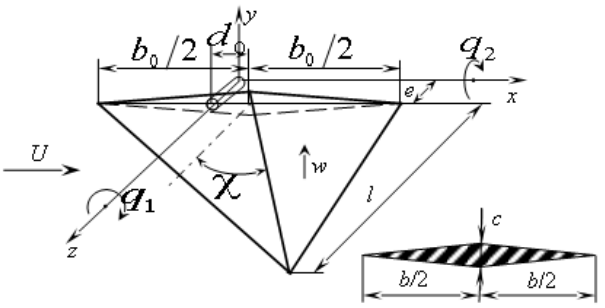


Рисунок 1.

Уравнения колебаний

Для решения поставленной задачи используется следующая модель стабилизатора (рис.1)

Имеется ось вращения (по оси z) длиной e, расположенная на расстоянии d_0 от оси стабилизатора. Ось стабилизатора повернута относительно оси вращения на угол χ. Длина хорды стабилизатора b. Скорость набегающего потока U, которая с хордой стабилизатора образует угол атаки α.

Перемещение стабилизатора в правой системе координат характеризуется величинами углов поворота q_1, q_2 и вертикального линейного перемещения w.

$q_1(t)$ – угол поворота относительно оси вращения *Oz*

$q_2(t)$ – угол поворота относительно оси *Ox*

Приращением местного угла атаки

$$\alpha = -\left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{1}{U}\frac{\partial w}{\partial t}\right) \qquad (1)$$

Нормальное перемещение стабилизатора

$$w(x,z,t) = q_1(t)\cdot\varphi_1(x,z) + q_2(t)\cdot\varphi_2(x,z) \qquad (2)$$

$$\varphi_1(x,z) = -x, \quad \varphi_2(x,z) = z.$$

Приращение местного угла атаки α приводит к приращению аэродинамического давления p, которое определяется выражением (3) при сверхзвуковых скоростях не превышающих скорость 4M и выражением (4) при гиперзвуковых скоростях:

1) при $1/\cos\chi < M < 4$

2) при M > 4

$$\Delta p = \frac{\rho U^2}{2}\frac{4}{\sqrt{M^2-1}}\alpha \ ; \qquad (3)$$

$$\Delta p = \frac{\rho U^2}{2}\frac{4}{M}\left\{1+\frac{\gamma+1}{4}M\left[\frac{\partial h}{\partial x}+\frac{M}{4}\left(\frac{\partial h}{\partial x}\right)^2+M\alpha_0^2\right]\right\}\alpha \qquad (4)$$

Вариация работы аэродинамических нагрузок

$$\delta A_{a/\partial} = \iint_S \Delta p \cdot \delta \cdot w ds = -\sum_{j=1}^{2}(d_{ij}\dot{q}_j + b_{ij}q_j)$$

Кинетическая и потенциальная энергии

$$T = \frac{1}{2}\iiint_V \rho \dot{w}^2 dV = \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{2}\sum_{j=1}^{2} m_{ij}\dot{q}_i\dot{q}_j$$

$$П = \frac{1}{2}k_{11}q_1^2 + \frac{1}{2}k_{22}q_2^2$$

Уравнение Лагранжа в обобщенных координатах

$$\frac{d}{dt}\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_j} - \frac{\partial T}{\partial q_j} + \frac{\partial \Pi}{\partial q_j} = Q_i, \qquad i = 1,2$$

УРАВНЕНИЯ КОЛЕБАНИЙ СТАБИЛИЗАТОРА

Под действием аэродинамического давления и упругих характеристик конструкции стабилизатор испытывает колебания, которые математически могут быть описаны дифференциальными уравнениями второго порядка относительно углов поворота:

$$\sum_{j=1}^{2}[m_{ij}q_j + d_{ij}q_j + (k_{ij}+b_{ij})q_j] = 0, \ i = 1,2,$$

Где $m_{ij} = \iint_S m\varphi_i\varphi_j dS \qquad d_{ij} = \frac{\rho U}{2}\iint_S \varphi_i P[\varphi_j]dS$

$$b_{ij} = M\bar{b}_{ij}, \qquad \bar{b}_{ij} = \frac{\rho U a_\infty}{2}\iint_S \varphi_i P\left[\frac{\partial \varphi_j}{\partial x}\right]dS$$

m_{ij} - коэффициенты инерции

d_{ij} - коэффициенты аэродинамического демпфирования

b_{ij} - коэффициенты аэродинамической жесткости

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОБСТВЕННЫХ ЧАСТОТ И ФОРМ КОЛЕБАНИЙ

Согласно теории колебаний, собственная частота колебаний стабилизатора на кручение и на изгиб определяется выражением **(7)**

Парциальные частоты кручения и изгиба:

$$\omega_{кр.} = \sqrt{\frac{k_{11}}{m_{11}}}, \quad \omega_{изг.} = \sqrt{\frac{k_{22}}{m_{22}}} \qquad \textbf{(7)}$$

Уравнение (5) фактически представляет собой систему двух дифференциальных уравнений.

Представляя решение этих уравнений относительно тригонометрических функций, можно перейти к системе линейных алгебраических уравнений относительно амплитуд колебаний q1, q2, которая имеет ненулевое решение в случае, если ее определитель (8) равен нулю.

То есть колебания возможны, если выполняется условие (8), которое называется частотным уравнением.

$$\begin{vmatrix} k_{11}-\omega^2 m_{11} & k_{12}-\omega^2 m_{12} \\ k_{21}-\omega^2 m_{21} & k_{22}-\omega^2 m_{22} \end{vmatrix} = 0 \qquad (8)$$

(8) имеет корни ω_1^2 и ω_2^2.

По соотношению найденных частот колебаний, может быть найдено соотношение амплитуд колебаний.

Принимая амплитуду угла поворота относительно оси oZ за единицу, могут быть определены собственные формы колебаний – выражение (9).

$$W_i(x,z) = -\bar{q}_1^{(i)}x + \bar{q}_2^{(i)}z, \quad i = 1, 2 \qquad (9)$$

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИТИЧЕСКИХ СКОРОСТЕЙ ФЛАТТЕРА И ДИВЕРГЕНЦИИ

Характеристическое уравнение системы (5) имеет вид:

$$\begin{vmatrix} \lambda^2 m_{11}+\lambda d_{11}+k_{11}+M\bar{b}_{11} & \lambda^2 m_{12}+\lambda d_{12}+k_{12}+M\bar{b}_{12} \\ \lambda^2 m_{21}+\lambda d_{21}+k_{21}+M\bar{b}_{21} & \lambda^2 m_{22}+\lambda d_{22}+k_{22}+M\bar{b}_{22} \end{vmatrix} = 0 \qquad (10)$$

Раскрывая определитель, получим уравнение 4 порядка:

$$a_4\lambda^4 + a_3\lambda^3 + a_2\lambda^2 + a_1\lambda + a_0 = 0\ , \qquad (11)$$

Корни уравнения (11) в общем случае являются комплексными $\lambda = \alpha \pm i\omega$,

случай $\alpha = 0$ является границей устойчивости:

на границе флаттера $\alpha = 0,\ \omega \neq 0$ и $\lambda = \pm i\omega$ (флаттер при) $\alpha > 0$ (12)

на границе дивергенции $\alpha = 0,\ \omega = 0$ и $\lambda = 0$ (дивергенция при) $\alpha > 0$

Условия (12) являются критерием устойчивости системы, по которым определяют наличие флаттера или дивергенции.

1. Если в уравнении (11) $\lambda = i\omega$ и приравнивая нулю отдельно его действительную и мнимую части, получим уравнение границы флаттера

$$a_1^2 a_4 - a_1 a_2 a_3 + a_0 a_3^2 = 0 \qquad (13)$$

и квадрат частоты колебаний на этой границе

$$\omega^2 = a_1 / a_3\ . \qquad (14)$$

Уравнение границы флаттера (13) с учётом формул для коэффициентов записывается в виде

$$p_2 M^2 + p_1 M + p_0 = 0\,, \qquad (15)$$

2. Если в уравнении (11) положить $\lambda = 0$, то получим уравнение границы дивергенции $\alpha_0 = 0$, которое с учётом формулы для коэффициента α_0 примет вид

$$C_2 M^2 + C_1 M + C_0 = 0\,. \qquad (16)$$

По уравнениям (15) и (16) определяются числа Маха, соответствующие флаттеру и дивергенции.

С учетом скорости звука определяются критические скорости флаттера и дивергенции:

$$U_{\text{фл.}} = a_\infty M_{\text{фл.}}\ ,\ U_{\text{див.}} = a_\infty M_{\text{див.}} \qquad (17)$$

Пример расчета

Используя весь приведенный теоретический материал, в качестве примера выполнен расчет частот собственных колебаний и их форм в зависимости от расстояния между осью вращения и осью стабилизатора.

Исходные данные:

$$l = 1 \text{ м},\ b_0 = 1 \text{ м},\ \bar{c} = c/b = 0.05\,,$$
$$\rho_0 = 2.7 \cdot 10^3\ кг/м^3\,,$$
$$k_{11} = 5.75 \cdot 10^4\ Н.м\,,\ k_{22} = 3.125 k_{11}\,,$$
$$d_0 / b_0 = -0.05\,;\ 0;\ 0.1.$$

Собственные частоты и формы колебаний стабилизатора в пустоте:

Для $d_0 = -0.05 \cdot b_0$:

$$\omega_1 = 0.9318\omega_{11}, \qquad W_1 = -x + 0.469z$$
$$\omega_2 = 1.8625\omega_{11}, \qquad W_2 = -x - 0.6823z\,.$$

Для $d_0 = 0.0$:

$$\omega_1 = 0.8411\omega_{11}, \qquad W_1 = -x + 0.4136z\,;$$
$$\omega_2 = 2.1018\omega_{11}, \qquad W_2 = -x - 0.77363z\,.$$

Для $d_0 = 0.1 \cdot b_0$

$$\omega_1 = 0.6788\omega_{11}, \qquad W_1 = -x + 0.3136z$$
$$\omega_2 = 2.4286\omega_{11}, \qquad W_2 = -x - 1.0203z\,.$$

где $\omega_{11} = \sqrt{\dfrac{k_{11}}{m_{11}}} = 226.078\ 1/c$ при $d_0 = 0.0$

Собственные значения $\lambda_k / \omega_1 = \alpha_k \pm i\beta_k$, (H = 5000 м, $\rho = 0.737\ кг/м^3$, $a_\infty = 320.7\ м/с$) при различных значениях d_0.

По результатам расчета построены графики зависимости действительных (рис. 2) и мнимых (рис. 3) частей условия границы устойчивости.

Так же приводится зависимость границы флаттера от высоты полета (рис. 4).

Действительные части собственных значений

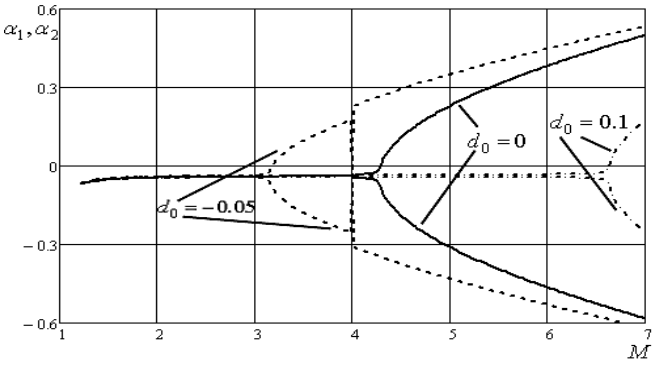


Рисунок 2.

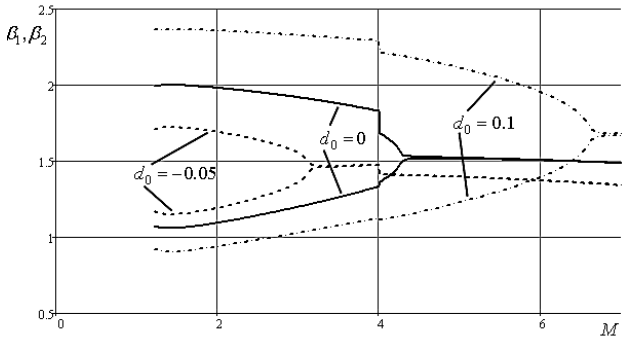


Рисунок 3.

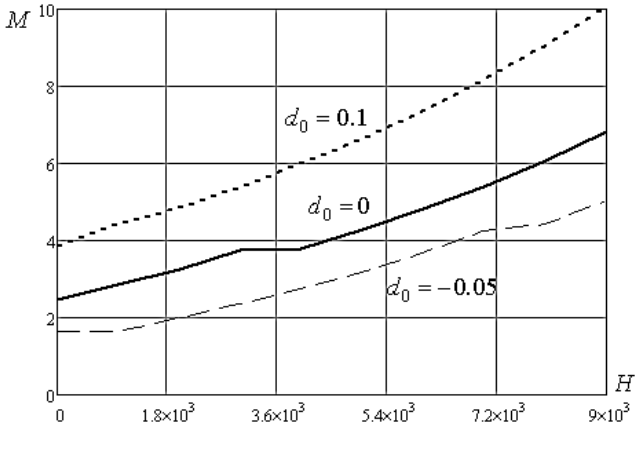


Рисунок 4.

ВЫВОД

По полученным результатам могут быть сделаны следующие выводы:

1) С увеличением высоты полета, скорость флаттера (число Маха) увеличивается.

2) Граница флаттера существенным образом зависит от взаимного положения оси вращения и продольной оси жесткости самого стабилизатора.

3) Для увеличения функциональных возможностей летательного аппарата, в частности, увеличение максимальной допускаемой скорости полета требуется сдвинуть границу флаттера на большие числа Маха. Исходя из графика рис.4 это достигается путем максимально возможного выноса вперед оси вращения стабилизатора относительно продольной оси жесткости стабилизатора.

Список литературы:

1. *Dr. Wernher von Braun* explains: Why Rockets Have Fins. // Popular Science. — September 1964. — Vol. 185 — No. 3 — P. 68-69, 184-185. (д-р Вернер фон Браун об оперении ракет)

2. *В.Г. Микеладзе, В. М. Титов.* Основные геометрические и аэродинамические характеристики самолётов и ракет., Москва. Машиностроение. 1990.

3. *Гришанина Т. В., Шклярчук Ф.Н.* Колебания упругих систем, Учебное пособие. — М.: Изд-во МАИ, 2013. — 100 с.: ил.

4. *Гришанина Т. В*. Управление нестационарными колебаниями, конечными передвижениями, деформированной формой и динамическими характеристиками упругих конструкций : Дис. ... д-ра физ.-мат. наук : 01.02.04 : М., 2004 306 с. РГБ ОД, 71:05-1/215.

5. *Долгов, О. С*. Моментно-инерционный фактор в формировании облика самолета : диссертация доктора технических наук : 05.07.02 / Долгов О. С.; [Место защиты: Моск. авиац. ин-т].- Москва, 2011.- 346 с.: ил. РГБ ОД, 71 13-5/8.

6. *Мусолин Н. В*. Влияние атмосферных возмущений на динамику полета воздушного судна Автореф. дис. на соиск. учен. степ. к.т.н. : Спец. 05.22.14.

7. *Иванов С. Е.* Исследование динамики источника электрической энергии из потока жидкости преобразователя возвратно-вращательного движения : магистерская диссертация / С. Е. Иванов ; Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ), Инженерная школа новых производственных технологий (ИШНПТ), Отделение материаловедения (ОМ) ; науч. рук. А. Н. Гаврилин. — Томск, 2018.

8.https://ru.wikipedia.org/wiki?%20curid=4083805

ПРАКТИЧЕСКИЕ ДОСТИЖЕНИЯ ГОИ им. С.И. ВАВИЛОВА, АО «ЛЫТКАРИНСКИЙ ЗАВОД ОПТИЧЕСКОГО СТЕКЛА» И ПАО «КРАСНОГОРСКИЙ ЗАВОД им. С.А. ЗВЕРЕВА» ПО СОЗДАНИЮ ДЛИННОФОКУСНЫХ ОБЪЕКТИВОВ ДЛЯ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

АРХИПОВ С.А.[1], АРХИПОВА Л.Н.[2], ЛИНЬКО В.М.[1], МОРОЗОВ С.А.[1], ПОНИН О.В.[3], ШАРОВ А.А.[3]

[1]ПАО «Красногорский завод им. С.А. Зверева»
[2]АО ГОИ им. С.И. Вавилова
[3]АО «Лыткаринский завод оптического стекла»

E-mail: da23@mail.ru

Аннотация: *В 2018 году АО «Государственный институт им. С.И. Вавилова» отметило свой 100 летний юбилей. В 2019 году уникальное многопрофильное предприятие АО «Лыткаринский завод оптического стекла» отметит 80-летие создания. Этот год также знаменателен для специального конструкторского бюро №1 ПАО «Красногорский завод им. С.А. Зверева», которому в 2019 году исполнится 75 лет. Одна из славных трудовых научно-технических страниц истории этих предприятий, связанная с созданием крупногабаритных объективов для аппаратуры дистанционного зондирования Земли, представлена читателям в настоящей статье.*

Ключевые слова: история автоматической космической фотоаппаратуры, совместная работа с ГОИ С.И.Вавилова, программно-методическое обеспечение.

Abstract: *In 2018, JSC «State Institute. S. I. Vavilov» celebrated its 100th anniversary. In 2019, a unique diversified enterprise JSC «the Lytkarino optical glass factory» will celebrate the 80th anniversary of creation. This year is also significant for the special design Bureau №1 of PJSC «Krasnogorsk plant. S. A. Zvereva», who in 2019 will be 75 years old. One of the glorious labor scientific and technical pages of the history of these enterprises, associated with the creation of large-size lenses for remote sensing Equipment, presented to readers in this article.*

Keywords: history of the automatic space photoequipment, collaboration about S.I. Vavilov's GOI, program and methodical providing.

КРАТКИЙ ЭКСКУРС В ИСТОРИЮ АВТОМАТИЧЕСКОЙ КОСМИЧЕСКОЙ ФОТОАППАРАТУРЫ ДЕТАЛЬНОГО НАБЛЮДЕНИЯ [1,2]

Первый успешный запуск космического аппарата (КА) «Зенит-2» с фотоаппаратурой «Фтор-2» был осуществлен 26 апреля 1962 г. Выведенный на орбиту спутник получил открытое наименование «Космос-4». Аппаратура «Фтор-2» была построена на основе разработанных Государственным оптическим институтом (ГОИ) и изготовленных Красногорским механическим заводом (КМЗ) линзовых объективов «Ленинград-9» (f =1000 мм, $D_{зрачка}$=164 мм, m=8,5 кг). Полученная аппаратурой информация оказалась пригодной для решения важных стратегических и широкого круга народнохозяйственных задач.

В ноябре 1963 года состоялся запуск КА «Зенит-4», для которого в КМЗ была создана уникальная, принципиально новая фотоаппаратура «Фтор-4» с разработанным в ГОИ длиннофокусным объективом «Титан-3» (f =3000 мм, $D_{зрачка}$=310 мм, m=76 кг). Успешная эксплуатация аппаратуры «Фтор-4» подтвердила правильность решений, как по космическому аппарату, так и по фотоаппаратуре. Главный конструктор аппаратуры лауреат Ленинской премии, к.т.н. А.К Меньков.

Далее последовали фотоаппаратура «Фтор-6» с объективом «Титан-3А» для КА «Зенит-4М» (1964 г., главный конструктор аппаратуры - А.К Меньков) и аппаратура «Жемчуг-3» на базе двух объективов «Телегоир-12Б» (f =3000 мм, $D_{зрачка}$=395 мм, m=160 кг), установленная на КА «Зенит-4МК» (1968 г., главный конструктор аппаратуры лауреат Ленинской премии, к.т.н. Ю.В. Рябушкин).

Информативность получаемых космических снимков Земли повышалась с каждым новым изделием.

В 1968-72 гг. в СКБ-1 КМЗ был создан топографический стереоскопический комплекс «Жемчуг-5» для КА «Зенит-4МТ» на базе разработанного ГОИ объектива «Ортогон-11А» (f =250 мм, D=340 мм, m=42 кг). Главный конструктор аппаратуры– лауреат Государственной премии СССР В.И. Осипов. Серийное производство комплекса «Жемчуг-5» было передано БелОМО. За 10 лет было произведено 23 успешных запуска КА «Зенит-4МТ» с аппаратурой «Жемчуг-5». Полученная информация позволила создать топографические карты (М 1:50000) на всю территорию России и многих зарубежных стран.

Начиная с 1967 г., параллельно с работами по фотоаппаратуре для КА типа «Зенит-4», проводились работы по созданию аппаратуры для нового КА детального фотонаблюдения типа «Янтарь». Была разработана оригинальная конструктивно-компоновочная схема построения в которой тонкостенный конусообразный корпус фотоаппаратуры «Жемчуг-4» совмещен с корпусом КА. Полученный при этом значительный резерв массы и габаритов был использован на улучшение характеристик объектива и, как следствие информативности аппаратуры. Для этой аппаратуры создан объектив «Мезон - 2А» (f =3000 мм, $D_{зрачка}$=530 мм, m=455 кг). Расчет оптической схемы объектива «Мезон-2А» выполнен в ГОИ, конструкцию разработали специалисты СКБ-1 КМЗ. Опытный образец объектива был изготовлен на КМЗ, а производство серийных образцов передано в Лыткаринский завод оптического стекла (ЛЗОС).

Дальнейшая модернизация «Жемчуга-4» – фотоаппаратура «Жемчуг-18» (1978-80 годы) с апохроматом «Кентавр» была предложена Красногорским заводом для КА «Янтарь-4К1», который отличался от КА «Янтарь-2К» большей продолжительность полета. Применение нового объектива позволило достигнуть более высокого уровня пространственного разрешения.

В аппаратуре «Жемчуг-22» (главный конструктор аппаратуры Лауреат Государственной премии СССР Е.Н. Герасимов) был установлен разработанный в ГОИ объектив-апохромат «Апо-Марс-3А» (f =3000 мм, $D_{зрачка}$=522 мм, m=330 кг). С 1981 по 2002 год на орбите успешно отработали 78 КА «Янтарь-4К2». обеспечивая потребителей важнейшей стратегической информацией.

Направление аппаратуры для обзорного фотонаблюдения и топографической съемки

продолжила панорамная фотоаппаратура «Топаз» для КА «Янтарь-1КФТ» на базе разработанного ГОИ широкоугольного светосильного ортоскопического объектива «Апо-Октон-8» (*f* =1000 мм, $D_{зрачка}$=209 мм, m=30 кг). Главные конструкторы аппаратуры – Ю.В. Рябушкин и Е.Н. Герасимов). Всего за 1981-2005 годы успешно запущен 21 КА «Янтарь-1КФТ», получены изображения Земли общей площадью более 600 млн км^2, что соответствует площади планеты.

Панорамный фотоаппарат 17В39, разработанный специалистами СКБ-1 КМЗ для КА «Янтарь-1КФТ», имел характеристики, превосходящие американский аналог КН-9 ***Hexagon***. Оптическая схема 17В39 строилась на основе объектива «Апо-Марс-8В» (разработка – ГОИ, изготовление ЛЗОС). Главный конструктор – лауреат Государственной премии СССР Е.Н.Герасимов. Разработчики панорамного фотоаппарата 17В39 удостоены высоких государственных наград. Звание лауреат Государственной премии СССР удостоены: Гоев А.И., Некрасов В.В., Барсуков Ю.Б.

РАБОТЫ ГОИ им. С.И. ВАВИЛОВА ПО СОЗДАНИЮ ОБЪЕКТИВОВ ДЛЯ АППАРАТУРЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

Создателем и главным конструктором объективов, разработанных ГОИ им. С.И. Вавилова для аппаратуры дистанционного зондирования Земли, был д.т.н., лауреат Сталинской и Ленинской премий Давид Самуилович Волосов. Ближайшими помощниками Давида Самуиловича были сотрудники ГОИ: Ш.Я. Печатникова, Ю.А. Гоголев, Г.И. Нифонтов, С.С. Гилев. Огромную расчетную аналитическую работу по расчету объективов выполняли сотрудники отдела ГОИ Г.И. Лебедева, Л.Н. Архипова, В.В. Тарабукин.

Еще в середине 50-х годов Д.С. Волосовым была разработана теория термобарических аберраций [3-5], на основе которой созданы оптические схемы длиннофокусных телеобъективов и широкоугольных ортоскопических анастигматов.

Первые отечественные космические фотографические аппараты, установленные на КА «Зенит-2» были оснащены линзовым телеобъективом «Ленинград-9» и широкоугольным топографическим объективом «Орион-20» (фокусное расстояние 200 мм, угловое поле 65°). Полученные фотоснимки Земли подтвердили прогнозы разработчиков относительно уровня разрешающей способности и дали возможность определить основные направления развития космического объективостроения.

Повышение разрешающей способности фотоаппаратуры потребовало, как увеличения фокусного расстояния (масштаба съемки), так и светосилы объективов (из-за применения высокоразрешающих фотопленок с относительно невысокой светочувствительностью). При этом качество изображения объективов должно было быть доведено до уровня, близкого к дифракционному пределу, массогабаритные характеристики должны быть минимизированы, а устойчивость к внешним воздействиям должна сохраняться на всех этапах эксплуатации.

Для решения этих непростых задач в 60-70 годы ГОИ им. С.И. Вавилова был проведен комплекс работ, среди которых особо следует отметить [6]:

- разработку методов расчета объективов-апохроматов на основе развития теории аберраций оптических систем и создания специализированных программ расчета, обеспечивающих автоматизированную коррекцию аберраций с оценкой критериев качества изображения;

- применение новых оптических материалов с целенаправленно заданными физико-химическими свойствами, в том числе с особым ходом дисперсии показателей преломления, требования к которым определялись разработчиками оптических систем;

- создание теории, методов и программ расчета температурных полей и деформаций оптических деталей, термооптических аберраций и оценки качества изображения с учетом термобарических условий эксплуатации;

- поиск принципиально новых, оригинальных оптических схем.

Под руководством Волосова Д.С. была создана программа автоматизированной коррек-

ции аберраций [7] , которая аккумулировала опыт разработки коллектива создателей космической оптики.

В ранних разработках оптических систем перечень используемых оптических материалов был весьма ограничен, в 40-50 годы реально применялось не более 10 марок стекол (см. таблицу 1 [8]). Но уже к 70-м годам, на основе исследований, проведенных отечественными учеными-химиками К.С. Евстропьевым, А.К, Яхкиндом, М.С. Генрихом, Л.Н. Урусовской, О.С. Шавелевым, Е.Н. Ефимовым, З.Н. Щегловой были созданы промышленные технологии варки бороланталовых, фосфатных и фторфосфатных стекол. Возможности расчётчиков по номенклатуре марок стекол возросли более, чем в два раза.

По заданию расчетчиков ГОИ были разработаны составы, а затем и технология изготовления крупногабаритных высокооднородных заготовок из стекла ОФ-4 и ОФ-6 диаметром до 700 мм с уменьшенной деформацией волнового фронта, высокими требованиями по отклонениям дисперсии.

В ГОИ и на Изюмском приборостроительном заводе эта технология была внедрена, получены уникальные заготовки, удовлетворяющие техническим условиям всем параметрам качества:

- из ОФ-4 размером ø660×120 мм,
- из ОФ-6 размером ø560×130 мм.

В 1960-70 годы под руководством лауреата Государственных премий СССР, академика РАН, директора Филиала № 1 ГОИ (НИТИОМ) Г.Т. Петровского и главного конструктора космических объективов, профессора Д.С. Волосова были определены марки оптических стекол, которые требовали совершенствования светопропускания и оптической однородности с учетом увеличения диаметра оптики до 500 мм, а позднее до 700 мм [9]. Особое внимание уделялось маркам стекол типа СТК, ТК, ТФ. Использование стекол СТК-3, ОФ-4, ОФ-6 для объективов с входным зрачком диаметром около 500 мм позволило существенно (приблизительно на порядок) уменьшить хроматические аберрации и благодаря этому в 2-3 раза повысить разрешающую способность при одновременном расширении рабочего спектрального диапазона.

Совместными усилиями разработчиков оптических систем и исследователей оптических материалов были решены задачи по измерениям показателей преломления и дисперсии с точностью до 2-3 10-6, контролю однородности и бессвильности заготовок, что позволило наладить серийный выпуск плеяды высокоразрешающих апохроматов: «Апо-Марс-3А», «Апо-Марс-8В», «Актиний-4А», «Апо-Октон-8» и т.д. [8].

В 1959 году лауреат Сталинских премий Г.Г. Слюсарев [10] исследовал влияние градиента температуры на изображение, рассмо-

Таблица 1.

Номенклатура оптических материалов, используемых в космических оптических системах

Марка стекла	1940-1950 гг.	1950-1970 гг.
	Номер марки	
К	8,19	
ЛК	3,5	3,5,7
БК	6,8	6,8,12
ТК	4,13,16	4,13,14,16,21,23,120,113,116
СТК	7	3,7,9,19,112,119
БФ	6,12,21	12,13,16,25,27,28
ТФ	2,4,5,7	2,4,5,8,12,107
ЛФ		105
Ф	1	1,4,13
ФК		13,14
КФ		4
ОК		1,2
ОФ		4,6
Кристаллы		КУ,КВ,ФКУ, ФБ

трел случаи линейного и параболического распределения температуры в плоскопараллельной пластинке, клине и линзе.

Дальнейшее обобщение и развитие проблемы температурных эффектов в оптических системах получила в работах Ю.П. Шрамко [11-13]. Им создана методика и программа расчета термооптических аберраций высокоточных оптических систем и их элементов, которые эксплуатируются в условиях изменяющихся внешних тепловых потоков, проведён значительный объем работ по расчету и оптимизации тепловых режимов различного типа оптических систем.

Проблема термостабильности крупногабаритных объективов и оптико-фотографической аппаратуры в 60-80 годы была ключевой, успешность ее решения определяла качество получаемых фотоснимков.

Работы, при головной научной роли ГОИ им. С.И. Вавилова, разворачивалось комплексно, в различных направлениях.

Экспериментальное исследование термостабильности объективов и оптико-фотографической аппаратуры, в дополнение к исследованиям ГОИ, проводили специалисты КМЗ (Шпачинский В.Н., Шумлова И.А.), ГИПО (г. Казань). Отрабатывались конструкторские решения по защите от внешних тепловых потоков, за счет нанесения на внешнюю поверхность иллюминатора специальной теплоотражающей в ИК области спектра пленки SnO_2, по увеличению термоустойчивости применяемых объективов и аппаратуры в целом.

Теоретические основы расчетов нестационарных температурных режимов объективов и фотоаппаратуры создавали сотрудники кафедры теплофизики ЛИТМО под руководством Г.Н. Дульнева [14].

Специалисты ГОИ (Денисюк Г.В.) совместно с Красногорским заводом разрабатывали системы автоматической фокусировки объективов АФО.

Головной разработчик космических аппаратов ЦСКБ создавал прецизионные жидкостные системы термостатирования.

На рисунке 1 приведена фотография чертежа конструкции объектива «Ленинград-9» с теплоизоляцией первых компонентов объектива теплостойким пластиком АГВ-4.

На рисунке 2 фотография Графика изменения температуры воздуха и смещения плоскости наилучшего изображения аппаратуры «Фтор-2» с объективом «Ленинград-9». Система термостатирования в то время обеспечивала изменение скорости температуры в пределах 5°С/час.

В 70-е годы Волосовым Д.С. была разрабо-

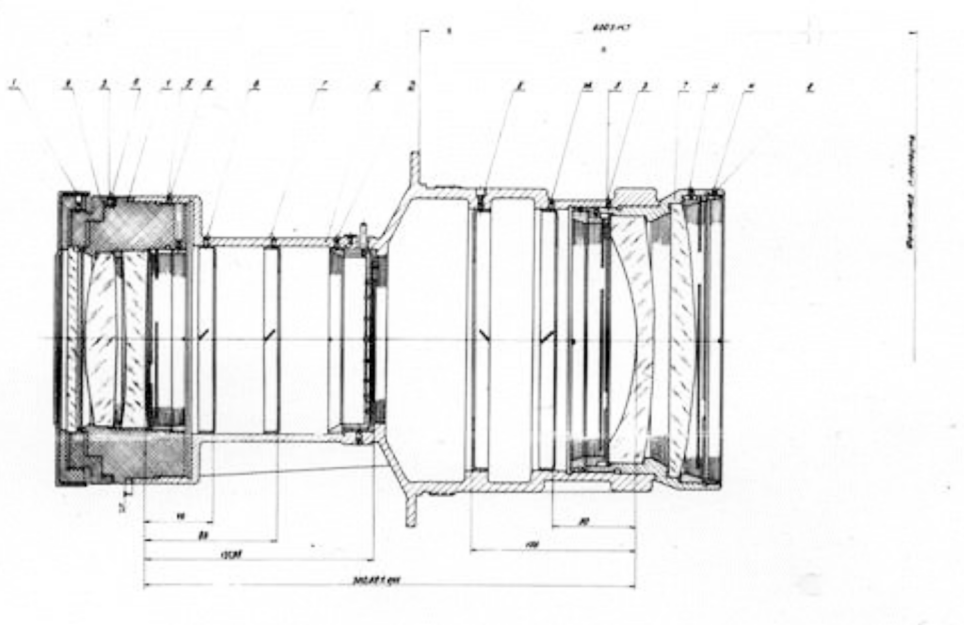


Рисунок 1.
Фотография чертежа конструкции объектива «Ленинград-9»

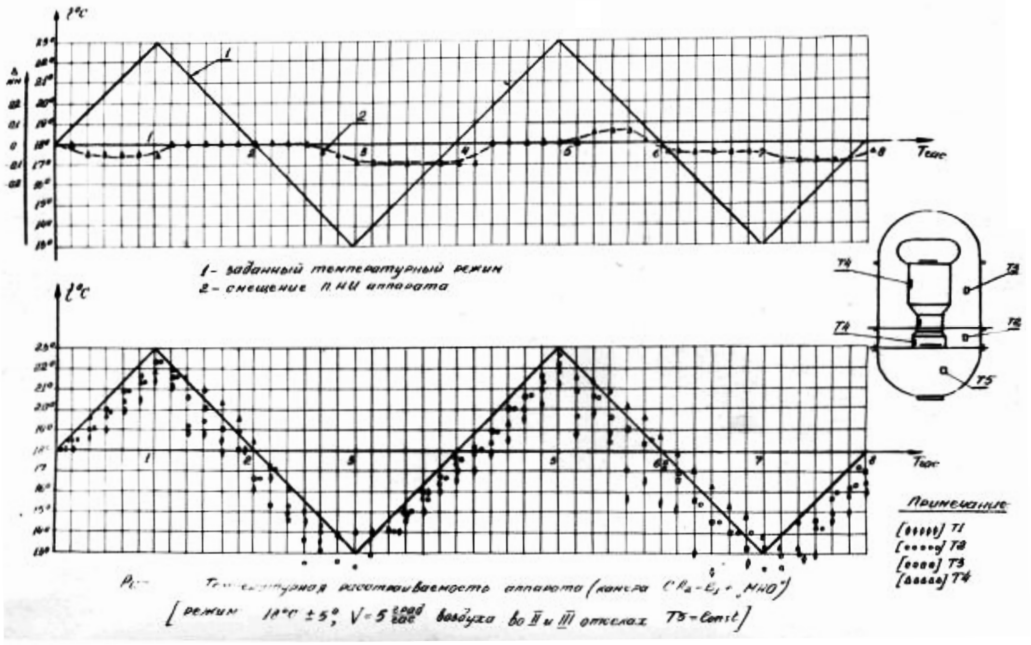


Рисунок 2.
Фотография из отчета по испытаниям аппаратуры «Фтор-2»

тана теория термохроматических аберраций и сформулированы требования к основным параметрам стекол для крупногабаритных высокоразрешающих объективов [15]. Такие стекла обеспечили возможность создания принципиально новых по своим характеристикам объективов – термоустойчивых апохроматов-анастигматов. Были определены марки оптических стекол, которые удовлетворяют требованиям повышения светопропускания и оптической однородности с учетом диаметра оптики до 700 мм. Особое внимание уделялось стеклам с высоким показателем преломления, а также стеклам – заменителям кристаллов с особыми дисперсионными свойствами.

Подводя в 1978 году итоги работ в области объективостроения, Д.С. Волосов в статьях [16,17] отметил значительный объем проведенных теоретико-методических, расчетных, конструкторских и оптотехнических и фототехнических работ, которые позволили достигнуть высоких технических характеристик объективов, указал на комплексный характер современных задач и сформулировал кардинальные проблемы, определяющие дальнейшее перспективное развитие объективостроения:

– развитие методологии построения алгоритмов для автоматизации проектирования оптических схем с учетом конкретных условий их применения;

– совершенствование методов автоматизированного проектирования оптимальных в технологическом смысле конструктивных элементов оптики объектива;

– развитие ускоренных методов контроля качества поверхностей линз в процессе их изготовления и тонкой доводки;

– автоматизация всего цикла изготовления линз на основе интерференционных методов контроля;

– создание автоматизированных методов оценки качества изображения системы для различных приемников изображения.

Сформулированные Д.С. Волосовым проблемы остаются актуальными и сегодня.

РАЗВИТИЕ ПРОГРАММНО-МЕТОДИЧЕСКОЙ, ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ БАЗЫ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ И КОНТРОЛЯ КРУПНОГАБАРИТНОЙ ЛИНЗОВОЙ ОПТИКИ

В ГОИ им. С.И. Вавилова не только осуществлялись расчеты объективов, но также разрабатывались контрольные системы, необходимые для изготовления линз или зеркал, стенды для предполетной аттестации объективов и

съемочной аппаратуры.

С 1962 г. в филиале №2 ГОИ (г. Сосоновый Бор) были начаты работы по созданию стендов (ТОВК-15, ВК-15, ЮСК-77), оснащенных оптическими устройствами для исследования термооптических аберраций оптических элементов и систем [18]. Эти стенды предназначались прежде всего для отработки крупногабаритных объективов типа «Мезон», «Комета» «Апо-Марс». Работы проводились по двум направлениям:

– разработка и изготовление технологического и оптотехнического термовакуумного оборудования для испытаний крупногабаритных оптических элементов и приборов, в условиях, имитирующих орбитальную эксплуатацию;

– ыэкспериментальные исследования влияния вакуума и нестационарных температурных полей на характеристики, работу и качество изображения крупногабаритных длиннофокусных объективов, зеркал различных конструкций, конструкций фото- и оптико-электронной аппаратуры.

Была разработана оптическая скамья ЮСК-77 на основе зеркального объектива схемы Ньютона с диаметром зеркала 985 мм и фокусным расстоянием 15 м, светоделительной пластиной диаметром 850 мм. Аналогична скамья изготовлена и введена в действие КМЗ и ЛЗОС. В дальнейшем ГОИ провел модернизацию оптической скамьи ЮСК-77 до диаметра 1850 мм.

Создан термовакуумный стенд ВК-15 для имитации тепловых воздействий и вакуума на исследуемый прибор с одновременным контролем его терморасстраиваемости, включающий автоколлимационную схему с плоским зеркалом диаметром 800 мм.

В Сосновом Бору построен уникальный термовакуумный комплекс ВК-150 с объемом вакуумной камеры в 150 м^3, предназначенный для исследования крупногабаритных длиннофокусных объективов, зеркал различных конструкций, оптико-фотографических и оптико-электронных приборов. В 1980 году на базе ВК-150 специалистами ГОИ и КМЗ проводились исследования влияния вакуума и переменных температурных режимов на смещение плоскости наилучшего изображения и погрешности работы автоматической фокусировки изделия «Жемчуг-22», с учетом работы эталонного зеркального уголкового отражателя [19].

Специалистами ГОИ проведено обоснование перехода от горизонтальных схем коллиматора к вертикальным для контроля характеристик и качества изображения крупногабаритных приборов с диаметром главного зеркал более 1500 мм [20].

В большинстве случаев в ГОИ разрабатывалась конструкция объективов, осуществлялось изготовление и испытания опытного образца каждого нового объектива, после чего отработанная технология внедрялась на предприятиях отрасли. Ведущим конструктором объективов, созданных ГОИ был Е.А. Васильев, разработавший типовые конструкции оправ, принципы высокоточной установки и фиксации крупногабаритных линз в оправах, базовую конструкторскую и технологическую документацию на сборку крупногабаритных конструкций объективов.

В 1972 году Постановлением ЦК КПСС изготовление крупногабаритных линзовых объективов для аппаратуры космического назначения поручено ЛЗОС. Приказом генерального директора ЛЗОС В.А. Шестакова организовано специальное направление, в состав которого вошли лучшие специалисты и рабочие завода.

Впечатляют темпы освоения нового производства. В начале 1972 года создается специализированный механосборочный цех № 22 (начальник – В.И. Клеянкин), организуется конструкторское подразделение № 57 во главе с Р.А. Михневым, в цехе № 18 создается специализированный участок по производству крупногабаритных оптических деталей, возглавляемый заместителем начальника цеха В.М. Жуковым. А уже в июле 1972 года изготовлен первый крупногабаритный линзовый объектив «Телегоир-12Б». В 1973 году завод осваивает изготовление объектива «Мезон-2А» с более высокими техническими характеристиками.

В становлении производства крупногабаритных линзовых объективов (КГЛО) внесли участвовали специалисты различных профилей и направлений ЛЗОС, среди них следует

отметить разработки нестандартному оборудованию, выполненные под руководством начальника отдела главного конструктора С.К. Штанделя. Главным метрологом в период становления производства КГЛО с 1973 по 1976 год был В.В. Румянцев, создавший метрологическую базу производства КГЛО. Вскоре он возглавил специализированный конструкторско-технологический отдел, созданный под задачи развития создания и производства КГЛО, стал первым главным конструктором направления (главным конструктором КГЛО). Под руководством В.В. Румянцева была создана школа крупногабаритного объективостроения. ЛЗОС получил всесоюзное признание как лидер производства КГЛО, как со стороны научного руководителя – ГОИ, так и со стороны создателей космической аппаратуры – КМЗ, ЦСКБ и завода «Прогресс». Заместителем главного конструктора направления в этот период был В.П. Давиденко – основатель школы юстировки КГЛО на ЛЗОС.

С 1983 года по 1986 год В.П. Давиденко работает главным конструктором направления. Этот период – пик производства КГЛО – освоены десятки новых объективов для различных классов космической фотоаппаратуры, в юстировке КГЛО совершен прорыв – освоены автоматизированные методы доводки оптики на основе автоматизированной регистрации интерферометрических результатов контроля, применения ЭВМ и специального программного обеспечения. Цехом изготовления и сборки КГЛО руководит талантливый организатор производства В.А. Макаров.

С 1986 по 1994 годы направление крупногабаритного объективостроения возглавляет главный конструктор С.П. Белоусов. В эти годы созданы уникальные изделия: «Апо-Марс-9А», не имеющий мировых аналогов, и объектив «Апо-Марс-8В» для панорамной аппаратуры 17В39. Был достигнут физический и оптотехнический максимум возможностей линзовых крупногабаритных объективов.

С 1994 года главным конструктором направления работает О.В. Понин. На период его руководства пришлось как тяжелые времена, связанные со спадом производства, решением задач по сохранению кадрового состава и производства в целом, так и выход на новый уровень – создание КГЛО «Актиний-4АГ» для КА «Ресурс-П», единственной в настоящее время группировки КА для высокодетальной съемки.

Всего за годы производства КГЛО завод выпустил около 800 объективов двенадцати типов для решения различных задач ДЗЗ в интересах народного хозяйства и МО РФ.

Лауреатами Государственной премии в этой области стали А.В. Самойлов, В.В. Румянцев, С.П. Белоусов; премии Совета Министров – В.П. Давиденко; звания «Заслуженный технолог России» удостоен В.М. Горобец; «Заслуженный машиностроитель России» – А.П. Кулаков, «Заслуженный конструктор России» – О.В. Понин.

Реализация дифракционного качества изображения, которые должны иметь длиннофокусные космические объективы, стала возможной благодаря созданию в ГОИ компьютерных методов восстановления и анализа волновых фронтов реальных оптических систем [21]. Интерферограммы крупногабаритных объективов регистрировались в компактной автоколлимационной схеме как для точки на оси, так и для внеосевых точек по полю зрения при различных ориентировках объективов.

На основе восстановленных по интерферограммам топографий деформаций волновых фронтов строилась математическая модель «реальной» оптической системы, которая позволяла не только прогнозировать качество изображения, формируемого космическим объективом, но и выполнять компенсационную доводку оптической системы объектива-апохромата [22].

Специалистами ГОИ было исследовано [23] влияние погрешности измерения показателей преломления и дисперсии на вторичный спектр и ЧКХ высокоразрешающих апохроматов в рабочем диапазоне длин волн.

Расчет показал, что для сохранения хроматической коррекции в апохроматах необходима погрешность измерения дисперсии $\pm 1 \cdot 10^{-6}$, что в три раза меньше, чем достигнутый в промышленности уровень $\pm 3 \cdot 10^{-6}$. Погрешность измерения показателя преломления должна

быть $\pm 2 \cdot 10^{-5}$, что практически реализуется. Исследования погрешностей вычисления показателей преломления по различным интерполяционным формулам показали, что применительно к высокоразрешающим апохроматам ни одна из интерполяционных формул не является надежной.

Таким образом информацию о хроматической коррекции высокоразрешающих апохроматов, имеющуюся на стадии расчета, нельзя считать достаточно надежной.

Предложено на этапе окончательной сборки и юстировки системы предусматривать возможность изменения комбинации воздушных промежутков системы, обеспечивающих коррекцию (разворот) вторичного спектра системы при сохранении монохроматических аберраций.

В обеспечение развития и серийного производства бортовой космической аппаратуры видового наблюдения Постановлением ЦК КПСС от 31.05.1976 г. на Красногорском заводе построены:

– лабораторно-производственный комплекс площадью 15 тыс. кв. м,

– производственно-испытательного комплекса площадью 30 тыс. кв. м ,

– оптический комплекс площадью 10 тыс. кв.м,

– инженерно-технологический комплекс площадью 8 тыс. кв. м ,

– больничный комплекс,

– дом культуры «Подмосковье».

ЭВОЛЮЦИЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ЛИНЗОВЫХ ОБЪЕКТИВОВ ДЛЯ СЪЕМОЧНОЙ АППАРАТУРЫ ДЕТАЛЬНОГО НАБЛЮДЕНИЯ

В таблице 2 представлены данные о линзовых объективах детального наблюдения, которые были использованы Красногорским заводом в съемочной оптико-фотографической аппаратуре (СА) в период 1960÷80 годы.

Для наглядной демонстрации роста технических характеристик объективов введем условный критерий ***I*** комплексной характеристики информативности, который определим, как произведение углового поля на диаметр входного зрачка объектива и экспоненциальную функцию, характеризующую количество и актуальность информации высокого пространственного разрешения относительно объектива «Титан-3»:

$$I = 2\beta \frac{F}{Z} e^{\frac{N}{N_{\text{Титан}}}}$$

где

N – разрешающая способность объектива,

$\boldsymbol{N}_{\text{Титан}}$ –разрешающая способность объектива «Титан-3»,

2β – угловое поле объектива,

Z – знаменатель относительного отверстия объектива,

F – фокусное расстояние объектива.

По этой формуле рассчитаны значения критерия информативности ***I*** объективов из таблицы 2. Значения критерия информативности объективов получены в условных относительных единицах и отложены на рисунке 1 по го-

Таблица 2.
Объективы для детального наблюдения

№	Наименование объектива	Год разработки	Предприятие изготовитель	Наименование фотоаппаратуры	Масса объектива, кг	Число линз
1	«Титан-3»	1961	КМЗ	«Фтор-6»	76	5
2	«Телегоир-12»	1972	КМЗ, ЛЗОС	«Жемчуг-3»	158	6
3	«Мезон-2А	1972	КМЗ, ЛЗОС	«Жемчуг-4» «Жемчуг-18»	455	10
4	«Кентавр»	1976	КМЗ	«Жемчуг-18» («Зевс»)	445	8
5	«Рубин-77»	1977	ЛЗОС	«Жемчуг-9»	158	6
6	«Апо-Марс-3А»	1980	ЛЗОС	«Жемчуг-18» «Жемчуг-22»	330	7
7	«Апо-Марс-9А»	1986	ЛЗОС	«Икар»	640	7

дам создания соответствующих объективов.

На рисунке 2 показана динамика изменения масс объективов.

Наиболее ёмко динамику комплексных характеристик линзовых объективов детального наблюдения характеризует критерий Ψ – отношение информативности к массе объектива

$$\Psi = \frac{I}{\mathrm{M}}$$

На рисунке 3 представлена зависимость критерия Ψ по годам создания объективов.

Рисунки 3 и 5 показывают неуклонный рост информативности объективов, обусловленный потребностью страны в получении съемочной информации высокого пространственного разрешения, развитием технологий дистанционного зондирования Земли.

Обращает на себя внимание резкий подъем кривой информативности в 1976 году объективом «Кентавр» (1976) относительно текущего уровня, определяемого объективами «Телегоир-12» (1972), «Мезон-2А» (1972), «Рубин-77» (1977).

Объектив «Кентавр» был создан Красногорским заводом. Разработчик оптической схемы и главный конструктор объектива д.т.н., лауреат Государственной премии Ю.Ф. Юрченко предложил решения, позволившие получить апохромат с суперахроматической коррекцией на основе серийно выпускаемых марок стекла. Для этого спектральный диапазон был ограничен до 486-766 нм. Реализация этой идеи потребовала всестороннего анализа дисперсионных характеристик оптического стекла, в которых принимали участие сотрудники ЦКБ КМЗ под руководством А.Я. Качаравы, доработки теории Герцбергера (1963) и продолжения исследований, выполненных сотрудниками ГОИ М.Г. Шпякиным и Г.А. Можаровым. Результаты всех этих работ изложены в докторской диссертации Ю.Ф. Юрченко.

Оптическая схема апохромата «Кентавр» строится на трех марках оптических стекол ТК21, ОФ4, ТК14. Вторичный спектр «Кентавра», исправленный для трех длин волн, на порядок меньше вторичного спектра длиннофокусных ахроматов «Телегоир-12», «Мезон-2А», «Рубин-77» (см. рисунок 6).

В работах Д.С. Волосова [15], М.Г. Шпякина [24,25], Г.А. Можарова [26] была изложена методика выбора марок стекол и оптических сил линз суперапохроматов с исправленным вторичным спектром в широком спектральном рабочем диапазоне. На основе этих исследований ГОИ им. С.И. Вавилова в 1989 году создает уникальный, не имеющий аналогов апохромат «Апо-Марс-3А». Информативность «Апо-Марс-3А» обеспечила предельную разрешающую способность фотоаппаратуры «Жемчуг-18» и далее «Жемчуг-22», столь необходимую для решения задач дистанционного зондирования Земли. Объектив имеет совершенную конструкцию – минимальное количество линз (7 – см. таблицу 2) среди апохроматов, относительно небольшую массу. В объективе использованы стекла СТК3, ТК21, ОФ4, ТФ8 ОФ6 обеспечившие практически идеальную актиничную коррекцию хроматизма (см. рисунок 6).

По критерию Ψ, комплексно характеризующему совершенство оптической схемы и конструкции объектива, «Апо-Марс-3А» превосходит (см. рисунок 5) не только все ранее созданные объективы, но также и уникальный по разрешающей способности «Апо-Марс-9А», созданный ГОИ гораздо позже, в 1986 году.

ПРЕДЕЛ РАЗВИТИЯ КРУПНОГАБАРИТНОЙ ЛИНЗОВОЙ ОПТИКИ – ОБЪЕКТИВЫ «МЕЗОН-3А» И «АПО-МАРС-9А»

Светосильный ахромат «Мезон-3А» разработан ГОИ им. С.И. Вавилова в 1977 году, имел повышенное фокусное расстояние и должен был обеспечить существенное повышение разрешающей способности аппаратуры. Конструктивные характеристики объектива приведены в таблице 3.

В ходе автономных испытаний объектива «Мезон-3А» была выявлена нестабильность его разрешающей способности. В качестве основной причины нестабильности была определена весовая деформация линз объектива.

Проблемы вторичного спектра ахроматов и несовершенство конструкции объективов типа «Мезон» были учтены ГОИ при создании объектива «Апо-Марс-9А». Созданный апохромат

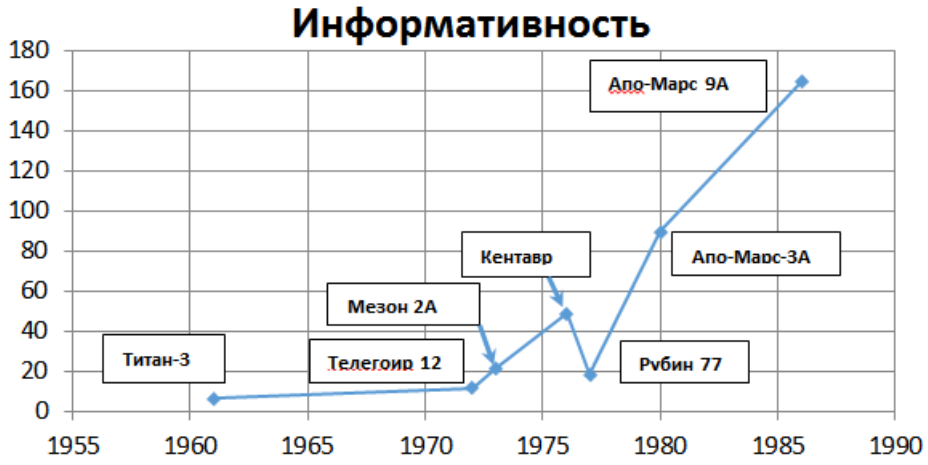


Рисунок 3.

Рост информативности объективов для детального наблюдения

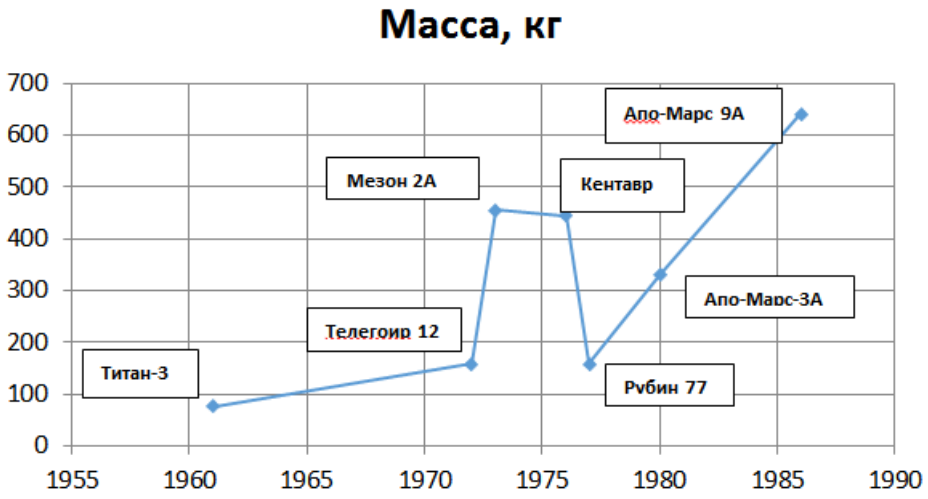


Рисунок 4.

Массы объективов для детального наблюдения

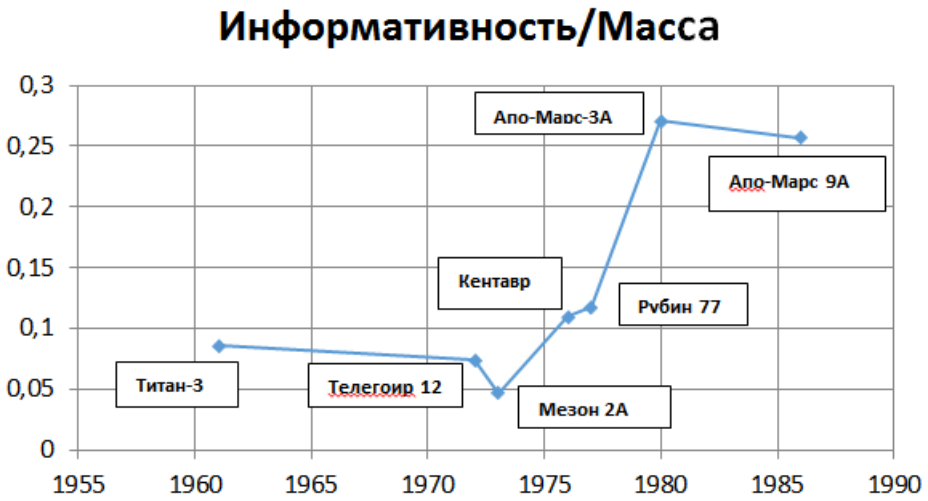


Рисунок 5.

Динамика комплексных характеристик линзовых объективов детального наблюдения

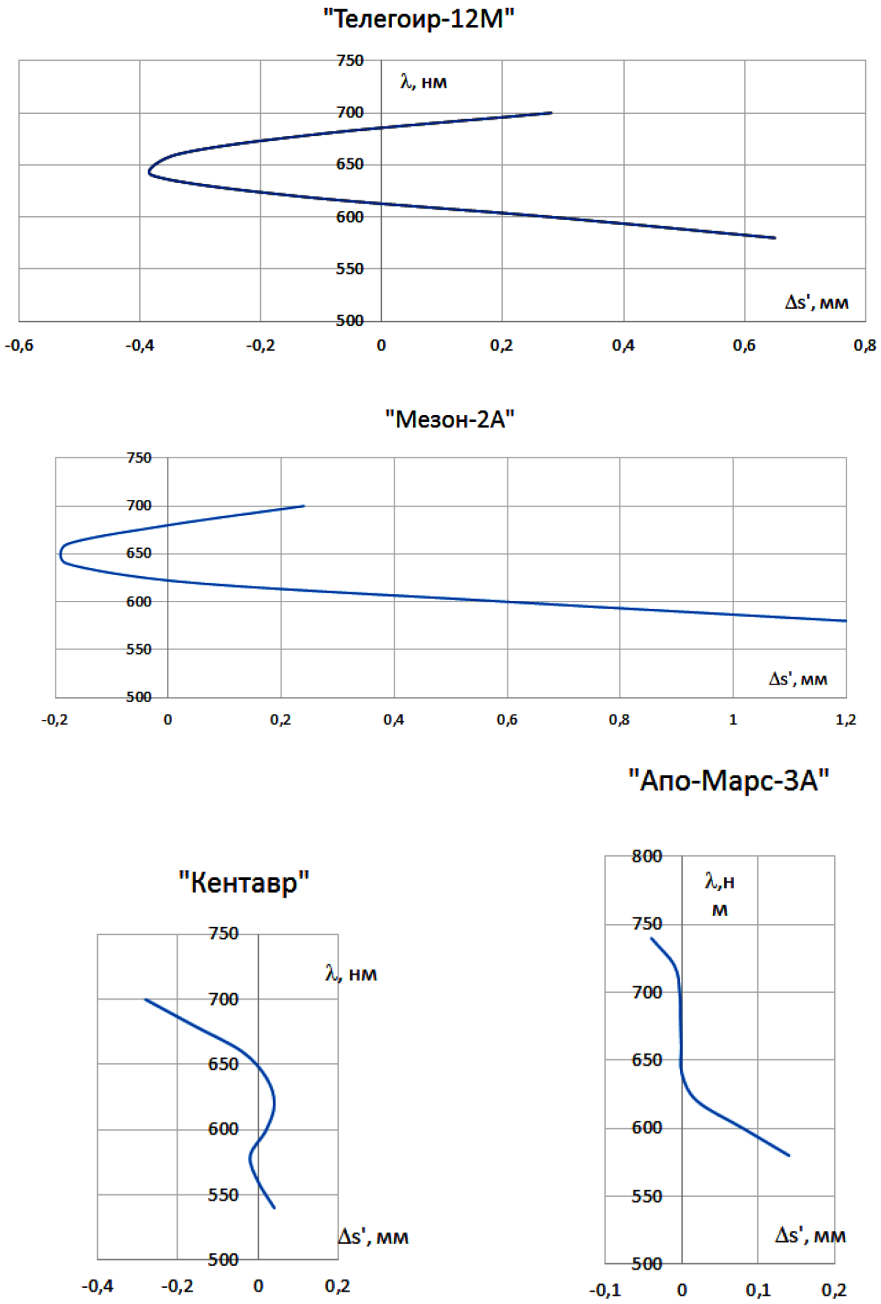


Рисунок 6.

Вторичный спектр объективов для детального наблюдения

Таблица 3.

Конструктивные характеристики объективов «Мезон-3А» и «Апо-Марс-9А»

Характеристика	«Мезон-3А»	«Апо-Марс-9А»
Угловое поле	8	7
Диафрагменное число	7	5,3
Число линз	10	7
Масса, кг	950	640
Отношение масс оптики и механики	1 : 0,48	1 : 0,41
Длина, мм	1394	975
Диаметр, мм	820	775
Максимальный диаметр линз, мм	670	672

Рисунок 7.
Объектив «Мезон-3А»

«Апо-Марс-9А» успешно прошел автономные испытания, подтвердил все требования технического задания. Сравнение двух объективов (см. таблица 3) показывает, что при практически одинаковой сложности оптическая схема «Апо-Марс-9А» имеет преимущества по габаритам и меньшему числу линз, и, как следствие, – меньшая масса объектива. Конструкция объектива обеспечивает более надежное закрепление линз в оправах и их разгрузку.

Несмотря на достигнутые предельные характеристики, «Апо-Марс-9А» в эксплуатацию принят не был. В ходе комплексных испытаний объектива «Апо-Марс-9А» была выявлена нестабильность его разрешающей способности. В качестве основной причины нестабильности была определена высокая чувствительность объектива к неравномерным температурным полям, требующая построения более высокоточной системы обеспечения теплового режима аппаратуры. Кроме того, для аппаратуры «Икар» с объективом «Апо-Марс-9А» на тот момент космический аппарат не был готов в полном объёме.

Таблица 4.
Характеристики объектива «Комета-11А»

Характеристика	Значение
Фокусное расстояние, мм	6375
Диафрагменное число	8,2
Угловое поле, град	6
Линейное поле, мм	500x500
Дисторсия, мм	5,7
Диаметр, мм	1250
Длина, мм	1602
Отношение масс оптики и механики	1 : 2,44
Масса, кг	600

ЗЕРКАЛЬНО-ЛИНЗОВЫЙ ОБЪЕКТИВ «КОМЕТА-11А» ДЛЯ АППАРАТУРЫ «АГАТ-1»

Главным инструментом орбитальной пилотируемой станции «Алмаз» была созданная КМЗ фототелевизионная аппаратура «Агат-1» (главный конструктор Е. Н. Герасимов) с длиннофокусным зеркально-линзовым объективом «Комета-11А».

Объектив построен по схеме Ричи-Кретьена с двумя гиперболическими зеркалами и двухлинзовым компенсатором.

Характеристики объектива «Комета-11А» представлены в таблице 4, а внешний вид объектива на рисунке 8.

Объектив был разработан ГОИ в 1972 году и изготовлен в ЛОМО. Главное облегченное ситалловое зеркало диаметром 880 мм изготовлено на ЛЗОС.

Аппаратура «Агат-1» обеспечивала детальную крупномасштабную панхроматическую и спектрозональную фотосъемку.

Экипаж космонавтов производил проявку и обработку экспонированной фотопленки, наиболее важные и интересные фотоснимки, с помощью устройств фотоэлектронного считывания кодировались и оперативно передавались на Землю по радиоканалу.

Основной объем отснятой фотопленки доставлялся в спускаемых капсулах.

Рисунок 8.
Объектив «Комета-11А»

ОБЪЕКТИВЫ ДЛЯ ОБЗОРНОЙ АППАРАТУРЫ

Одновременно с работой по созданию крупногабаритных космических линзовых объективов в ГОИ были разработаны:

- светосильный апохромат-анастигмат «Апо-Октон-8» для панорамной топографической аппаратуры «Топаз»,

- длиннофокусный объектив «Апо-Марс-8В» для аппаратуры панорамного наблюдения 17В39.

Технические характеристики этих объективов приведены в таблице 5.

Таблица 5 – Характеристики объективов «Апо-Октон-8» и «Апо-Марс-8В» [25].

В этих объективах наряду с исправлением вторичного спектра до уровня ~0,02 мм исправленная дисторсия не превышает 0,25%, что обеспечивает практическую ортоскопичность изображения. Относительно небольшие габариты и массы объективов позволили создать уникальные обзорные фотоаппараты, обеспечившие получение съемочной информации высочайшего качества.

НЕЗАМЕНИМЫЙ «ДЕДУШКА» ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ ОБЪЕКТИВ «АКТИНИЙ-4А»

Прорывом в развитии средств дистанционного зондирования Земли стало создание многоэлементных приемников изображения на базе фоточувствительных приборов с зарядовой связью (ФПЗС), позволившее заменить фотопленку твердотельными фотоприёмниками и коренным образом изменившее способы и сроки доставки информации, подходы к её обработке, хранению, тиражированию.

В 1981 году для КА «Янтарь-4КС1» специалистами КМЗ, на базе серийного объектива «Мезон-2А» и системы приема и преобразования информации «Сплав-1» (разработчик НПО «ЭЛАС»), была создана и успешно прошла лётные испытания первая отечественная оптико-электронная аппаратура «Жемчуг-20», обеспечивающая получение цифровой видеоинформации в темпе времени, близком к реальному (информационный поток 240 Мбит/с, угловое разрешение 2,0″). Главный конструктор аппаратуры «Жемчуг-20» Ю.В. Рябушкин.

В течение последующих двух лет была выполнена модернизация аппаратуры, включающая использование разработанного ГОИ длиннофокусного телеобъектива апохромата «Актиний-4А» (f =4000 мм, $D_{зрачка}$=500 мм, m=320 кг, область ахроматизации 580-800 нм). Главный конструктор этой аппаратуры, названной «Родонит» Е.Н. Герасимов. За период с 1980 по 1995 годы было произведено 24 успешных запуска КА «Янтарь-4КС1», оснащенных аппаратурой «Родонит».

Развитие технологии производства и параметров ФПЗС, АЦП, ПЛИС позволило в 90-е годы значительно повысить информативность оптико-электронной аппаратуры (ОЭА), приблизив её к лучшим образцам космической фотоаппаратуры. А сроки орбитальной эксплуатации

Таблица 5.
Характеристики объективов «Апо-Октон-8» и «Апо-Марс-8В» [25]

Характеристика	«Апо-Октон-8»	«Апо-Марс-8В
Фокусное расстояние, мм	1000	2200
Угловое поле, град.	12	9
Вторичный спектр, мм		
Дисторсия, мм	0,047	0,044
Диафрагменное число	5	5
Число линз	8	7
Масса, кг	30	250
Отношение масс оптики и механики	1 : 0,76	1 : 0,56
Длина, мм	32	628
Диаметр, мм	284	550
Максимальный диаметр линз, мм	209	466

ОЭА, не ограниченные запасом фотопленки, а также возможность оперативного сброса видеоинформации по высокоскоростной радиолинии, предопределили «закат» космических оптико-фотографических систем и переход на оптико-электронные комплексы космического наблюдения.

Научно-технический задел, полученный в процессе разработки и эксплуатации аппаратуры «Родонит» был использован КМЗ при создании аппаратуры «Геотон-Л» и «Геотон-Л1» для КА «Ресурс-ДК» и «Ресурс-П», соответственно. Объектив «Актиний-4А» был доработан специалистами ГОИ и ЛЗОС (снижен хроматизм в голубой и ближней ИК области спектра, улучшено пропускание в широкой области спектра, снижены технологические потери качества), что позволило существенно повысить информативность ОЭА - увеличить захват и разрешение при панхроматической съёмке, впервые реализовать детальную мультиспектральную съёмку, и получил наименование «Актиний-4Г».

Длиннофокусный телеобъектив «Актиний-4А», разработанный ГОИ им. С.И. Вавилова, производится серийно АО ЛЗОС и используется в ОЭА, разрабатываемой КМЗ с 1980 г. до настоящего времени как «Актиний-4Г». Характеристики объективов приведены в таблице 6.

На фотографии (рисунок 9) на заднем плане длиннофокусный телеобъектив объектив «Актиний-4А» для оптико-электронной аппаратуры «Геотон-Л1».

Рисунок 9.
Объектив «Актиний-4А» для оптико-электронной аппаратуры «Геотон-Л1»

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Появление и развитие технологий дистанционного зондирования Земли в 50-60 годы потребовало создания крупногабаритных длиннофокусных объективов для фотографической аппаратуры для детального наблюдения, обзорной и топографической съемки поверхности Земли.

Таблица 6.
Характеристики объективов «Актиний-4А» и «Актиний 4АГ»

Характеристика	«Актиний-4А» («Актиний -4Г»)
Фокусное расстояние, мм	4000
Угловое поле, град.	6
Диафрагменное число	8
Число линз	7
Масса, кг	305
Отношение масс оптики и механики	1 : 0,71
Длина, мм	1860
Диаметр, мм	685
Максимальный диаметр линз, мм	520

2. Разработку, изготовление, испытания и применение крупногабаритных объективов для дистанционного зондирования Земли обеспечила кооперация предприятий, среди которых основные работы выполняли:

– ГОИ им. С.И. Вавилова – научное руководство, головной разработчик оптических схем и конструкций объективов;

– ПО «Рубин» (АО ЛЗОС) – изготовление объективов;

– ПО «Красногорский завод им. С.А. Зверева» (ПАО КМЗ) – формирование требований к объективам, использование объективов в съемочной аппаратуре.

3. В 60-80 е годы ГОИ им. С.И. Вавилова выполнил ряд ключевых работ, обеспечивших создание уникальных крупногабаритных анастигматов- апохроматов:

– разработка теоретических основ и методов расчета фотообъективов на основе развития теории аберраций оптических систем и создания специализированных программ расчета, обеспечивающих автоматизированную коррекцию аберраций с оценкой критериев качества изображения;

– создание и применение новых оптических материалов с целенаправленно заданными физико-химическими свойствами, в том числе с особым ходом дисперсии показателей преломления,

– создание теории, методов и программ расчета температурных полей и деформаций оптических деталей, термооптических аберраций и оценки качества изображения с учетом термобарических условий эксплуатации;

– разработка интерферометрических методов контроля и программного обеспечения восстановления и анализа волновых фронтов реальных оптических систем,

– разработка и изготовление технологического и оптотехнического термовакуумного оборудования для испытаний крупногабаритных оптических элементов и приборов, в условиях, имитирующих орбитальную эксплуатацию,

– экспериментальные исследования влияния вакуума и нестационарных температурных полей на характеристики, работу и качество изображения крупногабаритных длиннофокусных объективов, зеркал различных конструкций, конструкций фото- и оптико-электронной аппаратуры.

4. В период 60-80 годы на ЛЗОС налажено серийное производство крупногабаритных объективов, используемых Красногорским заводом в составе оптико-фотографической и оптико-электронной аппаратуре для детальной, обзорной, топографической и оперативной съемки поверхности Земли из космоса.

Список литературы

1. *Кириллин А.Н., Аншаков Г.П., Ахметов Р.Н., Сторож А.Д.* Космическое аппаратостроение. Научно-технические исследования и разработки ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс», Самара: Издательский дом «АГНИ», 2011.

2. *Архипов С.А.* 70 лет Специальному Конструкторскому Бюро - 1 ОАО «Красногорского завода им. С.А. Зверева» // Научно-технический журнал «Контенант», 2014, том 13, №3.

3. *Волосов Д.С*. Основы теории термооптических аберраций. Ч.1// Опт. И спектр., 1958, Т. 4, В.5, С. 663-669.

4. *Волосов Д.С*. Основы теории термооптических аберраций. Ч.2// Опт. И спектр., 1958, Т. 4, В.5, С. 772-778.

5. *Волосов Д.С*. Основы теории термооптических аберраций. Ч.3// Опт. И спектр., 1958, Т. 5, В.2, С. 191-199.

6. *Архипова Л.Н., Забелина И.А.* Космические разработки ГОИ, их реализация и перспективы // Оптический журнал. 2018. Т. 85. № 11, рукопись статьи, депонированной на сайте журнала в приложении к №11 по адресу http://www.opticjourn.ru/ВР/10-11П-18.doc

7. *Волосов Д.С., Цено Н.В*. Метод автоматической коррекции аберраций сложных оптических систем // Опт. и спектр., 1968, Т. 25, вып. 4, С. 575-582.

8. *Архипова Л.Н.* Состояние оптического материаловедения с позиции разработчика оптических систем // Научно-технический сборник Международной академии «Контенант», 2009, декабрь, С. 31-37.

9. *Гоголев Ю.А., Кондратьев Ю.Н*. Аэрокосмическая и астрономическая оптика // ОМП, 2001, №8, С.112-113.

10. *Слюсарев Г.Г*. Влияние термического градиента стекла оптических систем на изображение, даваемое последними. // Оптика и спектр., 1959, том 6, вып 2, с.211-217.

11. *Шрамко Ю.П.* Влияние теплового режима иллюминатора на деформацию фронта волны. // ОМП, 1972, № 3, с.14-17.

12. *Шрамко Ю.П., Виноградов В.Д*. Влияние теплового режима на качество изображения объектива «Зикар-2Б.// ВОТ, 1979, вып. 140.

13. *Шрамко Ю.П., Нифонтова Е.Г*. Влияние градиентов температуры на качество изображения линзовых обьективов. // ОМП, 1990, № 1, с.25-29.

14. *Архипов С.А., Ефимов Е.Н.* Влияние тепловых режимов на выходные характеристики и способы тепловой защиты высокоточных оптических приборов и устройств. Обзор №3546. – М.: НТЦ «Информатика», 1993.

15. *Волосов Д.С*. Оптические стекла, необходимые для перспективных разработок / Свойства и разработка новых оптических стекол. Сб. статей, Л.: Машиностроение, 1977, С. 36-49.

16. *Волосов Д.С*. Состояние и перспективы объективостроения // ОМП, 1978, № 12, С. 40-42.

17. *Волосов Д.С*. Теория и уровень развития фотографической оптики // ОМП, 1980, № 3, С. 48-52.

18. *Новиков В.М., Мирошников М.М.*, и др. Развитие исследовательского оптотехнического оборудования для крупногабаритных оптико-фотографических и оптико-электронных приборов наблюдения // ВОТ, 1986, сб.10, вып.8, С.4 6-56.

19. *Новиков В.М., Нужин В.С*. и др. Исследование влияния теплового режима в вакууме на смещение плоскости установки системы АФО и качество изображения оптико-фотографического космического прибора // ВОТ, 1986, сб.10, вып.4, С.24-28.

20. *Ключников В.В., Новиков В.М., Пименов Ю.Д*. О принципах построения вертикальных оптотехнических испытательных стендов для крупногабаритных космических оптических приборов // ВОТ, 1989, сб.10, вып.11, С.13-19.

21. *Ган М.А*. и др. Обработка интерферограмм на ЭВМ и определение ФРТ и ОПФ при контроле и доводке оптических систем // ОМП, 1978, № 9, С.25-28.

22. *Ган М.А., Устинов С.И*. Компенсационный метод доводки оптических систем // ОМП, 1987, №11, С.25-27.

23. *Волосов Д.С., Цено Н.В., Архипова Л.Н*. Исследование достоверности информации о хроматической коррекции апохроматов // ОМП, 1982, № 6, С. 19-21.

24. *Шпякин М.Г*. Расчет четырехцветных тонких апохроматов // ОМП, 1978, №2, С.15-17.

25. *Шпякин М.Г.* Расчет компонентов апохроматов из четырех марок стекол для широкой спектральной области // ОМП, 1978, №4, С.17-21.

26. *Можаров Г.А*. Графоаналитический метод выбора стекол для расчета четырехлинзового трехцветного апохромата // ОМП, 1977, №3, С.22-24.

TEN optics

КОНТРАКТНОЕ ПРОИЗВОДСТВО ОПТИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ ПОВЫШЕННОЙ СЛОЖНОСТИ

Обеспечиваем высочайшую точность.
Погрешность:

<0.5%

Работаем на вакуумной установке
Бюлер Leybold Optics SYRUSpro 710
с системой прямого оптического контроля
последнего поколения

tenoptics.com
+7 499 271 71 75
+7 926 295 07 41

by TECHNOSPARK

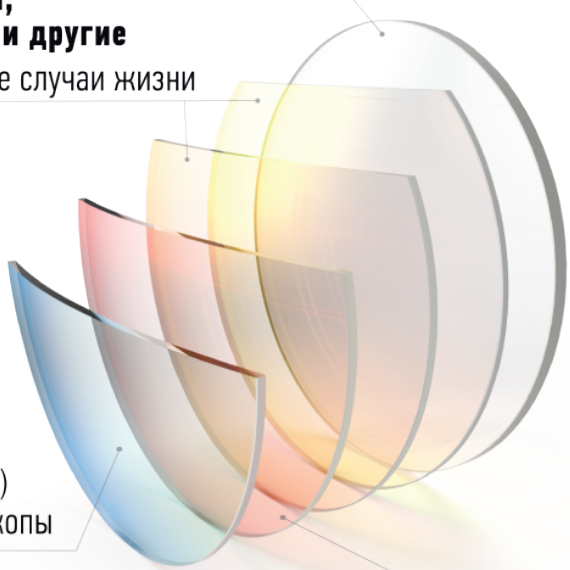
TEN optics

НАШИ ПОКРЫТИЯ

Работаем в УФ, видимом и SWIR диапазонах по ТЗ заказчика

Зеркала
(R > 99.5%, со сдвигом фаз) для оптоволоконных и беспроводных систем коммуникации

Светоделители, поляризоторы и другие
на все остальные случаи жизни



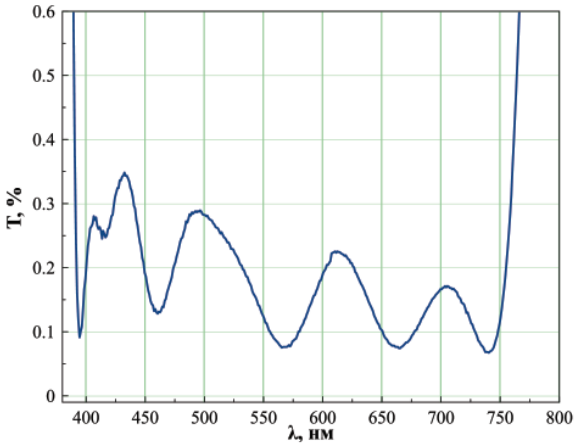
Просветление
(R < 0.1 ÷ 0.4%, 380-760 нм)
на кинообъективы и телескопы

Светофильтры
(T > 90%, блокировка седьмого порядка) для приборов ДНК-диагностики и флуоресцентной микроскопии

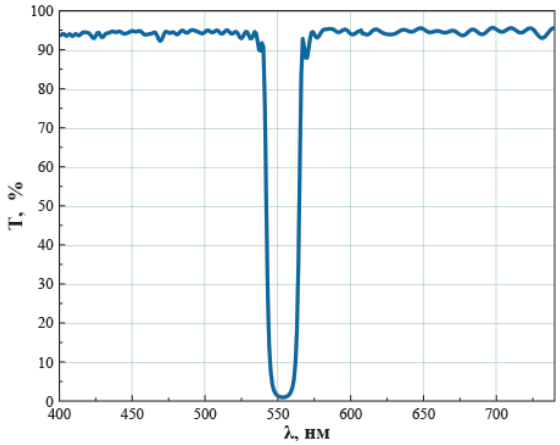
tenoptics.com
+7 499 271 71 75
+7 926 295 07 41

Примеры покрытий

Просветление видимого диапазона



Режекторный (NOTCH) светофильтр



ИСТОРИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ СТЕРЕОМИКРОСКОПОВ СЕРИИ МБС

ШМИДТ А.И., МАРШАКОВ Б.Г., СЕМЕНОВ Е.С.

АО «Лыткаринский завод оптического стекла» г. Лыткарино, Московская обл.

E-mail: ogk45@lzos.ru

Аннотация: *В статье дано описание стереоскопических микроскопов серии МБС. Описаны принципы стереоскопии. Отражены исторические данные, текущее состояние продуктовой линейки и обозначены тенденции и планы развития.*

Ключевые слова: стереоскопический микроскоп, стереомикроскоп, МБС.

ОАО «ЛЗОС» имеет многолетний опыт разработки и производства стереоскопических микроскопов. На нашем предприятии в разные годы были разработаны и освоены в производстве микроскопы МБС-1, МБС-2, МБС-9, МБС-10, МБС-12, МБС-14, МБС-10М, МБС-17 и оптические головки на их основе, которые применяются в различных областях науки и техники.

Стереоскопические микроскопы представляют собой класс микроскопов, позволяющий получить прямое объемное изображение объектов в широком диапазоне увеличений. Благодаря своим оптическим качествам область применения стереомикроскопов распространяется на все более расширяющиеся задачи – контроль, пайка, монтаж в радио- и микроэлектронике, в медицинских исследованиях, в криминалистике, ювелирном деле, часовом производстве, в процессе приготовления образцов для микроскопии плоского поля, при работе с миниатюрными механизмами, в процессе проведения механической обработки и сборки, при проведении реставрационных работ, при проведении ремонтных работ современной компьютерной техники и сотовых телефонов.

Современные стереомикроскопы имеют широкий диапазон увеличений от 2^x до 1300^x в зависимости от класса прибора.

По классам стереомикроскопы можно разделить на рутинные для общих работ – с диапазоном увеличений от 6^x до 80^x, микроскопы продвинутого класса – с диапазоном 6^x до 200^x, микроскопы исследовательского класса – 6^x до 1300^x. Так же, на данный момент существует большой набор классов стереомикроскопов в виде узкоспециализированных приборов, где оптическая стереоскопическая головка объединена со штативом. В основном это микроскопы медицинского назначения с увеличениями до 50^x.

Микроскопы серии МБС относятся к классу универсальных стереомикроскопов, имеющим расширенный диапазон увеличений от $2{,}5^x$ до 200^x(при использовании дополнительных объективов), что в свою очередь позволяет расширить область их применения.

Большой диапазон увеличений серии МБС возможен благодаря тому, что оптическая схема микроскопа выполнена по схеме Аббе, которая обеспечивает максимальную модульность в конструкции стереомикроскопов.

Модульность достигается за счет того, что правый и левый оптические каналы микроскопа параллельны. Это позволяет использовать сменные основные объективы и дополнительные модули. Схема Аббе позволяет получить четкое изображение по всему полю, так как

плоскость наблюдения перпендикулярная основной оси микроскопа.

При этом, стоит отметить, что большая часть моделей на российском рынке стереомикроскопов используют менее гибкую, но более экономичную оптическую схему Грену. Данной схеме присущи недостатки – невозможность получить четкую картинку по полю, так как плоскость наблюдения находится под углом к основной оси микроскопа, нарушение оптических свойств системы при использовании дополнительных объективов.

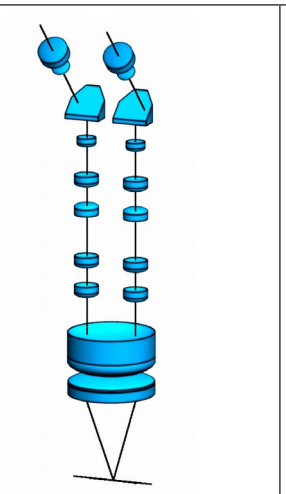


Рисунок 1.
Схема Аббе

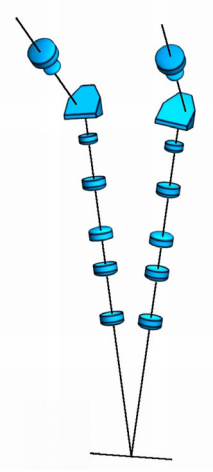


Рисунок 2.
Схема Грену

Производство стереомикроскопов на ЛЗОС началось в 1950-х годах [1], когда было принято решение о размещении серийного производства стереомикроскопов на мощностях ЛЗОС. Оптический расчет микроскопов был произведен в ГОИ им.Вавилова, первичная производственная документация получена из ЛОМО. После серьезной переработки документации вызванной необходимостью обеспечение крупносерийного производства стереомикроскопов для нужд страны, ЛЗОС приступил к выпуску МБС-1.

Позже была разработана модель МБС-2 со специальным штативом.

Конструкторами этих приборов были Н.Г. Золоторева, Ф.А. Антонов, О.Л. Лизунова, Г.А. Шендрик, В.М. Цыренов, В.П. Антюфеев.

Микроскоп МБС-1 предназначен для работы небольшими объектами в проходящем и отраженном свете.

Рисунок 3.
Стереомикроскоп МБС-1

Микроскоп МБС-2, в состав которого входил специальный штатив, предназначен для работы с крупными предметами.

Рисунок 4.
Стереомикроскоп МБС-2

На основе МБС-1 была разработана оптическая головка ОГМЭ-П, которая являлась родоначальником специальной модификации стереомикроскопа без штатива. Оптическая головка ОГМЭ-П предназначалась для использования в технологическом оборудования микроэлектронной промышленности. Конструкторами этого прибора были Ф.А. Антонов, О.Л. Лизунова и др.

Рисунок 5.
Оптическая головка ОГМЭ-П

В 1976 году был разработан стереомикроскоп МБС-9, обладающий современный дизайном и улучшенной эргономикой. Конструкторами этого прибора были С.П. Белоусов, Г.А. Шендрик, О.Л. Лизунова и др.

Рисунок 6.
Стереомикроскоп МБС-9

На основе МБС-9 была разработана оптическая головка ОГМЭ-П2.

В 1986 году был освоен в серийном производстве стереомикроскоп МБС-10, являющийся новым поколением стереомикроскопов серии МБС, с повышенной эргономикой, улучшенной оптической схемой, модульной конструкцией и широкой номенклатурой периферии.

Основные объективы с разным рабочим расстоянием, увеличивающие насадки для объективов, осветительные модули проходящего и отраженного света, осветители холодного света на базе волоконных световодов, кольцевой осветитель падающего света, бестеневое осветительное устройство, осветитель темного поля, модуль фотодокументирования, модуль документирования стереопар.

Все эти дополнительные модули позволяли решать большой круг задач.

Создателями этого прибора были – В.В. Фуфурин, С.П. Белоусов, О.Л. Лизунова, А.И.Шмидт ,Н.Э. Мандельштам, Л.В. Лесовщикова, А.Н. Овчинников и др.

Рисунок 7.
Стереомикроскоп МБС-10

Для стереомикроскопа МБС-10 была разработана новая серия осветителей, с применением оптоволоконных световодов, которая позволяла получить «холодный» свет. Блок осветителя с лампой накаливания размещался в отдельном модуле, а свет подавался в рабочую зону по световодам.

За счет этого, тепло генерируемое лампой накаливания было локализовано вне рабочей области микроскопа, что повысило удобство работы.

Применение оптоволоконных световодов так же позволило осуществить целую гамму различных режимов освещения – темное поле для проходящего света; бестеневое коаксильное освещение, кольцевое освещение и точечное косое освещение для отраженного света.

Рисунок 8.
Осветители с оптоволоконными световодами

На основе стереомикроскопа МБС-10 была разработана оптическая головка ОГМЭ-П3.

Рисунок 9.
Оптическая головка ОГМЭ-П3

Следует отметить, что в конце 70х-80х годах прошлого века выпуск стереомикроскопов на АО ЛЗОС составлял около 20 тысяч единиц в год. В 90-е годы в связи с кризисными явлениями в экономике страны объемы производства существенно сократились. Несмотря на это, предприятию удалось сохранить серийное производство стереомикроскопов. Этому способствовало наличие полного цикла производства внутри предприятия. Благодаря этому удалось сохранить все технологические возможности производства, технические компетенции и уникальный кадровый потенциал.

В 2002-2004 гг. была выполнена разработка стереомикроскопов МБС-12 и МБС-14. В этих микроскопах использована панкратическая система, то есть система с плавным (непрерывным) изменением увеличения в масштабе 1:10, в отличии от дискретной, существовавшей ранее. Это решение позволило пользователю наблюдать объект во всем диапазоне увеличений от 2.5 до 100 крат без проведения дополнительной перефокусировки и потери изображения, что вместе с новыми окулярами, рассчитанными на возможность работы в очках, существенно повысило функциональные и эргономические свойства прибора. Данная серия микроскопов так же была выполнена на основе модульной конструкции, что позволяло создавать конфигурацию микроскопа под разные задачи. Среди дополнительных модулей – объективы с разным рабочим расстоянием, осветители холодного света на базе волоконных световодов (кольцевой, боковой, темнопольный), телевизионный адаптер для работы с цифровой камерой.

Разработка оптической системы микроскопа была выполнена В.В. Фуфуриным, разработка конструкции выполнена Б.Г. Маршаковым, Л.М. Жемерикиной, Э.В. Корнеевой, В.В. Новиковым, Ю.А. Булеевым, А.И. Шмидтом.

Внедрение в производство моделей с панкратической сменой увеличения потребовало разработки новых методик юстировки и разработки нового юстировочного оборудования, т.к. изготовление панкратических систем существенно отличается от традиционной схемы с фиксированной сменой увеличения.

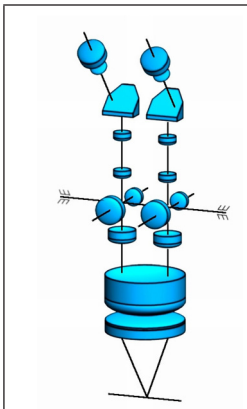


Рисунок 10.
Схема Аббе для микроскопа с дискретной сменой увеличений

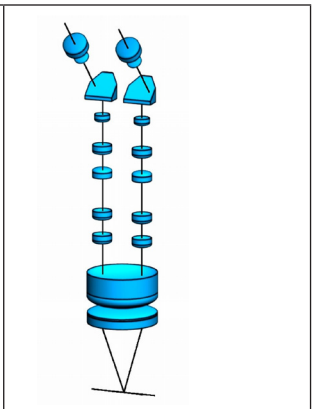


Рисунок 11.
Схема Аббе для микроскопа с панкратической сменой увеличений

Стереомикроскоп МБС-12 предназначен для работы в отраженном свете.

Рисунок 12.
Стереомикроскоп МБС-12

Стереомикроскоп МБС-14 был разработан для работы как в отраженном так и проходящем свете:

Рисунок 13.
Стереомикроскоп МБС-14

Для стереомикроскопов МБС-12 и МБС-14 была разработана новая линейка объективов с фокусными расстояниями 70 мм, 100 мм, 200 мм, новый телевизионный адаптер для работы с широким диапазоном цифровых камер.

Стоит отдельно отметить, что несмотря на то, что стереомикроскопы серии МБС являются преимущественно средствами визуального наблюдения, для всех моделей были разработаны дополнительные модули для фотодокументирования.

Для микроскопов МБС-1, МБС-2, МБС-9 микрофотонасадки, которые позволяли регистрировать на полнокадровые пленочные камеры изображения с правого и левого каналов одновременно, тем самым позволяя создавать стереопары. Их недостатком было невозможность одновременно визуально наблюдать изображение и осуществлять документирование.

Рисунок 14.
Микрофотонасадки

Для микроскопов серии МБС-10, МБС-12, МБС-14 были разработаны телевизионные адаптеры, которые позволяли осуществлять документирование изображения на различные виды камер – пленочные зеркальные полнокадровые, цифровые зеркальные с разным размером кадра, цифровые камеры с малым размером датчика. Документирование осуществляется без потери возможности визуального наблюдения.

Рисунок 15.
Телевизионные адаптеры

В настоящий момент линейка микроскопов серии МБС расширилась. В 2018 году поставлен на серийное производство микроскоп МБС-10М.

Микроскоп МБС-10М является усовершенствованной моделью ставшего классикой МБС-10, с улучшенной системой освещения на базе светодиодов и измененным дизайном микроскопа. Он позволяет работать с прозрачными и непрозрачными объектами.

Рисунок 16.
Стереомикроскоп МБС-10М

Продолжается производство оптической головки ОГМЭ-ПЗ, использующейся разработчиками технологического и медицинского оборудования. На текущий момент идет разработка модернизированной версии данной модели.

Расширением линейки МБС стал стереомикроскоп МБС-17, упрощенный вариант стереомикроскопа с фиксированным увеличением, для работы с непрозрачными объектами, ориентированный для применения в широком круге задач, где выполняются рутинные задачи и не требуется расширенный функционал.

Рисунок 17.
Стереомикроскоп МБС-17

Во всех новых моделях используется энергоэффективное светодиодные источники света.

Разработана линейка основных объективов, позволяющих существенно расширить рабочие возможности микроскопов по увеличениями и рабочим расстояниям. Линейка включает объективы с фокусными расстояниями 50 мм, 90 мм, 190 мм, 300 мм.

Рис.унок 18.
Основные объективы для стереомикроскопов МБС

Дальнейшее развитие микроскопов серии МБС связано с улучшением эргономических и оптических характеристик: разработкой новых моделей с плавной сменой увеличений, широкопольных окуляров, и других компонентов улучшающих работу с микроскопом, расширением возможности конфигурирования для возможности применения в еще более широком круге задач за счет выпуска дополнительных компонентов - объективов с различными фокусными расстояниями и разной степенью коррекции аберраций, различных штативов и цифровых модулей, оптимизации конструкции для возможности реализации широкого спектра функций цифровой и автоматизированной микроскопии.

Современные тенденции по цифровизации процессов исследований и производства при работе с микроскопами, требуют внедрения систем цифровой индикации рабочих параметров микроскопа, для обеспечения записи не только оптического изображения формируемого оптикой, но и параметров микроскопа для обеспечения полного контроля над получаемыми данными.

В новых разработках так же планируется внедрение перспективных технологий, таких как системы дополненной реальности, которые позволят добавить в оптическое поле прибора слои цифровой информации, которые позволят оператору более эффективно выполнять как рутинные задачи при исследовании и манипулировании мелкими объектами, так и осуществлять точное позиционирование рабочего поля относительно объектов превышающих размеры текущего поля зрения, либо относительно частей объекта, расположенных в других плоскостях.

Будущие стереомикроскопы серии МБС, благодаря своей модульности позволят эффективно решать широкий круг задач, от простого визуального наблюдения объектов, до построения автоматизированных систем с разной степенью интеграции с цифровыми решениями, что предоставит пользователям функциональные возможности, доступные ранее только в системах высокобюджетного класса.

Список литературы:

1. Времен связующая нить. – М.: «Р.Валент», 1999. – 240с., ил.

УДК 536.7

российский индекс научного цитирования Science Index

РАЗРАБОТКА МЕТОДА ФИКСАЦИИ УТЕЧКИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ НА ТРУБОПРОВОДАХ ТЭС И АЭС

НАУМОВ В.М.

Публичное акционерное общество «Красногорский завод им. С.А. Зверева», г. Красногорск
3-я научная рота Космических войск Воздушно-космических сил РФ

E-mail: nvm1403@yandex.ru

Аннотация: *в данной статье представлены результаты разработки двух методов фиксации утечки теплоносителя на трубопроводах атомных и тепловых электростанций.*

Ключевые слова: утечка, трубопровод, тепловизор, лазерная система, контроль, мониторинг, техническое состояние.

DEVELOPMENT OF A METHOD FOR FIXING COOLANT LEAKAGE ON PIPELINES OF THERMAL AND NUCLEAR POWER PLANTS

NAUMOV V.M.

PJSC «Krasnogorsky plant him S.A. Zvereva», Krasnogorsk

E-mail: nvm1403@yandex.ru

Abstract: *this paper represents development results of a method for fixing coolant leakage on pipelines of thermal and nuclear power plants.*

Keywords: this paper represents development results of a method for fixing coolant leakage on pipelines of thermal and nuclear power plants.

ВВЕДЕНИЕ

На многих заводах, фабриках и других производственных предприятиях промышленности используется большое количество различных трубопроводных систем. Они проектируются в соответствии с действующей нормативной документацией, в которой заложены необходимые критерии безопасности и сохранности объекта. Но даже строгое соблюдение всех норм и правил эксплуатации не гарантирует отсутствие аварий, повреждений и прочих факторов, способных негативным образом повлиять на работу трубопроводных систем. Даже в самых стойких материалах со временем может образоваться дефект, который под действием нагрузок может стать сквозным и привести к образованию течи, способной послужить началом полного разрушения объекта и развитием других неблагоприятных последствий. Такое развитие событий особенно критично в сфере энергетики, в частности на тепловых и атомных электростанциях. Это связано с повышенной температурой теплоносителя, потенциальной опасностью последствий развития аварий и социально-экономической значимостью электростанций как источника тепла и электроэнергии. Чтобы избежать подобного развития событий, необходимо заранее выявлять проблемные участки трубопроводов и своевременно принимать меры по недопущению образования течи.

Для решения этой задачи нужно иметь в наличии высококачественное оборудование, которое поможет обнаружить течь даже на ранних этапах её развития.

С целью обнаружения сквозных дефектов, которые могут послужить началом течи из трубопровода, согласно нормативно-технической документации используются различные методы неразрушающего контроля. К методам неразрушающего контроля относят визуальный, ультразвуковой, магнитный и радиографический.

Методы неразрушающего контроля, как правило, применяются на остановленном оборудовании. В этой связи в условиях электростанций становится актуальной разработка метода, способного проводить мониторинг и предотвращать развитие аварий в процессе работы станции.

Основная цель работы заключается в разработке именно такого метода контроля, который позволит оперативно определять техническое состояние различных участков трубопровода в режиме работы станции на мощности, позволит в режиме реального времени обнаруживать образование течи, своевременно выдавая сигнал на щит управления. Разрабатываемый метод относится к категории тепловых методов неразрушающего контроля, основанных на работе с тепловизионным и лазерным оборудованием.

Наряду с применением теплового контроля, который в последнее время получил достаточно большое распространение, в работе разработан абсолютно новый метод контроля, основанный на лазерной абсорбционной спектроскопии. Применение лазерной спектроскопии позволяет получать информацию о параметрах исследуемого трубопровода с высоким уровнем временного, спектрального и пространственного разрешения.

Таким образом, разрабатываемые в работе методы способны не только усовершенствовать существующие технологии контроля, но и стать платформой для создания новых современных высокотехнологичных приборов, позволяющих проводить контроль на любом участке трубопровода.

РАЗРАБОТКА МЕТОДА ФИКСАЦИИ УТЕЧКИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В ТРУБОПРОВОДАХ ТЭС И АЭС С ПОМОЩЬЮ ТЕПЛОВИЗОРА

Предлагаемый в данном разделе метод контроля трубопроводов относится к разряду тепловых методов и основан на применении современных средств тепловизионного контроля, а именно тепловизоров.

Тепловизор представляет собой прибор для измерения различия температур на определённом участке. Этот прибор достаточно прост в эксплуатации и не требует никаких дополнительных действий или подготовительных мероприятий. Принцип его действия основан на регистрации инфракрасного излучения, которое испускается любыми объектами с различной температурой.

Инфракрасное излучение фокусируется с помощью оптики тепловизора на приемнике излучения. Приемник излучения выдает сигнал, чаще всего представляющий собой изменение напряжения. Данный сигнал регистрируется электроникой тепловизионной системы. Сигнал, который выдаёт тепловизор, превращается в электронное изображение на дисплее – термограмму.

Термограмма представляет собой изображение объекта, обработанное электроникой для отображения на дисплее таким образом, что различные градации цвета соответствуют распределению инфракрасного излучения на поверхности исследуемого объекта. Таким образом, полученная цветная картина позволяет наглядно увидеть распределение температуры.

Разрабатываемый в данном разделе метод заключается в следующем: используемый тепловизор помещают в зоне контроля рядом с трубопроводом, располагая его таким образом, чтобы его объектив был направлен перпендикулярно распространению трубы. Схема расположения тепловизора представлена на рисунке 1:

После того, как тепловизор был правильно расположен, его включают и начинают наблюдение. Можно вести как постоянный мониторинг, так и периодический, т.е. при необходимости включать тепловизор на какое-то время,

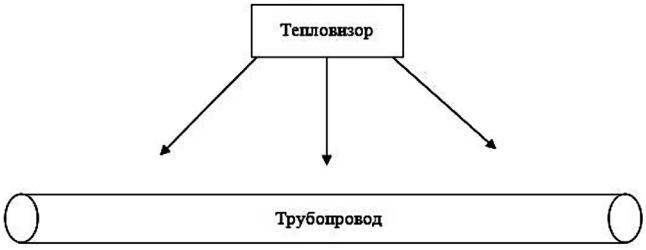


Рисунок 1.
Схема расположения тепловизора

а затем снова его отключать. Современные средства информационных технологий позволяют осуществлять включение/выключение дистанционно, не прибегая к необходимости активизировать работу прибора непосредственно на его панели.

Применение тепловизора данным способом позволит визуализировать летучие органические соединения, которые в форме свища будут вырываться из трещины или какого-либо другого дефекта на трубопроводе. Любое органическое соединение имеет свой диапазон излучения и поглощения в инфракрасном диапазоне волн – именно это свойство позволит зафиксировать не только само наличие содержания в воздухе различных соединений и веществ, но и с высокой точностью определить местонахождения их утечки.

На картинке, которая будет выводиться на дисплей тепловизора или на монитор подсоединенного к нему компьютера, будет наблюдаться четкая струя газа, вырывающегося из дефектного трубопровода. Контрастность получаемого изображения будет зависеть от разницы температур окружающей среды и струи газа, а также от настройки чувствительности самого прибора.

Предлагаемый в работе метод контроля обладает целым рядом существенных преимуществ:

1. Метод безопасен. У оператора нет необходимости присутствовать непосредственно рядом с прибором при проведении измерений. Особенно это актуально в тех ситуациях, когда температурный фон в помещении превышает допустимые показатели для безопасной работы персонала.

2. Метод универсален. Существуют различные труднодоступные места, контролировать которые необходимо, но добраться до них не представляется возможным. В этом случае также станет удобным разрабатываемый метод контроля, позволяющий «видеть» картину даже в самых неудобных и труднодоступных локациях.

3. Метод показателен. Мы можем в режиме реального времени увидеть утечку теплоносителя, зная при этом его температуру, и оценить характер её распространения.

4. Метод точен. Разрабатываемый метод контроля позволяет с высокой точностью определить конкретное место утечки, что позволяет не тратить время на поиски образовавшегося в трубопроводе дефекта. Оперативность, которую может предложить описанный метод контроля, невозможно переоценить. В критических ситуациях, когда существует риск развития дефекта и возникновения аварии, необходимо быстро реагировать на малейшую возможность появления нештатной ситуации и как можно быстрее принять меры по её устранению. Во многом именно такие маленькие свищи, незаметные для человеческого глаза, служат причиной появления проблемных зон, которые впоследствии могут развиться до высокой степени, способной привести к аварии и выходу из строя какого-либо объекта.

РАЗРАБОТКА МЕТОДА ФИКСАЦИИ УТЕЧКИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В ТРУБОПРОВОДАХ ТЭС И АЭС ПРИ ПОМОЩИ ЛАЗЕРНОЙ УСТАНОВКИ

Разрабатываемый в данном разделе метод основан на использовании лазерного излучения, а конкретнее на зондирующем его свойстве: расположенные на пути распространения лазерного луча объекты вызывают его поглощение или отражение от своей поверхности.

Принцип действия лазерного течеискателя основан на измерении объёмной доли вещества утечки методом лазерной спектроскопии путём поглощения инфракрасного света лазера молекулами вещества. Любое вещество способно поглощать инфракрасное излучение лазера в определённых диапазонах длин волн. Именно эта способность и позволяет использовать резонансные полосы поглощения вещества для его дистанционного обнаружения.

Разрабатываемый метод использует принцип сравнения интенсивности двух лучей зондирующего излучения лазера: входного в среду и выходного из среды. Существует две схемы реализации метода:

Согласно первой схеме (рисунок 2) луч лазера, исходящий от источника, отражается от потенциального облака утечки и попадает на приёмник, расположенный на той же стороне, что и источник.

Характерным отличием второй схемы является наличие зеркала за облаком утечки, которое отражает первый прошедший луч и заставляет его пройти через облако дважды. Это позволяет увеличить чувствительность измерения интенсивности лучей и в целом повысить достоверность обнаружения утечки. Структурная схема № 2 представлена на рисунке 3.

Приемник лазерного излучения преобразует попадающую на него интенсивность луча в электрический сигнал, который поступает на плату АЦП. В зависимости от объёма работы и характера излучения плата АЦП может содержать в себе несколько каналов для ускорения процесса измерения. Эта микросхема обладает очень малой степенью нелинейности, устойчива к изменению температурного режима и потребляет малые входные токи.

Аналого-цифровой преобразователь преобразует напряжение с приемника излучения в двоичный код. Современные АЦП позволяют обеспечить хорошее быстродействие таких операций, которое по времени занимает около 30 нс. Помимо этого погрешность современных преобразователей может достигать максимально низких значений, что только улучшает процесс преобразования.

После преобразования напряжения происходит передача данных в блок обработки, работающий от микропроцессора. В блоке обработки заложен специальный алгоритм, который позволяет на основе поступающих в него данных рассчитать искомую потерю интенсивности исходного лазерного луча.

ВЫБОР РАБОЧЕЙ ДЛИНЫ ВОЛНЫ ЛАЗЕРНОГО ИСТОЧНИКА

Ключевым параметром разрабатываемого метода контроля является значение длины волны излучения лазера. Для того чтобы выбрать рабочую длину волны излучения лазера, необходимо знать на какой длине волны происходит излучение контролируемого трубопровода с целью разнесения по спектру полезного сигнала лазера и фонового излучения нагретого трубопровода. Для этого воспользуемся законом Планка и смоделируем ситуацию, при которой трубопровод имеет температуру внешней стенки 280 °C.

Вот такой график получается при расчёте:

Синяя линия на этом графике демонстрирует

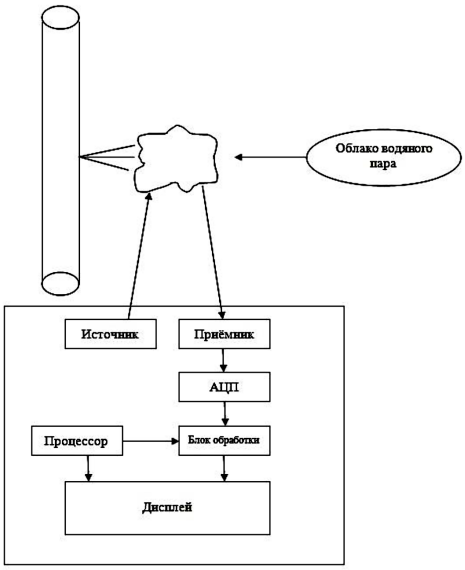


Рисунок 2.
Структурная схема № 1

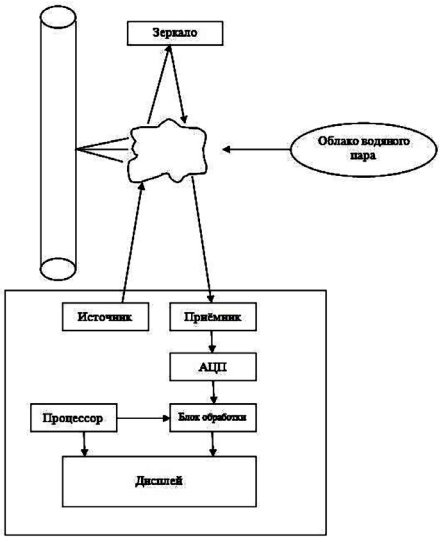


Рисунок 3.
Структурная схема № 2

степень излучения внешней стенки трубопровода при температуре 550 градусов Кельвина на разных длинах волн. Из графика видно, что пик излучения приходится на длину волны 5 мкм. Следовательно, длину волны лазера необходимо выбирать максимально отличной от данной величины.

Полученный график наглядно демонстрирует, что на длинах волн меньше 2 мкм влияние излучения трубопровода минимально. Это позволяет пренебречь его «свечением» на низких длинах волн.

Исходя из сравнительного анализа применяемых в настоящее время лазеров, примем в качестве рабочей длину волны излучения лазера 1,5 мкм.

Данный график наглядно демонстрирует, что выбранная длина волны излучения лазера и длина волны излучения нагретого трубопровода лежат в разных частях спектра. Это даёт основание утверждать, что можно уверенно выявлять полезный сигнал на фоне шумового излучения трубы.

РАСЧЁТ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ МЕТОДА

Измеренное соотношение интенсивностей входного и выходного лучей позволяет определить наличие утечки на каком-либо участке трубопровода. Такая характеристика называется чувствительностью, для её расчёта воспользуемся формулой Бугера:

$$I = I_0 \cdot e^{-k_\lambda \cdot l},$$

где k_λ - показатель поглощения среды, l – толщина облака вещества утечки.

Чувствительность представляет собой соотношение интенсивностей входного и выходного лучей:

$$S = \frac{I_0}{I_1}$$

Отклонение чувствительности от 1 будет свидетельствовать о том, что на участке контроля трубопровода обнаружена течь. Это даёт возможность утверждать, что чувствительность разработанного метода позволяет регистрировать даже самые незначительные утечки, в которых концентрация вещества составляет минимальные значения.

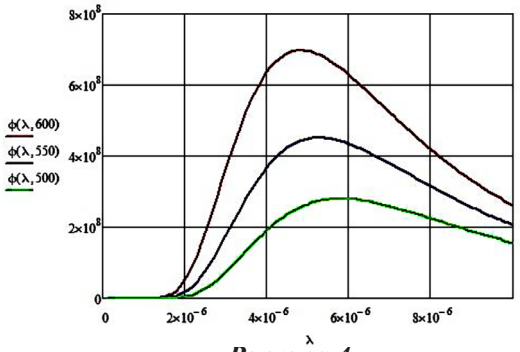


Рисунок 4.
Расчёт длины волны излучения трубопровода

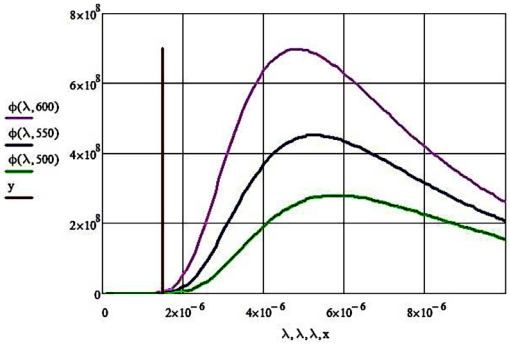


Рисунок 5.
Спектр длины волны лазера и излучения трубопровода

Список литературы:

1. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии «Общие положения обеспечения безопасности атомных станций» (НП-001-15) – 2015. – с. 56.

2. *Клюев В.В.* Неразрушающий контроль, том 5. – Москва: Машиностроение, 2004. – с. 418.

3. *Абидова Е.А., Пугачёва О.Ю., Пугачёв А.К.* Алгоритм поиска течи теплоносителя первого контура ВВЭР-1000. – Глобальная ядерная безопасность, 2014 №4(13), с. 62-67.

4. *Смирнов В.А.* Корреляционный метод поиска утечек жидкостей из трубопроводов под давлением. – 2005. – с. 20.

5. *Егоров В.А.* Автоматизированная система обнаружения течи теплоносителя с применением методов радиационного контроля. – ОАО «Концерн «Росэнергоатом», 2010. – с. 140.

6. *Ровинский Р.Е.* Обзор литературных материалов по оптическим методам определения химического состава и концентраций компонентов в газовых средах. – Москва,1995. – с. 28.

7. *Кузьмин Д.А.* Исследование безопасности эксплуатации трубопроводов энергетических реакторов на основе концепции «Течь перед разрушением». – АО «ВНИИАЭС», 2017. – с. 127.

8. *Баранов Ю.И.* Экспериментальное исследование индуцированного и континуального поглощения ИК-радиации основными атмосферными газами. – 2013. – с. 203.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОПТИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ УЗЛОВ КОНСТРУКЦИИ ОБЗОРНОЙ ТЕЛЕВИЗИОННОЙ КАМЕРЫ

ДЕНИСОВ Д.Г., КУДРОВА В.Д., СЕРИКОВ В.Ю.*

Московский государственный технический университет им.Н.Э.Баумана, г. Москва

АО "Лыткаринский завод оптического стекла", г. Лыткарино, Московская обл.

E-mail: lastro@lzos.ru

Аннотация: *В статье рассмотрены базовые операции технологии изготовления и сборки оптико-механических узлов обзорной телевизионной камеры, используемой на объектах специальной техники. Приведены принципы работы и основные характеристики станочной и контрольно-измерительной аппаратуры, используемой при производстве оптико-механических узлов конструкции рассматриваемого изделия.*

Ключевые слова: низкоуровневая телевизионная камера, объектив, технологический процесс, сборка и юстировка оптической системы.

TECHNOLOGICAL FEATURES OF MANUFACTURING OPTICAL AND MECHANICAL UNITS OF THE OVERVIEW TELEVISION CAMERA DESIGN

DENISOV D.G., KUDROVA V.D., SERIKOV V.YU.

Bauman Moscow State Technical University, Moscow

JSC "Lytkarino Optical Glass Factory" (LZOS), Lytkarino

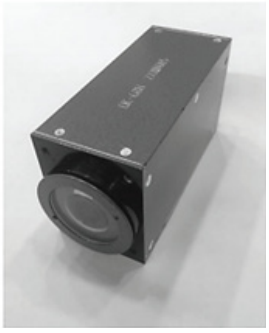
E-mail: lastro@lzos.ru

Abstract: *The article discusses the basic operations of manufacturing technology and assembly technology of optical-mechanical units of the overview television camera used on the special equipment. The principles of operation and the main characteristics of the machine tool and test and control equipment used in the production of the optical-mechanical units.*

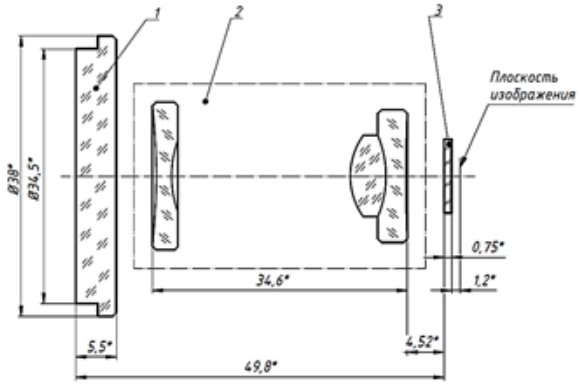
Keywords: low-level television camera, lens, technological process, assembly and adjustment of the optical system.

ВВЕДЕНИЕ

Начиная с 2003 года предприятием АО “ЛЗОС” ведется разработка и изготовление низкоуровневых черно-белых телевизионных камер. В 2011 году перед специалистами была поставлена задача разработки камеры с углом обзора 68±2° в горизонтальной плоскости, работающей в широком диапазоне освещенностей от 0,01 до 100000 лк. Результатом теоретических и экспериментальных исследований стала конструкция **обзорной камеры ОК-68Н** (рис. 1а)**,** технологии изготовления основных элементов которой представлены в работе. Технические характеристики камеры приведены в таблице 1.



а)



б)

Рисунок 1.
а) - фотография внешнего вида конструкции обзорной телевизионной камеры
б) - функциональная оптическая схема:
1 - защитное стекло; 2 - объектив;
3 - защитное стекло ПЗС-матрицы

Обзорная камера предназначенная для использования в составе бронированных машин и на автотранспорте в качестве дополнительного средства панорамного обзора местности. Наблюдение изображения от обзорной камеры осуществляется посредством оптической системы (рис.1б) с экрана телевизионного монитора.

Световой поток, отраженный от предмета на местности, пройдя через защитное стекло (поз.1 рис.1б), попадает в объектив обзорной камеры (поз. 2 рис.1б), который строит оптическое изображение в фокальной плоскости ПЗС-матрицы фотоприемного устройства (поз. 3 рис.1б). В свою очередь, фотоприемное устройство преобразует световое изображение в телевизионный сигнал, который передается на видеосмотровое устройство.

Таким образом, одним из ключевых элементов обзорной камеры является объектив с механической обвязкой (рис. 2).

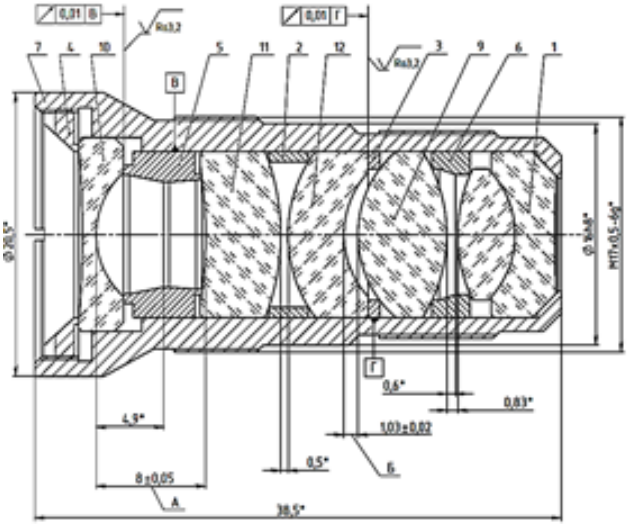


Рисунок 2.
Объектив обзорной камеры ОК-68Н:
1,9,10,11,12 - линзы; 2,3,4,5,6 - кольца; 7 - оправа

Качество функционирования видеокамеры будет определяться технологическими особенностями изготовления оптико-механических узлов ее конструкции.

Таблица 1.
Технические характеристики телевизионной камеры

Наименование камеры	Фокусное расстояние объектива телекамеры, мм	Угловое поле зрения телекамеры по горизонту, град	Относительное отверстие
ОК-68Н	5,58	68	1:1,4

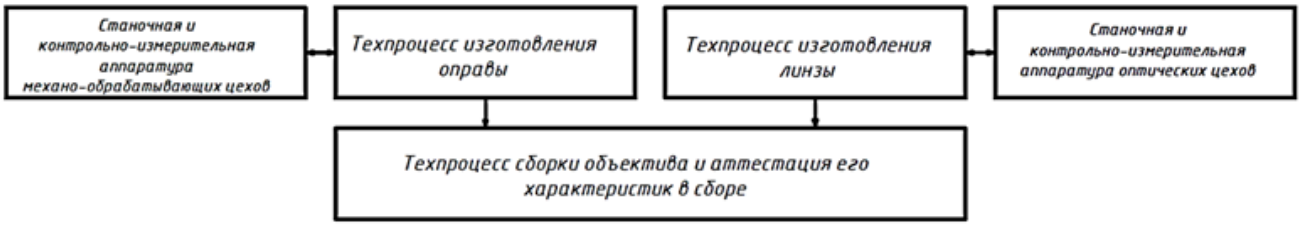


Рисунок 3.
Блок-схема технологического процесса изготовления оптико-механических узлов конструкции видеокамеры

С этой целью рассмотрим основные этапы получения готового изделия - объектива обзорной камеры ОК-68Н - в виде следующей блок-схемы (см. рис. 3).

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОПРАВЫ

В качестве материала для оправы объектива используется алюминиевый сплав Д16 ГОСТ 4784-97, который по твердости и механической прочности не уступает стали, но, в отличие от нее, обладает в 3 раза более легким удельным весом.

При изготовлении корпусной детали необходимо обеспечить правильность формы, малую шероховатость и точность взаимного расположения основных баз детали.

Технологический процесс состоит из этапа закрепления заготовки в трехкулачковом самоцентрирующем патроне (рис. 4) и последовательных переходов точения детали на токарно-винторезном станке 1ИС611В (рис. 5) от меньшего радиуса к большему для внутренних уступов и от большего радиуса к меньшему для внешних уступов, а также точения канавок внутренних и внешних.

Кулачки устройства плавно и одновременно перемещаются при помощи диска, что обеспечивает точное центрирование заготовки (совпадение оси заготовки с осью вращения шпинделя), то есть ее базирование по наружной цилиндрической поверхности.

После точения цилиндрических поверхностей и уступов с помощью резца нарезается резьба, с помощью фрезы изготавливается шлиц.

В таблице 2 приведены основные технические характеристики станка 1ИС611В.

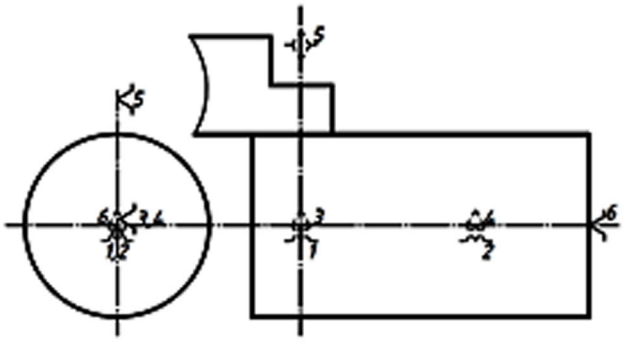


Рисунок 4.
Теоретическая схема базирования заготовки

Рисунок 5.
Фотография внешнего вида станка 1ИС611В

Таблица 2.
Основные технические характеристики станка 1ИС611В

Наибольший диаметр заготовки над станиной, мм	Наибольший диаметр заготовки над суппортом, мм	Наибольшая длина заготовки, мм	Диапазон скоростей, об/мин
250	125	500	25..2500

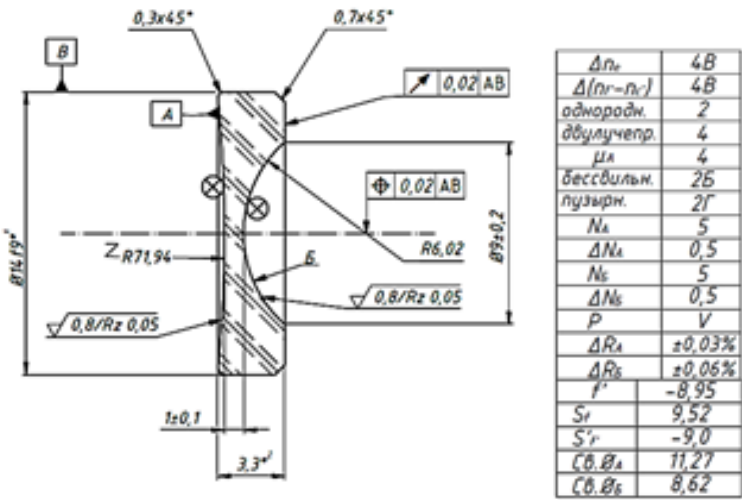


Рисунок 6.
Чертеж линзы позиции 10 и ее оптические характеристики

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОПТИЧЕСКОЙ ДЕТАЛИ

На примеры линзы позиции 10 (рис. 2) рассмотрим технологию изготовления оптической детали (рис. 6).

Качество изображения, создаваемого оптическим прибором, находится в прямой зависимости от качества материала, из которого изготовлены составляющие его оптические узлы и детали, а также от соответствия полученных размеров деталей требованиям чертежа [1]. Исходя из назначения и размеров детали выбираются необходимые показатели качества заготовки, которые представлены на чертеже (рис. 6). Линзу изготавливают из стекла марки БФ21.

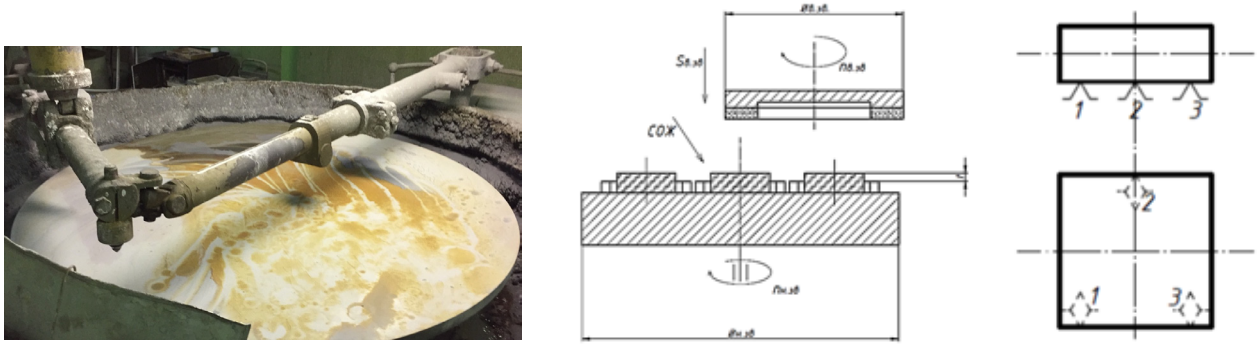
Весь технологический процесс изготовления линзы можно разделить на несколько основных этапов.

Получение заготовки осуществляется на распиливающем станке алмазным отрезным кругом. Затем заготовки устанавливают на планшайбу - магнитный стол станка ОС-1500 (рис. 7а) диаметром 300 мм и блокируют с двух сторон при помощи скоб, изготовленных из магнитного материала (рис. 7).

Благодаря поступательной и вращательной подаче алмазного инструмента происходит снятие слоя оптической детали толщиной 3,2 мм.

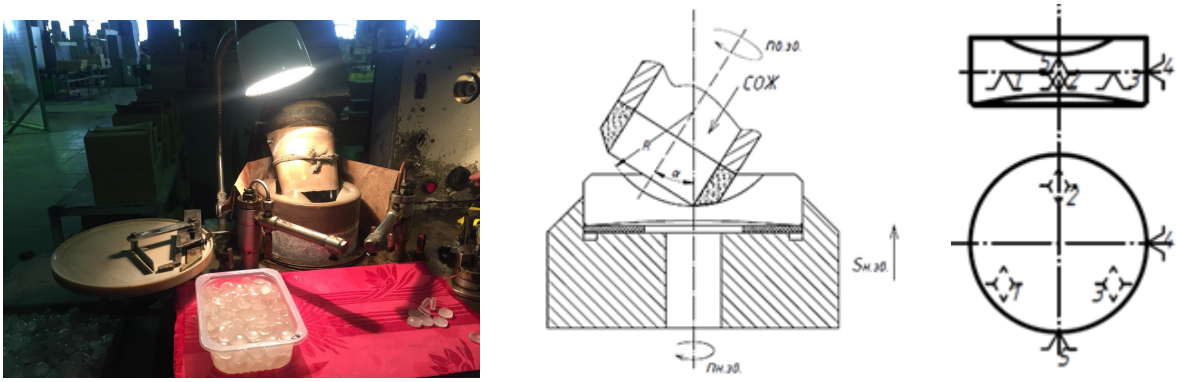
На рис. 7б представлен эскиз операции, а на рис. 7в теоретическая схема базирования заготовки на планшайбе магнитного стола.

Важность обозначения баз на теоретической схеме определяется последовательностью обработки технологических черновой и установочной баз.



а) *б)* *в)*

Рисунок 7.
Технологическая операция грубой обработки сторон заготовки: а) - фотография внешнего вида станка; б) - эскиз операции; в) - теоретическая схема базирования заготовки



а) *б)* *в)*

Рисунок 8.
Технологическая операция шлифования сфер: а) - фотография внешнего вида станка “Алмаз”; б) - эскиз операции; в) - теоретическая схема базирования

После этапа грубого шлифования заготовки промывают в содовом растворе и склеивают в столбик с помощью воска в специальном устройстве, представляющем собой винтовые тиски, что обеспечивает получение более равномерного и минимального по толщине слоя воска.

Далее детали округливают до заданного диаметра и шлифуют алмазным инструментом в три перехода для постепенного придания детали заданных радиусов и толщины (рис. 8).

Операция тонкого шлифования проводится на станке типа “Алмаз” (рис. 8а) и предназначена для придания оптической детали заданной геометрической формы с окончательными линейными и угловыми размерами, требуемыми классами чистоты и шероховатостью поверхностей с высотными показателями Rz0,05.

Полирование деталей производится с двух сторон смоляными полировальщиками с использованием полярита или фторопола для удаления слоя стекла, нарушенного шлифованием, с целью придания поверхностям полной прозрачности.

При изготовлении линзы также необходимо произвести центрирование, фасетирование и нанести просветляющие покрытия. Окончательный диаметр по заданному квалитету, а также радиусы кривизны, соответствующие ряду нормальных радиусов, формируются на этапах центрирования линзы. Важно отметить, что центры кривизны сферических поверхностей должны быть расположены на одной прямой, а если среди оптических поверхностей линз имеются плоскости, то они должны быть ортогональны этой прямой [6].

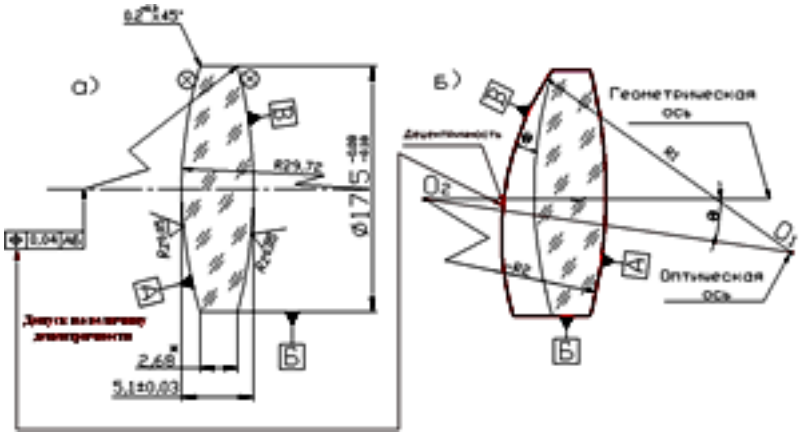


Рисунок 9.
а) - оптическая сферическая деталь; б) - соответствующее геометрическое представление величины децентрировки между оптической и геометрической осями для данной детали

Иначе говоря, оптические оси поверхностей линзы должны быть совмещены. Допуски на центрирование указывают в чертежах в линейных или угловых величинах. На рис. 9а представлена сферическая оптическая деталь с указанным позиционным допуском (децентрировкой поверхности (В) относительно базовых поверхностей А и Б). Децентрирование линз задается одним из допусков (ГОСТ 2.41281).

Линза называется децентрированной, если ее оптическая ось не совпадает с осью базовых поверхностей или геометрической осью, т. е. центры кривизны обеих поверхностей не лежат на оси боковой (чаще цилиндрической) поверхности линзы. На рис. 9 децентрированная линза представлена как правильная (центрированная) с “приставленным” к ней сферическим клином с углом *θ*. Этот клин вызывает смещение изображения относительно геометрической оси линзы, поперечный хроматизм и другие аберрации (кому, астигматизм). Децентричность линз характеризуется отрезком (в мм), равным расстоянию между геометрической и оптической осями линзы в центре последней. Длину отрезка, характеризующего величину децентричности, можно определить как

$$c = \frac{v f' D_{\text{пр}}}{10^4 D_{\text{л}}} \quad , \qquad (1)$$

где *v* - коэффициент относительной дисперсии; *f'* - фокусное расстояние линзы; $D_{\text{пр}}$ - диаметр рабочего зрачка прибора; $D_{\text{л}}$ - диаметр рабочего отверстия поверхности линзы.

На рабочем чертеже оптической детали или склейки со сферическими и плоскими поверхностями допуск на децентричность задается одним из трех нижеперечисленных.

1. Позиционный допуск - поперечное смещение, мм, центра кривизны поверхности линзы с оси базовых поверхностей. Определяется величина допуска в соответствии со следующим выражением

$$\text{C}_{\text{доп}} = \frac{2R}{f'} c \quad , \qquad (2)$$

где *R* - радиус сферической поверхности, поперечное смещение центра кривизны которой нормируется; с - линейное смещение оптической оси с оси базовых поверхностей, рассчитанное по формуле (1)

2. Погрешность формы, т.е. разнотолщинность линзы по краю

$$t_{\text{доп}} = \frac{2D_{\text{кр}}}{f'} c \quad , \qquad (3)$$

где $D_{\text{кр}}$ - диаметр края линзы, на котором измеряется разнотолщинность

3. Допуск перпендикулярности для плоской поверхности

$$\alpha_{\text{доп}} = \frac{2\rho'}{f'} c \quad , \qquad (4)$$

где *ρ´* - число угловых минут, выраженное в радианной мере (*ρ´ ≈ 3438*)

В качестве измерительного оборудования на данном этапе работы используется автоколлимационный прибор, предназначенный для контроля величины децентрировки линз - величины биения автоколлимационных бликов (рис. 10).

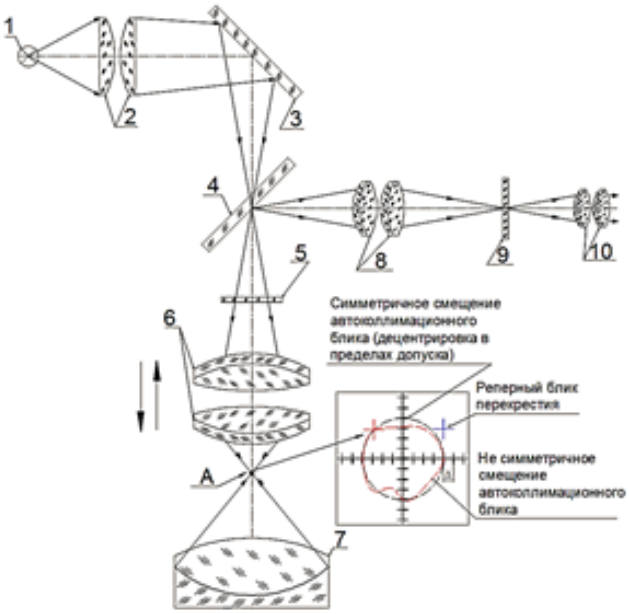


Рисунок 10.
Оптическая схема
автоколлимационного прибора

Оптическая схема представлена на рис. 10. Источник света 1 через конденсор 2 с помощью зеркала 3 освещает марку, прорезанную на алюминиевом слое зеркала 4.

Перемещением вдоль оси объектива 6 марка проектируется в автоколлимационную точку А - центр первой сферической поверхности центрируемой линзы 7. Изображение светящейся марки проектируется теми же объективами в плоскость марки. А затем объективом

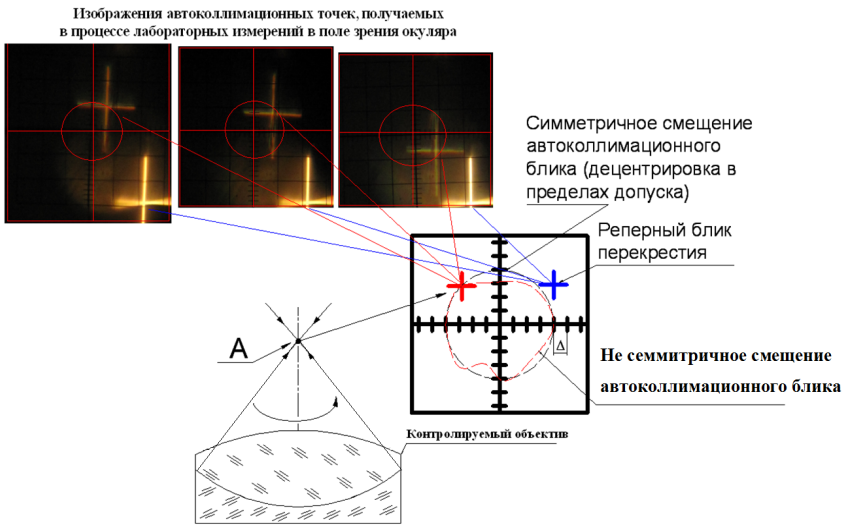


Рисунок 11.
Изображения автоколлимационных точек,
получаемых в процессе измерений в поле зрения окуляра в соответствие со схемой 9

8 автоколлимационное изображение марки проектируется на сетку 9 и рассматривается наблюдателем в окуляр 10. При контроле величины децентрировки испытуемую линзу устанавливают в специальный металлический патрон с отверстием под данный размер линзы и вращают ее относительно геометрического центра. Если оптическая ось центрируемой поверхности линзы не совпадает с геометрической осью испытуемой линзы, то при вращении последней в поле зрения окуляра микроскопа будет наблюдаться биение изображения светящейся марки. Величина биения, а следовательно и децентрировка оценивается по шкале сетки окуляра. после того, как будет проведена децентрировка первой поверхности линзы, автоколлимационную трубку фокусируют, перемещая объектив 6 внутри тубуса или всю трубку по колонне, на вторую поверхность испытуемой линзы, совмещая изображение марки с автоколлимационной точкой контролируемой поверхности линзы.

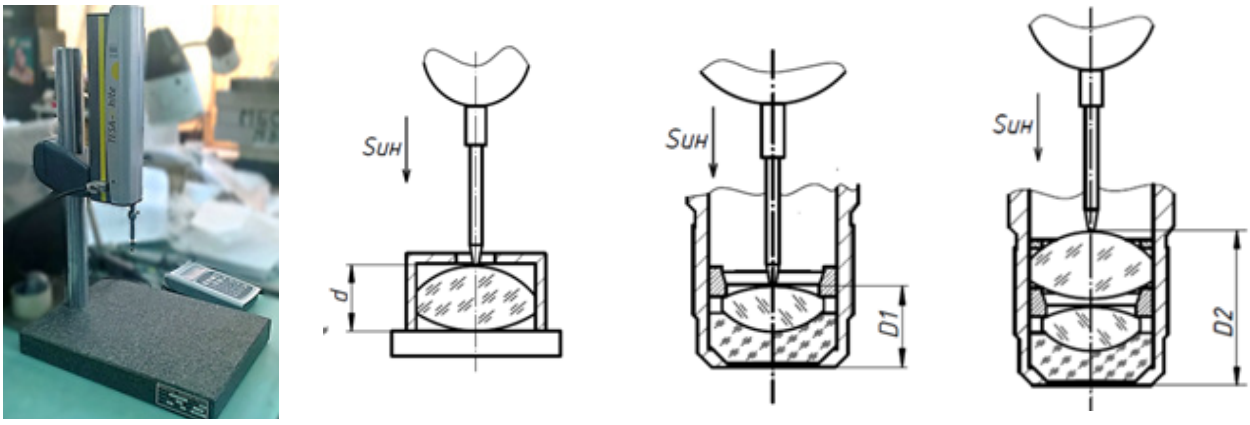
Положение автоколлимационных точек рассчитывается относительно первой поверхности линзы (или блока линз), обращенной в сторону объектива 6. Для первой поверхности расстояние до автоколлимационной точки равно радиусу этой поверхности, для остальных поверхностей его получают расчетным путем. На рис. 11 показаны изображения автоколлимационных точек (бликов), получаемых в процессе измерений величины децентрировки для изготавливаемой линзы.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС СБОРКИ ОБЪЕКТИВА

Процесс сборки объективов должен обеспечить получение необходимого качества изображения и требуемых параметров, таких как разрешающая способность, фокусное и рабочее расстояния. Кроме того, необходимо выпустить заданное количество объективов в установленные сроки, обеспечить надежную и длительную работу системы в реальных условиях эксплуатации.

Для объективов обзорной камеры разработана конструкция оправы и способ крепления, позволяющие разбирать и юстировать систему с максимально возможной точностью, что очень важно для обеспечения всех требований, предъявляемых к изделию. Объектив имеет “насыпную” конструкцию (рис. 2), в которой расстояния между компонентами выдерживаются с помощью промежуточных колец [4].

Измерение фактического значения воздушного промежутка между линзами при сборке объектива производится на специальном устройстве - вертикальном толщиномере (рис. 12). Сначала в специальной насадке производят замер толщины линзы *d* (а).



а) *б)* *в)* *г)*

Рисунок 12.
а) - фотография внешнего вида толщиномера и этапы технологии сборки объектива с "насыпной" конструкцией телевизионной видеокамеры: б) - замер толщины d; в) - измерение расстояния D_1; г) - измерение расстояния D_2

Затем с помощью индикаторного щупа по осевой линии измеряют расстояние D_1 - высоту объектива без измеряемой линзы (б). Устанавливая линзу в оправу объектива, производят замер расстояния D_2 (в). Таким образом, на основе полученных значений мы можем определить фактическую величину воздушного промежутка по формуле $h_{факт} = D_2 - D_1 - d$. Сравнивая фактическую величину с требуемой, мы определяем необходимость подрезки кольца до заданной величины с требуемой точностью.

С целью сохранения расчетного качества изображения на всех этапах технологического процесса осуществляется контроль характеристик материалов и деталей.

Основным контрольно-измерительным прибором при сборке объектива ОК-68Н является вертикальная оптическая скамья (рис. 13).

Проверка разрешающей способности объектива позволяет оценить качество изображения, формируемого оптической системой, установить его соответствие требуемому значению, выявить отклонения и определить меры, необходимые для их компенсации.

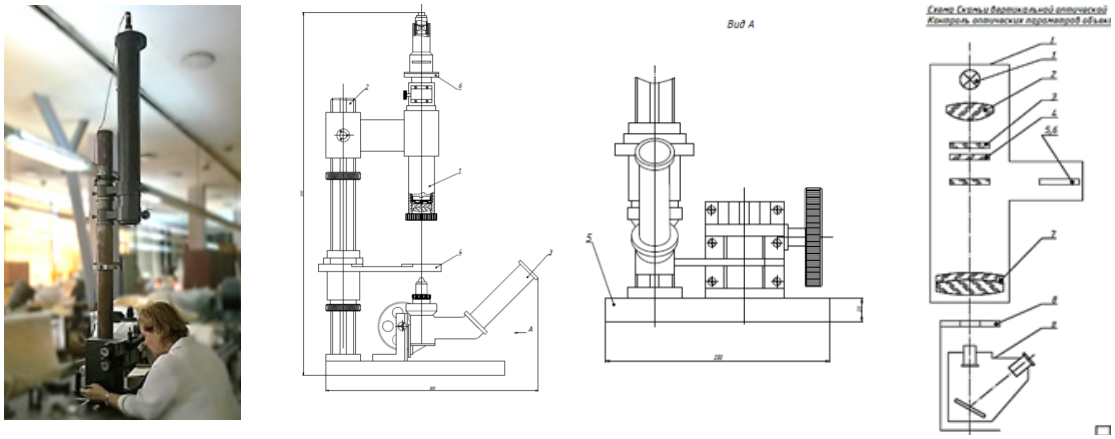
На столе расположен корпус скамьи 5 с колонной 2, блоками питания и тумблерами. На корпусе имеются две перемещающиеся каретки с ходовыми винтами. В зависимости от проводимых измерений, в них могут устанавливаться визирный микроскоп и индикатор часового типа или измерительная пластинка. По колонне с помощью блока, расположенного внутри колонны, передвигается объективодержатель 4 и жестко связанная с ним отсчетная шкала. Для быстрого и точного перемещения объективодержателя служат рукоятки на корпусе. Через измерительный микроскоп 3, расположенный в нижней части корпуса скамьи, производят снятие отсчетов с отсчетной шкалы.

На колонне установлен коллиматор 1. В револьверной головке коллиматора 6 установлен набор мир и точечных диафрагм.

Испытуемый объектив устанавливают так, чтобы центр его входного зрачка находился на оси вращения поворотного устройства. В фокальную плоскость коллиматора устанавливают штриховую миру. По полученному изображению миры, формируемому объективом в центре поля зрения, производится последовательное снятие данных и определяется разрешающая способность.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлен результат проведенных исследований и анализа основных технологических операций изготовления оптико-механического узла обзорной телевизионной камеры ОК-68Н - корпуса - и одного из важнейших его оптических элементов - объектива - в современных производственных условиях на АО "ЛЗОС". Все требования по качеству и точности, предъявляемые как к сборочной еди-



а) *б)* *в)*

Рисунок 13.
Скамья вертикальная оптическая:
а) - фотография внешнего вида; б) - конструктивное исполнение: 1- коллиматор; 2 - стойка; 3 - микроскоп; 4 - столик; 5 - плато; 6 - револьверное устройство; в) - функциональная схема: 1- лампа; 2 - конденсор; 3 - светофильтр; 4 - матовое стекло; 5 - набор мир; 6 - набор точечных диафрагм; 7 - объектив; 8 - столик

нице в целом, так и к отдельным оптическим деталям, могут быть реализованы на производственных площадках технологических подразделений оптического предприятия. Дальнейшее развитие данной работы связано прежде всего с разработкой цветных камер, что, безусловно, будет сопровождаться развитием технологий производства оптических материалов, внедрением новой оснастки, современного станочного оборудования отечественных производителей.

Список литературы:

1. Справочник технолога - оптика / Под ред. М.Н.Окатова. СПб.: Политехника, 2004. - 680 с.;

2. Сборка оптических приборов: Учебник для средн. проф.-техн. училищ / А.А.Ефремов, В.П. Законников, А.В.Подобрянский, В.Сальников. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Высш. школа, 1983. - 319 с., ил. - (Профтехобразование).;

3. Конструирование точных (оптических) приборов: Учебное пособие. Латыев С.М. - СПб.: Политехника, 2007. - 579 с.:ил.;

4. Основы проектирования конструкций объективов: Учебное пособие. Крынин Л.И. - СПб, СПбГУ ИТМО, 2006. - 254 с.;

5. Анализ некоторых проблем сборки светосильных объективов, С.М. Латыев, Буй Динь Бао, П.А.Белойван, А.Г. Табачков, “Оптический журнал”, 82, 12, 2015.;

6. Инженерная методика расчета допусков на первичные погрешности центрировки линзовых объективов, С.М.Латыев, И.Н.Тимощук, “Оптический журнал”, 83,12,2016.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС ИЗГОТОВЛЕНИЯ И МЕТОД КОНТРОЛЯ АСТРОНОМИЧЕСКОГО ЗЕРКАЛА С ГИПЕРБОЛИЧЕСКИМ ПРОФИЛЕМ

ТАРАСОВ В.Д., ДЕНИСОВ Д.Г., СЕМЕНОВ А.П.*

Московский государственный технический университет им.Н.Э.Баумана, г. Москва

АО "Лыткаринский завод оптического стекла", г. Лыткарино, Московская обл.

E-mail: lastro@lzos.ru

Аннотация: *В работе рассматривается технологический процесс изготовления и метод контроля вторичного выпуклого гиперболического зеркала. Его особенностями являются асферический профиль поверхности, ряд конструктивных элементов, а также материал подложки – астроситалл, обладающий около нулевым коэффициентом термического линейного расширения (КТЛР). В работе представлены наиболее важные операции технологического процесса, включающие предварительное формообразование и асферизацию поверхности. Рассмотрена функциональная схема прибора контроля на основе оптической схемы Хиндла, а также конструктивная реализация прибора контроля.*

Ключевые слова: технологическая схема, изготовление оптики, контроль оптики, асферические зеркала, оптика телескопов, астрономическое зеркало, контроль параметров формы поверхности, сфера Хиндла.

TECHNOLOGICAL PROCESS OF MANUFACTURING AND METHOD OF CONTROL OF ASTRONOMICAL MIRROR WITH A HYPERBOLIC PROFILE

V.D.TARASOV, D.G DENISOV, A.P.SEMENOV* .

Bauman Moscow State Technical University, Moscow

JSC "Lytkarino Optical Glass Factory" (LZOS), Lytkarino

E-mail: lastro@lzos.ru

Abstract: *The paper discusses the manufacturing process and the method of control of a secondary concave hyperbolic mirror. Its features are the aspherical surface profile, a number of structural elements, as well as the substrate material - astrositall, which has about zero thermal linear expansion coefficient (TLEC). The paper presents the most important operations of the technological process, including preshaping and asphericization of the surface. The functional scheme of the control device on the basis of the Hindle optical scheme, as well as the constructive implementation of the control device are considered.*

Keywords: technology system, optics manufacturing, optics control, aspherical mirrors, telescope optics, astronomical mirror, control of surface shape parameters, Hindle Sphere.

ВВЕДЕНИЕ

На протяжении многих лет асферические зеркала исполняют роль базовых элементов астрономических телескопов космического и наземного базирования. Использование данного типа поверхности обусловлено существенным преимуществом асферической оптики перед сферической – возможностью исправления аберраций, прежде всего сферической, что достаточно важно при формировании изображения. Применение оптических деталей с такими конструктивными особенностями обеспечивает повышение качества изображения объективов (разрешающей способность, шкала относительных диаметров и т. п.), увеличение относительного отверстия и углового поля, позволяет упростить конструктивное исполнение (за счет сокращения числа компонентов, уменьшения их размеров и, соотв., массы). Использование асферических зеркал, имеющих уникальную конструкцию и оптический материал, позволяет эксплуатировать подобные изделия в наземных и космических условиях.

Для изготовления зеркал используются стеклокристаллические материалы, обладающие рядом бесценных эксплуатационных свойств: близкий к нулю КТЛР, высокая изотропность, высокая механическая прочность, относительно малая плотность, высокая стабильность, доступная цена.

ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОПТИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА

Так как в данном изделии недопустимы влияния температурных колебаний на размеры конструкционных элементов, в качестве материала выступает стеклокристаллический материал астроситалл СО-115М с низким ТКЛР.

Характеристики астроситалла[1] представлены в таблице 1.

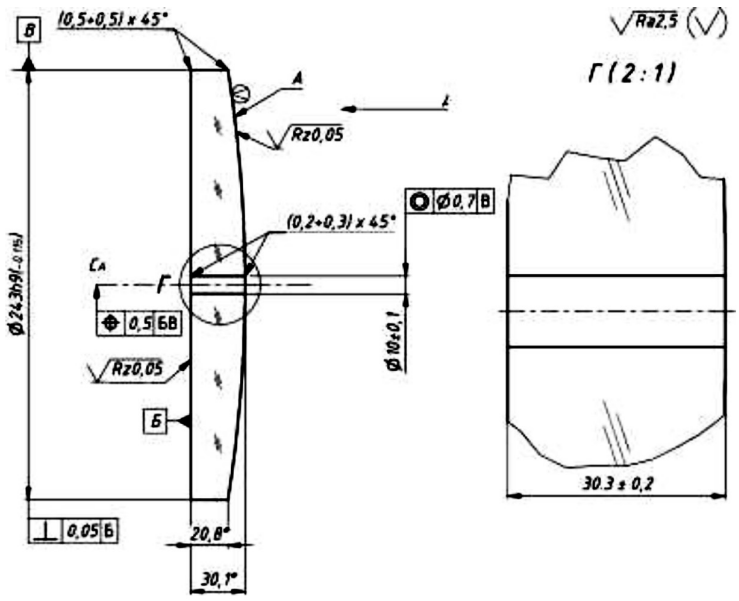
ОСНОВНЫЕ ЭТАПЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

Рассмотрим наиболее ответственные технологические операции создания изделия с требуемыми показателями качества, указанные на чертеже (рис. 1). Разрабатываемое изделие получается из заготовки на основе астроситалла путём применения предложенного в работе технологического процесса изготовления, основанного на операциях последовательной шлифовки, кругления, сверления, фрезеровки, шлифовки для получения асферики и доводки с контролем всех параметров, а так же нанесением требуемых оптических покрытий.

Основой для технологического процесса создания рассматриваемого изделия являются отработанная технология, разработанная в «АО ЛЗОС» для изготовления асферической оптики [2]. Она заключаются в последовательной обработке заготовки посредством фрезерования, полирования, шлифования и доводки. В рассматриваемом технологическом процессе изготовления изделия гиперболический профиль поверхности формируется после создания осевого отверстия. Для предотвращения срывов на краях в осевое отверстие устанавливается вспомогательная стеклянная вставка. Данная мера также позволяет проводить равномерную обработку рабочей поверхности на стандартном оборудовании со стандартной программой работы.

Таблица 1.
Основные свойства ситалла СО-115 М

Температура варки	1580 °С
Способ формования	литье
Средний ТКЛР в диапазоне температур от -60 °С до + 60 °С, ($К^{-1}$)	$\pm 0{,}2 \div \pm 1{,}5 \times 10^{-7}$
Плотность, ($г/см^3$)	2,46
Жаропрочность под нагрузкой, °С	930
Температура текучести, °С	1100
Однородность заготовок по ТКЛР, $\alpha \cdot 10^{-7}$ $град^{-1}$	0,05 ÷ 0,2
Химическая устойчивость: к влажной атмосфере кислотоустойчивость	А1



Основные характеристики изделия:

1. Среднее значение КТЛР $\pm 1.5 \times 10^{-7}$ °C^{-1} в диапазоне температур от -60 °C до +60°C
2. Фокусные расстояния составляют 284,27 мм и 1159,968 мм.
3. Двулучепреломление не более 15 нм/см
4. Двулучепреломление на свилях не более 15 нм/см
5. Пузырность 1-ой категории
6. Асферичность вершины 417 мкм
7. СКО поверхности А от теоретического гиперболоида не более 0.07 λ для λ = 0.6328 мкм. PV поверхности А не более 0.7 λ для λ = 0.6328
8. Недопустимо вскрытие пузырей на поверхности А
9. Внутренний диаметр световой зоны 50 мм, внешний диаметр световой зоны 227 мм
10. Зеркальное покрытие ИМ4 ИИЗ по ОСТ 3-1901-85, ρ(λср)=90%, α=0-30° для λ1=3.2-4.8 мкм и λ2=7.5-12 мкм

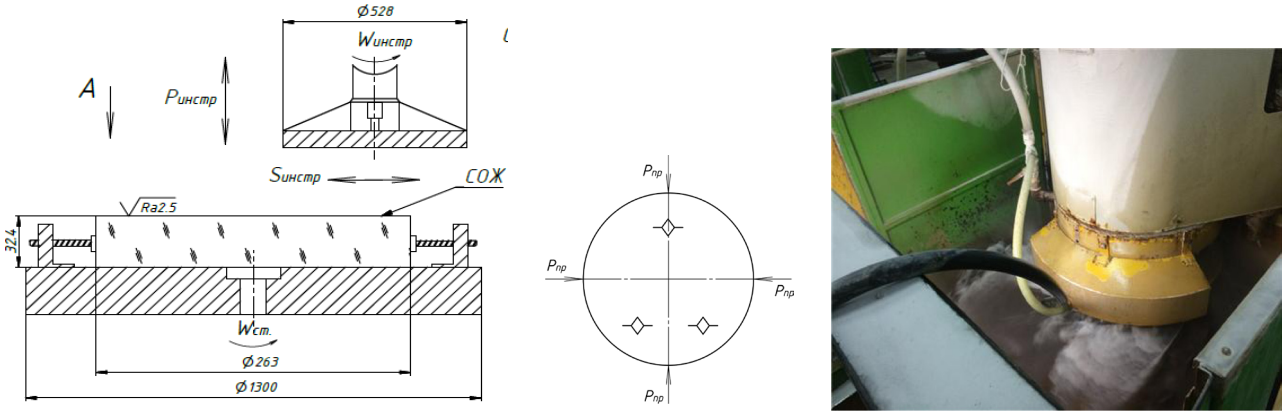
Рисунок 1.
Чертёж и характеристики зеркала

Шлифование заготовки по плоскости с двух сторон на станке ВСЗ-52

На первоначальном этапе заготовку помещают на плоскошлифовальный станок ВСЗ-52. Базирование производиться по боковым граням заготовки посредством поджатия.

Эскиз и схема базирование показаны на рисунке 2.

Операция производиться шлифовальным кругом диаметром 528 мм и повторяется со второй стороны заготовки. Выдерживается толщина 32.4+0.5мм.



а) *б)* *в)*

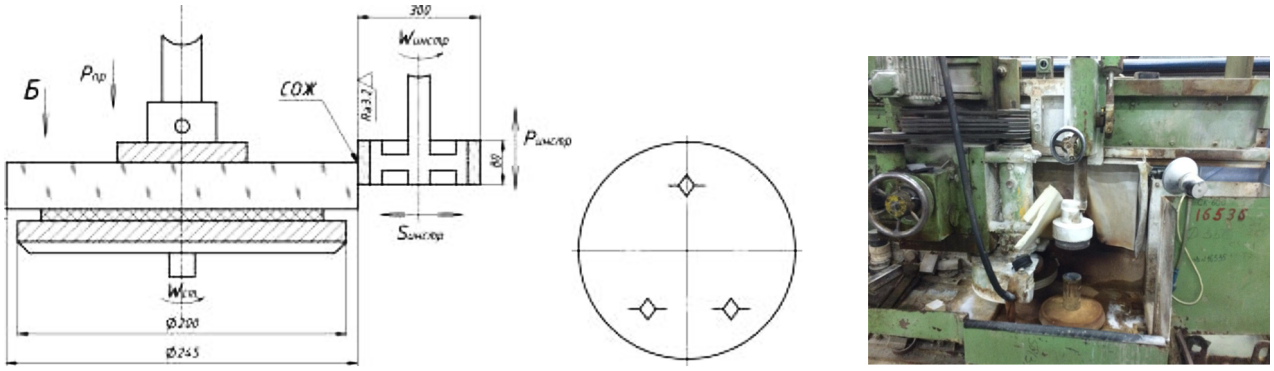
Рисунок 2.
Станок ВСЗ-52: а) – эскиз станка; б) – схема базирования; в) – фотография станка

Предварительное кругление на станке СК-600

Установленная на стол заготовка фиксируется посредством прижатия. После установки производиться центрирование.

Для кругления применяется шлифовальный круг с зернистостью 160/125 и концентрацией алмазоносного слоя 75%.

Эскиз и схема базирования показаны на рисунке. 3.



а) *б)* *в)*

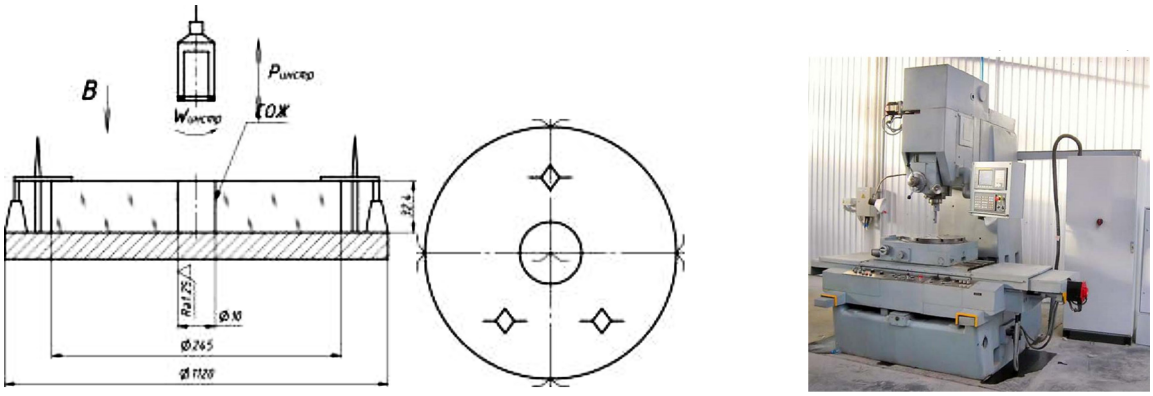
Рисунок 3.
Станок СК-600: а) – эскиз станка; б) – схема базирования; в) – фотография станка

Сверление центрального отверстия на станке 2Е-450 АФ-30

Установленная на стол заготовка фиксируется посредством прижатия. После установки производиться центрирование.

Отверстие формируется сверлом алмазным АС50 250/200 Ø10 мм, несоосность относительно цилиндрической поверхности В не более 0,1мм. Здесь же производиться фрезерование технологических фасок.

Эскиз и схема базирование показаны на рисунке 4.



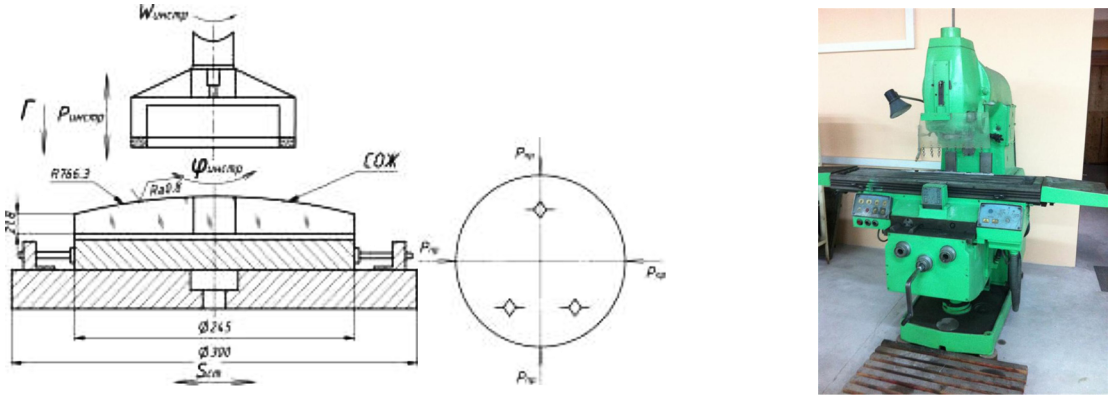
а) *б)* *в)*

Рисунок 4.
Станок 2Е-450 АФ-30: а) – эскиз станка; б) – схема базирования; в) – фотография станка

Фрезерование сферической поверхности на станке СФ-15

Установка заготовка на столе сопровождается предварительной наклейки поверхности Б на подложку, которая непосредственно фиксируется на столе станка СФ-15. Формирование сферической поверхности (Rбл.сф=766,3±5мм (h=9,6934мм)) необходима для последующей асферизации, так как выбранный в данном технологическом процессе метод формирования гиперболической поверхности основан на удалении лишнего материала, соответсвующего асферичности в каждой конкретной точке профиля поверхности.

Фрезерование осуществляется с выдерживанием отклонения стрелки прогиба от РПС Ø180. Rизм.=763,77мм на базе сферометра 90мм не более 0±0,010мм, толщина по краю 21,8-0,1мм. Эскиз и схема базирование показаны на рисунке 5.



а) *б)* *в)*

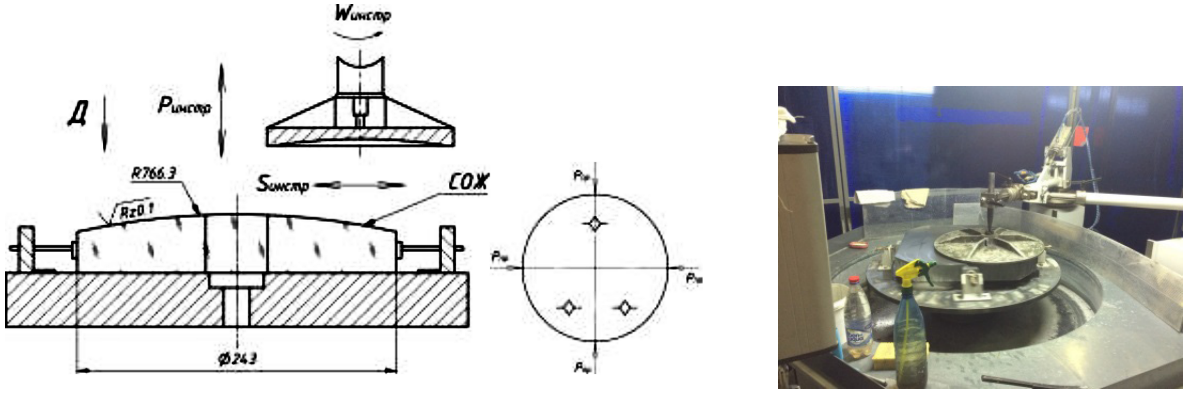
Рисунок 5.
Станок СФ-15: а) – эскиз станка; б) – схема базирования; в) – фотография станка

Асферизация шлифованием на станке NLP-500

После предварительной асферизации и отклейки от подложки изделие устанавливается на стол станка NLP-500. Выполняется интерферометрический контроль и строиться карта поверхности. Полученную топографическую карту поверхности в виде данных параметров высот профиля в заданной системе координат вносят в качестве исходных данных в программу расчёта съёма материала и траектории движения инструмента. Программа работает в соответствии с формулой Престона [4].

$$h_y = k\,P_y V_y S_y T_y \quad , \qquad (1)$$

где P_y – давление инструмента, V_y – скорость изделия относительно инструмента, S_y – коэф-



а) *б)* *в)*

Рисунок 6.
Станок NLP-500: а) – эскиз станка; б) – схема базирования; в) – фотография станка

фициент покрытия инструмента, T_y – время работы, k – технологический параметр, учитывающий состав абразивного или полирующего порошка (в данном случае микропорошки М14,М10), марку стекла, материал инструмента и температуру.

В зависимости от своего положения инструмент будет производить съём материала в течение определённого времени, формируя гиперболический профиль поверхности. В данном случае необходима асферичность при вершине 41.7 мкм. Эскиз операции можно увидеть на рисунке 10.

Как можно видеть в приведённое выражение (1) входит технологический параметр k, многофакторный анализ которого позволит в перспективе создать математическую модель автоматизированного метода формообразования сложнопрофильных оптических изделий.

Применимые для операций станки [3] в полном объёме имеются в АО ЛЗОС, что позволяет произвести полный технологический процесс на одном предприятии, существенно сократив расходы на транспортировку.

КОНТРОЛЬ ФОРМЫ ПОВЕРХНОСТИ

В процессе формообразования проводится контроль формы поверхности при помощи схемы с использованием анаберрационных точек. Такой схемой является схема Хиндла для контроля выпуклой поверхности гиперболоида вращения. Хиндл показал, как посредством отражения от сферы с центром вблизи недоступного фокуса гиперболического зеркала можно реализовать автоколлимационную схему контроля.

При использовании схемы Хиндла для контроля вторичного зеркала необходимо изготовить и проконтролировать либо одно сферическое зеркало большого диаметра, либо два сферических зеркала меньшего диаметра и использовать метод переналожения.

Для данной детали необходима сфера Хиндла диаметром

$$D = D_{\text{зерк}}\left(\frac{f_2}{f_1} + 1\right)\Big/\left(\frac{f_2}{f_1}\cdot\frac{D_{\text{экр}}}{D_{\text{зерк}}} + 1\right) = 659 \text{ мм}$$

и радиусом кривизны

$$R = f_1 \cdot \left(\frac{f_2}{f_1} + 1\right)\Big/\left(\frac{f_2}{f_1}\cdot\frac{D_{\text{экр}}}{D_{\text{зерк}}} + 1\right) = 780{,}6 \text{ мм}$$

Это относительно легко реализуется, поэтому выбирается схема с одной сферой.

В качестве прибора контроля выступает интерферометр Твайман-Грина (ИКАП-2). Интерферометр содержит осветительную, эталонную, регистрирующую ветви, рабочую ветвь с компенсатором и разделительный элемент. Пучок лучей, вышедший из лазера, преобразуют в параллельный пучок лучей, который светоделителем разделяется на два пучка: эталонный и рабочий. В рабочей ветви расположен компенсатор, выполненный из афокального и положительного менисков, и контролируемая поверхность, отразившиеся от которой лучи света образуют рабочий волновой фронт. О качестве контролируемой поверхности судят по измерениям интерференционной картины, которая возникает в результате взаимодействия рабочего и эталонного волновых фронтов.

Обработка зеркала ведётся до момента, когда отклонение формы поверхности гиперболоида становиться меньше требований спецификации. При анализе производится вычитание

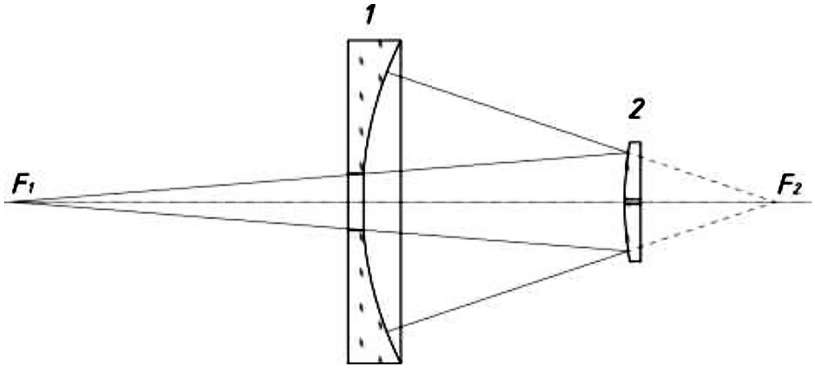


Рисунок 7.
Ход лучей в схеме Хиндла. 1 – сфера Хиндла, 2 – контролируемое зеркало

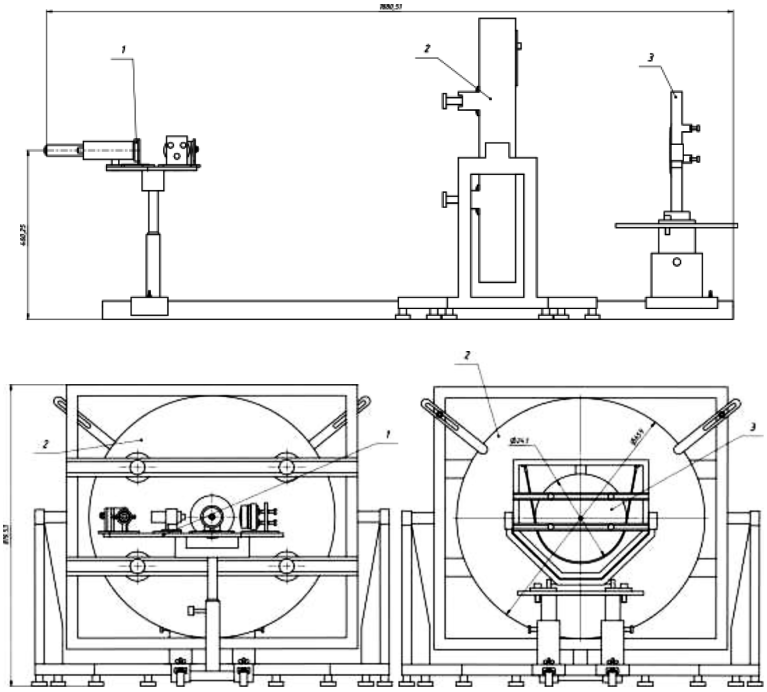


Рисунок 8.
Стенд контроля поверхности

волнового фронта сферического зеркала для получения истинной карты формы поверхности гиперболоида. Следует заметить, что контролируемый суммарный волновой фронт включает в себя дважды отраженный волновой фронт гиперболического зеркала и волновой фронт сферического зеркала Хиндла. Поэтому, ошибки контролируемой гиперболы удваиваются по сравнению с ошибками сферического зеркала.

На основе представленных выше принципов была создана представленная в работе схема прибора контроля (см. рис. 8). Она включает в себя: 1 – интерферометр ИКАП-2 в сборке на столе, 2 – сфера Хиндла в оправе, 3 – исследуемое зеркало в ременной раме, установленное на столе. Оптическая ось располагается параллельно полу. Все элементы двигаются по рельсам, положение на которых фиксируется посредством механизмов из прижимов и проточек.

Оправа сферы Хиндла устанавливает своей конструкцией высоту оптической оси, которая достигается столом интерферометра и столом зеркала посредством червякового механизма. Сфера Хиндла может быть отъюстирована при помощи четырёх прижимов.

Ременная рама, устанавливаемая на столе, предназначена для разгрузки зеркала. Юстировка осуществляется так же посредством прижимов.

Расстояние между элементами определяется совмещением фокусов элементов по принципу указанному выше.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный в работе технологический процесс изготовления гиперболического зеркала обеспечивает искомые показатели качества, обозначенные на чертеже и в ТЗ. Использование отработанных процессов и относительно компактное размещение мест обработки сильно снижают расходы на логистику и на освоение технологии. Разработана схема прибора контроля на основе сферы Хиндла и интерферометра ИКАП-2. Данный метод является оптимальным в экономическом плане и позволит снизить время необходимое для производства изделия.

Список литературы:

1. Справочник технолога-оптика. Ред. С.Н.Кузнецов, М.А.Окатов. – Л., Машиностроение, 1983.

2. *Ветриченко Э.А., Прохоров А.М., Трушин Е.Е.* Методы изготовления астрономической оптики. – М.; Наука, 1980.

3. *Михнев Р.А., Штандель С.К.* Оборудование оптических цехов. – М.; Машиностроение, 1991.

4. *Окатов М.А.,* Справочник технолога оптика – СПб: Политехника, 2004 г.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОПТИКО-МЕХАНИЧЕКОГО УЗЛА МОНОКУЛЯРА ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ НЕЙРО- И МИКРОХИРУРГИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ

ШАРИКОВА М.О., ДЕНИСОВ Д.Г., СЕРИКОВ В.Ю.*

Московский государственный технический университет им.Н.Э.Баумана, г. Москва

АО "Лыткаринский завод оптического стекла", г. Лыткарино, Московская обл.

E-mail: lastro@lzos.ru

Аннотация: *В работе рассмотрены основные элементы технологического процесса изготовления и контроля качества сборки базового оптико-механического узла лупы бинокулярной стереоскопической ЛБ-1 – монокуляра. Представлены наиболее важные технологические операции производства оптической детали, корпусного элемента, а также методика сборки всего изделия. Приведено конструктивное исполнение возможной реализации макета лабораторного стенда для аттестации качества сборки оптико- механического узла монокуляра.*

Ключевые слова: технологический процесс, оптико-механический узел, лупа бинокулярная стереоскопическая, контрольно-измерительная установка.

DESIGNING THE TECHNOLOGICAL PROCESS OF MANUFACTURING THE OPTICAL-MECHANICAL UNIT OF A MONOCULAR FOR CONDUCTING NEURO AND MICROSURGICAL OPERATIONS

SHARIKOVA M.O., DENISOV D.G., SERIKOV V.YU* .

Bauman Moscow State Technical University, Moscow

JSC "Lytkarino Optical Glass Factory" (LZOS), Lytkarino

E-mail: lastro@lzos.ru

Abstract: *The article discusses the main elements of the technological process of manufacturing and quality control of the assembly of a basic opto-mechanical unit of a magnifying glass binocular stereoscopic LB-1 – a monocular. The most important technological operations for the production of an optical part, a body element, as well as a technique for assembling the entire product are presented. The design of a possible implementation of a laboratory stand for the certification of the quality of an optical-mechanical assembly of a monocular is given.*

Keywords: technological process, optic-mechanical unit, stereoscopic binocular magnifier, measuring and measuring installation.

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день современная нейро- и микрохирургия не представляется без использования оптических и оптико-электронных систем наблюдения за ходом проведения сложнейших операций. В частности, одним из наиболее используемых в хирургии оптико-электронных узлов является лупа бинокулярная стереоскопическая (рис. 1), предназначенная для стереоскопического наблюдения операционного поля с увеличением в 2,5 и 3,3 раза и его освещения «холодным» светом. Одним из ответственных оптико-механического узлов данного изделия является монокуляр, выполняющий его главную функцию.

Рисунок 1.
Фотография лупы бинокулярой
со светодиодным осветителем ЛБ-1

МОНОКУЛЯР 2,5^{x}. ОСНОВНЫЕ ЭТАПЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

Целью работы является обзор базовых технологических операций производства и сборки готового оптико-механического изделия – монокуляра (рис. 2), включающего в свой состав основные операции изготовления корпусного элемента, производства оптической детали, а также методику оценки качества сборки готового изделия на основе предложенного конструктивного исполнения лабораторного измерительного стенда.

ОСНОВНЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОПЕРАЦИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КОРПУСНОГО ЭЛЕМЕНТА МОНОКУЛЯРА – ОПРАВЫ

Механическим корпусом является оправа монокуляра (рис. 3).

Основное оборудование – устройство ЧПУ: токарный с ЧПУ СТХ 310V3; Siemens 8400 SL.

Металлический пруток закрепляется в патрон трехкулачковый, изображенный на рис. 4а, его торец центрируется, просверливается меньшее из отверстий, выдерживая нужную длину, далее резцом (рис. 4б) подрезается торец.

Далее протачивается наружный диаметр (рис. 5а) и растачивается внутренний, резьба нарезается только в одном месте (рис. 5б),

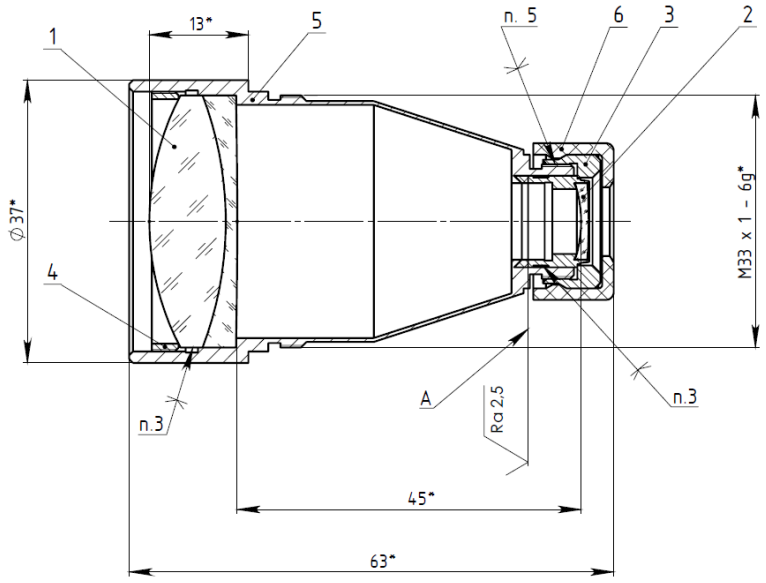


Рисунок 2.
Сборочный чертеж монокуляра 2,5^{x}
1 – линза склеенная, 2 – линза в оправе, 3 – втулка, 4 – кольцо, 5 – оправа, 6 - наглазник

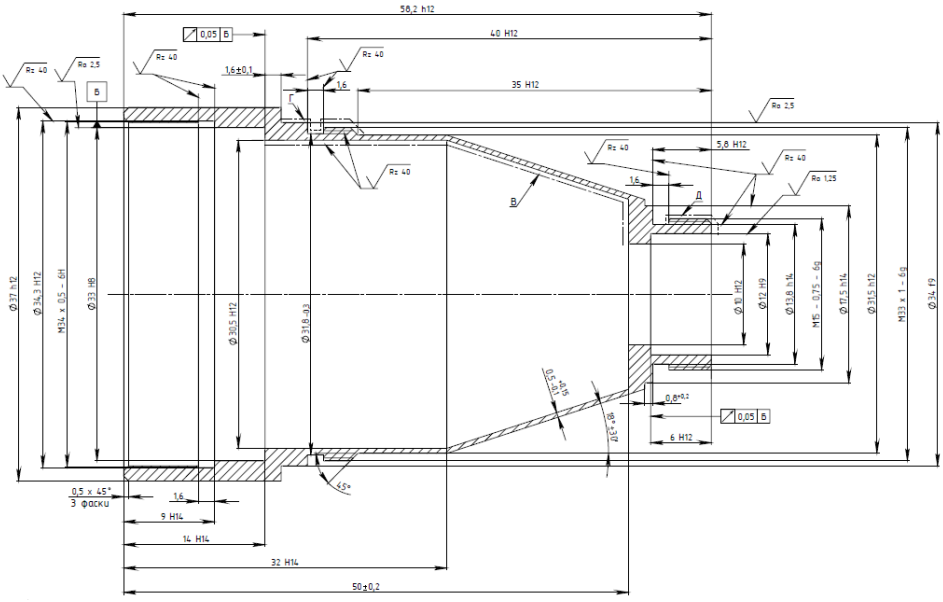


Рисунок 3.
Эскиз оправы

для дальнейшего закрепления промежуточной заготовке на второй резьбовой оснастке. В соответствии с эквивалентной схемой базирования, представленной на рис. 5в устанавливается заготовка в этих двух случаях. В конце деталь отрезается в нужный размер с притуплением до 0,2 мм.

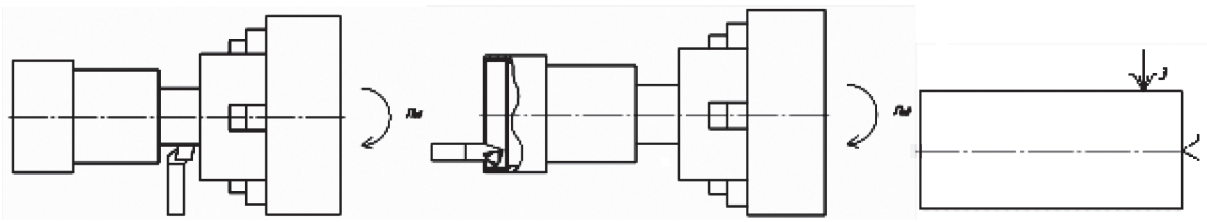
Контроль осуществляют с помощью штангенциркуля, пробок гладких и резьбовых, игольчатых глубиномеров и нутромеров. Перед транспортированием на термообработку производят промывку.

Далее производятся оставшиеся токарные работы с доведением размеров и поверхностей детали до требуемых отклонений и шероховатостей: точение итогового наружного контура, растачивание наружного контура, точение канавок и нарезание резьб. Перед транспортированием на гальванику осуществляют контроль с помощью штангенциркуля, игольчатых глубиномеров, калибр-скоб под резьбы, угломеров, «ПР» и «НЕ» колец и промывают изделие.

Токарные операции занимают 13 минут машинного времени.

а) ***б)***

Рисунок 4.
Фотографии оснастки для заготовки: а) – трехкулачковый патрон SDF3-210 – Б; б) – инструмент для подрезания торца заготовки – проходная пластина, закрепленная на нарезной державке



а) ***б)*** ***в)***

Рисунок 5.
а) – эскизы операции точения наружного контура; б) – операции нарезания внутренней резьбы; в) – эквивалентная схема базирования для данных операции

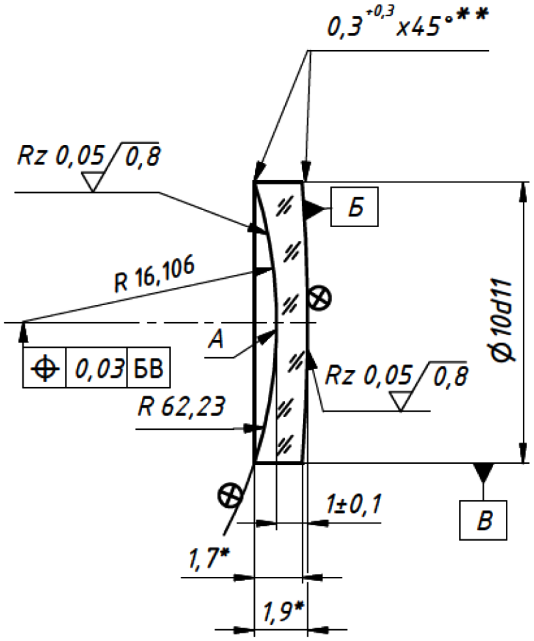


Рисунок 6.
Эскиз оптической детали (линзы)

Таблица 1.
Характеристики материала и параметры линзы

Δn_e	4Б
$\Delta(n_{F'} - n_{C'})$	4Б
Однороден.	3
Двулучепр.	3
μ_A	5
Бессвильн.	1Б
Пузырн.	2Б
N	5
ΔN	0,5
P	V
ΔR_A	±0,04%
$\Delta R_Б$	±0,03%
f'	-42,401
S_F	42,17
$S'_{F'}$	-43,3±0,8
$Øсв_A$	8,7
$Øсв_Б$	8,5

БАЗОВЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОПЕРАЦИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОПТИЧЕСКОГО ЭЛЕМЕНТА

Для обеспечения требуемых параметров (рис. 5 и табл. 1) используют обработку исходной заготовки по следующей технологии на основе наиболее важных операций.

Для определения размеров исходной заготовки нужно произвести расчет с учетом межоперационных припусков (рис. 7) [1]. Для распиливания стекла дисковыми алмазными кругами (пилами) оптимально использовать распиловочный станок СР-1500 (рис. 8).

Для предварительной обработки плоских поверхностей оптических деталей используют плоскошлифовальный станок ОС-1500 (рис. 9 и рис. 10а). С целью корректного закрепления обрабатываемой заготовки в оснастке составляются теоретические схемы базирования (рис. 10б).

После того, как заготовки разблокируют, их промывают в 4-6% содовом растворе и отправляют на межоперационный контроль толщины и разнотолщинности. Годные заготовки собирают в столбики и крепят на круглошлифовальном станке (рис. 11). Из условия хрупкости легко получить оптимальное количество заготовок в столбике, N = 20 шт.

После разбора столбиков производится промывка и протирка заготовок, и затем они

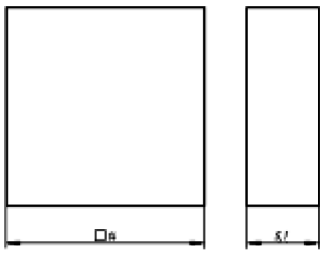


Рисунок 7.
Заготовка

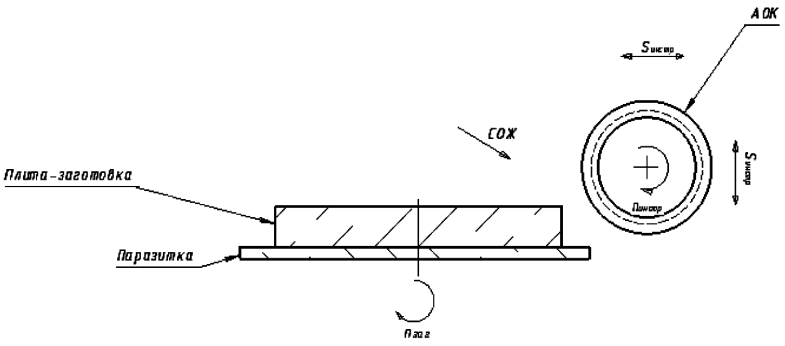
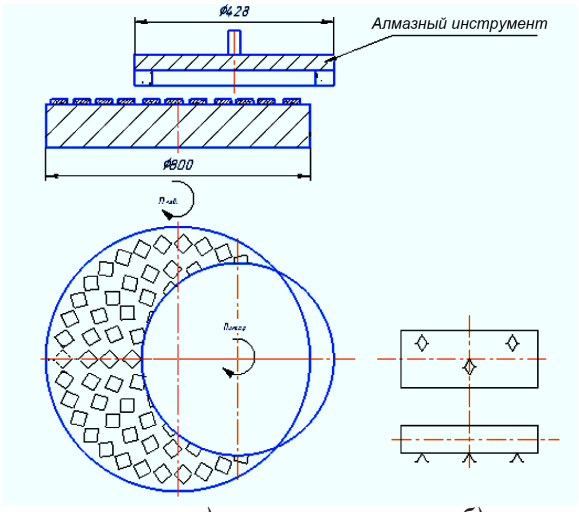


Рисунок 8.
Эскиз операции распиливания исходной заготовки на распиловочном станке СР-1500

Рисунок 9.
Фотографии внешнего вида станка ОС-1500



а) *б)*

Рисунок 10.
а) – кинематическая схема;
б) – теоретическая схема базирования с показом явных установочных баз

отправляются на межоперационный контроль диаметра заготовок и качества шлифовки. Годные транспортируют на участок обработки «сфер».

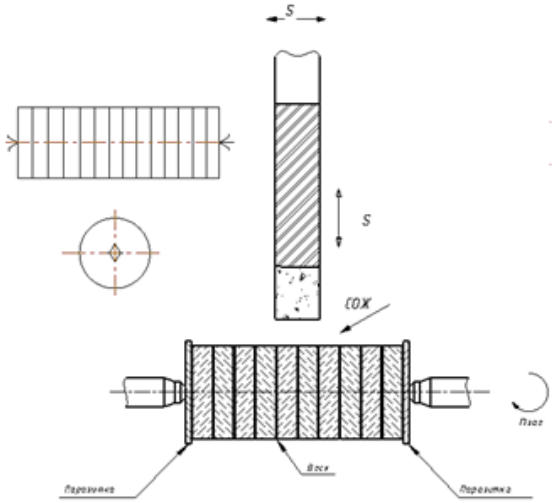
Данную операцию оптимально выполнять с использованием станка автомата АЛ-1М (рис. 12). Станок используют для обработки одиночных заготовок диаметром 10-50 мм с автоматическим съемом и установкой обрабатываемых заготовок в патрон шпинделя.

Далее заготовки фасетируются вручную и отправляются на контроль радиуса кривизны, толщины, разнотолщинности и качества шлифовки.

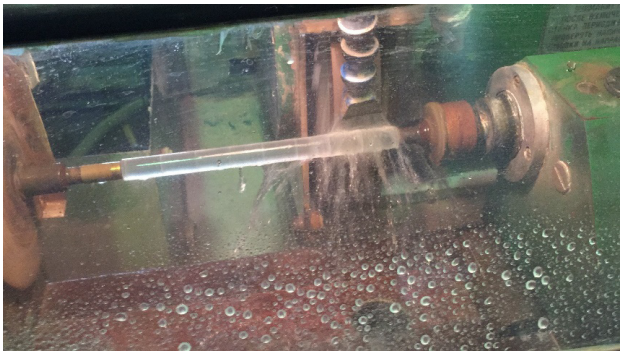
Годные заготовки транспортируют на участок шлифовки-полировки, где наклеиваются на смоляные пробочки и сначала шлифуются с двух сторон алмазным инструментом, а затем осуществляется полировка на станке 9ШП-50ЛШ (рис. 13).

После расклейки и промывки деталей проводят контроль по «цвету», чистоте полированных поверхностей и производят контроль толщины линз по цвету. Далее линзы центрируют на станке ЦС-50 в самоцентрирующих патронах (рис. 14). Децентрирование удобнее всего определять с помощью прибора СТ-41 [2].

Затем проводится контроль диаметра линз, размера фасок и чистоты поверхностей. На годные детали наносят просветляющее покрытие и после его проверяют.

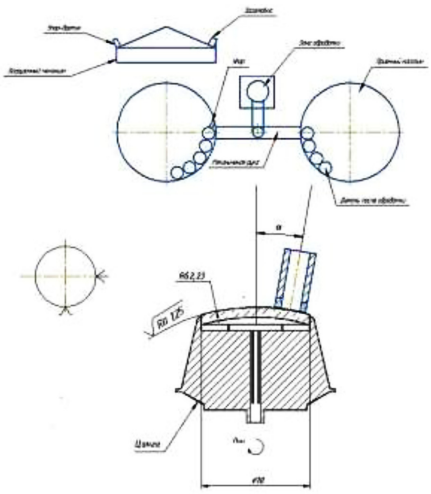


а)



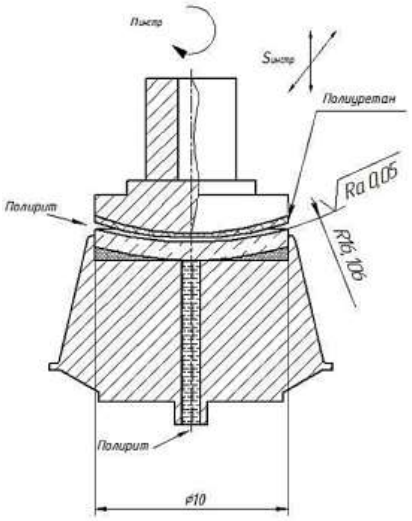
б)

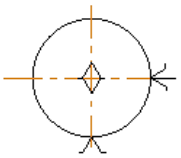
Рисунок 11.
а) – операция кругления на круглошлифовальном станке 3Б161 и теоретическая схема базирования;
б) – фотография внешнего вида



а) *б)*

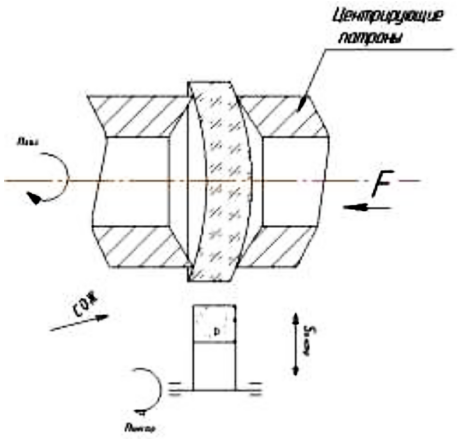
Рисунок 12.
а) – эскиз операции шлифования сферических поверхностей на станке-автомат АЛ-1М и эквивалентная схема базирования заготовки; б) – фотография внешнего вида





а) *б)* *в)*

Рисунок 13.
Операция полирования на станке 9ШП-50ЛШ: а) – кинематическая схема; б) – теоретическая схема базирования заготовки; в) – фотография внешнего вида



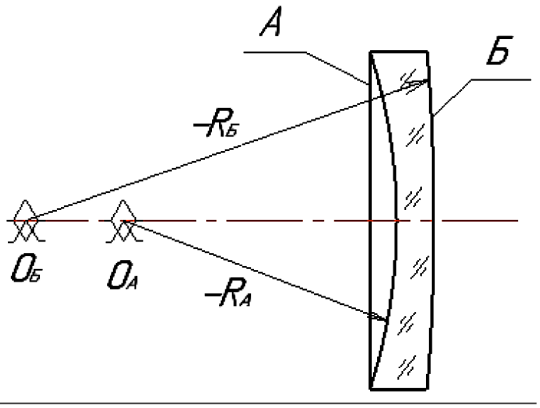


Рисунок 14.
Операция центрирования на центровочном станке-полуавтомате ЦС-50: а) – кинематическая схема; б) – теоретическая схема базирования заготовки

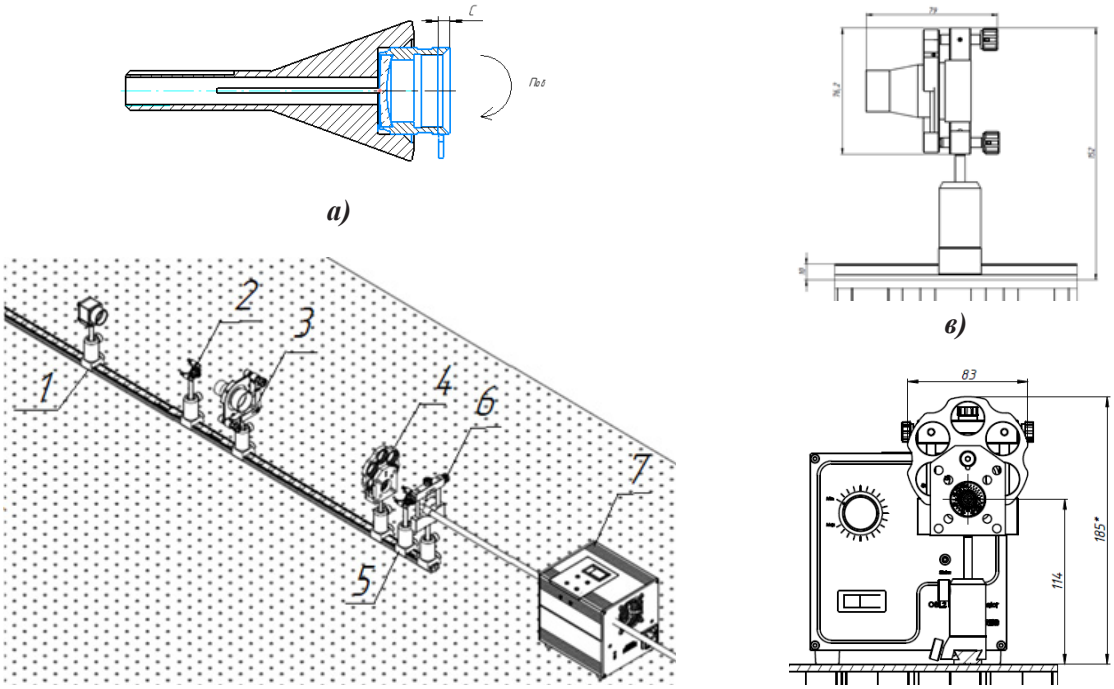


Рисунок 15.

а) – операция подрезания торца; б) – и внешний вид контрольно-измерительной установки на оптическом столе: 1 – камера, 2 – объектив, 3 – проверяемый монокуляр, закрепленный в кинетический держатель (в), 4 – колесо с мирой (г), 5 – конденсор, 6 – V-образный держатель, 7 – источник света

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ И КОНТРУКТИВНОГО ИСПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА ПРИБОРА КОНТРОЛЯ

Готовые узлы монокуляра (рис. 2) поступают на операцию сборки изделия, качество которой контролируется на предложенном в работе лабораторном стенде (рис. 15). Перед сборкой оптические и механические детали чистят [3]. Сначала в оправу объектива (5) устанавливают склеенную линзу (1), предварительно заполнив канавку оправы герметиком ВГО-1 [4]. Линза поджимается завернутым резьбовым кольцом (4). Далее устанавливают сборку (2) на посадочное место оправы (5), перед этим почистив его, и заворачивают втулку (3) на оправу (5) до упора. Затем производят контроль на установке, задача которого определить величину подрезки торца для итогового наблюдения резкого и четкого изображения миры [5]. На токарно-винторезном станке 95-ТС-1 производится подрезка (рис. 15а) и после опять проверяется качество изображения, даваемое монокуляром на установке [6]. В конце проводится визуальный контроль внешнего вида.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения данной работы был рассмотрен технологический процесс изготовления монокуляра для прибора ЛБ-1. Каждый этап изготовления рассмотрен детально, выбраны способы закрепления детали, подобраны инструменты и приспособления. Предложено оригинальное решение конструктивного исполнения лабораторного стенда контрольно-измерительной установки на основе модульного принципа построения и описана методика измерения на ее основе.

Список литературы:

1. Справочник технолога – оптика / Под ред. М.Н. Окатова. СПб.: Политехника, 2004. – 680 с.;

2. Инженерная методика расчета допусков на первичные погрешности центрировки линзовых объективов, С.М. Латыев, И.Н. Тимощук, «Оптический журнал», 83, 12, 2016.

3. Сборка оптических приборов: Учебник для средн. проф.-техн. Училищ / А.А. Ефремов, В.П. Законников, А.В. Подобрянский, Ю.В. Сальников. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. школа, 1983. – 319 с., ил. – (Профтехобразование).;

4. Основы проектирования конструкций объективов: Учебное пособие. Крынин Л.И. – СПб., СПбГУ ИТМО, 2006. – 254 с.;

5. Конструирование точных (оптических) приборов: Учебное пособие. Латыев С.М. – СПб.: Политехника, 2007. – 579 с.: ил.;

6. Анализ некоторых проблем сборки светосильных объективов, С.М. Латыев, Буй Динь Бао, П.А. Белойван, А.Г. Табачков, «Оптический журнал», 82, 12, 2015.

НЕЙТРАЛЬНЫЕ СТЕКЛА И ОСОБЕННОСТИ ИХ СИНТЕЗА В ГАЗОВЫХ ПЕЧАХ

ФИРСОВА Ю.А., ГУЛЮКИН М.Н., ХРАМОГИН Д.А.

АО "Лыткаринский завод оптического стекла", г. Лыткарино, Московская обл.

E-mail: j.firsova@bk.ru, m.gulyukin@lzos.ru, npk-74@lzos.ru

Аннотация: *Проведены серии производственных варок для получения оптического стекла нейтральных марок стекол в газовых горшковых печах в сосудах объемом 500 л. Подобраны количества введенных ионных красителей, определены зависимости соотношения $FeO:Fe_2O_3$, а также установлены окислительно-восстановительные условия для многих марок нейтральных стекол, которые обеспечивают получение стекол с требуемыми спектральными характеристиками.*

Ключевые слова: цветное оптическое стекло, нейтральные стекла, ионные красители, нейтральный светофильтр, фотометрия, спектрометрия и фотосъемка.

NEUTRAL GLASSES AND FEATURES OF THEIR SYNTHESIS IN GAS FURNACES

FIRSOVA J.A., GULYUKIN M.N., KHRAMOGIN D.A.

JSC "Lytkarino Optical Glass Factory" (LZOS), Lytkarino

E-mail: lastro@lzos.ru j.firsova@bk.ru, m.gulyukin@lzos.ru, npk-74@lzos.ru

Abstract: *A series of industrial cooking operations was carried out to obtain optical glass of neutral glass brands in gas pot furnaces in 500 l vessels. The amounts of introduced ionic dyes were selected, the dependences of the ratio of FeO: Fe2O3 were determined, and redox conditions were established for many brands of neutral glasses, which ensure the production of glasses with the required spectral characteristics.*

Keywords: colored optical glass, neutral glasses, ionic dyes, neutral filter, photometry, spectrometry and photographing.

Нейтральные стекла – цветные оптические стекла, полученные путем введения в шихту элементов переменной валентности, которые используются в качестве светофильтров в фотометрии, спектрофотометрии и для изготовления объективов съемочной аппаратуры. Нейтральные светофильтры (НФ) разделяют по их плотности. Самый слабый из них, обладающий наименьшей оптической плотностью, из стекла марки - НС2. Цифра 2 в данном случае означает кратность уменьшения света фильтра. В случае НС2 это будет ровно половина. Есть стекла еще темнее НС3 (пропускает 1/3 от всего света) до НС12 (1/12 света) [1, 6].

Светофильтры из стекол марки НС имеют почти неизменную интенсивность полосы пропускания в видимом диапазоне, равномерно снижая общее пропускание стекла при чем, не искажая цветовую гамму изображения.

Для создания равномерного пропускания в видимой области необходимо поддержание элементов переменной валентности в определенной степени окисления. Опыт варки нейтральных стекол на АО ЛЗОС в газовых горшковых печах показал, что основной вклад в неравномерность спектральных показателей стекла вносит железо, имеющее обратимый переход $Fe^{3+} \leftrightarrow Fe^{2+}$ [2]. Окно пропускания для Fe^{2+} характерно в длинноволновой области, а для Fe^{3+} в длинноволновой рис.1 [3]. Суммарное влияние обоих окисидов дает кривую оптической плотности, поднимающуюся к обоим концам видимого спектра и имеющую в зеленой области минимум, весьма сильно зависящий от соотношения $FeO:Fe_2O_3$.

На смещение химического равновесия $Fe^{3+} \leftrightarrow Fe^{2+}$ влияет окислительно-восстановительная среда и это отражается на изменении хода спектральной кривой светопоглощения рис. 2 [4].

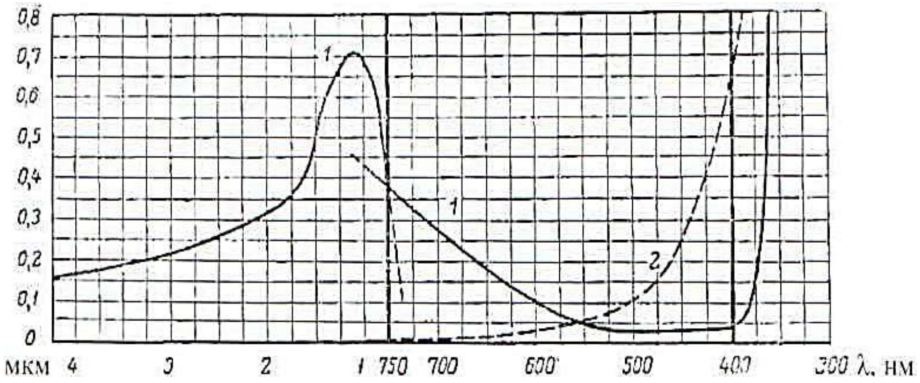


Рисунок 1.
Спектральные кривые показателя удельного поглощения в известково-натриевом стекле 1 – FeO, 2 – Fe_2O_3

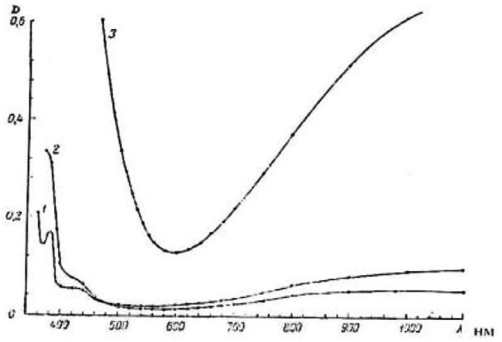


Рисунок 2.
Спектральные кривые оптической плотности для известково-натриево-калиевых стекол, окрашенных 3 % Fe_2O_3 и сваренных в различных условиях: 1 – в окислительных условиях с 5% селитры; 2 – в окислительных условиях с 5% селитры и 4% As_2O_3; 3 – восстановительных условиях с 0,8% древесных опилок

Таким образом, для достижения требуемых спектральных характеристик, необходимо не только постоянное соотношения Fe^{2+}/Fe^{3+}, но и строгое обеспечение требуемой атмосферы на протяжении всей варки.

Основываясь на исследованиях [2,3,4] и производственный опыт на сегодняшний день подобраны соотношения Fe^{2+}/Fe^{3+} и условия варок для стекол марок НС1, НС2, НС3, НС7, НС10, НС11 и НС12, что обеспечивает качество стекла 1 категории согласно ГОСТ9411-91. Селективный подход и сложность при варьировании состава по красителям возникла при варке стекол марки НС8 и НС9.

Опытные варки стекла марки НС9 в электрических печах в тиглях объемом 250 мл, показали, что содержание FeO должно быть 1,71 масс.%, Fe_2O_3 1,3 масс.% сверх 100%, что составляет Fe^{2+}/Fe^{3+} =1:0,76 и условия варки должны быть восстановительными.

Анализ спектральных кривых зависимостей светопропускания от длины волны, полученных промышленных варок марки НС9 в газовых печах в сосудах объемом 500 л показал, что данное соотношение необходимо сдвигать в сторону Fe^{3+} в пропорции 1:0,87

На спектральных кривых рис. 3. в видимом диапазоне можно выделить три максимума, которые характерны третьему красителю вводимого в состав нейтральных стекол – закись кобальта CoO, спектр поглощения которого представлен на рис. 4.

Его отличие от оксидов железа заключается в том, что он стабилен и не зависит от условий прохождения варки. Значительное его влияние на интенсивность окрашивания зависит от основного состава стекла и введенного количества CoO. Анализ полученных результатов спектральных характеристик производственных варок табл. 1. показал, что наиболее перспективное содержание CoO находится в интервале 0,050-0,060 масс.%.

Для нейтральных стекол марок НС8 содержание оксида кобальта должно быть в интервале 0,02-0,03 масс.%, в противном случае наблюдается сдвиг от допустимых значений по наибольшему отклонению от абсолютных значений показателя поглощения- $О_{мах}$ согласно ГОСТ 9411-91 [1].

Значения $а_{ср}$ и оср удовлетворяют требованиям ГОСТ при соотношение Fe2+/Fe3+=1:1 или при соотношении Fe^{2+}/Fe^{3+}=1:0,8. При вводе в шихту только оксида железа II происходит отклонение значений $а_{ср}$ ≤0,20 и $о_{мах}$ ≥30%. Ис-

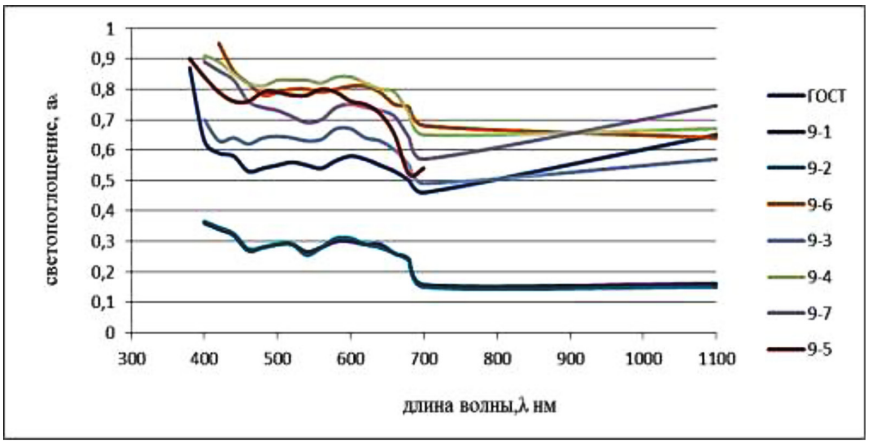


Рисунок 3.
Спектральные кривые оптической плотности стекла марки НС9 в диапазоне длин волн 400-1100 нм производственных варок

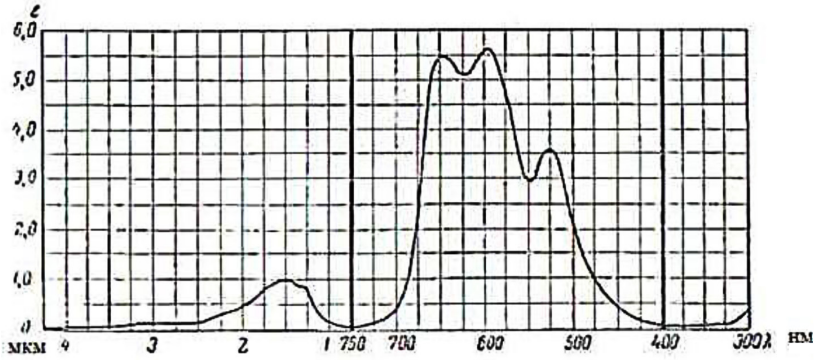


Рисунок 4.
Спектральная кривая показателя удельного поглощения CoO в известково-натриевом стекле [3]

Таблица 1.
Результат спектральных характеристик стекла марки НС9 производственных варок в сравнении с требованиями ГОСТ 9411-91

Варка	Fe^{2+}/Fe^{3+}	CoO	$a_{ср}$	$O_{ср}$	$O_{мах}$
ГОСТ	1/2[5]	0,0618[5]	0,55±0,11	≤10	≤20
9-1	1/2	0,0618	0,30	9,4	35,3
9-2	1/2	0,05	0,28	10,6	42,7
9-3	1/1	0,0612	0,63	5,1	21,7
9-4	1/0,38	0,056	0,81	4,75	20
9-5	1/1	0,0612	0,764	6,5	24
9-6	1/0,9	0,06	0,783	5,0	20,0
9-7	1/0,87	0,056	0,64	7,71	24,17

Таблица 2.
Результат спектральных характеристик стекла марки НС8 производственных варок в сравнении с требованиями ГОСТ9411-91

Варка	Fe^{2+}/Fe^{3+}	CoO	$a_{ср}$	$o_{ср}$	$o_{мах}$	Условия варки
ГОСТ	1/2[5]	0,0237[5]	0,27±0,06	≤10	≤15	-
8-1	1/2	0,02	0,17	9,4	35,3	Окислительные
8-2	1/2	0,05	0,28	9,3	38,2	Окислительные
8-3	0,8/1	0,02	0,292	5,8	21,5	Слабо – восстанов.
8-4	1/1	0,237	0,358	4,2	16,5	Слабо-восстанов.
8-5	1/1	0,02	0,214	7,3	26,3	Окислительные

ходя из полученных данных табл. 2. следует, что для достижения положительных результатов по спектральным характеристикам стекла марки НС8 необходимо соблюдать строгое соотношение Fe^{2+}/Fe^{3+}=1:1 и слабо-восстановительные условия варки.

Опыт получения оптических стекол марок НС показал, что достижение требуемого соотношения Fe2+/Fe3+ зависит от объема, навариваемого стекла, от количества введенного красителя и для каждой марки нейтральных стекол изменяется. В связи с чувствительностью стекол, окрашенных оксидами железа, к действию окислительно-восстановительных условий варки, в результате чего происходит смещение химического равновесия Fe2+↔Fe3+, корректируется от химического состава стекла и требуемых спектральных характеристик стекла марки НС.

Спрос на нейтральные марки стекол в последнее время увеличивается. И если буквально недавно превалировала минютиаризация светофильтров, то сейчас появился спрос на крупно-габаритные заготовки, из которых изготавливают светофильтры для космических объективов, позволяющие снимать Солнце и другие явления, значительно превышающие по яркости обычные объекты. В астрономии нейтральные фильтры входят в состав инструментов, предназначенных для изучения степени линейной и круговой поляризации света космических объектов, что являются основным способом получения информации о силе магнитного поля в областях генерации излучения. Эффект от нейтральных светофильтров не может быть воспроизведён в цифровом виде – по крайней мере, с помощью одного снимка, что очень актуально при явлениях возникающих в природе мгновенно.

Список литературы:

1. ГОСТ 9411-91 //Стекло оптическое цветное. Технические условия

2. *Л.Г. Могильная, О.Б. Зиновьева, Ю.Ф. Фирсова, М.Н. Гулюкин* //Цветное оптическое стекло, Оптический журнал, 2013, с.70-71.

3. *В.В. Варги*// Производство оптического стекла, Гизлегпром, 1940.

4. *А.Н. Даувальтер*//Хрустальные цветные и опаловые стекла, Гизленгром,1957.с.121.

ОСТ 3-4375-79// Стекло оптическое. Синтетический состав.

https://ru.wikipedia.org/wiki/Светофильтр

УДК 608.4

РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИЙ ВСЕПОГОДНОГО РАДИОПРОЗРАЧНОГО УКРЫТИЯ ИЗ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА

НОВИКОВ А.А., ПОДЛЕСНАЯ Г.В.

АО «Корпорация «Комета», г. Москва
3-я научная рота Космических войск Воздушно-космических сил РФ

E-mail: andreyn06@mail.ru

Аннотация: *В данной статье представлены результаты разработки радиопрозрачного укрытия из полимерного композиционного материала для наземных радиолокационных станций.*

Ключевые слова: полимерные композиционные материалы, радиопрозрачные укрытия, радиолокационные станции, стеклопластик, соты.

PROCESSING OF UNSTRUCTURED MEASUREMENTS OF KINEMATIC SYSTEMS

NOVIKOV A.A., PODLESNAYA G.V.

JSC» Corporation «Comet», Moscow

E-mail: andreyn06@mail.ru

Abstract: *This article presents the results of the development of a radio transparent cover from a polymer composite material for ground radar stations.*

Keywords: polymer composite materials, radio-transparent shelters, radar stations, fiberglass, honeycombs.

ВВЕДЕНИЕ

Радиолокационные станции – системы для обнаружения воздушных, морских и наземных объектов, а также для определения их дальности, скорости и геометрических параметров. При этом используется метод радиолокации, основанный на излучении радиоволн и регистрации их отражений от объектов. Подобные установки нуждаются в дополнительной защите [1] от внешнего климатического и механического воздействия, по этой причине используется радиопрозрачные укрытия (РПУ). Помимо указанных требований, очень важную роль играет способность РПУ пропускать сигнал, при этом не искажая и не отражая его[2].

Радиопрозрачность – важнейший параметр, характеризующий конструкцию РПУ. Способность сохранять заданную частоту определяет возможность выполнения радиопрозрачным укрытием поставленную задачу. Требуемую радиопрозрачность возможно обеспечить различными конструктивными и технологическими приемами. Определяющим фактором для обеспечения радиопрозрачности является выбор материала, самым актуальным на данный момент является стеклопластик. Так же возможно использование других материалов, таких как алюминий, но из-за ограниченного диапазона частот, на котором они не могут сохранять радиопрозрачность и вероятности экранирования, их применение ограниченно.

За время существования и развития РПУ появился ряд подходов к их проектированию. Одной из последних разработок по созданию РПУ занимались в ФГУП ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова (Патраков Ю.М.). В данной работе большое внимание было уделено расширению рабочих диапазонов частот радиоволн, но при этом не была учтена технологичность конструкции. Например, в умеренных широтах в зимнее время выпадает большое количество осадков[3], которые скапливаются на поверхности РПУ, которые могут повлиять на ее эффективность или сделать установку не радиопрозрачной. Эту проблему решают путем устранения осадков вручную, но подобное решение может привести к необратимым повреждениям защитной конструкции. В данной работе предполагается учесть эту проблему и предложить более технологичное решение с использованием полимерных композиционных материалов.

Конструктивно-компоновочная схема

Для проведения сравнительного анализа была рассмотрена конструкция с сотовым заполнителем из многослойного стеклопластика (рис. 1, рис. 2, рис. 3).

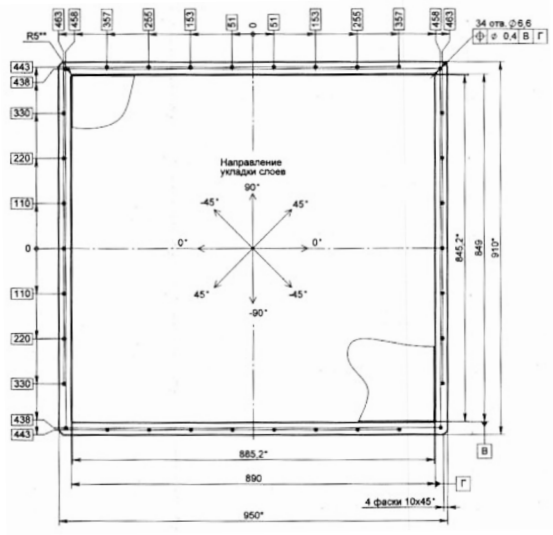


Рисунок 1.
Вид сверху РПУ

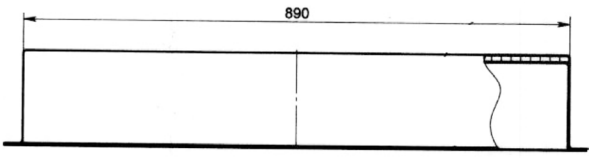


Рисунок 2.
Профиль РПУ

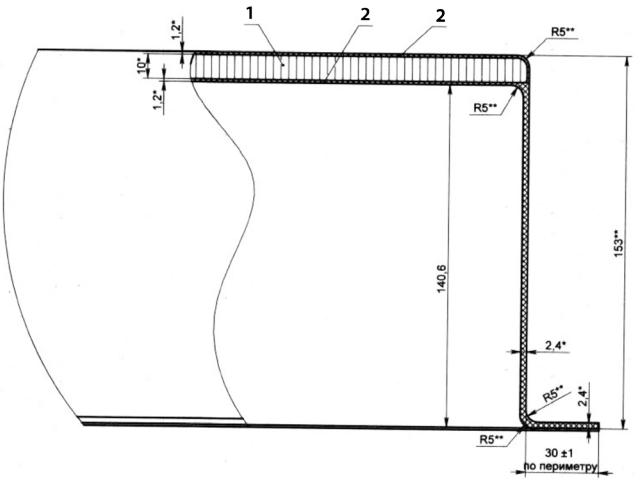


Рисунок 3.
Сечение РПУ

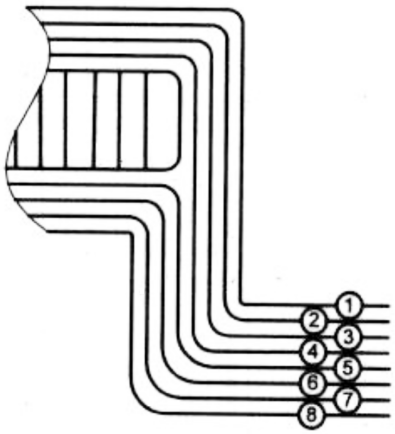


Рисунок 4.
Укладка слоев

Слои укладывались по следующей схеме (рис. 4).

Соответствующие углы укладки стеклоткани выбраны исходя из того что основные напряжения направлены под 90° и 45° указаны в таблице 1.

Исходя из этих данных, была построена 3D модель (рис. 5).

Таблица 1.
Схема укладки слоев

Номер слоя	Направление укладки
1	0°
2	45°
3	-45°
4	90°
5	-90°
6	-45°
7	45°
8	0°

При создании геометрической модели принято следующее допущение: так как толщина слоев очень мала, следовательно, вклад этих связей будет невелик, поэтому межслоевым взаимодействием можно пренебречь. Для упрощения расчета слои, которые распложены снизу и сверху сотового заполнителя, принимаем как изотропный материал.

Используя построенную модель, для упрощения расчетов рассекаем ее на ¼ часть (рис. 6).

После выполнения этих операций можно перейти к построению конечно-элементной модели.

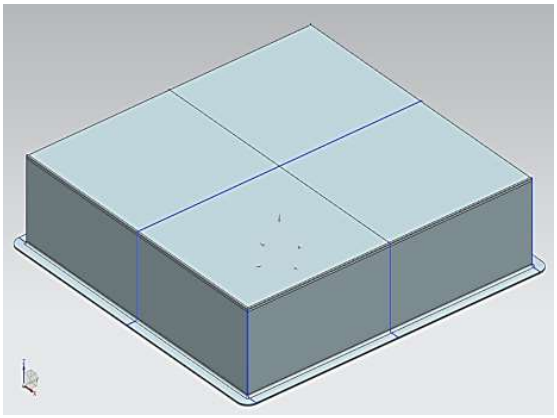


Рисунок 5.
Модель радиопрозрачного укрытия

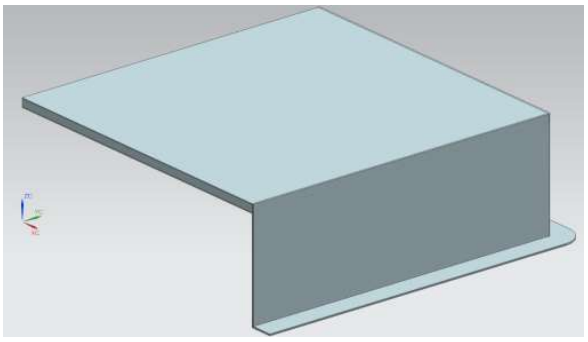


Рисунок 6.
Участок конечно-элементной модели

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

Сравнительные расчеты и создание сопутствующей документации происходили в CAD и CAE-системах.

Для создания чертежей и эскизной конструкторской документации (ЭКД) использовалась следующая CAD-система:

AutoDesk AutoCAD 2017.

Создания трёхмерных моделей конструктивно-компоновочных схем обеспечивалось CAD-системами на основе:

Autodesk Inventor 2017;

Для проведения конечно-элементного анализа использовались CAE-системы на основе программных пакетов:

Siemens NX PLM.

Для анализа прочностных характеристик сотового заполнителя использовалось следующее программное обеспечение (ПО):

e-Xstreme Digimat 6.0.

ВЫБОР КОНСТРУКТИВНО-КОМПОНОВОЧНЫЙ

Для проведения сравнительного анализа была выбраны арамидные и стеклянные соты. Для панелей выбран изотропный и ортотропный стеклопластик. Выбор окончательной ККС проводился по результатам конечно-элементного анализа [4] схем посредствам CAE-систем в пакете Siemens PLM Software [4] и Siemens NX Nastran [4].

Для проектного расчета были приняты следующие значения механических характеристик для изотропной стеклоткани [5]:

плотность – 2100 кг/м^3;

коэффициент теплопроводности – 0,3 Вт/(м·С);

удельная теплоемкость – 840 Дж/(кг·К);

модуль Юнга – 40000 МПа;

модуль сдвига – 15000 МПа

коэффициент Пуассона – 0,3.

Для проектного расчета были приняты следующие значения механических характеристик для ортотропной стеклоткани [11]:

коэффициент Пуассона – 0,3.

Таблица 2. Модули Юнга сотового заполнителя

Направление	Модуль Юнга, МПа
x	40000
y	40000
z	9000

Таблица 3. Модули сдвига сотового заполнителя

Направление	Модуль сдвига, МПа
xy	15000
xz	7000
yz	7000

Для сотового заполнителя из арамида:

Таблица 4. Модули Юнга сотового заполнителя

Направление	Модуль Юнга, МПа
x	38400
y	5380
z	5380

Таблица 5. Модули сдвига сотового заполнителя

Направление	Модуль сдвига, МПа
xy	7058
xz	7058
yz	1566

Таблица 6. Коэффициенты Пуассона сотового заполнителя

Направление	коэффициент Пуассона
xy	0,0504
xz	0,719
yz	0,0504

Для сотового заполнителя из стекла:

Таблица 7. Модули Юнга сотового заполнителя

Направление	Модуль Юнга, МПа
x	16000
y	2256
z	2256

Таблица 8. Модули сдвига сотового заполнителя

Направление	Модуль сдвига, МПа
xy	3076
xz	3076
yz	657

Таблица 9. Ккоэффициенты Пуассона сотового заполнителя

Направление	коэффициент Пуассона
xy	0,042
xz	0,7117
yz	0,042

СТАТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ

Для определения статических характеристик была построена следующая конечно-элементная модель (рис. 7).

Для определения напряженно-деформированного состояния конструкции с сотовым заполнителем применялся конечно-элементный анализ в рамках пакета Siemens NX Nastran с действующей нагрузкой 1000 Н. Кроме того, заданы соответствующие ограничения на плоскости сечения (рис. 8).

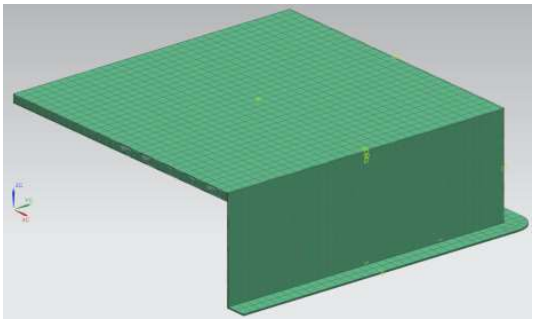


Рисунок 7.
Конечно-элементная модель РПУ

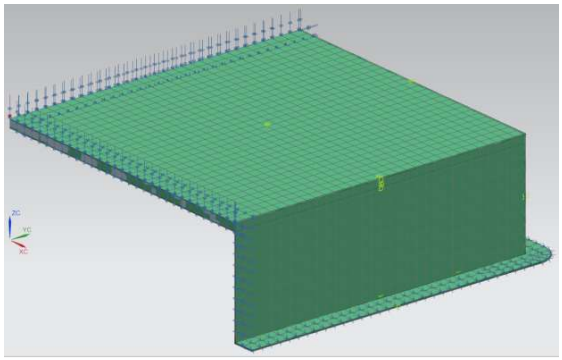


Рисунок 8.
Схема нагрузок модели РПУ

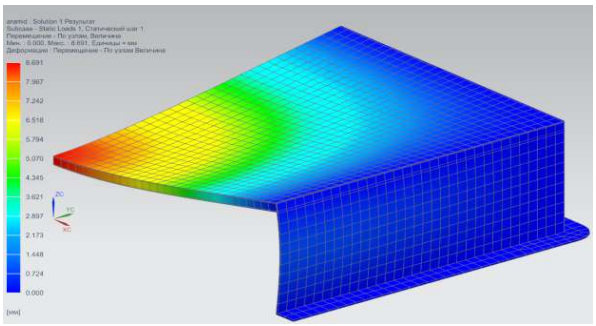


Рисунок 9.
Деформации ортотропный стеклопластик-стеклопластиковые соты

Для сравнительного анализа были использованы различные материалы для сот и панели. Результаты расчетов представлены на рис. 9 – рис. 16.

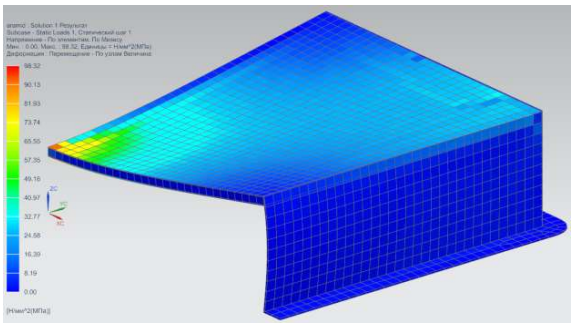


Рисунок 10.
Напряжения ортотропный стеклопластик-стеклопластиковые соты

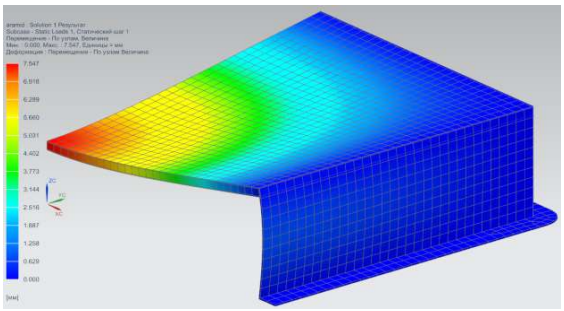


Рисунок 11.
Деформации ортотропный стеклопластик-арамидные соты

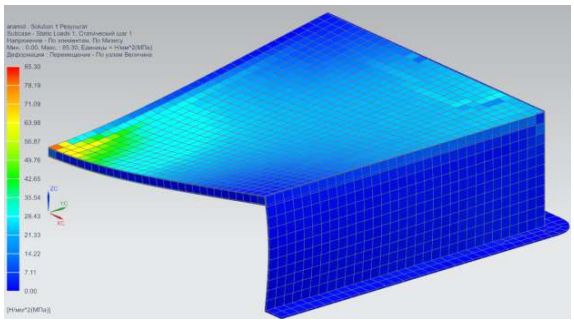


Рисунок 12.
Напряжения ортотропный стеклопластик-арамидные соты

По результатам расчетов наименьшую деформацию имеет панель с изотропным стеклопластиком и арамидным сотовым заполнителем 7,29 мм.

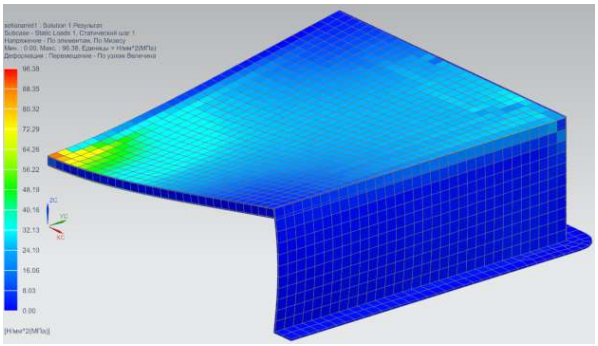


Рисунок 14.
Напряжения изотропный стеклопластик-арамидные соты

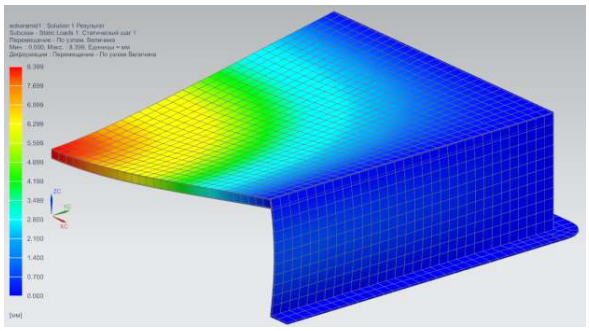


Рисунок 15.
Деформация изотропный стеклопластик-стеклопластиковые соты

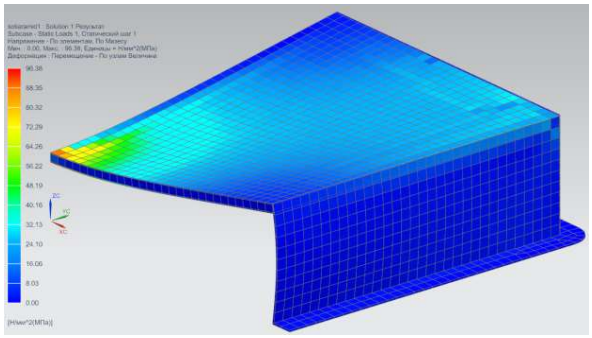


Рисунок 16.
Напряжения изотропный стеклопластик-стеклопластиковые соты

ВЫВОД

Прогресс в области усовершенствования защиты радиолокационных станций наземного базирования в значительной мере определяется улучшением радиопрозрачных укрытий из стеклопластика.

Выполнено сравнительное исследование вариантов четырех конструктивно-компоновочных схем с различным сочетанием материалов. Установлено, что схема с арамидным сотовым заполнителем и панелями из изотропного стеклопластика показывает наименьший уровень деформаций 7,299 мм при нагрузке в 1000 Н.

Список литературы:

1. Гуртовник, И.Г. Стеклопластики радиотехнического назначения / И.Г. Гуртовник, В.Н. Спорстемен. – М.: Химия, 1987. – 160 с.

2. Шалгунов, С.И. Особенности проектирования и разработки радиопрозрачных обтекателей и укрытий, работающих в сантиметровом и миллиметровом диапазонах радиоволн / С.И. Шалгунов, А.Н. Трофимов, В.И. Соколов, И.В. Морозова, Ю.С. Прохоров // Новости материаловедения. Наука и техника. – 2014. – №3 – С. 63-68.

3. Практическое использование NX [Электронный ресурс] / Siemens. – 2014. – Режим доступа: http://media.plm.automation.siemens.com/ru_ru/nx/book/Prakticheskoe_Ispolzovanie_NX_book.pdf

4. Боровков А.И. Компьютерный инжиниринг. Аналитический обзор – учебное пособие / А.И. Боровков. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та. – 2012. – 93 с.

5. Батаев А.А. Композиционные материалы: строение, получение, применение: учебник / А.А. Батаев, В.А. Батаев. - Новосибирск: Изд. НГТУ, 2002. - 384 с.